



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114378833 A

(43) 申请公布日 2022.04.22

(21) 申请号 202210284910.1

(22) 申请日 2022.03.23

(71) 申请人 珞石(北京)科技有限公司

地址 100097 北京市海淀区望福园东区北  
京海青曙光房地产开发中心产业用房  
(办公)及邮政支局项目A幢7层1-01

(72) 发明人 马建涛 韩峰涛 虞华 张航

何刚 刘凯 韩建欢 张雷

(74) 专利代理机构 北京瑞盛铭杰知识产权代理

事务所(普通合伙) 11617

代理人 李绩

(51) Int. Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

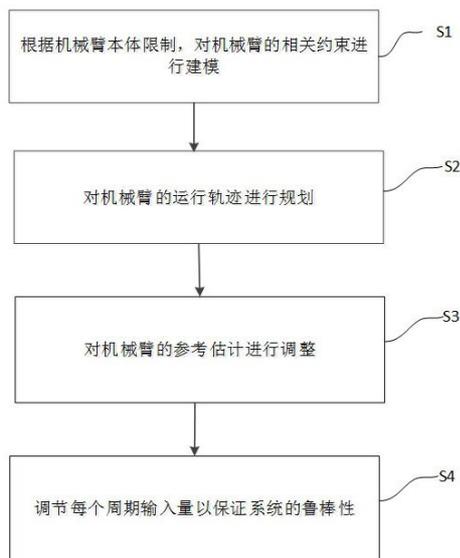
权利要求书4页 说明书8页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法

(57) 摘要

本发明提出了一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,包括:步骤S1,根据机械臂本体限制,对机械臂的相关约束进行建模;步骤S2,对机械臂的运行轨迹进行规划;步骤S3,对机械臂的参考估计进行调整;步骤S4,调节每个周期输入量以保证系统的鲁棒性。



1. 一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,其特征在于,包括如下步骤:  
步骤S1,根据机械臂本体限制,对机械臂的相关约束进行建模,其中,建模过程如下:  
每个关节角度满足约束:

$$q_i \in [q_i^{up}, q_i^{low}] \quad i=1,2 \cdots m;$$

其中,  $q_i, q_i^{up}, q_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角度,关节角度上限和下限;*m*表示关节总个数;

同时,由于电机转速和电机力矩限制,机械臂在运动过程中分别面临速度和力矩约束:

$$\dot{q}_i \in [\dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}] \quad i=1,2 \cdots m;$$

其中,  $\dot{q}_i, \dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角速度,关节角速度上限和下限;*m*表示关节总个数;

$$\tau_i \leq \tau^{up} \quad i=1,2 \cdots m$$

其中,  $\tau_i, \tau^{up}$  分别表示第*i*个关节的力矩,关节力矩上限;*m*表示关节总个数;

步骤S2,对机械臂的运行轨迹进行规划;

步骤S3,对机械臂的参考估计进行调整,其中,

调整后的参考轨迹为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} = \mathbf{x}_{k+1}^{ref} + \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref} = \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} + \Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

其中,  $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref}$  分别表示调整后的参考位置轨迹,参考速度轨迹;

步骤S4,调节每个周期输入量以保证系统的鲁棒性。

2. 如权利要求1所述的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,其特征在于,在所述步骤S2中,

将机械臂的任务采用一系列任务空间的目标点表示,将这些目标点平滑连接,构成机械臂的任务曲线;其中,*x*表示任务曲线上的任意一点,则机械臂的任务曲线和其关节角度的关系表示为:

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q})$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$$

其中,  $\dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \mathbf{J}, \dot{\mathbf{J}}$  分别表示任务向量的一阶导数,二阶导数,机械臂的雅克比矩阵,机械臂的雅克比矩阵一阶导数;

$$\text{另外记 } \mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}$$

其中,*u*表示系统的输入,上式表示将机械臂的角加速度作为系统的输入;

在机械臂运动过程中需要将任务离散化：

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k)$$

其中,  $\mathbf{J}_k = \mathbf{J}(\mathbf{q}_k)$ ,  $\dot{\mathbf{J}}_k = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}_k)$ ,  $k$ 表示第 $k$ 个控制周期,  $T_s$ 表示机械臂控制周期;

同时系统的控制量在面对任务时,需要满足如下的约束:

$$\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k \leq \mathbf{f}_k$$

其中,  $\mathbf{E}_k$ ,  $\mathbf{f}_k$  分别表示任务参数和任务约束。

3. 如权利要求2所述的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,其特征在于,在所述步骤S2中,每一步规划过程如下表示:

S21: 输入参数  $\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k, \mathbf{x}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{\max}, \ddot{\mathbf{x}}^{\max}, \mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$ ;

S22: 计算机械臂硬约束和运动学参数;

S23: 依据约束求解下一步的期望状态;

S24: 依据约束求解系统控制量 $U$ 的可行范围;

S25: 求解下述多约束下的最优解:

(1) 约束:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k)$$

$$\boldsymbol{\tau}_k = \mathbf{B}(\mathbf{q}_k) \mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$$

$$\mathbf{u}_{\inf} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}^{\sup}$$

$$-\boldsymbol{\tau}^{\max} \leq \boldsymbol{\tau}_k \leq \boldsymbol{\tau}^{\max}$$

$$-\dot{\mathbf{x}}^{\max} \leq \dot{\mathbf{x}}_k \leq \dot{\mathbf{x}}^{\max}$$

$$-\ddot{\mathbf{x}}^{\max} \leq \dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k \leq \ddot{\mathbf{x}}^{\max}$$

$$\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k \leq \mathbf{f}_k$$

(2) 优化目标:

$$\min(\dot{\mathbf{x}}_{k+1} - \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_{k+1}^{ref})$$

S26: 刷新输出量:

$$\boldsymbol{\tau}_k = \mathbf{B}(\mathbf{q}_k) \mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$$

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + 0.5T_s^2 \mathbf{u}_k \dot{\mathbf{q}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{k+1} = \dot{\mathbf{q}}_k + T_s \mathbf{u}_k$$

4. 如权利要求1所述的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,其特征在于,在所述步骤S3中,当受到外力干扰时,采用如下的导纳滤波器调整机械臂参考轨迹:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \Delta \dot{\mathbf{x}}_k + T_s \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{f}\mathbf{u}_k - \mathbf{D} \Delta \dot{\mathbf{x}}_k) \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = T_s \Delta \dot{\mathbf{x}}_k + 0.5 T_s^2 \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{f}\mathbf{u}_k - \mathbf{D} \Delta \dot{\mathbf{x}}_k)$$

其中,  $\Delta \mathbf{x}, \Delta \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{f}\mathbf{u}$  分别表示位置调整量, 速度调整量, 机器人质量矩阵, 机器人阻尼矩阵, 外界干扰力;

则调整后的参考轨迹为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} = \mathbf{x}_{k+1}^{ref} + \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref} = \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} + \Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

其中,  $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref}$  分别表示调整后的参考位置轨迹和参考速度轨迹。

5. 如权利要求1所述的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法, 其特征在于, 在所述步骤S4中,

记:  $\mathbf{W} = [\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}]^T$

则在周期性控制中, 有如下关系:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{q}}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5 T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix}$$

针对每一步, 角度、角速度和角加速度需要满足如下关系

$$\phi(p_i, \dot{p}_i) \leq 0$$

$$\phi(p_i, \dot{p}_i) = \begin{cases} p_i + \frac{\dot{p}_i^2}{2\dot{p}_i^{\max}} - p_i^{\max} & \dot{p}_i > 0 \\ p_i - p_i^{\max} & \dot{p}_i \leq 0 \end{cases} \quad i = 0 \cdots m$$

其中,  $i$  表示关节序号,  $m$  表示最大关节序号;

将满足上述约束的集合表示为:

$$\mathbf{I} = \{ \mathbf{W} : \phi(p_i, \dot{p}_i) \leq 0 \}$$

由前述推导可知, 每一步更新时满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A}(\mathbf{W}_k + \Delta \mathbf{S}_k) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{p}}_k + \mathbf{v}_k$$

其中,  $\Delta \mathbf{s}, \mathbf{v}$  分别表示干扰量和模型误差, 将其范围用  $\mathbf{I}\mathbf{s}, \mathbf{I}\mathbf{v}$  表示;

同时将角加速度的约束表示为

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} = \{ \ddot{\mathbf{p}} : \ddot{\mathbf{p}} \leq \ddot{\mathbf{p}}^{\max} \}$$

则每一步的角度和角加速度控制量需要满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} \in \mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}\mathbf{s} \oplus \mathbf{I}\mathbf{v}$$

其中  $\oplus$  表示求解闵可夫斯基和；

另外,角加速度需满足:  $\ddot{\mathbf{q}}_k^{\text{sup}} = \max(\ddot{\mathbf{q}}_k \in (\mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}\mathbf{s} \oplus \mathbf{I}\mathbf{v} \subseteq \mathbf{I}))$

同时力矩需要满足:

$$\tau_{f,\min}(q, \dot{q}) \leq \tau_f(q, \dot{q}) \leq \tau_f^{\max}(q, \dot{q})$$

$$\tau_{\text{inf}} \leq \mathbf{B}(\mathbf{q}_k)\mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \leq \tau^{\text{sup}}$$

$$\tau_{\text{inf}} = -\tau^{\max} + \tau_{f,\min}(q, \dot{q})$$

$$\tau^{\text{sup}} = \tau^{\max} - \tau_f^{\max}(q, \dot{q})$$

其中,  $\mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$  表示机械臂的柯氏力矩阵。

## 一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机器人技术领域,特别涉及一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法。

### 背景技术

[0002] 随着经济社会的发展,机械臂在越来越多的场景中被应用。这使得机械臂面临的工作环境越来越复杂,同时也对机械臂的性能提出了更高的要求。良好的轨迹规划和控制策略是保证机械臂能够在复杂环境中,依然能够高质量完成任务的保障。

[0003] 目前已有的机械臂轨迹规划方案有如下几类:

1. 不考虑约束的运动规划。该方法中不考虑机械臂的性能和环境的约束,采用理想的数学模型输出运动指令,依赖机械臂本身性能保障任务的完成质量。使用该类方法的机械臂往往只能进行简单场景的任务。

[0004] 2. 离线调整运动规划。该类方法为了使得机械臂能够在新的场景中工作,需要实现不断调整机械臂的轨迹,调整机械臂的参数,进而安排机械臂进行任务。使用该类方法,往往需要在任务开始前,反复调整参数和轨迹,工作人员需要进行大量的调试和编程工作,大大降低了工作效率。

[0005] 同时这些方案未将外部的干扰因素考虑进规划控制算法之中,当机械臂受到外部干扰时,难以自我调节,从而降低作业质量。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的旨在至少解决所述技术缺陷之一。

[0007] 为此,本发明的目的在于提出一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法。

[0008] 为了实现上述目的,本发明的实施例提供一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,包括如下步骤:

步骤S1,根据机械臂本体限制,对机械臂的相关约束进行建模,其中,建模过程如下:

每个关节角度满足约束:

$$q_i \in [q_i^{up}, q_i^{low}] \quad i=1,2 \cdots m;$$

其中,  $q_i, q_i^{up}, q_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角度,关节角度上限和下限;*m*表示关节总个数;

同时,由于电机转速和电机力矩限制,机械臂在运动过程中分别面临速度和力矩约束:

$$\dot{q}_i \in [\dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}] \quad i=1,2 \cdots m;$$

其中,  $\dot{q}_i, \dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角速度, 关节角速度上限和下限;  
m表示关节总个数;

$$\tau_i \leq \tau^{up} \quad i = 1, 2 \dots m$$

其中,  $\tau_i, \tau^{up}$  分别表示第*i*个关节的力矩, 关节力矩上限; m表示关节总个数;

步骤S2, 对机械臂的运行轨迹进行规划;

步骤S3, 对机械臂的参考估计进行调整, 其中,

调整后的参考轨迹为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} = \mathbf{x}_{k+1}^{ref} + \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref} = \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} + \Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

其中,  $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref}$  分别表示调整后的参考位置轨迹, 参考速度轨迹;

步骤S4, 调节每个周期输入量以保证系统的鲁棒性。

[0009] 进一步, 在所述步骤S2中,

将机械臂的任务采用一系列任务空间的目标点表示, 将这些目标点平滑连接, 构成机械臂的任务曲线。其中, *x*表示任务曲线上的任意一点, 则机械臂的任务曲线和其关节角度的关系表示为:

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{q})$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}$$

其中,  $\dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \mathbf{J}, \dot{\mathbf{J}}$  分别表示任务向量的一阶导数, 二阶导数, 机械臂的雅克比矩阵, 机械臂的雅克比矩阵一阶导数。

[0010] 另外记  $\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}}$

其中, *u*表示系统的输入, 上式表示将机械臂的角加速度作为系统的输入;

在机械臂运动过程中需要将任务离散化:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5 T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k)$$

其中,  $\mathbf{J}_k = \mathbf{J}(\mathbf{q}_k), \dot{\mathbf{J}}_k = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}_k)$ , *k*表示第*k*个控制周期, *T<sub>s</sub>*表示机械臂控制周期;

同时系统的控制量在面对任务时, 需要满足如下的约束:

$$\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k \leq \mathbf{f}_k$$

其中,  $\mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$  分别表示任务参数和任务约束。

[0011] 进一步, 在所述步骤S2中, 每一步规划过程如下表示:

S21: 输入参数  $\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k, \mathbf{x}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{\max}, \ddot{\mathbf{x}}^{\max}, \mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$ ;

S22: 计算机械臂硬约束和运动学参数;

S23: 依据约束求解下一步的期望状态;

S24: 依据约束求解系统控制量*u*的可行范围;

S25:求解下述多约束下的最优解:

(1) 约束:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k)$$

$$\boldsymbol{\tau}_k = \mathbf{B}(\mathbf{q}_k) \mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$$

$$\mathbf{u}_{\inf} \leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}^{\sup}$$

$$-\boldsymbol{\tau}^{\max} \leq \boldsymbol{\tau}_k \leq \boldsymbol{\tau}^{\max}$$

$$-\dot{\mathbf{x}}^{\max} \leq \dot{\mathbf{x}}_k \leq \dot{\mathbf{x}}^{\max}$$

$$-\ddot{\mathbf{x}}^{\max} \leq \dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k \leq \ddot{\mathbf{x}}^{\max}$$

$$\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k \leq \mathbf{f}_k$$

(2) 优化目标:

$$\min(\dot{\mathbf{x}}_{k+1} - \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_{k+1}^{ref})$$

S26:刷新输出量:

$$\boldsymbol{\tau}_k = \mathbf{B}(\mathbf{q}_k) \mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$$

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + 0.5T_s^2 \mathbf{u}_k \dot{\mathbf{q}}_{k+1} \quad \circ$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{k+1} = \dot{\mathbf{q}}_k + T_s \mathbf{u}_k$$

进一步,在所述步骤S3中,当受到外力干扰时,采用如下的导纳滤波器调整机械臂参考轨迹:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1} = \Delta \dot{\mathbf{x}}_k + T_s \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{f} \mathbf{u}_k - \mathbf{D} \Delta \dot{\mathbf{x}}_k) \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\Delta \mathbf{x}_{k+1} = T_s \Delta \dot{\mathbf{x}}_k + 0.5T_s^2 \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{f} \mathbf{u}_k - \mathbf{D} \Delta \dot{\mathbf{x}}_k)$$

其中,  $\Delta \mathbf{x}, \Delta \dot{\mathbf{x}}, \mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{f} \mathbf{u}$  分别表示位置调整量,速度调整量,机器人质量矩阵,机器人阻尼矩阵,外界干扰力;

则调整后的参考轨迹为

$$\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} = \mathbf{x}_{k+1}^{ref} + \Delta \mathbf{x}_{k+1}$$

$$\tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref} = \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} + \Delta \dot{\mathbf{x}}_{k+1}$$

其中,  $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref}$  分别表示调整后的参考位置轨迹和参考速度轨迹。

[0012] 进一步,在所述步骤S4中,

记:  $\mathbf{W} = [\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}]^T$

则在周期性控制中,有如下关系:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{W}_k + \mathbf{B} \ddot{\mathbf{q}}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix}$$

针对每一步,角度、角速度和角加速度需要满足如下关系

$$\phi(p_i, \dot{p}_i) \leq 0$$

$$\phi(p_i, \dot{p}_i) = \begin{cases} p_i + \frac{\dot{p}_i^2}{2\ddot{p}^{\max}} - p^{\max} & \dot{p}_i > 0 \\ p_i - p_i^{\max} & \dot{p}_i \leq 0 \end{cases} \quad i = 0 \cdots m$$

其中,  $i$  表示关节序号,  $m$  表示最大关节序号;

将满足上述约束的集合表示为:

$$\mathbf{I} = \{ \mathbf{W} : \phi(p_i, \dot{p}_i) \leq 0 \}$$

由前述推导可知,每一步更新时满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A}(\mathbf{W}_k + \Delta \mathbf{S}_k) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{p}}_k + \mathbf{v}_k$$

其中,  $\Delta \mathbf{s}$ ,  $\mathbf{v}$  分别表示干扰量和模型误差,将其范围用  $\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_v$  表示;

同时将角加速度的约束表示为

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} = \{ \ddot{\mathbf{p}} : \ddot{\mathbf{p}} \leq \ddot{\mathbf{p}}^{\max} \}$$

则每一步的角度和角加速度控制量需要满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} \in \mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}_s \oplus \mathbf{I}_v$$

其中  $\oplus$  表示求解闵可夫斯基和;

另外,角加速度需满足:  $\ddot{\mathbf{q}}_k^{\sup} = \max(\ddot{\mathbf{q}}_k \in (\mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}_s \oplus \mathbf{I}_v \subseteq \mathbf{I}))$

同时力矩需要满足:

$$\tau_{f,\min}(q, \dot{q}) \leq \tau_f(q, \dot{q}) \leq \tau_f^{\max}(q, \dot{q})$$

$$\tau_{\inf} \leq \mathbf{B}(\mathbf{q}_k)\mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \leq \tau^{\sup}$$

$$\tau_{\inf} = -\tau^{\max} + \tau_{f,\min}(q, \dot{q})$$

$$\tau^{\sup} = \tau^{\max} - \tau_f^{\max}(q, \dot{q})$$

其中,  $\mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$  表示机械臂的柯氏力矩阵。

[0013] 根据本发明实施例的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,提出基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法、轨迹与力矩规划算子、鲁棒输入调节算子等技术点。本发明实现机械臂自动依据外界环境调整规划和控制输入量,省去的人工调整路径的繁琐;将约束分为机械臂硬约束和任务约束,将任务与指令直接联系起来。

[0014] 本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变

得明显,或通过本发明的实践了解到。

### 附图说明

[0015] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

图1为根据本发明实施例的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法的流程图。

### 具体实施方式

[0016] 下面详细描述本发明的实施例,所述实施例的示例在附图中示出,其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0017] 本发明提出一种基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,实现将约束优化和轨迹规划相结合的方法进行机械臂的运动规划。在该方法中,机械臂的运动跟踪于一条不断更新矫正的参考轨迹,同时结合了反应控制,不断调整整个控制系统的输入量,保证机械臂即使在面对复杂环境时也能高质量地作业。

[0018] 如图1所示,本发明实施例的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,包括如下步骤:

步骤S1,根据机械臂本体限制,对机械臂的相关约束进行建模。

[0019] 具体的,依据机械臂本体限制,将相关约束建模如下:

首先,每个关节角度满足约束:

$$q_i \in [q_i^{up}, q_i^{low}] \quad i = 1, 2 \dots m \quad (1)$$

其中,  $q_i, q_i^{up}, q_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角度,关节角度上限和下限;*m*表示关节总个数。

[0020] 同时,由于电机转速和电机力矩限制,机械臂在运动过程中分别面临速度和力矩约束:

$$\dot{q}_i \in [\dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}] \quad i = 1, 2 \dots m \quad (2)$$

其中,  $\dot{q}_i, \dot{q}_i^{up}, \dot{q}_i^{low}$  分别表示第*i*个关节的关节角速度,关节角速度上限和下限;*m*表示关节总个数。

$$\tau_i \leq \tau^{up} \quad i = 1, 2 \dots m \quad (3)$$

其中,  $\tau_i, \tau^{up}$  分别表示第*i*个关节的力矩,关节力矩上限;*m*表示关节总个数。

[0022] 步骤S2,对机械臂的运行轨迹进行规划。

[0023] 在本步骤中,机械臂的任务可以用一系列任务空间的目标点表示,将这些目标点平滑连接构成任务曲线。*X*表示任务曲线上的任意一点,则机械臂的任务曲线和其关节角度的关系可以表示为:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= \mathbf{f}(\mathbf{q}) \\
\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \\
\ddot{\mathbf{x}} &= \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}
\end{aligned} \tag{4}$$

其中,  $\dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, \mathbf{J}, \dot{\mathbf{J}}$  分别表示任务向量的一阶导数, 二阶导数, 机械臂的雅克比矩阵, 机械臂的雅克比矩阵一阶导数。

[0024] 另外记

$$\mathbf{u} = \ddot{\mathbf{q}} \tag{5}$$

其中U表示系统的输入, 上式表示将机械臂的角加速度作为系统的输入。

[0025] 在机械臂运动过程中需要将任务离散化:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5 T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1} \\
\dot{\mathbf{x}}_{k+1} &= \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k)
\end{aligned} \tag{6}$$

其中,  $\mathbf{J}_k = \mathbf{J}(\mathbf{q}_k), \dot{\mathbf{J}}_k = \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q}_k)$ , k表示第k个控制周期,  $T_s$ 表示机械臂控制周期。

[0026] 同时系统的控制量在面对任务时, 需要满足如下的约束:

$$\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k \leq \mathbf{f}_k \tag{7}$$

其中,  $\mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$  分别表示任务参数和任务约束

则每一步规划过程可以如下表示:

输入:  $\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k, \mathbf{x}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{\max}, \ddot{\mathbf{x}}^{\max}, \mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$ ; 输出:  $\mathbf{q}_{k+1}, \dot{\mathbf{q}}_{k+1}, \boldsymbol{\tau}_k$

具体步骤如下:

S21: 输入参数  $\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k, \mathbf{x}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{trg}, \dot{\mathbf{x}}^{\max}, \ddot{\mathbf{x}}^{\max}, \mathbf{E}_k, \mathbf{f}_k$ ;

S22: 计算机械臂硬约束和运动学参数, 包括: 雅克比矩阵, 任务向量;

S23: 依据约束求解下一步的期望状态;

S24: 依据约束求解系统控制量U的可行范围;

S25: 求解下述多约束下的最优解:

(1) 约束:

$$\begin{aligned}
\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{x}_k + T_s \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + 0.5 T_s^2 (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \dot{\mathbf{x}}_{k+1} \\
\dot{\mathbf{x}}_{k+1} &= \mathbf{J}_k \dot{\mathbf{q}}_k + T_s (\dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k) \\
\boldsymbol{\tau}_k &= \mathbf{B}(\mathbf{q}_k) \mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \\
\mathbf{u}_{\inf} &\leq \mathbf{u}_k \leq \mathbf{u}^{\sup} \\
-\boldsymbol{\tau}^{\max} &\leq \boldsymbol{\tau}_k \leq \boldsymbol{\tau}^{\max} \\
-\dot{\mathbf{x}}^{\max} &\leq \dot{\mathbf{x}}_k \leq \dot{\mathbf{x}}^{\max} \\
-\ddot{\mathbf{x}}^{\max} &\leq \dot{\mathbf{J}}_k \dot{\mathbf{q}}_k + \mathbf{J}_k \mathbf{u}_k \leq \ddot{\mathbf{x}}^{\max} \\
\mathbf{E}_k \mathbf{u}_k &\leq \mathbf{f}_k
\end{aligned} \tag{8}$$

(2) 优化目标:

$$\min(\dot{\mathbf{x}}_{k+1} - \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_{k+1}^{ref}) \tag{9}$$

S26:刷新输出量。

$$\boldsymbol{\tau}_k = \mathbf{B}(\mathbf{q}_k)\mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) + \boldsymbol{\tau}_f(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$$

$$\mathbf{q}_{k+1} = \mathbf{q}_k + 0.5T_s^2\mathbf{u}_k\dot{\mathbf{q}}_{k+1}$$

$$\dot{\mathbf{q}}_{k+1} = \dot{\mathbf{q}}_k + T_s\mathbf{u}_k$$

[0027] 步骤S3,对机械臂的参考估计进行调整。

[0028] 在复杂环境中,机械臂运动时不可避免地受到外力干扰。由于外力干扰时,需要调整机械臂的运动指令,使得机械臂的运动保持平稳。

[0029] 当受到外力干扰时,采用如下的导纳滤波器调整机械臂参考轨迹:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{\mathbf{x}}_{k+1} &= \Delta\dot{\mathbf{x}}_k + T_s\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}\mathbf{u}_k - \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_k)\Delta\mathbf{x}_{k+1} \\ \Delta\mathbf{x}_{k+1} &= T_s\Delta\dot{\mathbf{x}}_k + 0.5T_s^2\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}\mathbf{u}_k - \mathbf{D}\Delta\dot{\mathbf{x}}_k)\end{aligned}\quad (11)$$

其中  $\Delta\mathbf{x}, \Delta\dot{\mathbf{x}}, \mathbf{M}, \mathbf{D}, \mathbf{f}\mathbf{u}$  分别表示位置调整量,速度调整量,机器人质量矩阵,机器人阻尼矩阵,外界干扰力。

[0030] 则调整后的参考轨迹为

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} &= \mathbf{x}_{k+1}^{ref} + \Delta\mathbf{x}_{k+1} \\ \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref} &= \dot{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref} + \Delta\dot{\mathbf{x}}_{k+1}\end{aligned}\quad (12)$$

其中  $\tilde{\mathbf{x}}_{k+1}^{ref}, \tilde{\dot{\mathbf{x}}}_{k+1}^{ref}$  分别表示调整后的参考位置轨迹和参考速度轨迹。

[0031] 步骤S4,调节每个周期输入量以保证系统的鲁棒性。

首先,记:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}]^T \quad (13)$$

则在周期性控制中,有如下关系:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{q}} \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0.5T_s^2 \\ T_s \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (15)$$

其中,针对每一步,角度、角速度和角加速度需要满足如下关系:

$$\begin{aligned}\phi(p_i, \dot{p}_i) &\leq 0 \\ \phi(p_i, \dot{p}_i) &= \begin{cases} p_i + \frac{\dot{p}_i^2}{2\ddot{p}^{\max}} - p^{\max} & \dot{p}_i > 0 \\ p_i - p_i^{\max} & \dot{p}_i \leq 0 \end{cases} \quad i = 0 \dots m\end{aligned}\quad (16)$$

其中,  $i$  表示关节序号,  $m$  表示最大关节序号

将满足上述约束的集合表示为:

$$\mathbf{I} = \{\mathbf{W} : \phi(p_i, \dot{p}_i) \leq 0\} \quad (17)$$

由前述推导可知,每一步更新时满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{A}(\mathbf{W}_k + \Delta \mathbf{S}_k) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{p}}_k + \mathbf{v}_k \quad (18)$$

其中,  $\Delta \mathbf{s}, \mathbf{v}$  分别表示干扰量和模型误差,将其范围用  $\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_v$  表示。

[0032] 同时将角加速度的约束表示为

$$\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} = \{\ddot{\mathbf{p}} : \ddot{\mathbf{p}} \leq \ddot{\mathbf{p}}^{\max}\} \quad (19)$$

则每一步的角度和角加速度控制量需要满足:

$$\mathbf{W}_{k+1} \in \mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}_s \oplus \mathbf{I}_v \quad (20)$$

其中  $\oplus$  表示求解闵可夫斯基和。

[0033] 另外,角加速度需满足:

$$\ddot{\mathbf{q}}_k^{\sup} = \max(\ddot{\mathbf{q}}_k \in (\mathbf{A}\mathbf{W}_k + \mathbf{B}\mathbf{I}\ddot{\mathbf{p}} \oplus \mathbf{A}\mathbf{I}_s \oplus \mathbf{I}_v \subseteq \mathbf{I})) \quad (21)$$

同时力矩需要满足:

$$\begin{aligned} \tau_{f,\min}(q, \dot{q}) &\leq \tau_f(q, \dot{q}) \leq \tau_f^{\max}(q, \dot{q}) \\ \tau_{\inf} &\leq \mathbf{B}(\mathbf{q}_k)\mathbf{u}_k + \mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k) \leq \tau^{\sup} \\ \tau_{\inf} &= -\tau^{\max} + \tau_{f,\min}(q, \dot{q}) \\ \tau^{\sup} &= \tau^{\max} - \tau_f^{\max}(q, \dot{q}) \end{aligned} \quad (22)$$

其中,  $\mathbf{h}(\mathbf{q}_k, \dot{\mathbf{q}}_k)$  表示机械臂的柯氏力矩阵

依据上述方法对每个控制周期的角度、角速度和角加加速,关节力矩进行调节保证系统鲁棒性。

根据本发明实施例的基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法,提出基于鲁棒约束控制的机械臂轨迹规划方法、轨迹与力矩规划算子、鲁棒输入调节算子等技术点。本发明实现机械臂自动依据外界环境调整规划和控制输入量,省去的人工调整路径的繁琐;将约束分为机械臂硬约束和任务约束,将任务与指令直接联系起来。

[0034] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0035] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。本发明的范围由所附权利要求及其等同限定。

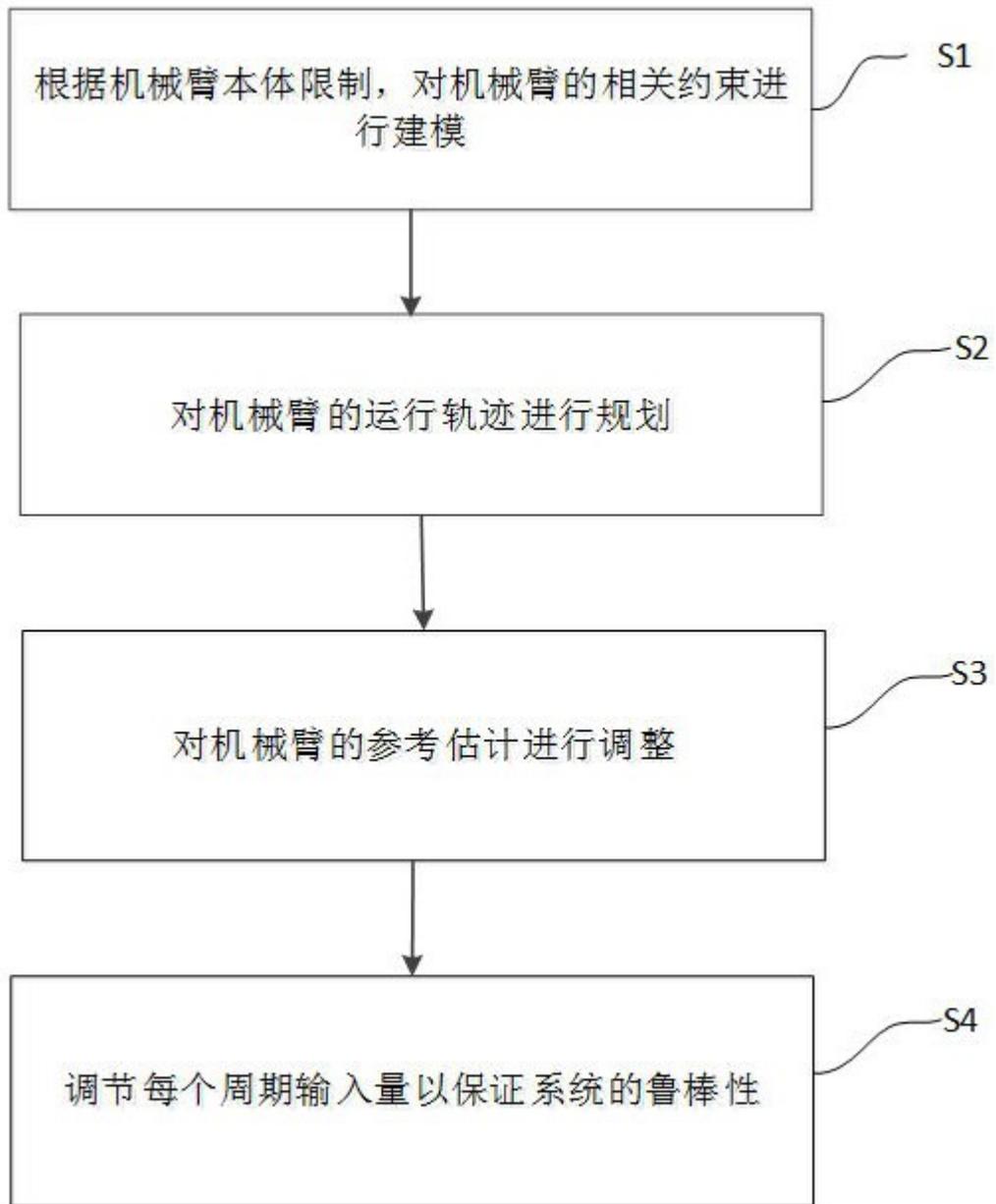


图1