



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116728401 B

(45) 授权公告日 2025. 05. 06

(21) 申请号 202310346250.X

(22) 申请日 2023.03.31

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 116728401 A

(43) 申请公布日 2023.09.12

(73) 专利权人 人工智能与数字经济广东省实验室(广州)

地址 510330 广东省广州市海珠区新港东路2429号首层自编051房

专利权人 华南理工大学

(72) 发明人 张智军 张铭洋 罗亚梅 陈凯全

(74) 专利代理机构 广州科粤专利商标代理有限公司 44001

专利代理师 邓潮彬

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 106945041 A, 2017.07.14

CN 108714894 A, 2018.10.30

审查员 余伊兰

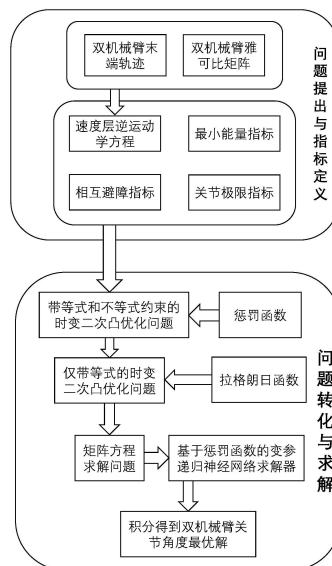
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

## (54) 发明名称

一种冗余度双机械臂相互避障方法、装置及存储介质

## (57) 摘要

本发明公开了一种冗余度双机械臂相互避障方法、装置及存储介质,该方法包括通过冗余度双机械臂各自的末端轨迹,在速度层上建立机械臂逆运动学方程并增加最小能量、关节极限和相互避障指标;将逆运动学方程和各项指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题;通过定义惩罚函数将上述问题转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题;再通过拉格朗日方程将其转化为时变矩阵方程;将矩阵方程通过变参收敛微分神经网络进行求解;最后将求得的在速度层上的最优解进行积分,得到关节角度的最优解。本发明能够让双机械臂能够顺利完成规划好的运动任务,有效解决冗余度双机械臂相互避障问题,具有计算效率高、实时性强,鲁棒性好,精度高的优点。



1. 一种冗余度双机械臂相互避障方法,其特征在于,包括:

根据双机械臂的期望末端轨迹和双机械臂雅可比矩阵,在速度层上建立机械臂逆运动学方程;

在所建立的机械臂逆运动学方程基础上增加约束条件指标,所述约束条件指标包括最小能量指标、关节极限指标和相互避障指标;

将机械臂逆运动学方程和约束条件指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题;

将时变二次凸优化问题通过定义惩罚函数转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题;

将仅受等式约束的时变二次凸优化问题通过拉格朗日方程转化为时变矩阵方程;

将时变矩阵方程通过基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络进行求解,得到冗余度双机械臂在速度层上的最优解;

将所得到的冗余度双机械臂在速度层上的最优解进行积分,得到关节角度的最优解。

2. 如权利要求1所述的冗余度双机械臂相互避障方法,其特征在于,所述机械臂逆运动学方程为:

$$f(\theta) = r;$$

其中, $r$ 为双机械臂期望末端轨迹, $f(\cdot)$ 为关于机械臂关节角度的非线性方程;对方程两边求导得到速度层上的逆运动学方程: $J(\theta)\dot{\theta} = \dot{r}$ ;

其中, $J(\theta)$ 为机械臂的雅可比矩阵, $\dot{\theta}$ 和 $\dot{r}$ 分别为机械臂关节角度和末端轨迹关于时间的导数。

3. 如权利要求2所述的冗余度双机械臂相互避障方法,其特征在于,所述最小能量指标为 $\min \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta}$ , $T$ 为矩阵转置;所述关节极限指标为 $\dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$ ;

所述相互避障指标为 $J_N \dot{\theta} \leq \beta$ ,其中 $J_N$ 表示相互避障指标中双机械臂中每一枝节之间最小距离的矢量, $\beta$ 表示反向速度向量。

4. 如权利要求3所述的的冗余度双机械臂相互避障方法,其特征在于,所述将机械臂逆运动学方程和约束条件指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题为:最小化 $\frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta}$ ,受约束于 $J\dot{\theta} = \dot{r}$ ,  $\dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$ ,  $J_N \dot{\theta} \leq \beta$ 。

5. 如权利要求4所述的的冗余度双机械臂相互避障方法,其特征在于,所述将时变二次凸优化问题通过定义惩罚函数转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题包括:

定义一个惩罚函数 $P(\dot{\theta}(t)) = p \sum_{i=1}^h M(N_i(t))$ ,其中 $p$ 表示非负惩罚因子, $h$ 表示不等式约束方程的数量, $M(t) = e^{-\sigma N_i(\dot{\theta})}$ , $\sigma$ 是一个用于决定惩罚函数 $P(\dot{\theta})$ 一致性的参数,

$$N_i(t) = B_i(t) - A_i(t)\dot{\theta}(t), \quad A(t) = \begin{bmatrix} U(t) \\ I \\ -I \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} \beta(t) \\ \dot{\theta}^+(t) \\ -\dot{\theta}^-(t) \end{bmatrix},$$

将受等式和不等式约束的二次凸优化问题转化为仅受等式约束的二次凸优化问题,具体为:最小化 $\frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta}(t))$ ,受

约束于  $J\dot{\theta} - \dot{r}$ ;  $I$  为单位矩阵。

6. 如权利要求5所述的冗余度双机械臂相互避障方法, 其特征在于, 所述将仅受等式约束的时变二次凸优化问题通过拉格朗日方程转化为时变矩阵方程包括:

定义拉格朗日函数:  $L(\dot{\theta}, \lambda, t) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta}) + \lambda^T (J\dot{\theta} - \dot{r})$ , 其中  $\lambda$  拉格朗日乘子;

通过两个偏微分方程, 即  $\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t) / \partial \dot{\theta} = \dot{\theta} + J^T \lambda p \sigma \sum_{i=1}^h (e^{-\sigma N_i} \cdot A_i^T) = 0$  和  $\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t) / \partial \lambda = J\dot{\theta} - \dot{r} = 0$ , 构造如下时变矩阵方程:  $Ey = e$ , 其中

$$E(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & J^T(t) \\ J(t) & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix}, \quad e(t) = \begin{bmatrix} -p \sigma \sum_{i=1}^h (e^{-\sigma N_i(t)} A_i^T(t)) \\ \alpha(t) \end{bmatrix}.$$

7. 如权利要求6所述的冗余度双机械臂相互避障方法, 其特征在于, 所述将时变矩阵方程通过基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络进行求解具体为:  $Q\dot{y} = -Sy - \gamma e^t \Psi(Ey - e) + u$ , 其中  $\gamma$  为表示神经网络收敛速率的常数,  $\Psi(\cdot)$  表示神经网络的激活函数, 由此可以求得时变矩阵方程  $Ey = e$  的最优解  $y^*$ 。

8. 如权利要求7所述的冗余度双机械臂相互避障方法, 其特征在于, 所述将所得到的冗余度双机械臂在速度层上的最优解进行积分, 得到关节角度的最优解为: 由  $y^*$  的前  $n$  项得到二次规划问题的最优解  $x^*$ , 对  $x^*$  积分得到冗余度双机械臂的关节角度最优解  $\theta^*$ 。

9. 一种冗余度双机械臂相互避障装置, 包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序, 其特征在于, 所述处理器执行所述计算机程序时实现如权利要求1至8任一所述方法的步骤。

10. 一种计算机可读存储介质, 所述计算机可读存储介质存储有计算机程序, 其特征在于, 所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至8任一所述方法的步骤。

## 一种冗余度双机械臂相互避障方法、装置及存储介质

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机器人控制技术领域,具体涉及一种冗余度双机械臂相互避障方法、装置及存储介质。

### 背景技术

[0002] 冗余度双机械臂中每一机械臂的自由度数都多于完成任务所必须的自由度数。由于具有更多自由度,冗余度机械臂可以在完成末端执行器主要任务的基础上,完成如躲避障碍物,关节极限位置等额外任务。在双机械臂的相互避障中,每一机械臂将另一机械臂作为障碍物进行躲避,从而使双机械臂在完成协作任务的整个周期中,在任意位置均不发生碰撞。如果双机械臂的路径规划不考虑相互避障的问题,在运动过程中很有可能会导致机械臂之间的碰撞,进而导致任务突然终止,甚至引起机械臂的损坏。因此对双机械臂相互避障的研究很有意义。

[0003] 传统的解决冗余度双机械臂逆运动学问题方法是基于伪逆的方法,此方法计算时间长,实时性差,问题约束单一,在实际机械臂运动规划的应用中受很大的制约。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于克服上述现有技术的不足,提供一种冗余度双机械臂相互避障方法、装置及存储介质,以有效解决冗余度双机械臂相互避障问题。

[0005] 为实现上述目的,本发明的技术方案是:

[0006] 第一方面,本发明提供一种冗余度双机械臂相互避障方法包括:

[0007] 根据双机械臂的期望末端轨迹和双机械臂雅可比矩阵,在速度层上建立机械臂逆运动学方程;

[0008] 在所建立的机械臂逆运动学方程基础上增加约束条件指标,所述约束条件指标包括最小能量指标、关节极限指标和相互避障指标;

[0009] 将机械臂逆运动学方程和约束条件指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题;

[0010] 将时变二次凸优化问题通过定义惩罚函数转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题;

[0011] 将仅受等式约束的时变二次凸优化问题通过拉格朗日方程转化为时变矩阵方程;

[0012] 将时变矩阵方程通过基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络进行求解,得到冗余度双机械臂在速度层上的最优解;

[0013] 将所得到的冗余度双机械臂在速度层上的最优解进行积分,得到关节角度的最优解。

[0014] 进一步地,所述机械臂逆运动学方程为:

[0015]  $f(\theta) = r$ ;

[0016] 其中, $r$ 为双机械臂期望末端轨迹, $f(\cdot)$ 为关于机械臂关节角度的非线性方程;对

方程两边求导得到速度层上的逆运动学方程:  $J(\theta)\dot{\theta} = \dot{r}$ ;

[0017] 其中,  $J(\theta)$  为机械臂的雅克比矩阵,  $\dot{\theta}$  和  $\dot{r}$  分别为机械臂关节角度和末端轨迹关于时间的导数。

[0018] 进一步地, 所述最小能量指标为  $\min \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta}$ ; 所述关节极限指标为  $\dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$ ;

[0019] 所述相互避障指标为  $J_N \dot{\theta} \leq \beta$ , 其中  $J_N$  表示相互避障指标中双机械臂中每一枝节之间最小距离的矢量,  $\beta$  表示反向速度向量。

[0020] 进一步地, 所述将机械臂逆运动学方程和约束条件指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题为: 最小化  $\frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta}$ , 受约束于  $J\dot{\theta} = \dot{r}$ ,  $\dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$ ,  $J_N \dot{\theta} \leq \beta$ 。

[0021] 进一步地, 所述将时变二次凸优化问题通过定义惩罚函数转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题包括:

[0022] 定义一个惩罚函数  $P(\dot{\theta}(t)) = p \sum_{i=1}^h M(N_i(t))$ , 其中  $p$  表示非负惩罚因子,  $h$  表示不等式约束方程的数量,  $M(t) = e^{-\sigma N_i(\dot{\theta})}$ ,  $\sigma$  是一个用于决定惩罚函数  $P(\dot{\theta})$  一致性的参数,

$$N_i(t) = B_i(t) - A_i(t)\dot{\theta}(t), \quad A(t) = \begin{bmatrix} U(t) \\ I \\ -I \end{bmatrix}, \quad B(t) = \begin{bmatrix} \beta(t) \\ \dot{\theta}^+(t) \\ -\dot{\theta}^-(t) \end{bmatrix},$$

将受等式和不等式约束的二次凸优化问题转化为仅受等式约束的二次凸优化问题, 具体为: 最小化  $\frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta}(t))$ , 受约束于  $J\dot{\theta} = \dot{r}$ 。

[0023] 进一步地, 所述将仅受等式约束的时变二次凸优化问题通过拉格朗日方程转化为时变矩阵方程包括:

[0024] 定义拉格朗日函数:  $L(\dot{\theta}, \lambda, t) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta}) + \lambda^T (J\dot{\theta} - \dot{r})$ , 其中  $\lambda$  拉格朗日乘子;

[0025] 通过两个偏微分方程, 即  $\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t) / \partial \dot{\theta} = \dot{\theta} + J^T \lambda p \sigma \sum_{i=1}^h (e^{-\sigma N_i} \cdot A_i^T) = 0$  和  $\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t) / \partial \lambda = J\dot{\theta} - \dot{r} = 0$ , 构造如下时变矩阵方程:  $Ey = e$ , 其中

$$E(t) = \begin{bmatrix} I & J^T(t) \\ J(t) & 0 \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix}, \quad e(t) = \begin{bmatrix} -p \sigma \sum_{i=1}^h (e^{-\sigma N_i(t)} A_i^T(t)) \\ \alpha(t) \end{bmatrix}.$$

[0027] 进一步地, 所述将时变矩阵方程通过基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络进行求解具体为:  $Q\dot{y} = -Sy - \gamma e^t \Psi(Ey - e) + u$ , 其中  $\gamma$  为表示神经网络收敛速率的常数,  $\Psi(\cdot)$  表示神经网络的激活函数, 由此可以求得时变矩阵方程  $Ey = e$  的最优解  $y^*$ 。

[0028] 进一步地, 所述将所得到的冗余度双机械臂在速度层上的最优解进行积分, 得到关节角度的最优解为: 由  $y^*$  的前  $n$  项得到二次规划问题的最优解  $x^*$ , 对  $x^*$  积分得到冗余度双机械臂的关节角度最优解  $\theta^*$ 。

[0029] 第二方面, 本发明提供一种冗余度双机械臂相互避障装置, 包括存储器、处理器以及存储在所述存储器中并可在所述处理器上运行的计算机程序, 所述处理器执行所述计算机程序时实现如上任一所述方法的步骤。

[0030] 第三方面,本发明提供一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如上任一所述方法的步骤。

[0031] 本发明与现有技术相比,其有益效果在于:

[0032] 本发明通过在机械臂逆运动学方程基础上增加约束条件指标能够让双机械臂能够顺利完成规划好的运动任务,有效解决冗余度双机械臂相互避障问题,避免机械臂的损坏。本发明采用神经网络求解器来进行求解,计算速度快,效率更高;与原来的基于线性变分不等式的原始对偶神经网络求解器相比,本发明采用新型的基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络求解器,收敛速度更快,鲁棒性更好。

## 附图说明

[0033] 图1为本发明实施例1提供的冗余度双机械臂相互避障方法的流程图;

[0034] 图2为实现本发明的冗余度双机械臂相互避障与未相互避障对比的示意图;

[0035] 图3为本发明实施例2提供的冗余度双机械臂相互避障装置的组成示意图。

## 具体实施方式

[0036] 下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步的说明。

[0037] 实施例1:

[0038] 参阅图1所示,本实施例提供的冗余度双机械臂相互避障方法主要包括问题提出与指标定义,问题转化与求解两大部分组成。

[0039] 该题提出与指标定义部分主要包括如下步骤:

[0040] 根据双机械臂的期望末端轨迹和双机械臂雅可比矩阵,在速度层上建立机械臂逆运动学方程;

[0041] 在所建立的机械臂逆运动学方程基础上增加约束条件指标,所述约束条件指标包括最小能量指标、关节极限指标和相互避障指标。

[0042] 如此,通过在机械臂逆运动学方程基础上增加约束条件指标能够让双机械臂能够顺利完成规划好的运动任务,有效解决冗余度双机械臂相互避障问题,避免机械臂的损坏,具体效果如图2所示。

[0043] 该问题转化与求解部分则包括如下步骤:

[0044] 将机械臂逆运动学方程和约束条件指标转化为受等式和不等式约束的时变二次凸优化问题;

[0045] 将时变二次凸优化问题通过定义惩罚函数转化为仅受等式约束的时变二次凸优化问题;

[0046] 将仅受等式约束的时变二次凸优化问题通过拉格朗日方程转化为时变矩阵方程;

[0047] 将时变矩阵方程通过基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络进行求解,得到冗余度双机械臂在速度层上的最优解;

[0048] 将所得到的冗余度双机械臂在速度层上的最优解进行积分,得到关节角度的最优解。

[0049] 由此可见,在问题转化与求解部分中,本发明采用神经网络求解器来进行求解,计算速度快,效率更高;与原来的基于线性变分不等式的原始对偶神经网络求解器相比,本发

明采用新型的基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络求解器,收敛速度更快,鲁棒性更好。

[0050] 在一具体实施例中,上述的机械臂逆运动学方程为:

$$[0051] \quad f(\theta) = r;$$

[0052] 其中, $r$ 为双机械臂期望末端轨迹, $f(\cdot)$ 为关于机械臂关节角度的非线性方程,该方程表示由已知的末端位置,求机械臂各个关节对应时刻的位置,由于方程的非线性,方程具有多种解,所以需要在速度层上考虑问题。求方程两边关于时间的导数得: $J(\theta)\dot{\theta} = \dot{r}$ ;

[0053] 其中, $J(\theta)$ 为机械臂的雅可比矩阵, $\dot{\theta}$ 和 $\dot{r}$ 分别为机械臂关节角度和末端轨迹关于时间的导数。

[0054] 为了去除冗余度双机械臂多余的运动动作,最小化运动过程中的能量损耗,最小能量指标需要被考虑。而机械臂运动中的能量消耗与其平均关节速度直接相关,因此冗余度双机械臂的最小能量指标指标,即为最小化其关节平均速度 $\frac{1}{2}\|\dot{\theta}\|_2^2$ ,写成最小值约束的形式为

$$[0055] \quad \min \quad \frac{1}{2}\dot{\theta}^T \dot{\theta}$$

[0056] 实际应用中,由于电机本身的限制,冗余度双机械臂每一关节的关节角度和关节速度均有其极限值,机械臂关节速度极限写成不等式约束的形式如下

$$[0057] \quad \dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$$

[0058] 冗余度双机械臂协作运动过程中必须考虑相互避障的问题,否则机械臂在运动过程中相互碰撞会导致任务突然终止甚至机械臂的损坏。冗余度双机械臂相互避障的大致原理如下:1)利用基于三维空间线段距离测量的方法,使用传感器测量出两机械臂之间的最小距离;2)人为设置外部安全范围 $d_1$ 和内部安全范围 $d_2$ ,根据机械臂之间最小距离与两个安全范围之间的关系调节相应的关节速度以达到相互避障的目的。根据此原理设计的不等式约束如下

$$[0059] \quad J_N \dot{\theta} \leq \beta$$

[0060] 其中, $J_N = \overrightarrow{r_{\mathcal{P}_E}} \diamond J_{\mathcal{P}}$ , $\overrightarrow{r_{\mathcal{P}_E}}$ 表示双机械臂中每一枝节之间最小距离的矢量, $J_{\mathcal{P}}$ 表示机械臂上最小距离点位置的雅可比矩阵, $\beta$ 表示反向速度向量。

[0061] 根据上述指标条件,通过二次规划的方法来解决冗余度双机械臂的相互避障问题,设计如下统一的二次规划问题,

$$\min \quad \frac{1}{2}\dot{\theta}^T \dot{\theta}$$

$$[0062] \quad \text{s.t.} \quad J\dot{\theta} = \dot{r}$$

$$\dot{\theta}^- \leq \dot{\theta} \leq \dot{\theta}^+$$

$$J_N \dot{\theta} \leq \beta$$

[0063] 为了能够使用变参递归神经网络求解上述二次规划问题,这里定义一个惩罚函数:

$$P(\dot{\theta}) = p \sum_{i=1}^h M(N_i)$$

[0064]

$$M(t) = e^{-\sigma N_i}$$

$$N_i = B_i - A_i \dot{\theta}$$

[0065] 其中,  $p$  表示非负惩罚因子,  $h$  表示不等式约束方程的数量,  $\sigma$  是一个用于决定惩罚函数  $P(\dot{\theta})$  一致性的参数,

$$[0066] \quad A(t) = \begin{bmatrix} J_N \\ I \\ -I \end{bmatrix}, B(t) = \begin{bmatrix} \beta \\ \dot{\theta}^+ \\ -\dot{\theta}^- \end{bmatrix}$$

[0067] 将上述具有等式及不等式约束的二次规划问题转化为以下仅含等式约束的二次规划问题

$$[0068] \quad \min \quad \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta})$$

$$\text{s.t. } J\dot{\theta} = \dot{r}$$

[0069] 基于上述二次规划问题, 构造拉格朗日函数如下:

$$[0070] \quad L(\dot{\theta}, \lambda, t) = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T \dot{\theta} + P(\dot{\theta}) + \lambda^T (J\dot{\theta} - \dot{r})$$

[0071] 其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘子, 对等式求偏导得:

$$[0072] \quad \begin{cases} \frac{\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t)}{\partial \dot{\theta}} = \dot{\theta} + J^T \lambda p \sigma \sum_{i=1}^h (e^{-\sigma N_i} \cdot A_i^T) = 0 \\ \frac{\partial L(\dot{\theta}, \lambda, t)}{\partial \lambda} = J\dot{\theta} - \dot{r} = 0 \end{cases}$$

[0073] 方程组可以表示成以下矩阵方程

$$[0074] \quad E y = e$$

[0075] 为了求解矩阵方程, 定义误差函数

$$[0076] \quad \xi(t) = E y - e$$

[0077] 其中

$$[0078] \quad E(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & J^T(t) \\ J(t) & \mathbf{0} \end{bmatrix}, y(t) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix}, e(t) = \begin{bmatrix} -p\sigma \sum_{i=1}^{h_p} (e^{-\sigma N_i(t)} A_i^T(t)) \\ \alpha(t) \end{bmatrix}$$

[0079] 通过神经动力学方法, 设计误差有如下方式收敛为零

$$[0080] \quad \frac{d\xi(t)}{dt} = -\gamma e^{\tau} \Psi(\xi(t))$$

[0081] 其中, 参数  $\gamma e^{\tau}$  属于实时变化参数, 收敛速度更快;  $\Psi(\cdot)$  为激活函数。将式代入式得到基于惩罚函数的变参递归神经网络求解器, 即



[0082]  $Q\dot{y} = -Sy - \gamma e^t \Psi(Ey - e) + u$

[0083] 由式可以得到矩阵方程的最优解 $y^*$ ,其前 $n$ 项即为二次规划问题中的最优解 $\varphi^*$ ,对其进行积分得到冗余度双机械臂关节角度的实时最优解 $\theta^*$ 。

[0084] 综上,本发明与现有技术相比,具有如下优点:

[0085] 1、与传统的基于伪逆的方法相比,本发明通过二次规划方案解决冗余度双机械臂相互避障问题,实时性强,能考虑多种约束条件;

[0086] 2、与数值方法求解器相比,本发明属于神经网络求解器,计算速度快,效率更高;

[0087] 3、与原来的基于线性变分不等式的原始对偶神经网络求解器相比,本发明采用新型的基于惩罚函数的变参收敛微分神经网络求解器,收敛速度更快,鲁棒性更好。

[0088] 实施例2:

[0089] 参阅图3所示,本实施例提供的冗余度双机械臂相互避障装置包括处理器31、存储器32以及存储在该存储器32中并可在所述处理器31上运行的计算机程序33,例如冗余度双机械臂相互避障程序。该处理器31执行所述计算机程序33时实现上述实施例1步骤,例如图1所示的步骤。

[0090] 示例性的,所述计算机程序33可以被分割成一个或多个模块/单元,所述一个或者多个模块/单元被存储在所述存储器32中,并由所述处理器31执行,以完成本发明。所述一个或多个模块/单元可以是能够完成特定功能的一系列计算机程序指令段,该指令段用于描述所述计算机程序33在所述冗余度双机械臂相互避障装置中的执行过程。

[0091] 所述冗余度双机械臂相互避障装置可以是桌上型计算机、笔记本、掌上电脑及云端服务器等计算设备。所述冗余度双机械臂相互避障装置可包括,但不仅限于,处理器31、存储器32。本领域技术人员可以理解,图3仅仅是冗余度双机械臂相互避障装置的示例,并不构成冗余度双机械臂相互避障装置的限定,可以包括比图示更多或更少的部件,或者组合某些部件,或者不同的部件,例如所述冗余度双机械臂相互避障装置还可以包括输入输出设备、网络接入设备、总线等。

[0092] 所称处理器31可以是中央处理单元(Central Processing Unit,CPU),还可以是其他通用处理器、数字信号处理器(Digital Signal Processor,DSP)、专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit,ASIC)、现成可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者该处理器也可以是任何常规的处理器等。

[0093] 所述存储器32可以是所述冗余度双机械臂相互避障装置的内部存储单元,例如冗余度双机械臂相互避障装置的硬盘或内存。所述存储器32也可以是所述冗余度双机械臂相互避障装置的外部存储设备,例如所述冗余度双机械臂相互避障装置上配备的插接式硬盘,智能存储卡(SmartMedia Card,SMC),安全数字(Secure Digital,SD)卡,闪存卡(Flash Card)等。进一步地,所述存储器32还可以既包括所述冗余度双机械臂相互避障装置的内部存储单元也包括外部存储设备。所述存储器32用于存储所述计算机程序以及所述冗余度双机械臂相互避障装置所需的其他程序和数据。所述存储器32还可以用于暂时地存储已经输出或者将要输出的数据。

[0094] 实施例3:

[0095] 本实施例提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现实施例1所述方法的步骤。

[0096] 所示计算机可读介质可以是任何可以包含、存储、通信、传播或传输程序以供指令执行系统、装置或设备或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用的装置。计算机可读介质的更具体的示例(非穷尽性列表)包括以下:具有一个或多个布线的电连接部(电子装置),便携式计算机盘盒(磁装置),随机存取存储器(RAM),只读存储器(ROM),可擦除可编程只读存储器(EPROM或闪速存储器),光纤装置,以及便携式光盘只读存储器(CDROM)。另外,计算机可读介质甚至可以是可在其上打印所述程序的纸或其他合适的介质,例如通过对纸或其他介质进行光学扫描,接着进行编辑、解译或必要时以其他合适方式进行处理再以电子方式获得所述程序,然后将其存储在计算机存储器中。

[0097] 上述实施例只是为了说明本发明的技术构思及特点,其目的是在于让本领域内的普通技术人员能够了解本发明的内容并据以实施,并不能以此限制本发明的保护范围。凡是根据本发明内容的实质所做出的等效的变化或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围内。

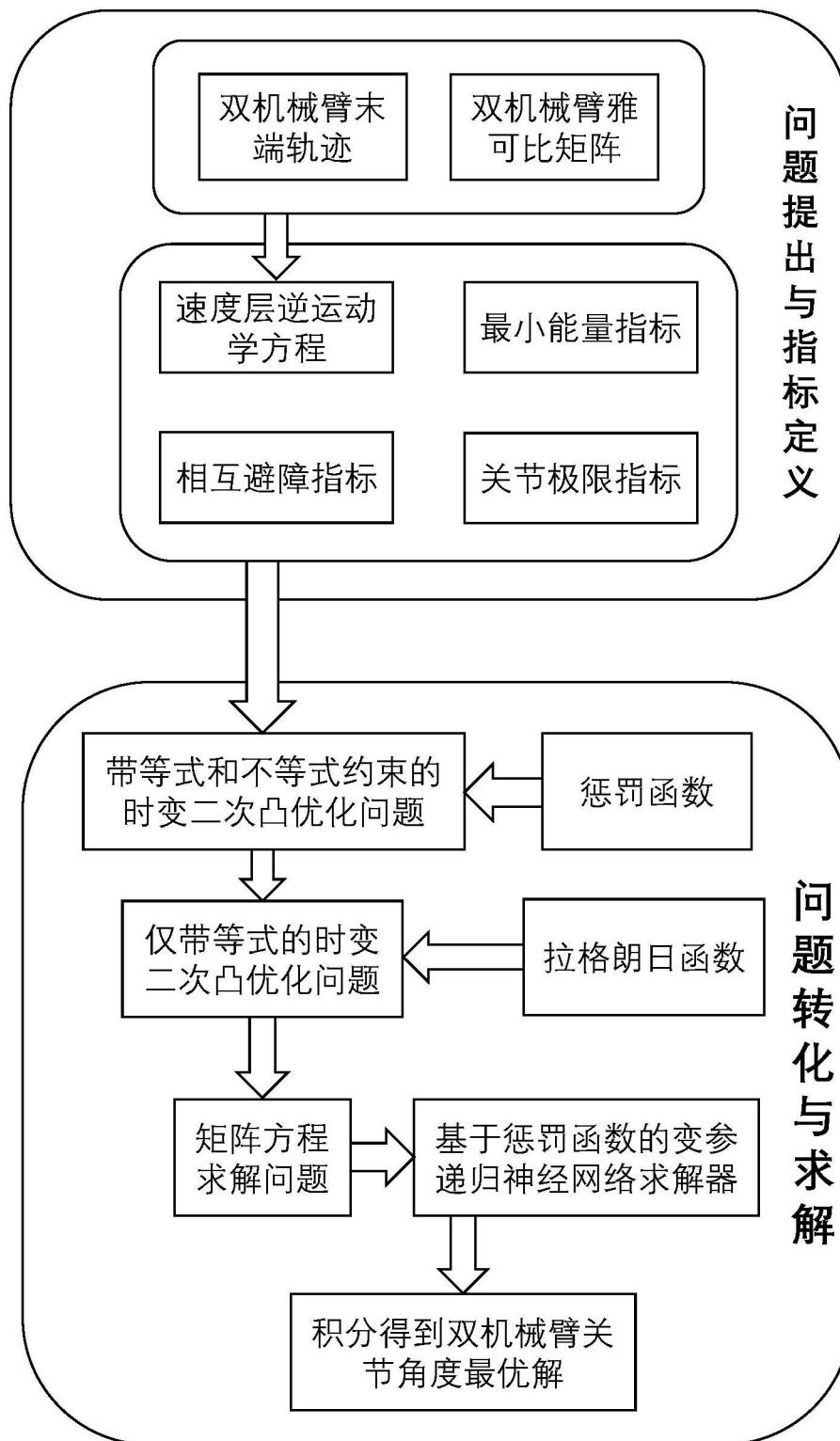


图1

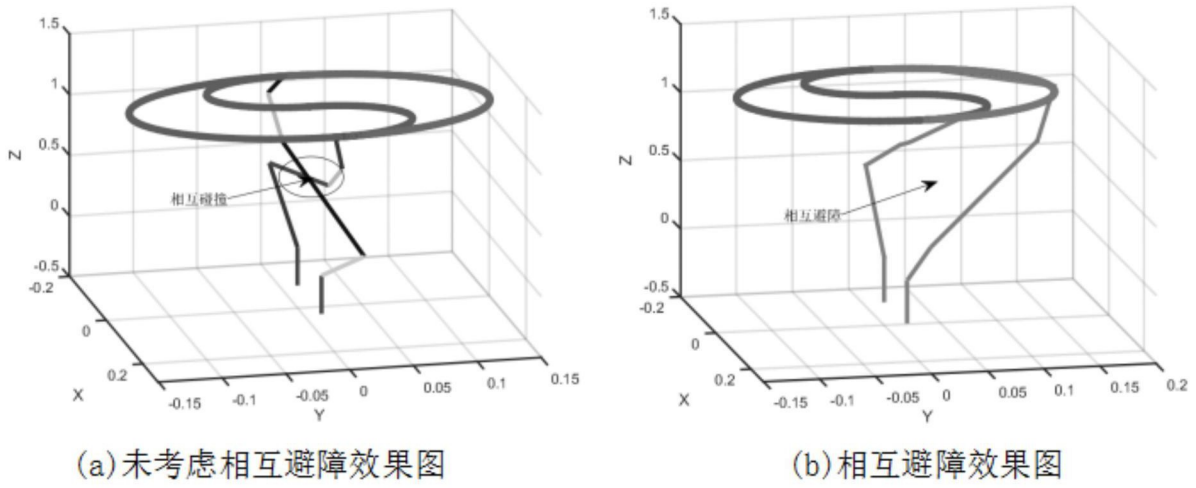


图2

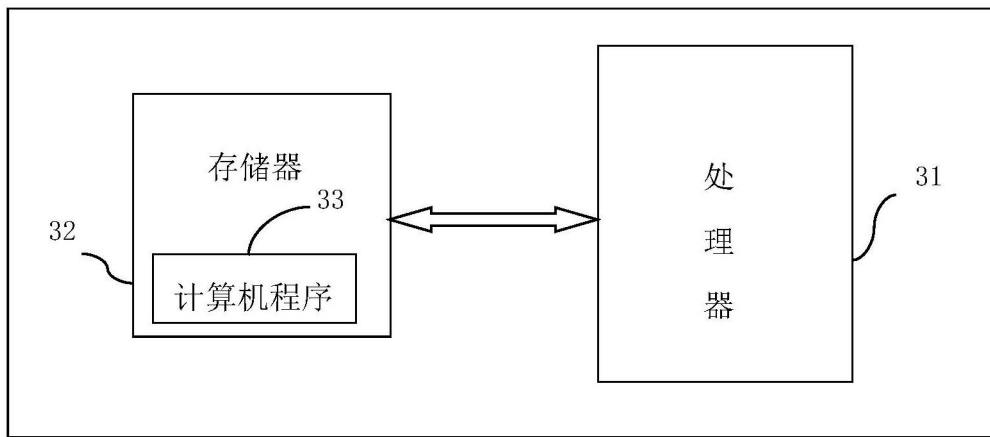


图3