



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112135718 B

(45) 授权公告日 2024.06.07

(21) 申请号 201980033367.4

(22) 申请日 2019.05.16

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112135718 A

(43) 申请公布日 2020.12.25

(30) 优先权数据
102018207921.8 2018.05.18 DE
102018214946.1 2018.09.03 DE

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2020.11.18

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2019/062575 2019.05.16

(87) PCT国际申请的公布数据
W02019/219795 DE 2019.11.21

(73) 专利权人 库卡德国有限公司
地址 德国奥格斯堡

(72) 发明人 F·阿尔门丁格

J·D·穆诺茨奥索里奥

M·D·菲奥雷

(74) 专利代理机构 隆天知识产权代理有限公司
72003

专利代理师 黄艳 谢强

(51) Int.Cl.
B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件
CN 106826839 A, 2017.06.13
JP 2008110406 A, 2008.05.15
US 2018099410 A1, 2018.04.12
US 6181983 B1, 2001.01.30
US 9694495 B1, 2017.07.04

审查员 杨元戎

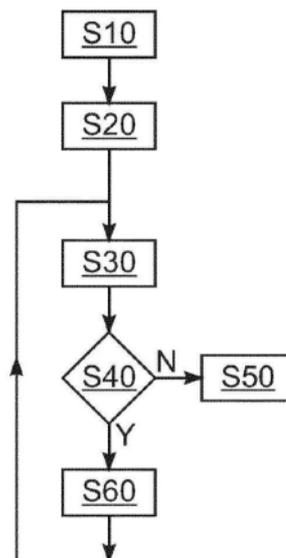
权利要求书2页 说明书12页 附图1页

(54) 发明名称

机器人的控制

(57) 摘要

在根据本发明的用于控制机器人(1)的方法中,机器人被柔性地力调节(S50),其中,不仅基于在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制和/或所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,而且基于所设定的任务,来确定目标驱动力(S10,S30),使得遵守所述限制优先于执行所述任务。



1. 一种用于控制机器人(1)的方法,其中,对所述机器人进行柔性的力调节(S50),其中,不仅基于在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制和/或所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,而且基于所设定的任务,确定目标驱动力(S10,S30),使得遵守一个或多个所述限制优先于执行所述任务,

其特征在于,确定所述目标驱动力,使得遵守对轴位置和轴速度的限制和/或遵守对轴位置和轴加速度的限制和/或遵守对轴速度和轴加速度的限制和/或遵守对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势和速度的限制和/或遵守对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势和加速度的限制和/或遵守对所述至少一个固定于机器人的参照物的速度和加速度的限制具有相同的优先级。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征不在于,所设定的任务包括在所述机器人的工作空间和/或轴空间中进入、保持至少一个设定的姿势和/或与该至少一个设定的姿势间隔开。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征不在于,所设定的任务包括驶过一设定的轨迹。

4. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征不在于,所设定的任务至少具有第一子任务和第二子任务,并且以如下的方式确定所述目标驱动力:即,使得执行所述第一子任务优先于执行所述第二子任务。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征不在于,以如下的方式确定所述目标驱动力:即,使得执行所述第二子任务优先于执行所设定的任务的至少一个其他的子任务。

6. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征不在于,基于所述机器人的动态模型来确定所述目标驱动力。

7. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征不在于,基于在所述机器人的轴空间和/或工作空间中用于遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制的虚拟复位力,和/或基于在所述机器人的轴空间和/或工作空间中用于遵守在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制的虚拟复位力,和/或基于在所述机器人的轴空间和/或工作空间中用于执行任务的虚拟任务力,来确定所述目标驱动力。

8. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征不在于,迭代地和/或基于所述机器人的虚拟轴加速度和/或所述至少一个固定于机器人的参照物的虚拟加速度,确定用于遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制和/或用于遵守对在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制的目标驱动力。

9. 根据权利要求8所述的方法,其特征不在于,仅在预测达到该限制时下命令。

10. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法,其特征不在于,所设定的对轴位置和/或轴速度的限制限定了轴加速度的限制,和/或所设定的对轴位置和/或轴加速度的限制限定了轴速度的限制,和/或在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势和/或速度的限制限定了在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参照物的加速度的限制,和/或在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势和/或加速度的限制限定了在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对所述至少一个固定于机器人的参

照物的速度的限制。

11. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法, 其特征在于, 在执行所设定的任务之前和/或基于所设定的所述机器人的环境的模型, 设定对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制。

12. 根据权利要求1至3中任一项所述的方法, 其特征在于, 在执行所设定的任务期间和/或基于环境识别, 设定对所述至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制。

13. 一种用于控制机器人(1)的控制器(2), 该控制器被设计用于执行根据权利要求1至12中任一项所述的方法, 和/或具有:

- 用于柔性地力调节所述机器人的装置; 以及下述装置中的至少之一:
- 用于不仅基于所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制, 而且还基于所设定的任务来确定目标驱动力以使遵守所述限制优先于执行所述任务的装置; 和/或
- 用于不仅基于在所述机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制, 而且基于所设定的任务来确定目标驱动力以使遵守所述限制优先于执行所述任务的装置。

14. 一种能由计算机读取的介质, 其实储存有计算机程序产品的程序代码, 所述计算机程序产品用于执行根据权利要求1至12中任一项所述的方法。

机器人的控制

技术领域

[0001] 本发明涉及用于控制机器人的一种方法和一种控制器,以及一种用于执行该方法的计算机程序产品。

背景技术

[0002] 机器人应该定期地执行预先给定的任务,例如使用其末端执行器或TCP驶向预先给定的位置等。

[0003] 为此,在O.Khatib所著的题为“用于机器人操纵器的运动和力控制的统一方法:操作空间公式化(A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators:The Operational Space Formulation)”(IEEE Journal of Robotics and Automation Vol. RA-3, No.1, Februar 1987, ISSN 0882-4967, S.43-53)的文章中提出了一种所谓的任务空间调节(“操作空间控制”),其中确定了用于执行任务的虚拟的力,并借助于任务-雅可比矩阵将该虚拟力转换为在机器人的轴空间中的目标驱动力。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于改善机器人的运行。

[0005] 本发明的目的通过一种具有权利要求1所述特征的方法来实现。权利要求11和权利要求12请求保护一种控制器或一种用于执行在此所述方法的计算机程序产品。优选的扩展方案由从属权利要求给出。

[0006] 根据本发明的一种实施方式,机器人被柔性地(“顺应性地(compliant)”)力调节,在一种实施方式中是这样进行的,即,使得机器人规避外部的力,特别是手动地或由操作者施加于其上的力,并且在一种扩展方案中,据此在其周围、特别是在引导机器人的手等上施加反作用于这些力的复位力。在一种实施方式中,机器人被导纳调节。由此,可以实现特别有利的柔性的力调节。

[0007] 根据本发明的一种实施方式,在力调节中,基于或根据

[0008] -特别是预先所设定、特别是所编程的和/或通过用户输入可调节的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,以及

[0009] -所设定的任务、特别是预先所编程的或所存储的任务如下地或者以此为前提来确定目标驱动力:即,对该(轴)限制的遵守优先于任务的执行,特别是仅在如下的范围内执行任务或者任务仅被执行至如下的程度:即,任务的执行容许遵守该限制或者不会损害对该限制的遵守。因此,在一种实施方式中,仅在如下的范围内下命令用于执行任务的目标驱动力:即,该目标驱动力不会违反或者反作用于用于遵守限制的目标驱动力。特别地,在以下状态中:即,执行任务需要或条件在于至少第一轴的第一目标驱动力和第二轴的第二目标驱动力,例如为了进入设定的姿势等,而遵守限制则需要或条件在于与第一轴的该第一目标驱动力反向的一目标驱动力并且不需要或条件不在于第二轴的特定的目标驱动力,因为例如第一轴接近于其限制而第二轴没有,因此下命令用于遵守限制的该反向的目标驱

动力和用于执行任务的第二目标驱动力。

[0010] 附加地或替代地,根据本发明的一种实施方式,在力调节中,基于或根据

[0011] -在机器人的笛卡尔工作空间中设定的固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,以及

[0012] -所设定的任务、特别是预先所编程的或存储的任务如下地或者以此为前提来确定目标驱动力:即,对(固定于机器人的参照物在笛卡尔工作空间中的姿势、速度和/或加速度的)限制的遵守优先于任务的执行,特别是仅在如下的范围内执行任务或者任务仅被执行至如下的程度:即,任务的执行容许遵守该限制或者不会损害对该限制的遵守。因此,在一种实施方式中,仅在如下的范围内下命令用于执行任务的目标驱动力:即,该目标驱动力不会违反或者反作用于用于遵守限制的目标驱动力。特别地,在以下状态中:即,执行任务需要或条件在于至少第一轴的第一目标驱动力和第二轴的第二目标驱动力,例如为了进入设定的姿势等,而遵守限制则是需要或条件在于与第一轴的该第一目标驱动力反向的一目标驱动力并且不需要或条件不在于第二轴的特定的目标驱动力,因为例如第一轴的调整导致固定于机器人的参照物达到其限制而第二轴的调整则没有,因此下命令用于遵守限制的该反向的目标驱动力和用于执行任务的第二目标驱动力。

[0013] 因此,在一种实施方式中,机器人为了执行设定的任务或者在执行设定的任务时被柔性地力调节。由此,在一种实施方式中,机器人在执行任务时可以有利的由操作者引导(离开)或偏转或停止。由此可以改善机器人的运行。

[0014] 但是在这种情况下,可能会由于手动引导而无意中达到通过硬件或软件技术实施的轴位置限制、轴速度限制或轴加速度限制或者通过硬件或软件技术实施的固定于机器人的参照物在笛卡尔工作空间中的姿势限制、速度限制或加速度限制,例如机器人的轴、其末端执行器或者肘部达到容许范围的边界或者容许速度,这通常可能导致机器人的突然的、不期望的和/或意外的反应。

[0015] 根据本发明,通过(还)如下地或者以此为前提确定目标驱动力:即,遵守所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制和/或在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,在一种实施方式中,能够在执行任务时基于对柔性机器人的手动引导而力调节地反作用于对所述限制的接近。据此,在一种实施方式中,通过使遵守限制优先于执行任务,能够有利的避免机器人的突然行为改变。

[0016] 在一种实施方式中,如下地或者以此为前提地确定目标驱动力:即,

[0017] -遵守对轴位置和轴速度的限制,和/或

[0018] -遵守对轴位置和轴加速度的限制,和/或

[0019] -遵守对轴速度和轴加速度的限制

[0020] 具有相同的优先级。据此,在一种实施方式中,通过使得遵守对轴位置水平、轴速度水平或轴加速度水平的限制具有相同的优先级,能够有利的避免机器人的突然行为改变。

[0021] 附加地或替代地,在一种实施方式中,目标驱动力被如下地或者以此为前提地确定:即,

[0022] -遵守对固定于机器人的参照物的姿势和速度的限制,和/或

[0023] -遵守对固定于机器人的参照物的姿势和加速度的限制,和/或

[0024] -遵守对固定于机器人的参照物的速度和加速度的限制具有相同的优先级。据此,在一种实施方式中,通过使得遵守对姿势水平、速度水平或加速度水平的限制具有相同的优先级,能够有利地避免机器人的突然行为改变。

[0025] 如果不仅设定了对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,而且还设定了在机器人的笛卡尔工作空间中对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,则在一种实施方式中,这两种限制中的一者优先于这两种限制中的另一者。

[0026] 据此,在一种实施方式中,对轴位置,轴速度和/或轴加速度的限制优先于在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制;或者相反,在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制优先于对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制;在一种实施方式中,这两种限制中的更低优先级的那一个相对于任务的执行也是以类似的方式实现,尤其是多阶段地实现。据此,在一种实施方式中,能够使关于机器人的限制和关于环境的限制有利地一起被遵守,并由此能够有利地避免机器人的突然行为改变。

[0027] 在一种实施方式中,通常也可以、特别是仅设定对至少一个固定于机器人的参照物在机器人的笛卡尔工作空间中的姿势、速度和/或加速度的限制,或者也可以、特别是仅设定对轴位置,轴速度和/或轴加速度的限制。

[0028] 在一种实施方式中,所设定的任务至少具有第一子任务和第二子任务,其中,目标驱动力被如下地或以此为前提地确定:即,第一子任务的执行(本身)优先于第二子任务的执行,特别是第二子任务的执行(本身)优先于一个或多个其他子任务的执行,在一种实施方式中,该一个或多个其他子任务(本身)可以相对于彼此具有优先级。

[0029] 附加地或替代地,所述的、特别是其一个或多个子任务(分别)可以包括:进入一个或多个所设定的、特别是被编程或存储的姿势,特别是驶过设定的轨迹;在机器人的工作空间和/或轴空间中保持所设定的姿势和/或相对于一个或多个设定的、特别是奇异的姿势的间隔,特别是由它们组成。

[0030] 据此,在一种实施方式中,能够特别有利地使用机器人。因此,在一种实施方式中,机器人能够高优先级地进入设定的姿势或驶过轨迹,并据此避免进入低优先级地或者更高优先级的奇异姿势。

[0031] 在一种实施方式中,目标驱动力是基于机器人的动态模型来确定,在一种实施方式中,该动态模型摹拟了轴位置、轴速度和轴加速度以及轴、特别是轴驱动力为,特别是以如下的形式

$$[0032] \quad \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

[0033] 其中 \mathbf{q} 为轴位置, $\dot{\mathbf{q}}$ 为轴速度, $\ddot{\mathbf{q}}$ 为轴加速度, \mathbf{M} 为一般化的质量矩阵, $\mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 为取决于位置和速度的力、特别是科里奥利力和离心力, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 为(仅)取决于位置的力、特别是重力,以及 $\boldsymbol{\tau}$ 为轴、特别是轴驱动力。

[0034] 据此,在一种实施方式中,能够考虑到机器人的行为、特别是其惯性等,从而改善运行。

[0035] 在一种实施方式中,目标驱动力是

[0036] -基于在机器人的轴空间和/或工作空间中用于遵守轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制的虚拟的复位力,和/或

[0037] -基于在机器人的轴空间和/或工作空间中用于遵守限制的虚拟的复位力,和/或

[0038] -基于在机器人的轴空间和/或工作空间中用于执行任务、特别是子任务的虚拟的任务力

[0039] 来确定。

[0040] 根据前面提到的文章“用于机器人操纵器的运动和力控制的统一方法:操作空间公式化(A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation)”,作为补充参考并且其内容以全文引用的方式并入本文中,可以在机器人的轴空间或工作空间中、特别是其子空间中,基于(子)任务来确定虚拟的任务力(“操作力”) f_t ,在一种实施方式中,则是以如下的形式来确定

$$[0041] \quad \Lambda_t(\mathbf{x}_t)\ddot{\mathbf{x}}_t + \boldsymbol{\mu}_t(\mathbf{x}_t, \dot{\mathbf{x}}_t) + \boldsymbol{\rho}_t(\mathbf{x}_t) = \mathbf{f}_t \quad (2)$$

[0042] 其中,

$$[0043] \quad \dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{J}_t \dot{\mathbf{q}}$$

$$[0044] \quad \Lambda_t = (\mathbf{J}_t \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_t^T)^{-1}$$

$$[0045] \quad \bar{\mathbf{J}}_t = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{J}_t^T \Lambda_t$$

$$[0046] \quad \boldsymbol{\mu}_t = \bar{\mathbf{J}}_t^T \mathbf{c} - \Lambda_t \mathbf{J}_t \dot{\mathbf{q}}$$

$$[0047] \quad \boldsymbol{\rho}_t = \bar{\mathbf{J}}_t^T \mathbf{g}$$

[0048] 其中, \mathbf{J}_t 为任务雅可比矩阵。命令向量 \mathbf{f}^* 对应于任务的所期望的加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_t$, 命令向量 $\mathbf{f}_{pos}^* = \mathbf{k}_p(\mathbf{x}_{E,d} - \mathbf{x}_E) + \mathbf{k}_d(\dot{\mathbf{x}}_{E,d} - \dot{\mathbf{x}}_E)$ 对应于所期望的笛卡尔末端执行器位置的弹簧-阻尼特性。

[0049] 在一种实施方式中,轴位置限制和轴速度限制可以有利地统一根据加速度水平来定义,特别是基于所设定的对轴位置、轴速度和轴加速度的限制

$$[0050] \quad \begin{aligned} Q_{\min,i} < q_i < Q_{\max,i} \\ V_{\min,i} < \dot{q}_i < V_{\max,i} \\ A_{\min,i} < \ddot{q}_i < A_{\max,i} \end{aligned} \quad (4)$$

[0051] 以及一时间增量、特别是采样或调节增量 T 而统一地根据加速度水平来定义,特别是以如下的形式来定义:

$$[0052] \quad \begin{aligned} \ddot{Q}_{\max,i} &= \min \left(2 \frac{Q_{\max,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{V_{\max,i} - \dot{q}}{T}, A_{\max,i} \right) \\ \ddot{Q}_{\min,i} &= \max \left(2 \frac{Q_{\min,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{V_{\min,i} - \dot{q}}{T}, A_{\min,i} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

[0053] 其中,所设定的对轴位置和轴速度的限制限定了所设定的对轴加速度的限制,或者在一种扩展方案中,所设定的对轴位置和轴加速度的限制附加地限定了所设定的对轴速度的限制,

$$\begin{aligned}
\dot{Q}_{\max,i} &= \min\left(V_{\max,i}, -\sqrt{2A_{\max,i}(q_i - Q_{\min,i})}\right) \\
\dot{Q}_{\min,i} &= \max\left(V_{\min,i}, \sqrt{2A_{\max,i}(Q_{\min,i} - q_i)}\right) \quad (5') \\
[0054] \quad \ddot{Q}_{\max,i} &= \min\left(2\frac{Q_{\max,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{\dot{Q}_{\max,i} - q}{T}, A_{\max,i}\right) \\
\ddot{Q}_{\min,i} &= \max\left(2\frac{Q_{\min,i} - q - \dot{q}T}{T^2}, \frac{\dot{Q}_{\min,i} - q}{T}, A_{\min,i}\right)
\end{aligned}$$

[0055] 在一种实施方式中,对固定于机器人的参照物的位置限制和速度限制可以有利地统一根据加速度水平来定义,特别是基于所设定的对固定于机器人的参照物的姿势、速度和加速度的限制

$$\begin{aligned}
X_{\min,i} &< X_i < X_{\max,i} \\
[0056] \quad V_{\min,i} &< \dot{X}_i < V_{\max,i} \quad (104) \\
A_{\min,i} &< \ddot{X}_i < A_{\max,i}
\end{aligned}$$

[0057] 以及时间增量、特别是采样或调节增量T而统一地根据加速度水平来定义,特别是以如下的形式来定义:

$$\begin{aligned}
\ddot{X}_{\max,i} &= \min\left(2\frac{X_{\max,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{V_{\max,i} - X_i}{T}, A_{\max,i}\right) \\
[0058] \quad \ddot{X}_{\min,i} &= \max\left(2\frac{X_{\min,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{V_{\min,i} - X_i}{T}, A_{\min,i}\right) \quad (105)
\end{aligned}$$

[0059] 其中,所设定的对姿势和速度的限制限定了所设定的对固定于机器人的参照物的加速度的限制,或者在一种扩展方案中,所设定的对姿势和加速度的限制附加地限定了所设定的对固定于机器人的参照物的速度的限制,

$$\begin{aligned}
\dot{X}_{\max,i} &= \min\left(V_{\max,i}, -\sqrt{2A_{\max,i}(X_i - X_{\min,i})}\right) \\
\dot{X}_{\min,i} &= \max\left(V_{\min,i}, \sqrt{2A_{\max,i}(X_{\min,i} - X_i)}\right) \\
[0060] \quad \ddot{X}_{\max,i} &= \min\left(2\frac{X_{\max,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{\dot{X}_{\max,i} - X_i}{T}, A_{\max,i}\right) \quad (105') \\
\ddot{X}_{\min,i} &= \max\left(2\frac{X_{\min,i} - X_i - \dot{X}_i T}{T^2}, \frac{\dot{X}_{\min,i} - X_i}{T}, A_{\min,i}\right)
\end{aligned}$$

[0061] 在此, $X = [X_1 \dots X_6]^T$ 表示固定于机器人的参照物的(当前)姿势,其中,例如, $[X_1 \dots X_3]^T$ 可以例如以笛卡尔坐标 x, y, z 来定义其位置, $[X_4 \dots X_6]^T$ 可以例如以欧拉或万向节角度等来定义其方向。

[0062] 由此,在一种实施方式中,能够得到机器人的有利行为,特别是在接近限制时。

[0063] 在一种实施方式中,所述的虚拟复位力 f_{lim}^* 或目标驱动力 τ_d 被迭代地确定,其中,在一种实施方式中,开始设置为

$$[0064] \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{q}}_{\text{sat}} &= \mathbf{0} \quad (6), \\ \mathbf{N}_{\text{lim}} &= \mathbf{1} \end{aligned}$$

[0065] 随后确定

$$[0066] \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_d &= \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} + \mathbf{N}_{\text{lim}} \boldsymbol{\tau}_t \\ \ddot{\mathbf{q}} &= \mathbf{M}^{-1}(\boldsymbol{\tau}_d - \mathbf{g} - \mathbf{c}) \quad (7), \end{aligned}$$

[0067] 并且利用

$$[0068] \quad \begin{aligned} \ddot{q}_i > \ddot{Q}_{\text{max},i} &\Rightarrow \ddot{q}_{\text{sat},i} = \ddot{Q}_{\text{max},i} \\ \ddot{q}_i < \ddot{Q}_{\text{min},i} &\Rightarrow \ddot{q}_{\text{sat},i} = \ddot{Q}_{\text{min},i} \quad (8), \end{aligned}$$

[0069] 根据下式

$$[0070] \quad \begin{aligned} \mathbf{f}_{\text{lim}}^* &= \ddot{\mathbf{q}}_{\text{sat}} \\ \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \mathbf{J}_{\text{lim}}^T (\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}} \mathbf{f}_{\text{lim}}^* + \mathbf{p}_{\text{lim}} + \boldsymbol{\mu}_{\text{lim}}) \quad (9), \\ \mathbf{N}_{\text{lim}} &= \mathbf{1} - \mathbf{J}_{\text{lim}}^T \bar{\mathbf{J}}_{\text{lim}}^T \end{aligned}$$

[0071] 确定新的虚拟复位力 $\mathbf{f}_{\text{lim}}^*$ 或与其相对应的目标驱动力 $\boldsymbol{\tau}_d$ 的分量 $\tau_{d,i}$, 并将其用于等式 (7) 中, 只要有至少一个虚拟轴加速度 \ddot{q}_i 满足等式 (8) 中的条件之一即可。在此, 对于每个轴 (其根据等式 (7) 的虚拟加速度满足等式 (8) 中的条件之一) 的轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制的雅可比矩阵 \mathbf{J}_{lim} , 包含有一行, 该行在 (与轴) 相对应的列中具有 1, 其余为 0, 亦即例如

$$[0072] \quad (\text{仅}) \text{ 对于 } \ddot{q}_2 > \ddot{Q}_{\text{max},2} \Rightarrow \mathbf{J}_{\text{lim}} = [0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0],$$

$$[0073] \quad (\text{仅}) \text{ 对于 } \ddot{q}_2 > \ddot{Q}_{\text{max},2}, \ddot{q}_3 > \ddot{Q}_{\text{max},3} \Rightarrow \mathbf{J}_{\text{lim}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \text{ 等。}$$

[0074] 由此, 根据等式 (3) 确定质量矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}_{\text{lim}}$ 和向量 $\mathbf{p}_{\text{lim}}, \boldsymbol{\mu}_{\text{lim}}$ 。

[0075] 在一种实施方式中, 如果或只要虚拟轴加速度不再满足等式 (8) 中的条件之一, 则根据等式 (7) 命令目标驱动力。

[0076] 在一种实施方式中, 所述的虚拟复位力 $\mathbf{f}_{\text{lim}}^*$ 或目标驱动力 $\boldsymbol{\tau}_d$ 被迭代地确定, 其中, 在一种实施方式中, 开始设置为

$$[0077] \quad \begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{\text{lim}} &= \mathbf{0} \\ \ddot{\mathbf{X}}_{\text{sat}} &= \mathbf{0} \quad (106), \\ \mathbf{N}_{\text{lim}} &= \mathbf{1} \end{aligned}$$

[0078] 随后确定

$$\begin{aligned}
\tau_d &= \tau_{lim} + N_{lim} \tau_t \\
\ddot{q} &= M^{-1}(\tau_d - g - c) \\
\dot{q}_{t+\tau} &= \dot{q} + \ddot{q}T \\
\dot{X}_{t+\tau} &= J_{lim} \dot{q}_{t+\tau} \\
\ddot{X} &= \frac{\dot{X}_{t+\tau} - \dot{X}}{T}
\end{aligned} \quad (107),$$

[0079] 其中 q 为当前的轴位置, \dot{q} 为轴速度, X 为固定于机器人的参照物到达(当前)时间点时的当前姿势,并利用

$$\begin{aligned}
f_{lim}^* &= \ddot{X}_{sat} \\
\tau_{lim} &= J_{lim}^T (\Lambda_{lim} f_{lim}^* + p_{lim} + \mu_{lim}) \\
N_{lim} &= \mathbf{1} - J_{lim}^T \bar{J}_{lim}^T
\end{aligned} \quad (108),$$

[0082] 根据下式

$$\begin{aligned}
f_{lim}^* &= \ddot{X}_{sat} \\
\tau_{lim} &= J_{lim}^T (\Lambda_{lim} f_{lim}^* + p_{lim} + \mu_{lim}) \\
N_{lim} &= \mathbf{1} - J_{lim}^T \bar{J}_{lim}^T
\end{aligned} \quad (109),$$

[0084] 确定新的虚拟的复位力 f_{lim}^* 或与其相对应的目标驱动力 τ_d 的分量 τ_{lim} ,并将其用于等式(7)中,只要有至少一个虚拟加速度 \ddot{X}_i 满足等式(108)中的条件之一即可。

[0085] 在此,至少一个固定于机器人的参照物在机器人的笛卡尔工作空间中的姿势、速度和/或加速度的限制的雅可比矩阵 J_{lim} 是基于该固定于机器人的参照物的下述雅克比矩阵,

$$J_x = \frac{\partial \dot{X}}{\partial \underbrace{[\dot{q}_1 \ \dots \ \dot{q}_f]}_q} = \begin{bmatrix} J_{1,1} & J_{1,2} & \dots & J_{1,f} \\ J_{2,1} & J_{2,2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ J_{6,1} & \dots & \dots & J_{6,f} \end{bmatrix},$$

[0087] 通过删除其中没有限制被设定或起作用的行来获得,也就是说,例如仅根据在机器人的笛卡尔工作空间的 y 方向上的限制,因为例如在该方向上存在障碍,或者当例如在 z 方向上也存在限制时。

[0088] 由此,根据等式(3)确定质量矩阵 Λ_{lim} 和向量 p_{lim}, μ_{lim} 。

[0089] 在一种实施方式中,如果或只要虚拟加速度不再满足等式(108)中的条件之一,则根据等式(107)命令目标驱动力。

[0090] 正如前面根据特别优选的实施方式所阐述的那样,在一种实施方式中,通常迭代地确定目标驱动力、特别是用于遵守限制的目标驱动力。

[0091] 附加地或替代地,正如前面根据特别优选的实施方式所阐述的那样,在一种实施方式中,基于机器人的虚拟轴加速度来确定用于遵守轴位置、轴速度 h_e 或轴加速度的限制的目标驱动力,并且在一种扩展方案中,仅在达到、特别是预测达到限制时发出命令(特别

是参见等式 (5)、(5') 中对轴位置或轴速度的预测)：

$$[0092] \quad \dot{\mathbf{q}}(t+T) \cong \dot{\mathbf{q}}(t) + \ddot{\mathbf{q}}(t)T; \quad \mathbf{q}(t+T) \cong \mathbf{q}(t) + \dot{\mathbf{q}}(t)T + \frac{1}{2}\ddot{\mathbf{q}}(t)T^2。$$

[0093] 附加地或替代地,正如前面根据特别优选的实施方式所阐述的那样,在一种实施方式中,对用于遵守在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制的目标驱动力的确定通常是基于该固定于机器人的参照物的虚拟加速度和虚拟速度,而该虚拟加速度和虚拟速度则是基于虚拟的轴加速度和轴速度来确定的,并且在一种扩展方案中,仅在达到、特别是预测达到限制时发出命令(特别是参见在等式 (105)、(105') 中对固定于机器人的参照物的姿势或速度的预测)：

$$[0094] \quad \underset{\mathbf{x}}{\dot{\mathbf{X}}}(t+T) \cong \underset{\mathbf{x}}{\dot{\mathbf{X}}}(t) + \underset{\mathbf{x}}{\ddot{\mathbf{X}}}(t)T; \quad \underset{\mathbf{x}}{\mathbf{X}}(t+T) \cong \underset{\mathbf{x}}{\mathbf{X}}(t) + \underset{\mathbf{x}}{\dot{\mathbf{X}}}(t)T + \frac{1}{2}\underset{\mathbf{x}}{\ddot{\mathbf{X}}}(t)T^2$$

[0095] 由此,在一种实施方式中,(分别)能够减少计算时间和/或计算能力和/或改善机器人的行为。

[0096] 在一种实施方式中,使遵守限制相对于执行任务具有更高优先级和/或使第一子任务相对于第二子任务具有更高优先级是借助于在具有更高优先级的零空间中的相应投影进行的,特别是以等式 (7) 或 (107) 的形式或者以如下的相应形式进行

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{J}_1^T \mathbf{f}_1 + \mathbf{N}_1 \mathbf{r}_{t,2}$$

$$[0097] \quad \mathbf{r}_{t,k-1} = \mathbf{J}_{k-1}^T \mathbf{f}_{k-1} + \mathbf{N}_{k-1} \mathbf{r}_{t,k} \quad (10),$$

$$\mathbf{r}_{t,k} = \mathbf{J}_k^T \mathbf{f}_k$$

[0098] 其中, \mathbf{f}_k 为用于执行第 k 个子任务的虚拟任务力,并且投影为

$$[0099] \quad \mathbf{N}_{\lim/t/k} = \mathbf{1} - \mathbf{J}_{\lim/t/k}^T \bar{\mathbf{J}}_{\lim/k/k}^T \quad (11)$$

[0100] 在一种实施方式中,例如基于或根据虚拟的弹簧-阻尼系统来确定用于执行保持笛卡尔位置 \mathbf{x}_p 的(子)任务的虚拟任务力为:

$$[0101] \quad \mathbf{f}_{t,E} = k_p (\mathbf{x}_E - \mathbf{x}) + k_d (\dot{\mathbf{x}}_E - \dot{\mathbf{x}}) \quad (12)$$

[0102] 在一种实施方式中,在由机器人执行所设定的任务之前和/或基于所设定的机器人周围环境的模型、特别是目标模型、优选为 CAD 模型,来设定对姿势、速度和/或加速度的限制。例如,可以预先基于由机器人引导的工具所加工的工件的 CAD 模型来设定工具的姿势限制,或者可以预先基于机器人单元的 CAD 模型来设定机器人的肘部的姿势限制。

[0103] 由此,在一种实施方式中,能够有利地(更)精确,(更)快速和/或(更)少由于测量错误而失真地设定这样的限制。

[0104] 在一种实施方式中,在由机器人执行所设定的任务期间和/或基于环境识别,特别是借助于固定于机器人的传感器的和/或设置在机器人周围环境中的传感器的图像处理,和/或借助于固定于机器人的传感器的和/或设置在机器人周围环境中的传感器的距离测量所进行的环境识别,来设定对姿势、速度和/或加速度的限制。例如,可以基于借助于图像处理所进行的障碍物识别或者基于距离测量,在线地设定末端执行器的姿势限制。

[0105] 由此,在一种实施方式中,能够有利地(更)实时,(更)简单和/或(更)少由于现实和目标环境之间的偏差而失真地设定这样的限制。

[0106] 根据本发明的一种实施方式,提出一种系统,特别是被硬件技术和/或软件技术地、特别是编程技术地设计用于执行在此所述的方法,和/或具有:

[0107] -用于柔性地力调节机器人的装置。

[0108] 根据本发明的一种实施方式,该系统具有:

[0109] -用于不仅基于所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,而且基于所设定的任务来确定目标驱动力而使得遵守限制相对于执行任务具有优先级的装置。

[0110] 附加地或替代地,根据本发明的一种实施方式,该系统具有:

[0111] -用于不仅基于在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,而且基于所设定的任务来确定目标驱动力而使得遵守限制相对于执行任务具有优先级。

[0112] 在一种实施方式中,控制器或其装置具有:

[0113] -用于确定目标驱动力的装置,使得遵守对轴位置和轴速度的限制和/或遵守对轴位置和轴加速度的限制和/或遵守对轴速度和轴加速度的限制具有相同的优先级;和/或

[0114] -用于确定目标驱动力的装置,使得遵守对固定于机器人的参照物的姿势和速度的限制和/或遵守固定于机器人的参照物的姿势和加速度的限制和/或遵守对固定于机器人的参照物的速度和加速度的限制具有相同的优先级;

[0115] -用于确定目标驱动力的装置,使得执行所设定任务的第一子任务相对于执行所设定任务的第二子任务具有更高优先级,特别是执行第二子任务相对于执行所设定任务的至少一个其他子任务具有更高优先级;和/或

[0116] -用于基于机器人的动态模型确定目标驱动力的装置;和/或

[0117] -用于基于在机器人的轴空间和/或工作空间中的虚拟复位力来确定目标驱动力的装置,以遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制;和/或

[0118] -用于基于在机器人的轴空间和/或工作空间中的虚拟复位力来确定目标驱动力的装置,以遵守在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对至少一个固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制;和/或

[0119] -用于基于在机器人的轴空间和/或工作空间中的虚拟任务力来确定目标驱动力的装置,以执行任务;和/或

[0120] -用于迭代地和/或基于机器人的虚拟的轴加速度来确定目标驱动力的装置,以遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,特别是仅在达到限制时才命令目标驱动力以遵守该限制;和/或

[0121] -用于迭代地和/或基于机器人的虚拟的轴加速度和/或至少一个固定于机器人的参照物的虚拟的加速度来确定目标驱动力的装置,以遵守在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对该固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,特别是用于仅在达到限制时才命令目标驱动力以遵守该限制。

[0122] 本发明意义下的装置可以硬件技术和/或软件技术地构成,特别是具有:优选与存储系统和/或总线系统进行数据连接或信号连接的处理单元,特别是数字处理单元,特别是微处理器单元(CPU);和/或一个或多个程序或程序模块。CPU可以为此被设计为:执行被实现为存储在存储系统中的程序的指令;从数据总线采集输入信号;和/或将输出信号发送至数据总线。存储系统可以具有一个或多个特别是不同的存储介质,特别是光学的、磁的、固

体的和/或其它非易失性的介质。程序可以被如下地提供：即，其能够体现或执行在此所述的方法，从而使得CPU能够执行该方法的步骤，并由此特别是能够控制机器人。在一种实施方式中，计算机程序产品可以具有、特别可以是特别是非易失性的、用于存储程序的存储介质或者说其上存储有程序的存储介质，其中，该程序的执行使得系统或控制器、特别是计算机执行在此所述的方法或该方法的一个或多个步骤。

[0123] 在一种实施方式中，该方法的一个或多个步骤，特别是所有的步骤被全部或部分地自动化执行，特别是通过控制器或其装置。

[0124] 为了更紧凑地示出，在一种实施方式中，将反平行力偶或转矩也概括地称为力。因此，目标驱动力可以相应地具有、特别可以是目标驱动转矩。在本发明的意义上，基于或根据所采集到的实际参量对目标参量的调节或命令也被称为控制。

[0125] 在一种实施方式中，机器人具有至少三个、特别是至少六个、在一种实施方式中为至少七个轴或关节、特别是转动轴或转动关节，并且具有驱动器，在一种实施方式中为电驱动器，用于基于所确定的目标驱动力来调节或移动这些轴或关节，在一种实施方式中是带有轴的(曲)臂。

[0126] 在本文中，特别是以本领域惯用的方式将说明或表示轴的位置、例如角位置的坐标的空间称为轴空间。在本文中，特别是以本领域惯用的方式将说明或表示固定于机器人的参照物、特别是TCP或在机器人上其他被示出的点或坐标系，例如末端执行器(固定的点或坐标系)、肘部(固定的点或坐标系)等的一维、二维或三维位置和/或一维、二维或三维方向的坐标的空间称为工作空间。本发明意义下的姿势可以相应地特别是以固定于机器人的参照物(在工作空间中)的一维、二维或三维位置和/或一维、二维或三维方向的形式或者以轴坐标或轴位置的形式来设定，或者可以具有、特别可以是固定于机器人的参照物(在工作空间中)的一维、二维或三维的位置和/或一维、二维或三维方向。

附图说明

[0127] 其它的优点和特征由从属权利要求和实施例给出。为此，部分示意性示出了：

[0128] 图1为根据本发明一种实施方式的用于控制机器人的控制器；和

[0129] 图2为根据本发明一种实施方式的用于控制机器人的方法。

具体实施方式

[0130] 图1示出了根据本发明一种实施方式的七轴机器人1，其轴位置(坐标)以 $q = [q_1 \cdots q_7]^T$ 来表示，并且示出了用于控制机器人的机器人控制器2，该机器人控制器执行下面将参考图2所阐述的方法或者被设计用于此目的。

[0131] 在步骤S10中，例如根据等式(12)，特别是在多个相对于彼此具有优先级的子任务的情况下结合等式(10)，来确定在机器人的轴空间和/或工作空间中用于执行设定的任务的虚拟任务力 τ_t 。

[0132] 在步骤S20中，例如根据等式(6)，为了所述迭代而对值 τ_{lim} ， \ddot{q}_{sat} ， N_{lim} 进行初始化。

[0133] 由此，在步骤S30中，例如根据等式(7)来确定(初始的)目标驱动力 τ_d ，特别是目标力矩，并由此例如基于根据等式(1)的动态模型来确定虚拟轴加速度 \ddot{q} ，该虚拟轴加速度在施加该目标驱动力时(已)产生。

[0134] 随后,在步骤S40中检查这些虚拟轴加速度,是否有至少一个轴加速度 \ddot{q}_i 达到所设定的限制,例如满足根据等式(8)的条件之一。在此,同样可以根据加速度水平来考虑轴位置限制和/或轴速度限制,或者说所设定的限制受到轴加速度的限定,例如根据等式(5)或(5')。

[0135] 如果没有轴加速度 \ddot{q}_i 满足根据等式(8)的条件之一(S40:“N”),则命令在步骤S30中所确定的目标驱动力 τ_d ,并且机器人1因此被柔性地力调节。

[0136] 如果有一个或多个轴加速度 \ddot{q}_i 满足根据等式(8)的条件之一(S40:“Y”),则根据等式(5)或(5')将其设置为相应的边界值,以便在步骤S60中,例如根据等式(9)来更新虚拟复位力 f_{lim}^* 或与该虚拟复位力相对应的目标驱动力 τ_d 的分量 τ_{lim} 以及投影 N_{lim} ,并且从步骤S30开始执行新的迭代。

[0137] 通过这种方式,在柔性的力调节中将优先遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,其中,对轴位置和轴速度的限制限定了轴加速度的限制,并且对轴位置和轴加速度的限制限定了轴速度的限制(参见等式(5')、(7)),并且尽可能地以柔性力调节的方式次级地(nachrangig)执行所设定的任务(参见等式(12)、(7))。

[0138] 在一种替代的实施方式中,在步骤S10中,例如根据等式(12),特别是在多个相对于彼此具有优先级的子任务的情况下结合等式(10),来确定在机器人的轴空间和/或工作空间中用于执行所设定的任务的虚拟任务力 τ_t 。

[0139] 在步骤S20中,例如根据等式(106),为了所述迭代而对值 $\tau_{lim}, \ddot{q}_{sat}, N_{lim}$ 进行初始化。

[0140] 由此,在步骤S30中,例如根据等式(107)来确定(初始的)目标驱动力 τ_d ,特别是目标力矩,并由此例如基于根据等式(1)的动态模型来确定虚拟轴加速度 \ddot{q} ,以及由此确定固定于机器人的参照物(例如TCP,末端执行器,肘部等)的虚拟加速度 \ddot{X} ,它们在施加目标驱动力时(已)产生。

[0141] 随后,在步骤S40中检查该固定于机器人的参照物的虚拟加速度,是否有至少一个加速度 \ddot{X}_i 达到所设定的限制,例如满足根据等式(108)的条件之一。在此,同样可以根据加速度水平来考虑位置限制和/或速度限制,或者说所设定的限制受到轴加速度的限定,例如根据等式(105)或(105')。

[0142] 如果没有加速度 \ddot{X}_i 满足根据等式(108)的条件之一(S40:“N”),则命令在步骤S30中所确定的目标驱动力 τ_d ,并且机器人1因此被柔性地力调节。

[0143] 如果有一个或多个轴加速度 \ddot{X}_i 满足根据等式(108)的条件之一(S40:“Y”),则根据等式(105)或(105')将其设置为相应的边界值,以便在步骤S60中,例如根据等式(109)来更新虚拟复位力 f_{lim}^* 或与该虚拟复位力相对应的目标驱动力 τ_d 的分量 τ_{lim} 以及投影 N_{lim} ,并且从步骤S30开始执行新的迭代。

[0144] 通过这种方式,在柔性的力调节中将优先遵守对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,其中,对姿势和速度的限制限定了加速度的限制,并且对姿势和加速度的限制限定了速度的限制(参见等式(105')、(107)),并且尽可能地以柔性力调节的方式次级地执行所设定的任务(参见等式(12)、(107))。

[0145] 尽管在前面的描述中已经阐述了示例性的实施方式,但是应该指出的是,还可能有很多的变型。

[0146] 在前文中分开阐述了相比于执行任务更优先地遵守所设定的对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制和相比于执行任务更优先地遵守对在机器人的笛卡尔工作区中所设定的对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,因为它们可以如上所述地分别单独进行。

[0147] 例如,通过首先特别是以前述的方式确定目标驱动力或转矩 τ_d 以便在柔性力调节中遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,然后特别是以前述的方式将其作为确定目标驱动力或转矩 τ_d 时的虚拟任务力 τ_t ,以遵守在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,可以将这两种实施方式进行组合。由此,在两阶段的方法中,就能够使遵守对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制优先于遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制,而后者又优先于任务的执行。

[0148] 相反,也可以首先特别是以前述的方式确定目标驱动力或转矩 τ_d ,以遵守在机器人的笛卡尔工作空间中所设定的对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,然后特别是以前述的方式将其作为确定目标驱动力或转矩 τ_d 时的虚拟任务力 τ_t ,以遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制。由此,在两阶段的方法中,就能够使遵守对轴位置、轴速度和/或轴加速度的限制优先于遵守对固定于机器人的参照物的姿势、速度和/或加速度的限制,而后者又优先于任务的执行。

[0149] 此外还应指出的是,这些示例性的实施方式仅仅是举例,其不应对保护范围、应用和结构形成任何限制。相反,通过前面的描述能够赋予本领域技术人员实现对至少一个示例性实施方式进行转换的教导,其中,在不脱离本发明保护范围的情况下,可以实现特别是关于所述部件的功能和布置的各种变化,例如可以根据权利要求和等效的特征组合获得。

[0150] 附图标记列表

[0151] 1 机器人

[0152] 2 (机器人)控制器

[0153] q_1, \dots, q_7 轴位置(坐标)。

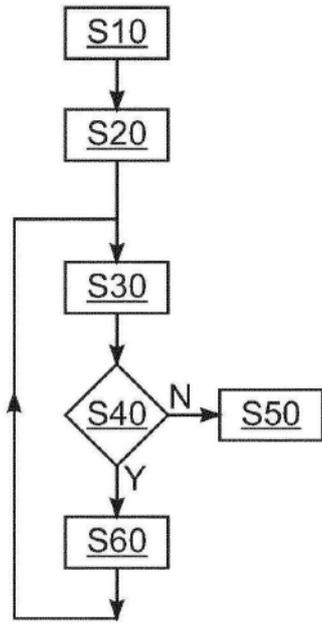


图2

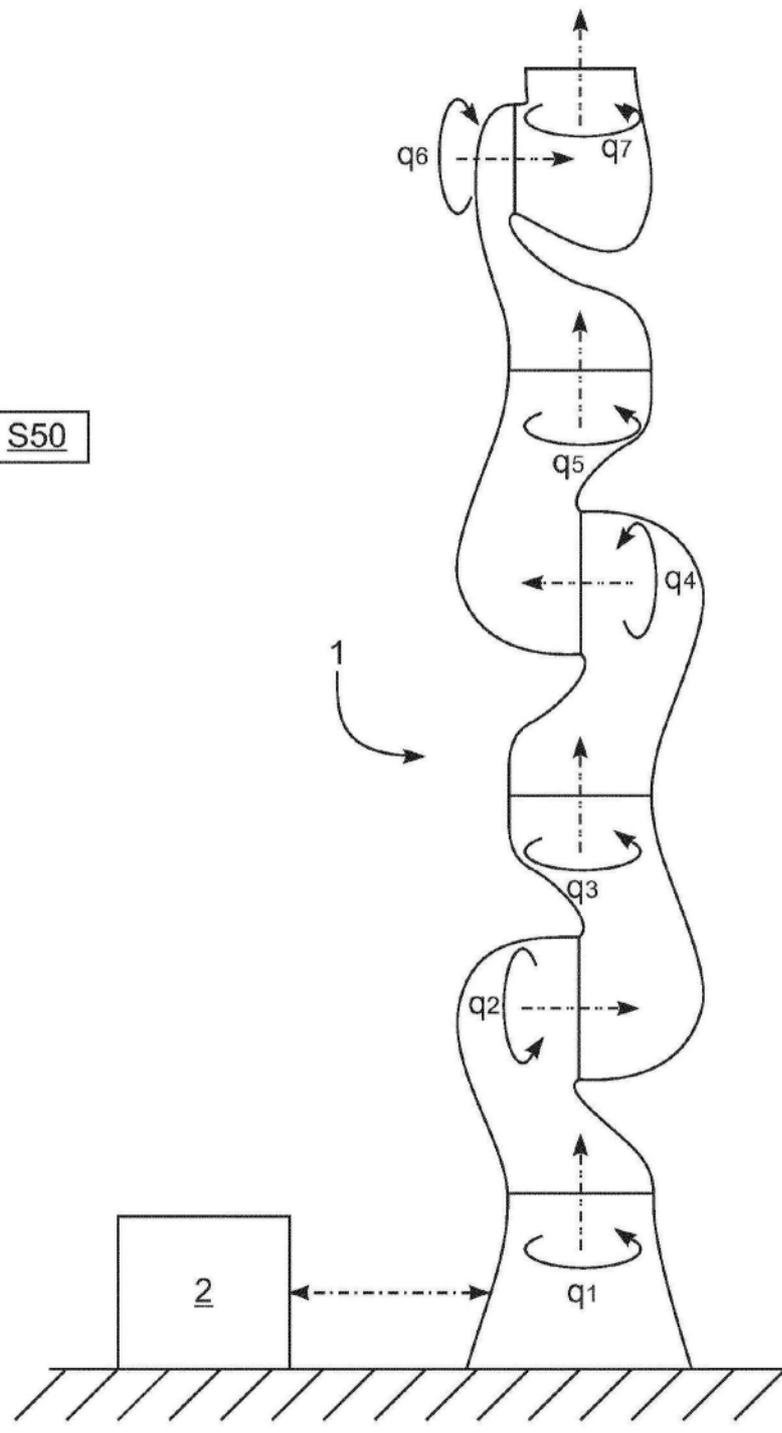


图1