(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
21. November 2019 (21.11.2019)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2019/219795 A1

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

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2019/062575

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. Mai 2019 (16.05.2019)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2018 207 921.8
18. Mai 2018 (18.05.2018) DE
10 2018 214 946.1
03. September 2018 (03.09.2018) DE

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

(72) Erfinder: **ALLMENDINGER, Felix**; Stadtjägerstr. 16a, 86152 Augsburg (DE). **MUNOZ OSORIO, Juan, David**; Pilgerhausstr. 34, 86152 Augsburg (DE). **FIORE, Mario, Daniele**; Frauentorstr. 35, 86152 Augsburg (DE).

(74) Anwalt: **OELKE, Jochen**; 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).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:
— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:
— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

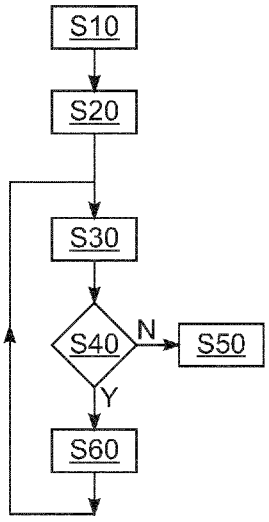
(54) **Title:** CONTROLLING A ROBOT

(54) **Bezeichnung:** STEUERN EINES ROBOTERS

(57) **Abstract:** In a method according to the invention for controlling a robot (1), the robot is pliably force-controlled (S50), wherein setpoint drive forces are determined (S10, S30) on the basis of a limitation of a pose, speed and/or acceleration of at least one robot-fixed reference, which limitation is predefined in a Cartesian workspace of the robot, and/or a predefined limitation of axial positions, speeds and/or accelerations as well as a predefined task in such a way that adherence to the limitation is given priority over the performance of the task.

(57) **Zusammenfassung:** Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Steuern eines Roboters (1) wird der Roboter nachgiebig kraftgeregelt (S50), wobei Soll-Antriebskräfte auf Basis sowohl einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz und/oder einer vorgegebenen Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart ermittelt werden (S10, S30), dass die Einhaltung der Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

Fig. 2



WO 2019/219795 A1

Beschreibung

Steuern eines Roboters

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Steuerung zum Steuern eines Roboters sowie ein Computerprogrammprodukt zur Durchführung des Verfahrens.

Roboter sollen regelmäßig vorgegebene Aufgaben durchführen, beispielsweise mit ihrem Endeffektor bzw. TCP eine vorgegeben Position anfahren oder dergleichen.

In dem Artikel O. Khatib, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation", (IEEE Journal of Robotics and AutomationVol. RA-3, No. 1, Februar 1987, ISSN 0882-4967, S. 43-53) wird hierzu eine sogenannte Aufgabenraumregelung ("Operational Space Control") vorgeschlagen, bei der eine virtuelle Kraft zur Durchführung der Aufgabe ermittelt und mithilfe einer Aufgaben-Jacobimatrix auf Soll-Antriebskräfte im Achsraum des Roboters transformiert wird.

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

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Ansprüche 11, 12 stellen eine Steuerung bzw. ein Computerprogrammprodukt zur Durchführung eines hier beschriebenen Verfahrens unter Schutz. Die Unteransprüche betreffen vorteilhafte Weiterbildungen.

Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung wird ein Roboter nachgiebig („compliant") kraftgeregelt, in einer Ausführung derart, dass er externen, insbesondere manuell bzw. durch einen Bediener auf ihn aufgeprägten, Kräften ausweicht und in einer Weiterbildung dabei gegen diese Kräfte wirkende Rückstellkräfte auf seine Umgebung, insbesondere eine ihn führende Hand oder dergleichen, ausübt. In einer Ausführung wird der Roboter admittanzgeregelt. Hierdurch kann eine besonders vorteilhafte nachgiebige Kraftregelung realisiert werden.

Bei der Kraftregelung werden nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung Soll-Antriebskräfte auf Basis bzw. in Abhängigkeit von

- einer, insbesondere vorab, vorgegebenen, insbesondere programmierten und/oder durch eine Benutzereingabe einstellbaren, Begrenzung von Achsstellungen, Achsgeschwindigkeiten und/oder Achsbeschleunigungen, als auch
- einer vorgegebenen, insbesondere vorab programmierten bzw. gespeicherten, Aufgabe

derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt, dass die Einhaltung dieser (Achs)Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird, insbesondere derart, dass die Aufgabe nur insoweit bzw. bis zu dem Grad durchgeführt wird, soweit bzw. bis zu dem dies die Einhaltung der Begrenzung zulässt bzw. diese nicht beeinträchtigt. So wird in einer Ausführung eine Soll-Antriebskraft zur Durchführung der Aufgabe nur soweit kommandiert, soweit sie einer Soll-Antriebskraft zur Einhaltung der Begrenzung nicht zuwiderläuft bzw. dieser entgegenwirkt. Insbesondere werden in einem Zustand, in dem die Durchführung der Aufgabe wenigstens eine erste Soll-Antriebskraft einer ersten Achse und eine zweite Soll-Antriebskraft einer zweiten Achse erfordert bzw. bedingt, beispielsweise, um eine vorgegebene Pose anzufahren oder dergleichen, und die Einhaltung der Begrenzung eine zu der ersten Soll-Antriebskraft der ersten Achse gegensinnige Soll-Antriebskraft und keine bestimmte Soll-Antriebskraft der zweiten Achse erfordert bzw. bedingt, da beispielsweise die erste Achse sich in der Nähe ihrer Begrenzung befindet, die zweite Achse hingegen nicht, die gegensinnige Soll-Antriebskraft zur Einhaltung der Begrenzung und die zweite Soll-Antriebskraft zur Durchführung der Aufgabe kommandiert.

Zusätzlich oder alternativ werden nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung bei der Kraftregelung (die) Soll-Antriebskräfte auf Basis bzw. in Abhängigkeit von

- einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz, als auch
- einer bzw. der vorgegebenen, insbesondere vorab programmierten bzw. gespeicherten, Aufgabe

derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt, dass die Einhaltung dieser Begrenzung (der Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der roboterfesten Referenz im kartesischen Arbeitsraum) gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird,

insbesondere derart, dass die Aufgabe nur insoweit bzw. bis zu dem Grad durchgeführt wird, soweit bzw. bis zu dem dies die Einhaltung dieser Begrenzung zulässt bzw. diese nicht beeinträchtigt. So wird in einer Ausführung eine Soll-Antriebskraft zur Durchführung der Aufgabe nur soweit kommandiert, soweit sie einer Soll-Antriebskraft zur Einhaltung dieser Begrenzung nicht zuwiderläuft bzw. dieser entgegenwirkt. Insbesondere werden in einem Zustand, in dem die Durchführung der Aufgabe wenigstens eine erste Soll-Antriebskraft einer ersten Achse und eine zweite Soll-Antriebskraft einer zweiten Achse erfordert bzw. bedingt, beispielsweise, um eine vorgegebene Pose anzufahren oder dergleichen, und die Einhaltung dieser Begrenzung eine zu der ersten Soll-Antriebskraft der ersten Achse gegensinnige Soll-Antriebskraft und keine bestimmte Soll-Antriebskraft der zweiten Achse erfordert bzw. bedingt, da beispielsweise eine Verstellung der ersten Achse die roboterfesten Referenz zu ihrer Begrenzung führt, eine Verstellung der zweiten Achse hingegen nicht, die gegensinnige Soll-Antriebskraft zur Einhaltung der Begrenzung und die zweite Soll-Antriebskraft zur Durchführung der Aufgabe kommandiert.

Somit wird in einer Ausführung der Roboter zur bzw. bei der Durchführung der vorgegebenen Aufgabe nachgiebig kraftgeregelt. Hierdurch kann er in einer Ausführung vorteilhaft beim Durchführen der Aufgabe durch einen Bediener (weg)geführt bzw. abgelenkt oder aufgehalten werden. Dadurch kann der Betrieb des Roboters verbessert werden.

Dabei kann es jedoch vorkommen, dass durch das Handführen ungewollt eine hard- oder softwaretechnisch implementierte Achsstellungs-, -geschwindigkeits- oder –beschleunigungsbegrenzung oder eine hard- oder softwaretechnisch implementierte Posen-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsbegrenzung einer roboterfesten Referenz in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters erreicht wird, beispielsweise eine seiner Achsen, sein Endeffektor oder Ellbogen eine Grenze eines zulässigen Bereichs oder eine zulässige Geschwindigkeit erreicht, was üblicherweise zu einer abrupten, ungewollten und/oder unerwarteten Reaktion des Roboters führen kann.

Indem erfindungsgemäß die Soll-Antriebskräfte (auch) derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt werden, dass eine vorgegebene Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen und/oder eine in

einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz eingehalten wird, kann in einer Ausführung einer Annäherung an die Begrenzung(en) beim Durchführen der Aufgabe aufgrund einer Handführung des nachgiebigen Roboters kraftgeregelt entgegengewirkt werden. Durch die Priorisierung dieser Einhaltung der Begrenzung(en) gegenüber der Durchführung der Aufgabe kann dabei in einer Ausführung eine abrupte Verhaltensänderung des Roboters vorteilhaft vermieden werden.

In einer Ausführung werden die Soll-Antriebskräfte derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt, dass

- die Einhaltung der Begrenzung der Achsstellungen und Achsgeschwindigkeiten und/oder
- die Einhaltung der Begrenzung der Achsstellungen und Achsbeschleunigungen und/oder
- die Einhaltung der Begrenzung der Achsgeschwindigkeiten und Achsbeschleunigungen

gleich priorisiert wird. Durch diese gleiche Priorisierung der Einhaltung der Begrenzung auf Achsstellungs-, -geschwindigkeits- oder –beschleunigungsebene kann dabei in einer Ausführung eine abrupte Verhaltensänderung des Roboters vorteilhaft vermieden werden.

Zusätzlich oder alternativ werden in einer Ausführung die Soll-Antriebskräfte derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt, dass

- die Einhaltung der Begrenzung der Pose und Geschwindigkeit der roboterfesten Referenz und/oder
- die Einhaltung der Begrenzung der Pose und Beschleunigung der roboterfesten Referenz und/oder
- die Einhaltung der Begrenzung der Geschwindigkeit und Beschleunigung der roboterfesten Referenz

gleich priorisiert wird. Durch diese gleiche Priorisierung der Einhaltung der Begrenzung auf Posen-, Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsebene kann dabei in einer Ausführung eine abrupte Verhaltensänderung des Roboters vorteilhaft vermieden werden.

Sofern sowohl eine Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen als auch in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters eine Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz vorgegeben ist bzw. wird, wird in einer Ausführung die eine dieser beiden Begrenzungen ihrerseits gegenüber der anderen dieser beiden Begrenzungen priorisiert.

In einer Ausführung wird somit eine Begrenzung von Achsstellungen, Achsgeschwindigkeiten und/oder Achsbeschleunigungen gegenüber einer im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz priorisiert oder umgekehrt eine im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebene Begrenzung einer Pose Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz gegenüber einer Begrenzung von Achsstellungen, Achsgeschwindigkeiten und/oder Achsbeschleunigungen priorisiert, in einer Ausführung in gleicher Weise wie die niedriger priorisierte dieser beiden Begrenzungen ihrerseits gegenüber der Durchführung der Aufgabe, insbesondere mehrstufig. Hierdurch können in einer Ausführung roboter- und umgebungsbedingte Begrenzungen vorteilhaft gemeinsam eingehalten und dabei abrupte Verhaltensänderungen des Roboters vorteilhaft vermieden werden.

Allgemein kann in einer Ausführung auch nur eine Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz im kartesischen Arbeitsraum des Roboters oder auch nur eine Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen vorgegeben sein, insbesondere werden.

In einer Ausführung weist die vorgegebene Aufgabe wenigstens eine erste und eine zweite Teilaufgabe auf, wobei die Soll-Antriebskräfte derart bzw. mit der Maßgabe ermittelt werden, dass die Durchführung der ersten Teilaufgabe (ihrerseits) gegenüber der Durchführung der zweiten Teilaufgabe priorisiert wird, insbesondere die Durchführung der zweiten Teilaufgabe (ihrerseits) gegenüber der Durchführung einer oder mehrerer weiteren Teilaufgaben priorisiert wird, welche in einer Ausführung (ihrerseits) untereinander priorisiert sein bzw. werden können.

Zusätzlich oder alternativ kann die Aufgabe, insbesondere eine oder mehrere ihrer Teilaufgaben (jeweils), ein Anfahren einer oder mehreren vorgegebenen, insbesondere programmierten bzw. abgespeicherten, Posen, insbesondere ein Abfahren einer vorgegebenen Bahn, ein Halten einer vorgegebenen Pose und/oder ein Beabstanden von einer oder mehreren vorgegebenen, insbesondere singulären, Posen, im Arbeits- und/oder Achsraum des Roboters aufweisen, insbesondere hieraus bestehen.

Hierdurch kann in einer Ausführung der Roboter besonders vorteilhaft eingesetzt werden. So kann der Roboter in einer Ausführung höherprior(isiert) eine vorgegebene Pose an- bzw. Bahn abfahren und dabei nieder- oder höherprior(isiert) singuläre Posen vermeiden.

In einer Ausführung werden die Soll-Antriebskräfte auf Basis eines dynamischen Modells des Roboters ermittelt, das in einer Ausführung Achsstellungen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen sowie Achs-, insbesondere Antriebskräfte aufeinander abbildet, in einer Ausführung in der Form

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{c}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})=\boldsymbol{\tau} \qquad (1)$$

mit den Achsstellungen $\boldsymbol{q}$, Achsgeschwindigkeiten $\dot{\boldsymbol{q}}$, Achsbeschleunigungen $\ddot{\boldsymbol{q}}$, der generalisierten Massenmatrix $\boldsymbol{M}$, den stellungs- und geschwindigkeitsabhängigen Kräften $\boldsymbol{c}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$, insbesondere Coriolis- und Zentrifugalkräften, den (nur) stellungsabhängigen Kräften $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q})$, insbesondere Gravitationskräften, und den Achs-, insbesondere Antriebskräften $\boldsymbol{\tau}$.

Hierdurch kann in einer Ausführung das Verhalten des Roboters, insbesondere seine Trägheiten und dergleichen, berücksichtigt und dadurch der Betrieb verbessert werden.

In einer Ausführung werden die Soll-Antriebskräfte

- auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der Begrenzung der Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen und/oder

- auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der Begrenzung und/oder
- auf Basis virtueller Aufgabenkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Durchführung der Aufgabe, insbesondere der Teilaufgaben,

ermittelt.

Nach dem eingangs genannten Artikel “A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation”, auf den ergänzend Bezug genommen und dessen Inhalt vollumfänglich in die vorliegende Offenbarung einbezogen wird, können im Achs- oder Arbeitsraum des Roboters, insbesondere einem Unterraum hiervon, auf Basis einer (Teil)Aufgabe virtuelle Aufgabenkräfte („operational forces“) $\boldsymbol{f}_t$ ermittelt werden, in einer Ausführung in der Form

$$\boldsymbol{\Lambda}_t(\boldsymbol{x}_t)\ddot{\boldsymbol{x}}_t + \boldsymbol{\mu}_t(\boldsymbol{x}_t, \dot{\boldsymbol{x}}_t) + \boldsymbol{p}_t(\boldsymbol{x}_t) = \boldsymbol{f}_t \qquad (2)$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{x}}_t &= \boldsymbol{J}_t\dot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{\Lambda}_t &= \left(\boldsymbol{J}_t\boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_t^T\right)^{-1} \\ \bar{\boldsymbol{J}}_t &= \boldsymbol{M}^{-1}\boldsymbol{J}_t^T\boldsymbol{\Lambda}_t \\ \boldsymbol{\mu}_t &= \bar{\boldsymbol{J}}_t^T\boldsymbol{c} - \boldsymbol{\Lambda}_t\dot{\boldsymbol{J}}_t\dot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{p}_t &= \bar{\boldsymbol{J}}_t^T\boldsymbol{g} \end{aligned} \qquad (3)$$

mit der Aufgaben-Jacobimatrix $\boldsymbol{J}_t$. Der Kommandovektor $\boldsymbol{f}^*$ entspricht einer gewünschten Beschleunigung $\ddot{\boldsymbol{x}}_t$ der Aufgabe, der Kommandovektor $\boldsymbol{f}^*_{pos} = k_p\left(\boldsymbol{x}_{E,d} - \boldsymbol{x}_E\right) + k_d\left(\dot{\boldsymbol{x}}_{E,d} - \dot{\boldsymbol{x}}_E\right)$ einer gewünschten Feder-Dämpfer-Charakteristik der kartesischen Endeffektorposition

Die Achsstellungs- und –geschwindigkeitsbegrenzungen können in einer Ausführung vorteilhaft, insbesondere mit der vorgegebenen Begrenzung der Achsstellungen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen

$$
\begin{aligned}
Q_{\min,i} < q_i < Q_{\max,i} \\
V_{\min,i} < \dot{q}_i < V_{\max,i} \\
A_{\min,i} < \ddot{q}_i < A_{\max,i}
\end{aligned}
\qquad (4)
$$

und einem Zeit-, insbesondere Abtast- bzw. Regelinkrement T, einheitlich auf Beschleunigungsebene formuliert werden, insbesondere in der Form:

$$
\begin{aligned}
\ddot{Q}_{\max,i} &= \min\left(2\frac{Q_{\max,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{V_{\max,i} - q}{T}, A_{\max,i}\right) \\
\ddot{Q}_{\min,i} &= \max\left(2\frac{Q_{\min,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{V_{\min,i} - q}{T}, A_{\min,i}\right)
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

wobei die vorgegebene Begrenzung von Achsstellungen und -geschwindigkeiten die vorgegebene Begrenzung von Achsbeschleunigungen limitiert, oder in einer Weiterbildung, in der zusätzlich die vorgegebene Begrenzung von Achsstellungen und -beschleunigungen die vorgegebene Begrenzung von Achsgeschwindigkeiten limitiert,

$$
\begin{aligned}
\dot{Q}_{\max,i} &= \min\left(V_{\max,i}, -\sqrt{2A_{\max,i}\left(q_i - Q_{\min,i}\right)}\right) \\
\dot{Q}_{\min,i} &= \max\left(V_{\min,i}, \sqrt{2A_{\max,i}\left(Q_{\min,i} - q_i\right)}\right) \\
\ddot{Q}_{\max,i} &= \min\left(2\frac{Q_{\max,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{\dot{Q}_{\max,i} - q}{T}, A_{\max,i}\right) \\
\ddot{Q}_{\min,i} &= \max\left(2\frac{Q_{\min,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{\dot{Q}_{\min,i} - q}{T}, A_{\min,i}\right)
\end{aligned}
\qquad (5')
$$

Die Posen- und Geschwindigkeitsbegrenzung der roboterfesten Referenz kann in einer Ausführung vorteilhaft, insbesondere mit der vorgegebenen Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung der roboterfesten Referenz

$$
\begin{aligned}
X_{\min,i} < X_i < X_{\max,i} \\
V_{\min,i} < \dot{X}_i < V_{\max,i} \\
A_{\min,i} < \ddot{X}_i < A_{\max,i}
\end{aligned}
\qquad (104)
$$

und einem bzw. dem Zeit-, insbesondere Abtast- bzw. Regelinkrement T, einheitlich auf Beschleunigungsebene formuliert werden, insbesondere in der Form:

$$\ddot{X}_{\max,i} = \min\left(2\frac{X_{\max,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{V_{\max,i} - X_i}{T}, A_{\max,i}\right)$$
$$\ddot{X}_{\min,i} = \max\left(2\frac{X_{\min,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{V_{\min,i} - X_i}{T}, A_{\min,i}\right) \quad (105)$$

wobei die vorgegebene Begrenzung der Pose und Geschwindigkeit die vorgegebene Begrenzung der Beschleunigung der roboterfesten Referenz limitiert, oder in einer Weiterbildung, in der zusätzlich die vorgegebene Begrenzung der Pose und Beschleunigung die vorgegebene Begrenzung der Geschwindigkeit der roboterfesten Referenz limitiert,

$$\dot{X}_{\max,i} = \min\left(V_{\max,i}, -\sqrt{2A_{\max,i}\left(X_i - X_{\min,i}\right)}\right)$$
$$\dot{X}_{\min,i} = \max\left(V_{\min,i}, \sqrt{2A_{\max,i}\left(X_{\min,i} - X_i\right)}\right)$$
$$\ddot{X}_{\max,i} = \min\left(2\frac{X_{\max,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{\dot{X}_{\max,i} - X_i}{T}, A_{\max,i}\right) \quad (105')$$
$$\ddot{X}_{\min,i} = \max\left(2\frac{X_{\min,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{\dot{X}_{\min,i} - X_i}{T}, A_{\min,i}\right)$$

Dabei bezeichnet $\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} X_1 & \dots & X_6 \end{bmatrix}^T$ die (aktuelle) Pose der roboterfesten Referenz, wobei beispielsweise $\begin{bmatrix} X_1 & \dots & X_3 \end{bmatrix}^T$ ihre Position, zum Beispiel in kartesischen Koordinaten x, y, z, und $\begin{bmatrix} X_4 & \dots & X_6 \end{bmatrix}^T$ ihre Orientierung, zum Beispiel in Euler- oder Kardanwinkeln oder dergleichen, definieren kann.

Hierdurch ergibt sich in einer Ausführung (jeweils) ein vorteilhaftes Verhalten des Roboters, insbesondere bei Annäherung an die Begrenzung.

In einer Ausführung werden die virtuellen Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}_{\text{lim}}^*$ bzw. die Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ iterativ ermittelt, wobei in einer Ausführung initial

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{0} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}_{sat} &= \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{N}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{1} \end{aligned} \qquad (6)$$

gesetzt, dann

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_d &= \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} + \boldsymbol{N}_{\text{lim}} \boldsymbol{\tau}_t \\ \ddot{\boldsymbol{q}} &= \boldsymbol{M}^{-1} \left(\boldsymbol{\tau}_d - \boldsymbol{g} - \boldsymbol{c} \right) \end{aligned} \qquad (7)$$

ermittelt und mit

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i > \ddot{Q}_{\max,i} &\Rightarrow \ddot{q}_{sat,i} = \ddot{Q}_{\max,i} \\ \ddot{q}_i < \ddot{Q}_{\min,i} &\Rightarrow \ddot{q}_{sat,i} = \ddot{Q}_{\min,i} \end{aligned} \qquad (8)$$

die neuen virtuellen Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}^*_{\text{lim}}$ bzw. diesen entsprechende Anteile $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$ der Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ gemäß

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}^*_{\text{lim}} &= \ddot{\boldsymbol{q}}_{sat} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{J}^T_{\text{lim}} \left(\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}} \boldsymbol{f}^*_{\text{lim}} + \boldsymbol{p}_{\text{lim}} + \boldsymbol{\mu}_{\text{lim}} \right) \\ \boldsymbol{N}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{1} - \boldsymbol{J}^T_{\text{lim}} \overline{\boldsymbol{J}}^T_{\text{lim}} \end{aligned} \qquad (9)$$

ermittelt und in Gl. (7) eigesetzt werden, solange wenigstens eine der virtuellen Achsbeschleunigungen $\ddot{q}_i$ eine der Bedingungen in (8) erfüllt. Dabei enthält die Jacobi-Matrix der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen $\boldsymbol{J}_{\text{lim}}$ für jede Achse, deren virtuelle Beschleunigung gemäß Gl. (7) eine der Bedingungen in (8) erfüllt, eine Zeile, die in der (der Achse) entsprechenden Reihe eine Eins und ansonsten Nullen aufweist, also beispielsweise

für (nur) $\ddot{q}_2 > \ddot{Q}_{\max,2} \Rightarrow \boldsymbol{J}_{\text{lim}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$,

für (nur) $\ddot{q}_2 > \ddot{Q}_{\max,2}, \ddot{q}_3 > \ddot{Q}_{\max,3} \Rightarrow \boldsymbol{J}_{\text{lim}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$ etc.

Die Massenmatrix $\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}}$ und die Vektoren $\boldsymbol{p}_{\text{lim}}$, $\boldsymbol{\mu}_{\text{lim}}$, werden damit gemäß Gl. (3) ermittelt.

Falls bzw. sobald keine der virtuellen Achsbeschleunigungen $\ddot{q}_i$ eine der Bedingungen in (8) (mehr) erfüllt, werden in einer Ausführung die Soll-Antriebskräfte gemäß Gl. (7) kommandiert.

In einer Ausführung werden die virtuellen Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}_{\text{lim}}^*$ bzw. die Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ iterativ ermittelt, wobei in einer Ausführung initial

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{0} \\ \ddot{\boldsymbol{X}}_{sat} &= \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{N}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{1} \end{aligned} \qquad (106)$$

gesetzt, dann

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_d &= \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} + \boldsymbol{N}_{\text{lim}} \boldsymbol{\tau}_t \\ \ddot{\boldsymbol{q}} &= \boldsymbol{M}^{-1}\left(\boldsymbol{\tau}_d - \boldsymbol{g} - \boldsymbol{c}\right) \\ \dot{\boldsymbol{q}}_{t+T} &= \dot{\boldsymbol{q}} + \ddot{\boldsymbol{q}} T \\ \dot{\boldsymbol{X}}_{t+T} &= \boldsymbol{J}_{\text{lim}} \dot{\boldsymbol{q}}_{t+T} \\ \ddot{\boldsymbol{X}} &= \frac{\dot{\boldsymbol{X}}_{t+T} - \dot{\boldsymbol{X}}}{T} \end{aligned} \qquad (107)$$

mit den aktuellen Achsstellungen $\boldsymbol{q}$, Achsgeschwindigkeiten $\dot{\boldsymbol{q}}$ und der aktuellen Pose $\boldsymbol{X}$ der roboterfesten Referenz zum (aktuellen) Zeitpunkt t ermittelt und mit

$$\begin{aligned} \ddot{X}_i > \ddot{X}_{\max,i} &\Rightarrow \ddot{X}_{sat,i} = \ddot{X}_{\max,i} \\ \ddot{X}_i < \ddot{X}_{\min,i} &\Rightarrow \ddot{X}_{sat,i} = \ddot{X}_{\min,i} \end{aligned} \qquad (108)$$

die neuen virtuellen Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}_{\text{lim}}^*$ bzw. diesen entsprechende Anteile $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$ der Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ gemäß

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}_{\text{lim}}^{*} &= \ddot{\boldsymbol{X}}_{sat} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{J}_{\text{lim}}^{T}\left(\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}}\boldsymbol{f}_{\text{lim}}^{*} + \boldsymbol{p}_{\text{lim}} + \boldsymbol{\mu}_{\text{lim}}\right) \\ \boldsymbol{N}_{\text{lim}} &= \boldsymbol{1} - \boldsymbol{J}_{\text{lim}}^{T}\overline{\boldsymbol{J}}_{\text{lim}}^{T} \end{aligned} \qquad (109)$$

ermittelt und in Gl. (107) eingesetzt werden, solange wenigstens eine der virtuellen Beschleunigungen $\ddot{X}_i$ eine der Bedingungen in (108) erfüllt.

Dabei ergibt sich die Jacobi-Matrix der Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz im kartesischen Arbeitsraum des Roboters $\boldsymbol{J}_{\text{lim}}$ aus der Jacobi-Matrix der roboterfesten Referenz

$$\boldsymbol{J}_X = \frac{\partial \dot{\boldsymbol{X}}}{\partial \underbrace{\left[\dot{q}_1 \quad \ldots \quad \dot{q}_f\right]^T}_{\dot{\boldsymbol{q}}}} = \begin{bmatrix} j_{1,1} & j_{1,2} & \cdots & j_{1,f} \\ j_{2,1} & j_{2,2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ j_{6,1} & \cdots & \cdots & j_{6,f} \end{bmatrix}$$

durch Streichen der Zeilen, in denen keine Begrenzung vorgegeben bzw. wirksam ist, also beispielsweise bei einer Begrenzung nur in y-Richtung des kartesischen Arbeitsraums des Roboters, da beispielsweise in dieser Richtung ein Hindernis liegt

$$\boldsymbol{J}_{\text{lim}} = \begin{bmatrix} j_{2,1} & \cdots & j_{2,f} \end{bmatrix}$$

oder, wenn beispielsweise auch eine Begrenzung in z-Richtung vorliegt

$$\boldsymbol{J}_{\text{lim}} = \begin{bmatrix} j_{2,1} & \cdots & j_{2,f} \\ j_{3,1} & \cdots & j_{2,f} \end{bmatrix}$$

Die Massenmatrix $\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}}$ und die Vektoren $\boldsymbol{p}_{\text{lim}}$, $\boldsymbol{\mu}_{\text{lim}}$, werden damit gemäß Gl. (3) ermittelt.

Falls bzw. sobald keine der virtuellen Beschleunigungen $\ddot{X}_i$ eine der Bedingungen in (108) (mehr) erfüllt, werden in einer Ausführung die Soll-Antriebskräfte gemäß Gl. (107) kommandiert.

Wie vorstehend anhand einer besonders bevorzugten Ausführung erläutert, werden allgemein in einer Ausführung Soll-Antriebskräfte, insbesondere Soll-Antriebskräfte zur Einhaltung der Begrenzung(en), iterativ ermittelt.

Zusätzlich oder alternativ werden allgemein, wie vorstehend anhand einer besonders bevorzugten Ausführung erläutert, in einer Ausführung Soll-Antriebskräfte zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen auf Basis virtueller Achsbeschleunigungen des Roboters ermittelt und in einer Weiterbildung nur bei einem, insbesondere prognostizierten, Erreichen der Begrenzung kommandiert (vgl. insbesondere die Prognose der Achsstellung bzw. –geschwindigkeit in Gl. (5), (5‘):

$$\dot{\boldsymbol{q}}(t+T) \cong \dot{\boldsymbol{q}}(t) + \ddot{\boldsymbol{q}}(t)T; \quad \boldsymbol{q}(t+T) \cong \boldsymbol{q}(t) + \dot{\boldsymbol{q}}(t)T + \frac{1}{2}\ddot{\boldsymbol{q}}(t)T^2 .$$

Zusätzlich oder alternativ werden allgemein, wie vorstehend anhand einer besonders bevorzugten Ausführung erläutert, in einer Ausführung Soll-Antriebskräfte zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz auf Basis virtueller Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der roboterfesten Referenz, die ihrerseits auf Basis virtueller Achsbeschleunigungen und –geschwindigkeiten ermittelt wird, ermittelt und in einer Weiterbildung nur bei einem, insbesondere prognostizierten, Erreichen der Begrenzung kommandiert (vgl. insbesondere die Prognose der Pose bzw. Geschwindigkeit der roboterfesten Referenz in Gl. (105), (105‘):

$$\dot{\boldsymbol{X}}(t+T) \cong \underbrace{\dot{\boldsymbol{X}}(t)}_{\dot{x}} + \ddot{\boldsymbol{X}}(t)T; \quad \boldsymbol{X}(t+T) \cong \underbrace{\boldsymbol{X}(t)}_{x} + \dot{\boldsymbol{X}}(t)T + \frac{1}{2}\ddot{\boldsymbol{X}}(t)T^2 .$$

Hierdurch kann in einer Ausführung (jeweils) eine Rechenzeit und/oder Rechenkapazität reduziert und/oder das Verhalten des Roboters verbessert werden.

Die Priorisierung der Einhaltung der Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe und/oder der ersten gegenüber der zweiten Teilaufgabe erfolgt in einer Ausführung mittels eines entsprechenden Projektors in den Nullraum der höheren Priorität, insbesondere in der Form der Gl. (7) bzw. (107) bzw. einer entsprechenden Form

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau}_t &= \boldsymbol{J}_1^T \boldsymbol{f}_1 + \boldsymbol{N}_1 \boldsymbol{\tau}_{t,2} \\ \boldsymbol{\tau}_{t,k-1} &= \boldsymbol{J}_{k-1}^T \boldsymbol{f}_{k-1} + \boldsymbol{N}_{k-1} \boldsymbol{\tau}_{t,k} \\ \boldsymbol{\tau}_{t,k} &= \boldsymbol{J}_k^T \boldsymbol{f}_k\end{aligned} \qquad (10)$$

mit den virtuellen Aufgabenkräften zur Durchführung der k. Teilaufgabe $\boldsymbol{f}_k$ und dem Projektor

$$\boldsymbol{N}_{\mathrm{lim}/t/k} = \boldsymbol{1} - \boldsymbol{J}_{\mathrm{lim}/t/k}^T \overline{\boldsymbol{J}}_{\mathrm{lim}/k/k}^T \qquad (11)$$

Beispielsweise werden in einer Ausführung virtuelle Aufgabenkräften zur Durchführung der (Teil)Aufgabe, eine kartesische Position $\boldsymbol{x}_E$ zu halten, auf Basis bzw. entsprechend eines virtuellen Feder-Dämpfer-Systems ermittelt:

$$\boldsymbol{f}_{t,E} = k_p \left(\boldsymbol{x}_E - \boldsymbol{x} \right) + k_d \left(\dot{\boldsymbol{x}}_E - \dot{\boldsymbol{x}} \right) \qquad (12)$$

In einer Ausführung ist, insbesondere wird, die Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung vor dem Ausführen der vorgegebenen Aufgabe durch den Roboter und/oder auf Basis eines vorgegebenen Modells, insbesondere Soll-Modells, vorzugsweise eines CAD-Modells, einer Umgebung des Roboters vorgegeben. So können beispielsweise Posenbegrenzungen eines Werkzeugs vorab auf Basis eines CAD-Modells eines durch das robotergeführte Werkzeug zu bearbeitenden Werkstücks oder Posenbegrenzungen eines Ellbogens des Roboters vorab auf Basis eines CAD-Modells einer Roboterzelle vorgegeben sein bzw. werden.

Dadurch können solche Begrenzungen in einer Ausführung vorteilhaft präzise(r), schnell(er) und/oder wenig(er) durch Messfehler verfälscht vorgegeben werden.

In einer Ausführung ist, insbesondere wird, die Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung während des Ausführens der vorgegebenen Aufgabe durch den Roboter und/oder auf Basis einer Umgebungserkennung, insbesondere mithilfe einer Bildverarbeitung durch roboterfeste Sensoren und/oder in der Umgebung des Roboters angeordnete

Sensoren und/oder mithilfe einer Abstandsmessung durch roboterfeste Sensoren und/oder in der Umgebung des Roboters angeordnete Sensoren, vorgegeben. So können beispielsweise Posenbegrenzungen eines Endeffektors online auf Basis einer Hinderniserkennung mithilfe einer Bildverarbeitung oder auf Basis einer Abstandsmessung vorgegeben sein bzw. werden.

Dadurch können solche Begrenzungen in einer Ausführung vorteilhaft aktuell(er), einfach(er) und/oder wenig(er) durch Abweichungen zwischen Realität und Soll-Umgebung verfälscht vorgegeben 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 auf:

- Mittel zur nachgiebigen Kraftregelung des Roboters.

Nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung weist das System auf:

- Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften auf Basis sowohl einer vorgegebenen Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart, dass die Einhaltung dieser Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

Zusätzlich oder alternativ weist das System nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung auf:

- Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften auf Basis sowohl einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart, dass die Einhaltung dieser Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

In einer Ausführung weist die Steuerung bzw. ihr(e) Mittel auf:

- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte derart, dass die Einhaltung der Begrenzung der Achsstellungen und -geschwindigkeiten und/oder der Begrenzung der Achsstellungen und -beschleunigungen und/oder der Begrenzung der Achsgeschwindigkeiten und –beschleunigungen gleich priorisiert wird; und/oder

- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte derart, dass die Einhaltung der Begrenzung der Pose und Geschwindigkeit der roboterfesten Referenz und/oder der Begrenzung der Pose und Beschleunigung der roboterfesten Referenz und/oder der Begrenzung der Geschwindigkeit und Beschleunigung der roboterfesten Referenz gleich priorisiert wird
- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte derart, dass die Durchführung einer ersten Teilaufgabe der vorgegebenen Aufgabe gegenüber der Durchführung einer zweiten Teilaufgabe der vorgegebenen Aufgabe priorisiert wird, insbesondere die Durchführung der zweiten Teilaufgabe gegenüber der Durchführung wenigstens einer weiteren Teilaufgabe der vorgegebenen Aufgabe priorisiert wird; und/oder
- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte auf Basis eines dynamischen Modells des Roboters; und/oder
- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs - und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen; und/oder
- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs - und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz; und/oder
- Mittel zum Ermitteln der Soll-Antriebskräfte auf Basis virtueller Aufgabenkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Durchführung der Aufgabe; und/oder
- Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen iterativ und/oder auf Basis virtueller Achsbeschleunigungen des Roboters, insbesondere zum Kommandieren von Soll-Antriebskräften zur Einhaltung dieser Begrenzung nur bei Erreichen der Begrenzung; und/oder
- Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz iterativ und/oder auf Basis virtueller Achsbeschleunigungen des Roboters und/oder virtueller Beschleunigungen der roboterfesten Referenz,

insbesondere zum Kommandieren von Soll-Antriebskräften zur Einhaltung dieser Begrenzung nur bei Erreichen der Begrenzung.

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 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, 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 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 auszuführen.

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

Zur kompakteren Darstellung werden in einer Ausführung antiparallele Kräftepaare bzw. Drehmomente verallgemeinernd ebenfalls als Kräfte bezeichnet. So können Soll-Antriebskräfte entsprechend insbesondere Soll-Antriebsdrehmomente aufweisen, insbesondere sein. Ein Regeln bzw. Kommandieren von Soll-Größen auf Basis bzw. in Abhängigkeit von erfassten Ist-Größen wird vorliegend ebenfalls als Steuern im Sinne der vorliegenden Erfindung bezeichnet.

Der Roboter weist in einer Ausführung wenigstens drei, insbesondere wenigstens sechs, in einer Ausführung wenigstens sieben, Achsen bzw. Gelenke, insbesondere Drehachsen bzw. –gelenke, und, in einer Ausführung elektrische, Antriebe zum Verstellen bzw. Bewegen dieser Achsen bzw. Gelenke auf Basis der ermittelten Soll-Antriebskräfte auf, in einer Ausführung einen (Knick)Arm mit den Achsen.

Als Achsraum wird vorliegend insbesondere in fachüblicher Weise der Raum der Koordinaten bezeichnet, die die Stellungen, beispielsweise Winkellagen, der Achsen angeben bzw. darstellen. Als kartesischer Arbeitsraum wird vorliegend insbesondere in fachüblicher Weise der Raum der Koordinaten bezeichnet, die eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Position und/oder ein-, zwei- oder dreidimensionale Orientierung der roboterfesten Referenz, insbesondere des TCPs oder eines anderen ausgezeichneten Punktes bzw. Koordinatensystems am Roboter, beispielsweise eines Endeffektor(festen Punktes bzw. Koordinatensystem)s, Ellbogen(festen Punktes bzw. Koordinatensystem)s oder dergleich, angeben bzw. darstellen. Eine Pose im Sinne der vorliegenden Erfindung kann entsprechend insbesondere in Form einer ein-, zwei- oder dreidimensionalen Position und/oder ein-, zwei- oder dreidimensionalen Orientierung einer roboterfesten Referenz (im Arbeitsraum) oder in Form von Achskoordinaten bzw. –stellungen vorgegeben sein bzw. werden bzw. eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Position und/oder ein-, zwei- oder dreidimensionale Orientierung der roboterfesten Referenz (im Arbeitsraum) aufweisen, insbesondere sein.

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

Fig. 1: eine Steuerung zum Steuern eines Roboters nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung; und

Fig. 2: ein Verfahren zum Steuern des Roboters nach Ausführungen der vorliegenden Erfindung.

Fig. 1 zeigt einen siebenachsigen Roboter 1, dessen Achsstellung(skoordinat)en mit $\boldsymbol{q} = [q_1 \quad \dots \quad q_7]^T$ bezeichnet sind, und einer Robotersteuerung 2 zum Steuern des

Roboters nach einer Ausführung der vorliegenden Erfindung, die hierzu ein nachfolgend mit Bezug auf Fig. 2 erläutertes Verfahren durchführt bzw. hierzu eingerichtet ist.

In einem Schritt S10 werden die virtuellen Aufgabenkräfte $\boldsymbol{\tau}_t$ im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Durchführung einer vorgegebenen Aufgabe ermittelt, beispielsweise gemäß Gl. (12), insbesondere in Verbindung mit Gl. (10) bei mehreren untereinander priorisierten Teilaufgaben.

In einem Schritt S20 werden für die Iteration die Werte $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$, $\ddot{\boldsymbol{q}}_{sat}$, $\boldsymbol{N}_{\text{lim}}$ initialisiert, beispielsweise gemäß Gl. (6).

In einem Schritt S30 werden, beispielsweise gemäß Gl. (7), hieraus (anfängliche) Soll-Antriebskräfte, insbesondere -momente, $\boldsymbol{\tau}_d$ und hieraus, beispielsweise auf Basis eines dynamischen Modells gemäß Gl. (1), virtuelle Achsbeschleunigungen $\ddot{\boldsymbol{q}}$ ermittelt, die sich bei Aufprägen dieser Soll-Antriebskräfte ergeben (würden).

Diese virtuellen Achsbeschleunigungen werden in einem Schritt S40 daraufhin überprüft, ob wenigstens eine Achsbeschleunigung $\ddot{q}_i$ eine vorgegebene Begrenzung erreicht, beispielsweise eine der Bedingungen gemäß Gleichung (8) erfüllt. Dabei können Achsstellungs- und/oder -geschwindigkeitsbegrenzungen ebenfalls auf Beschleunigungsebene berücksichtigt werden bzw. die vorgegebene Begrenzung von Achsbeschleunigungen limitieren, beispielsweise gemäß Gl. (5) oder (5‘).

Erfüllt keine der Achsbeschleunigungen $\ddot{q}_i$ eine der Bedingungen gemäß Gleichung (8) (S40: „N“), werden die in Schritt S30 ermittelten Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ kommandiert und der Roboter 1 damit nachgiebig kraftgeregelt.

Erfüllen eine oder mehrere der Achsbeschleunigungen $\ddot{q}_i$ eine der Bedingungen gemäß Gleichung (8) (S40: „Y“), werden diese auf die entsprechenden Grenzwerte gemäß Gleichung (5) bzw. (5‘) gesetzt, damit in einem Schritt S60, beispielsweise gemäß Gl. (9), die virtuelle Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}^*_{\text{lim}}$ bzw. diesen entsprechende Anteile $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$

der Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ sowie der Projektor $\boldsymbol{N}_{\text{lim}}$ aktualisiert, und beginnend mit Schritt S30 eine neue Iteration durchgeführt.

Auf diese Weise wird die Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen bei der nachgiebigen Kraftregelung priorisiert eingehalten, wobei die Begrenzung von Achsstellungen und -geschwindigkeiten die Begrenzung von Achsbeschleunigungen und die Begrenzung von Achsstellungen und -beschleunigungen die Begrenzung von Achsgeschwindigkeiten limitiert (vgl. Gl. (5'), (7)), und, soweit möglich, nachranging die vorgegebene Aufgabe nachgiebig kraftgeregelt durchgeführt (vgl. Gl. (12), (7)).

In einer alternativen Ausführung werden Schritt S10 die virtuellen Aufgabenkräfte $\boldsymbol{\tau}_t$ im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Durchführung einer vorgegebenen Aufgabe ermittelt, beispielsweise gemäß Gl. (12), insbesondere in Verbindung mit Gl. (10) bei mehreren untereinander priorisierten Teilaufgaben.

In Schritt S20 werden für die Iteration die Werte $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$, $\ddot{\boldsymbol{q}}_{sat}$, $\boldsymbol{N}_{\text{lim}}$ initialisiert, beispielsweise gemäß Gl. (106).

In Schritt S30 werden, beispielsweise gemäß Gl. (107), hieraus (anfängliche) Soll-Antriebskräfte, insbesondere -momente, $\boldsymbol{\tau}_d$ und hieraus, beispielsweise auf Basis eines dynamischen Modells gemäß Gl. (1), virtuelle Achsbeschleunigungen $\ddot{\boldsymbol{q}}$ sowie hieraus virtuelle Beschleunigungen $\ddot{\boldsymbol{X}}$ einer roboterfesten Referenz, zum Beispiel des TCPs, Endeffektors, Ellbogens oder dergleichen, ermittelt, die sich bei Aufprägen dieser Soll-Antriebskräfte ergeben (würden).

Diese virtuellen Beschleunigungen der roboterfesten Referenz werden in Schritt S40 daraufhin überprüft, ob wenigstens eine Beschleunigung $\ddot{X}_i$ eine vorgegebene Begrenzung erreicht, beispielsweise eine der Bedingungen gemäß Gleichung (108) erfüllt. Dabei können Posen- und/oder Geschwindigkeitsbegrenzungen ebenfalls auf Beschleunigungsebene berücksichtigt werden bzw. die vorgegebene Begrenzung von Achsbeschleunigungen limitieren, beispielsweise gemäß Gl. (105) oder (105').

Erfüllt keine der Beschleunigungen $\ddot{X}_i$ eine der Bedingungen gemäß Gleichung (108) (S40: „N“), werden die in Schritt S30 ermittelten Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ kommandiert und der Roboter 1 damit nachgiebig kraftgeregelt.

Erfüllen eine oder mehrere der Beschleunigungen $\ddot{X}_i$ eine der Bedingungen gemäß Gleichung (108) (S40: „Y“), werden diese auf die entsprechenden Grenzwerte gemäß Gleichung (105) bzw. (105‘) gesetzt, damit in Schritt S60, beispielsweise gemäß Gl. (109), die virtuelle Rückstellkräfte $\boldsymbol{f}^*_{\text{lim}}$ bzw. diesen entsprechende Anteile $\boldsymbol{\tau}_{\text{lim}}$ der Soll-Antriebskräfte $\boldsymbol{\tau}_d$ sowie der Projektor $\boldsymbol{N}_{\text{lim}}$ aktualisiert, und beginnend mit Schritt S30 eine neue Iteration durchgeführt.

Auf diese Weise wird die Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der roboterfesten Referenz bei der nachgiebigen Kraftregelung priorisiert eingehalten, wobei die Begrenzung von Pose und Geschwindigkeit die Begrenzung der Beschleunigung und die Begrenzung der Pose und Beschleunigung die Begrenzung der Geschwindigkeit limitiert (vgl. Gl. (105‘), (107)), und, soweit möglich, nachranging die vorgegebene Aufgabe nachgiebig kraftgeregelt durchgeführt (vgl. Gl. (12), (107)).

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

So wurde vorstehend getrennt jeweils eine gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisierte Einhaltung einer vorgegebenen Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen und eine gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisierte Einhaltung einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung einer roboterfesten Referenz erläutert, da dies, wie vorstehend betont, jeweils einzeln durchgeführt werden kann.

Beide Ausführung können auch kombiniert sein bzw. werden, beispielsweise, indem zunächst, insbesondere in vorstehend erläuterter Weise, die Soll-Antriebskräfte bzw. -momente, $\boldsymbol{\tau}_d$ zur Einhaltung der Begrenzung von

Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen bei der nachgiebigen Kraftregelung ermittelt und diese dann als die virtuellen Aufgabenkräfte τ_t bei der Ermittlung der Soll-Antriebskräfte bzw. -momente, τ_d zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der roboterfesten Referenz, insbesondere in vorstehend erläuterter Weise, verwendet werden. Damit wird die Einhaltung der Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung der roboterfesten Referenz gegenüber der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten bzw. –beschleunigungen in einem zweistufigen Verfahren priorisiert, die ihrerseits gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

Gleichermaßen können umgekehrt zunächst die Soll-Antriebskräfte bzw. -momente, τ_d zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der roboterfesten Referenz, insbesondere in vorstehend erläuterter Weise, ermittelt und diese dann als die virtuellen Aufgabenkräfte τ_t bei der Ermittlung der Soll-Antriebskräfte bzw. -momente, τ_d zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen, insbesondere in vorstehend erläuterter Weise, verwendet werden. Damit wird dann die Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten bzw. –beschleunigungen gegenüber der Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung der roboterfesten Referenz in einem zweistufigen Verfahren priorisiert, die ihrerseits gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

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

1	Roboter
2	(Roboter)Steuerung
$q_1,\ldots,q_7$	Achsstellung(skoordinate)

Patentansprüche

1. Verfahren zum Steuern eines Roboters (1), wobei der Roboter nachgiebig kraftgeregelt wird (S50), wobei Soll-Antriebskräfte auf Basis sowohl einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung wenigstens einer roboterfesten Referenz und/oder einer vorgegebenen Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart ermittelt werden (S10, S30), dass die Einhaltung der Begrenzung bzw. Begrenzungen gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Antriebskräfte derart ermittelt werden, dass die Einhaltung der Begrenzung der Achsstellungen und -geschwindigkeiten und/oder der Begrenzung der Achsstellungen und -beschleunigungen und/oder der Begrenzung der Achsgeschwindigkeiten und –beschleunigungen und/oder der Begrenzung der Pose und Geschwindigkeit der wenigstens einen roboterfesten Referenz und/oder der Begrenzung der Pose und Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz und/oder der Begrenzung der Geschwindigkeit und Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz gleich priorisiert wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorgegebene Aufgabe ein Anfahren, Halten und/oder Beabstanden von wenigstens einer vorgegebenen Pose, insbesondere ein Abfahren einer vorgegebenen Bahn, im Arbeits- und/oder Achsraum des Roboters aufweist.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorgegebene Aufgabe wenigstens eine erste und eine zweite Teilaufgabe aufweist und die Soll-Antriebskräfte derart ermittelt werden, dass die Durchführung der ersten Teilaufgabe gegenüber der Durchführung der zweiten Teilaufgabe priorisiert wird, insbesondere die Durchführung der zweiten Teilaufgabe gegenüber der Durchführung wenigstens einer weiteren Teilaufgabe der vorgegebenen Aufgabe priorisiert wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Antriebskräfte auf Basis eines dynamischen Modells des Roboters ermittelt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Antriebskräfte auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen und/oder auf Basis virtueller Rückstellkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz und/oder auf Basis virtueller Aufgabenkräfte im Achs- und/oder Arbeitsraum des Roboters zur Durchführung der Aufgabe ermittelt werden.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Soll-Antriebskräfte zur Einhaltung der Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder -beschleunigungen und/oder zur Einhaltung der im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz iterativ und/oder auf Basis virtueller Achsbeschleunigungen des Roboters und/oder virtueller Beschleunigungen der wenigstens einen roboterfesten Referenz ermittelt, insbesondere nur bei einem, insbesondere prognostizierten, Erreichen dieser Begrenzung kommandiert, werden.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die vorgegebene Begrenzung von Achsstellungen und/oder -geschwindigkeiten die Begrenzung von Achsbeschleunigungen und/oder die vorgegebene Begrenzung von Achsstellungen und/oder -beschleunigungen die Begrenzung von Achsgeschwindigkeiten und/oder die im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebene Begrenzung der Pose und/oder Geschwindigkeit der wenigstens einen roboterfesten Referenz die im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebene Begrenzung der Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz und/oder die im

kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebene Begrenzung der Pose und/oder Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz die im kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebene Begrenzung der Geschwindigkeit der wenigstens einen roboterfesten Referenz limitiert.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz vor dem Ausführen der vorgegebenen Aufgabe und/oder auf Basis eines vorgegebenen Modells einer Umgebung des Roboters vorgegeben ist.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Begrenzung der Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung der wenigstens einen roboterfesten Referenz während des Ausführens der vorgegebenen Aufgabe und/oder auf Basis einer Umgebungserkennung vorgegeben ist.

11. Steuerung (2) zum Steuern eines Roboters (1), die zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingerichtet ist und/oder aufweist:
    - Mittel zur nachgiebigen Kraftregelung des Roboters; sowiewenigstens eines von:
    - Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften auf Basis sowohl einer vorgegebenen Begrenzung von Achsstellungen, -geschwindigkeiten und/oder –beschleunigungen als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart, dass die Einhaltung dieser Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird; und/oder
    - Mittel zum Ermitteln von Soll-Antriebskräften auf Basis sowohl einer in einem kartesischen Arbeitsraum des Roboters vorgegebenen Begrenzung einer Pose, Geschwindigkeit und/oder Beschleunigungen wenigstens einer roboterfesten Referenz als auch einer vorgegebenen Aufgabe derart, dass die Einhaltung dieser Begrenzung gegenüber der Durchführung der Aufgabe priorisiert wird.

12. Computerprogrammprodukt mit einem Programmcode, der auf einem von einem Computer lesbaren Medium gespeichert ist, zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

Fig. 2

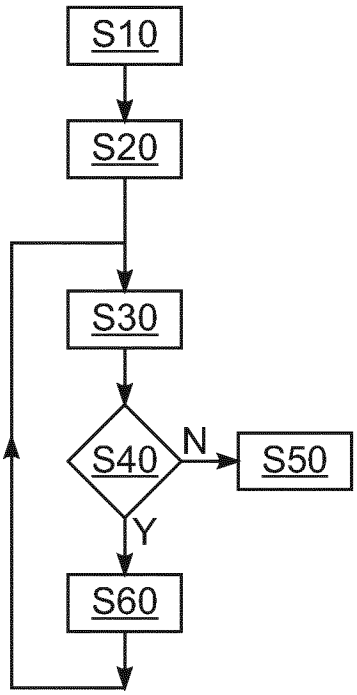
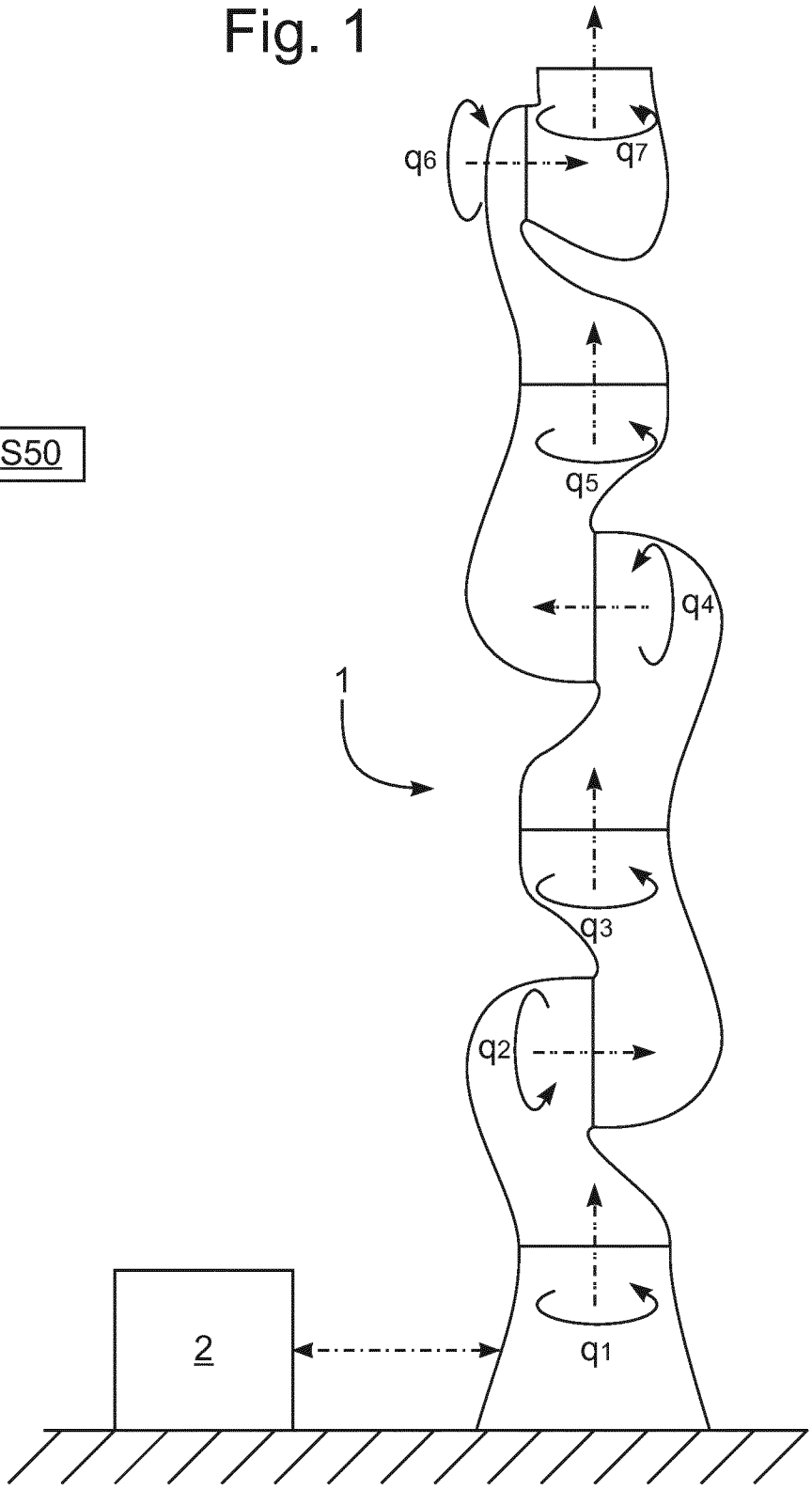


Fig. 1



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2019/062575

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 9/16(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, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 6181983 B1 (SCHLEMMER MAXIMILIAN [DE] ET AL) 30 January 2001 (2001-01-30) column 2; figure 3	1
X	ALEXANDER DIETRICH ET AL. "An overview of null space projections for redundant, torque-controlled robots" *INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH.*, US, Vol. 34, No. 11, 01 September 2015 (2015-09-01), pages 1385-1400 DOI: 10.1177/0278364914566516 ISSN: 0278-3649, XP055613290 page 1385 - page 1387 page 1391 - page 1393	1
A	KHATIB O. "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation" *IEEE JOURNAL ON ROBOTICS AND AUTOMATION, IEEE, USA,* Vol. 3, No. 1, 01 February 1987 (1987-02-01), pages 43-53 DOI: 10.1109/JRA.1987.1087068 ISSN: 0882-4967, XP011217372 cited in the application the whole document	1-12

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
16 August 2019	**02 September 2019**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands**	**Bassi, Luca**
Telephone No. **(+31-70)340-2040**	
Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	OMRCEN ET AL. "Compensation of velocity and/or acceleration joint saturation applied to redundant manipulator" *ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYST, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, AMSTERDAM, NL,* Vol. 55, No. 4, 19 March 2007 (2007-03-19), pages 337-344 DOI: 10.1016/J.ROBOT.2006.10.001 ISSN: 0921-8890, XP005927842 the whole document	1-12
A	FABRIZIO FLACCO ET AL. "Prioritized multi-task motion control of redundant robots under hard joint constraints" *2012 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS,* 01 October 2012 (2012-10-01), pages 3970-3977 DOI: 10.1109/IROS.2012.6385619 ISBN: 978-1-4673-1735-1. XP055563829 the whole document	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2019/062575

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 6181983 B1	30 January 2001	FR 2764838 A1	24 December 1998
		US 6181983 B1	30 January 2001

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2019/062575

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, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 6 181 983 B1 (SCHLEMMER MAXIMILIAN [DE] ET AL) 30. Januar 2001 (2001-01-30) Spalte 2; Abbildung 3	1
X	ALEXANDER DIETRICH ET AL: "An overview of null space projections for redundant, torque-controlled robots", INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBOTICS RESEARCH., Bd. 34, Nr. 11, 1. September 2015 (2015-09-01), Seiten 1385-1400, XP055613290, US ISSN: 0278-3649, DOI: 10.1177/0278364914566516 Seite 1385 - Seite 1387 Seite 1391 - Seite 1393	1

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] 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
16. August 2019	02/09/2019

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

2

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	KHATIB O: "A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation", IEEE JOURNAL ON ROBOTICS AND AUTOMATION, IEEE, USA, Bd. 3, Nr. 1, 1. Februar 1987 (1987-02-01) , Seiten 43-53, XP011217372, ISSN: 0882-4967, DOI: 10.1109/JRA.1987.1087068 in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	1-12
A	OMRCEN ET AL: "Compensation of velocity and/or acceleration joint saturation applied to redundant manipulator", ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYST, ELSEVIER SCIENCE PUBLISHERS, AMSTERDAM, NL, Bd. 55, Nr. 4, 19. März 2007 (2007-03-19), Seiten 337-344, XP005927842, ISSN: 0921-8890, DOI: 10.1016/J.ROBOT.2006.10.001 das ganze Dokument -----	1-12
A	FABRIZIO FLACCO ET AL: "Prioritized multi-task motion control of redundant robots under hard joint constraints", 2012 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 1. Oktober 2012 (2012-10-01), Seiten 3970-3977, XP055563829, DOI: 10.1109/IROS.2012.6385619 ISBN: 978-1-4673-1735-1 das ganze Dokument -----	1-12

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2019/062575

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 6181983 B1	30-01-2001	FR 2764838 A1	24-12-1998
		US 6181983 B1	30-01-2001