

安全扭矩约束下的多关节机器人 轨迹跟随方法*

张少林¹, 王颖², 王硕¹

(1. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190;

2. 北方重工集团有限公司, 沈阳 110141)

[摘要] 为了减轻机器人与环境碰撞产生的不良影响, 常需要机器人在跟随指令轨迹的同时约束各关节的最大扭矩。针对多关节机器人动力学约束下的笛卡尔空间路径保持与快速跟随问题, 分析机器人关节空间力矩约束对笛卡尔空间轨迹的速度和加速度的影响, 在机器人保持原笛卡尔路径不变的同时, 实时分析当前允许的最大加速度, 并计算得到相应的速度和位置, 实现指令轨迹的快速跟随, 达到安全作业的目的。该方法在一台自研六自由度轻量化机械臂平台上进行了验证。结果表明, 该方法能够将扭矩约束到设定范围内, 重新规划后的轨迹保持笛卡尔路径不变, 且能够快速跟随指令轨迹。

关键词: 扭矩约束; 路径保持; 轨迹规划; 动力学分析; 多关节机器人

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.057



张少林

博士后, 主要研究方向为协作机器人的轨迹规划、力控制和智能操作任务。

在多关节机器人的工作任务中, 不可避免地与外界环境发生接触。为了保护工件、工作平台, 减轻对人员的伤害, 常需要对机器人的关节扭矩进行约束, 同时使机器人保持笛卡尔空间路径不变, 实现设定的任务目标。另外, 当运动指令的速度和加速度较大时, 机器人关节电机不能提供所需要的扭矩, 会产生冲击和振动。为了避免机器人的损坏, 也需要对关节扭矩进行约束。因此, 有必要对机器人在安全扭矩约束下的轨迹跟随方法进行研究。

针对多关节机器人的扭矩约束与轨迹规划已经有很多研究。在很多工业机器人上, 通过在轨迹编程时对最大速度、加速度和加加速度等运动参数进行约束, 使得机器人关节扭矩限制在一定范围之内^[1]。但是, 该方法中的参数设置需要依据经验,

不同的机器人和不同的轨迹需要设置不同的参数, 不能直观地设置扭矩约束。为了直接限制各关节的扭矩值, 可以在轨迹规划和插补完成后, 对电机扭矩指令加以限幅, 防止扭矩过大^[2]。但是这类方法只在控制系统输出时将扭矩约束到制定范围内, 没有同时考虑扭矩约束与轨迹规划。Zanchettin 等^[3-4]将轨迹生成技术和优化控制策略合并到一个运动规划与控制的框架中, 自主地分析程序指令给定的约束条件, 实时地转换为运动命令, 提高任务执行的可靠性。Yue 等^[5]分析了扭矩约束时空间机器人控制系统的稳定控制策略。Valente 等^[6]提出了一种在运动约束范围内生成平滑轨迹的方法, 在装配过程的运动精度和速度之间达到平衡。这些方法在机器人的工作空间内搜索了满足稳定性、时间最优

* 基金项目: 国家自然科学基金(61773378)。

等控制性能的轨迹,但是不能针对笛卡尔路径主动地将扭矩约束到特定范围内。目前,一种常见的扭矩约束与轨迹规划方法应用在轨迹的最短时间规划方面^[7-11]。该方法基于动力学模型分析关节最大扭矩限制,通过使至少一个关节的驱动扭矩达到最大来实现运动时间的最小化。通常,该方法先根据动力学模型计算各位置点对应的最大速度约束,形成位置-速度相平面的约束边界线。然后从起始点分析最大加速度对应的相平面曲线,从终点分析最大减速度对应的相平面曲线,并在边界线的极小值处求相切曲线,从而实现从起始点到终点的最短时间规划。另外,郭清达等^[12-13]通过遗传算法计算了机器人在扭矩约束的情况下能够达到的关节速度、加速度和加加速度,从而实现在扭矩限制范围内的轨迹规划。但是,这类方法需要针对整条轨迹进行综合分析,计算量大,耗时较长,通常在计算完成后才开始运动。刘华山等^[14-15]通过在控制过程中引入具有饱和特性的反正切函数来确保扭矩的有界性,并通过模糊自适应PD控制来减小超调量,提升轨迹跟随性能。但是,饱和函数的非线性特性可能对系统产生影响,不同函数的选取需要调节不同的控制系统参数。Dahl^[16]通过对轨迹进行时间缩放来实现扭矩约束时的路径跟踪。该方法在原控制器基础上扩展了辅助控制器,控制系统较为复杂。因此,在保持多关节机器人的笛卡尔路径不变的同时,如何实时施加扭矩约束并保证快速轨迹跟随还需要进一步研究。

本文将安全扭矩约束下的多关节机器人轨迹跟随方法进行分析,将机器人各关节的扭矩约束到指定范围内,继续按照笛卡尔空间路径运动,并使得机器人能够快速跟随指令轨迹,避免运动太慢引起的效率低下。该方法可以提升作业的安全性,

达到保护机器人和作业环境的目的。具体将从以下几点进行分析:

(1) 分析机器人轨迹上的动力学约束,依据设定的关节扭矩,重新计算最大加速度,使得机器人轨迹跟随不超过安全扭矩。

(2) 在安全扭矩的约束下,实现对指令轨迹的动态跟随,达到实时计算与快速跟随的目的。

扭矩限制下的轨迹跟随

分析多关节机器人的受力为:

$$M_q \ddot{q} + \dot{q}^T Cq + G + \tau_f + M_j \ddot{q} = R\tau_{total} \quad (1)$$

其中, M_q 是质量矩阵, \dot{q}^T 和 Cq 是离心力和哥氏力, G 是重力, τ_f 是摩擦力, $M_j \ddot{q}$ 是关节惯性力, $R\tau_{total} \in [-\tau_{max}, \tau_{max}]$ 是电机提供的驱动扭矩, τ_{max} 是限制扭矩, q, \dot{q}, \ddot{q} 是关节的角度值、角速度和角加速度。 q 由关节位置传感器测量得到, \dot{q}, \ddot{q} 通过对 q 微分和滤波得到。在扭矩约束下,当机械臂的关节运动到位置 q 时, \dot{q} 和 \ddot{q} 需要满足上式,以保证扭矩不超过限制值。

设机器人轨迹规划后,得到的运动曲线为 $s(t) \in \mathbb{R}$ (t 表示时间)。当关节扭矩被限制,不足以跟随指令轨迹时,应当保持路径不变,修改关节速度和加速度来满足扭矩要求。关节空间的位置、角速度和角加速度与曲线 $s(t)$ 之间的关系如下:

$$\begin{cases} q = h(s(t)) \\ \dot{q} = \frac{\partial h}{\partial s} \dot{s} \\ \ddot{q} = \frac{\partial h}{\partial s} \ddot{s} + \frac{\partial^2 h}{\partial s^2} \dot{s}^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 变换可以表示为 $h(s) = f_{Invk}[f_{Pos}(s)]$ 。 $f_{Pos}(s) \in \mathbb{R}^6$ 为将长度 s 映射到指令轨迹的笛卡尔坐标点, f_{Invk} 表示求运动学逆运算。

设曲线映射关系 $f_{Pos}(s)$ 为

$$f_{Pos}(s) = P_0 + sn \quad (3)$$

式中, P_0 为起始点, n 为与长度

s 对应的曲线单位矢量。考虑到 $q = f_{Invk}(P)$, 求得可得:

$$\dot{q} = \frac{\partial f_{Invk}}{\partial f_{Pos}} \dot{P} \quad (4)$$

而 \dot{q} 和 \dot{P} 的关系又可表示为:

$$\dot{q} = J_b^{-1} \dot{P} \quad (5)$$

式中, J_b 为雅克比矩阵。因此,由式(4)和式(5)可得:

$$\frac{\partial f_{Invk}}{\partial f_{Pos}} = J_b^{-1} \quad (6)$$

由式(3)和式(6)可以推导 h 的导数为:

$$\frac{\partial h}{\partial s} = \frac{\partial f_{Invk}}{\partial f_{Pos}} \frac{\partial f_{Pos}}{\partial s} = J_b^{-1} n \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial s^2} = \frac{\partial (J_b^{-1} n)}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial s} = \left(\frac{\partial J_b^{-1}}{\partial t} n + J_b^{-1} \frac{\partial n}{\partial t} \right) \frac{1}{\dot{s}} \quad (8)$$

考虑到 $\tau_f = f(\dot{q}) = f\left(\frac{\partial h}{\partial s} \dot{s}\right)$, 综

合式(1)和式(2),可以得到:

$$M \frac{\partial h}{\partial s} \ddot{s} + \left[M \frac{\partial^2 h}{\partial s^2} + \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)^T C \frac{\partial h}{\partial s} \right] \dot{s}^2 + G + f\left(\frac{\partial h}{\partial s} \dot{s}\right) = R\tau_{total} \quad (9)$$

式中, $M = M_q + M_j$, \dot{s} 和 \ddot{s} 分别表示笛卡尔空间的速度和加速度。由式(9)可以得到 \dot{s} 和 \ddot{s} 的约束关系为:

$$-R\tau_{max} - G \leq M \frac{\partial h}{\partial s} \ddot{s} + \left[M \frac{\partial^2 h}{\partial s^2} + \left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)^T C \frac{\partial h}{\partial s} \right] \dot{s}^2 + f\left(\frac{\partial h}{\partial s} \dot{s}\right) \leq R\tau_{max} - G \quad (10)$$

式(10)给出了机器人关节扭矩受到约束时, \dot{s} 和 \ddot{s} 应该满足的条件。该条件直接基于笛卡尔空间运动曲线 $s(t)$ 进行分析,只对速度和加速度进行了约束,能够保证原规划路径不变。为了实现机器人对原规划轨迹的快速跟随,需要计算扭矩约束时的最大加速度,并积分得到速度和位置,从而使跟随误差尽可能小。不同于最短

时间规划等离线任务,机器人的轨迹约束需要实时计算,确保扭矩不会超限。因此,设计如下计算步骤,每个周期 T 计算一次,实现机器人轨迹的动态跟随。计算流程如图 1 所示。

步骤 1: 设当前机器人状态为 s_c, \dot{s}_c 和 \ddot{s}_c 。依据 S 型加减速^[17] 计算下一个周期的指令轨迹点 s_d, \dot{s}_d 和 \ddot{s}_d 。

步骤 2: 采用 PID 和前馈控制^[18] 计算下一个周期的笛卡尔空间位置、速度和加速度:

$$\begin{cases} \dot{s} = \text{PID}_1(s_d - s_c) + \dot{s}_d \\ \ddot{s} = \text{PID}_2(\dot{s}_d - \dot{s}_c) + \ddot{s}_d \\ s = s + \dot{s}T \end{cases} \quad (11)$$

步骤 3: 将 s, \dot{s} 和 \ddot{s} 代入式(9) 计算所需扭矩 $R\tau_{\text{total}}$ 。

步骤 4: 比较 τ_{total} 和 τ_{max} 的大小。如果 $R\tau_{\text{total}} \in [-\tau_{\text{max}}, \tau_{\text{max}}]$, 则扭矩在限制范围内,跳转步骤 6。否则,跳转步骤 5 计算扭矩约束。

步骤 5: 比较 $R\tau_{\text{total}}$ 和 $R\tau_{\text{max}}$, 判断是第几关节扭矩超限。依据式(10)

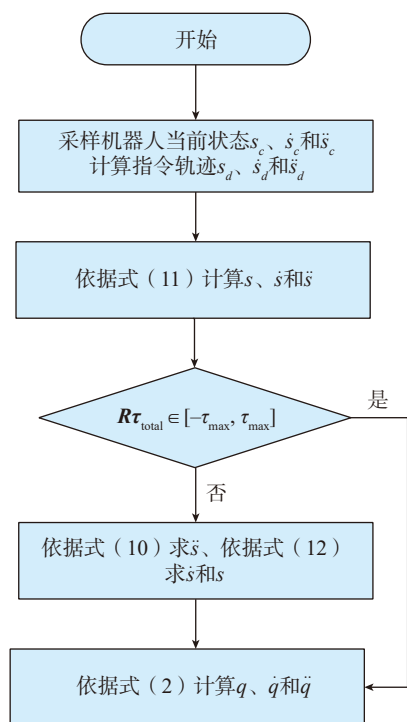


图1 扭矩约束方法计算流程
Fig.1 Calculation flowchart of torque constraint method

求解此时的最大加速度 \ddot{s} 并积分得到 \dot{s} 和 s 。

$$\begin{cases} \dot{s} = \dot{s}_c + \ddot{s}T \\ s = s_c + \dot{s}T \end{cases} \quad (12)$$

跳转步骤 3 继续执行。

步骤 6: 由式(2) 计算 q, \dot{q}, \ddot{q} , 并控制各关节运动。

步骤 7: 等待下一个计算周期的到来,跳转步骤 1, 依次循环,直到轨迹运行结束。

试验与分析

1 试验平台

为了对所述方法进行验证,在如图 2 所示机械臂上进行了试验。该机械具有 6 个自由度,全部都是旋转关节。机械臂上选用了较大功率的电机,并将所有关节的驱动电机都布置在底座上,通过中间传动件驱动末端关节运动。为了减小连杆惯量,设计了紧凑的传动方式。该机械臂的技术参数如表 1 所示。机器人关节臂最大长度约为 1m。6 个电机的功率都是 200W。不考虑基座时,机械臂重量为 13.8kg,且重量都集中在底

表1 机械臂技术参数

Table 1 Technical parameters of manipulator

参数	值
1~6 臂最大长度	约 1m
自由度	6
功率	(6 × 200)W
质量(不考虑基座)	约 13.8kg
末端执行器最大速度	>8m/s

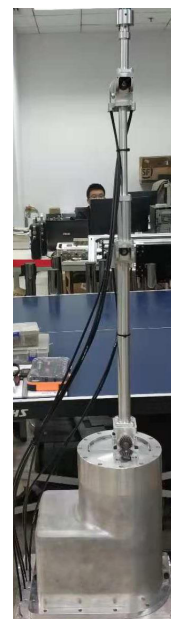


图2 操作臂实物图

Fig.2 Picture of manipulator

表2 机械臂各关节参数

Table 2 Joint parameters of manipulator

关节	运动角度	额定转矩 / (N·m)	最大转矩 / (N·m)
1	$[-\pi, \pi]$	17	45
2	$[\pi/2, 0]$	17	45
3	$[-\pi, \pi]$	10	23
4	$[-\pi, \pi]$	10	23
5	$[-\pi, \pi]$	10	23
6	$[-\pi, \pi]$	10	23

为验证扭矩约束方法的可行性, 现以 $14\text{N}\cdot\text{m}$ 为例(即 $\tau_{\max}=14\text{N}\cdot\text{m}$), 将各关节扭矩约束到该扭矩范围之内, 使机器人继续沿该轨迹运动并重新规划。图 5 为重新规划后的关节扭矩, 可见, 图 4 中扭矩 1 超过 $14\text{N}\cdot\text{m}$ 的部分在图 5 中得到了约束, 且在约束部分逼近 $14\text{N}\cdot\text{m}$ 。同时, 为了保持路径不变, 其他关节扭矩也相应变化。根据 Chen 等^[7-8] 研究, 当有关节的扭矩达到最大值时, 其他关节的扭矩在最大值范围内相应调节可以使得机器人跟随指令轨迹, 这种情况下沿着指令轨迹的运动时间是最短的。这种情况对应了扭矩约束时的最大加速度, 具有最快的跟随效果。

重新规划的轨迹是基于运动曲线参数 s 进行的。该方法在原直线路径的基础上改变速度和加速度来实现扭矩约束, 不改变原笛卡尔空间路径。因此, 重新规划后仍然是如图 3 所示的直线段。图 6 为扭矩约束前后运动曲线参数 s 的对比(其中, 蓝色虚线为扭矩约束后的 s , 红色实线为扭矩约束前的 s)。虚线轨迹在 $N=100$ 左右偏离了实线轨迹, 这说明重新规划后速度和加速度发生了变化, 与指令轨迹存在偏差。但是, 虚线轨迹随后又快速跟随了实线的变化, 这说明扭矩约束解除后, 重新规划的轨迹快速跟随了指令轨迹。

结论

本文给出了一种多关节机器人在安全扭矩约束下的轨迹跟随方法。该方法依据动力学方程约束, 通过空间曲线参数 s 来保证笛卡尔空间路径不变, 重新计算了当前允许的最大加速度, 确保轨迹跟随过程不超过安全扭矩限制, 提高了机械臂与人协作的安全性。同时, 在安全扭矩的约束下, 实现对指令轨迹的动态跟随, 达到实时计算与快速跟随的目的。在六自由度自研轻量化协作机械臂上的试验验证了该方法的可行性。

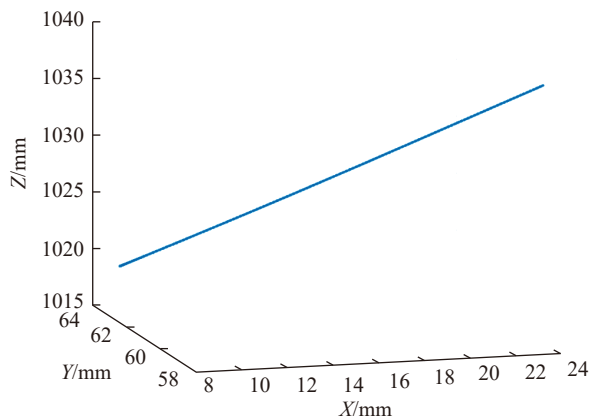


图3 机械臂指令轨迹

Fig.3 Command trajectory of manipulator

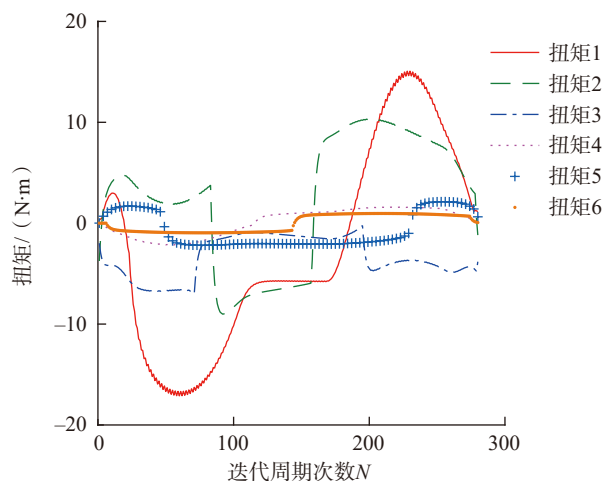


图4 指令轨迹对应的关节扭矩

Fig.4 Joint torques corresponding to command trajectory

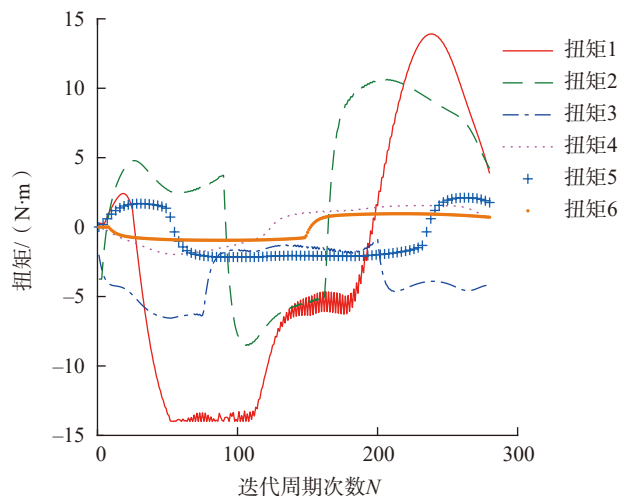


图5 扭矩约束后各关节的扭矩

Fig.5 Torque of each joint after torque constraints

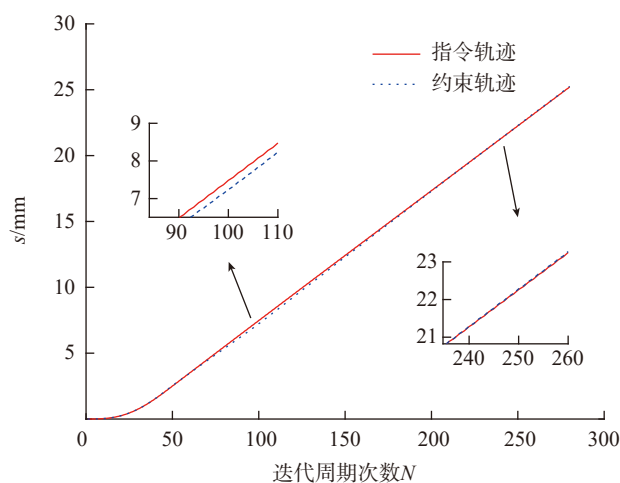


图6 指令轨迹与跟随轨迹

Fig.6 Command trajectory and following trajectory

参考文献

- [1] FANG Y, HU J, LIU W, et al. Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137: 127–153.
- [2] TAUFATOFUA J, HEATH S, RAMIREZ-BRINEZ C, et al. Designing for robust movement in a child-friendly robot[C]// Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2018: 7667–7674.
- [3] ZANCHETTIN A M, ROCCO P. Motion planning for robotic manipulators using robust constrained control[J]. Control Engineering Practice, 2017, 59: 127–136.
- [4] PARIGI P M, ZANCHETTIN A M, ROCCO P. A constraint-based programming approach for robotic assembly skills implementation[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59: 69–81.
- [5] YUE X, ZHANG T, DAI H H, et al. Postcapture stabilization of space robots considering actuator failures with bounded torques[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(10): 2034–2048.
- [6] VALENTE A, BARALDO S, CARPANZANO E. Smooth trajectory generation for industrial robots performing high precision assembly processes[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017(66): 17–20.
- [7] CHEN Y, CHIEN Y P, DESROCHERS A A. General structure of timeoptimal control of robotic manipulators moving along prescribed paths[J]. International Journal of Control, 1992, 56(4): 767–782.
- [8] CHEN Y, DESROCHERS A A. Structure of minimum time control law for robotic manipulators with constrained paths[C]// Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1989: 971–976.
- [9] SHILLER Z, LU H H. Robust computation of path constrained time optimal motions[C]// Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1990: 144–149.
- [10] ARMIN S, JAN S. Iterative learning of feasible time-optimal trajectories for robot manipulators[J]. IFAC-Papers Online, 2017, 50(1): 12095–12100.
- [11] KIM J, CROFT E A. Online near time-optimal trajectory planning for industrial robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 58: 158–171.
- [12] 郭清达, 万传恒, 史步海. 基于遗传算法的工业机器人时间最优轨迹规划及仿真研究[J]. 计算机测量与控制, 2014(4): 274–276.
- [13] 赵莉. 6R 工业机器人连续路径平滑轨迹规划及时间最优化研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018.
- [14] 刘华山, 朱世强, 王宣银. 扭矩输入有界的机器人模糊 PD 轨迹跟踪[J]. 电机与控制学报, 2010(1): 78–89.
- [15] 刘华山, 朱世强, 吴剑波, 等. 基于奇异摄动理论的输入有界机器人轨迹跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2009(12): 57–63.
- [16] DAHL O. Torque-limited path following by on-line trajectory time scaling[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(5): 554–561.
- [17] 王彩芳. 一种简化 S 型加减速算法的研究[J]. 机电工程技术, 2016, 51(7): 56–60.
- [18] FONTES J V C, DA SILVA N B F, DA SILVA M M. Feedforward control for the kinematically redundant manipulator 3PRRR[C]// IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science, 2019.

GUO Qingda, WAN Chuanheng, SHI Buhai. Research on time optimal trajectory planning and simulation of industrial robot based on genetic algorithm[J]. Computer Measurement and Control, 2014(4): 274–276.

ZHAO Li. Research on continuous path smooth trajectory planning and time optimization of 6R industrial robot[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WANG Xuanyin. Fuzzy PD trajectory tracking for a torqueinput bounded robot[J]. Electric Machines and Control, 2010(1): 78–89.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

LIU Huashan, ZHU Shiqiang, WU Jianbo, et al. Trajectory tracking control of input bounded robot based on singular perturbation theory[J]. Control Theory and Applications, 2009(12): 57–63.

Trajectory Following Method of Multi-Joint Robot Under Safe Torque Constraints

ZHANG Shaolin¹, WANG Ying², WANG Shuo¹

(1. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Northern Heavy Industry Group Co., Ltd., Shenyang 110141, China)

[ABSTRACT] To reduce the effects of collision between the robot and environment, it is generally required to limit the maximum torque of each joint while the robot follows the command trajectory. For keeping the Cartesian path unchanged and following quickly under the dynamic constraints of a multi-joint robot, the effects of joint space torque constraints on the velocity and acceleration of Cartesian space are analyzed. The maximum acceleration allowed is analyzed in real time, and the corresponding velocity and position are calculated while the robot keeps the Cartesian path unchanged. The purpose of safe operation is achieved. The method was verified on a self-developed six-degree-of-freedom lightweight manipulator. The result shows that the method can constrain the torque to a set range, the replanned trajectory keeps the Cartesian path unchanged, and the command trajectory is followed quickly.

Keywords: Torque constraint; Path keeping; Trajectory planning; Dynamic analysis; Multi-joint robot

(责编 大漠)

(上接第56页)

on Robotics and Automation. 1989, 5(3): 345-358.

[10] 陆玲, 李金萍. Visual C++ 数字图像处理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 79-93.

LU Ling, LI Jinping. Visual C++ digital

image processing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 79-93.

[11] ADRIAN K, GARY B. Learning OpenCV 3[M]. Sebastopol: O' Reilly Media, 2018: 572-576.

[12] JOSÉ F, PAULO D, ANTÓNIO

J R N. Detection of aruco markers using the quadrilateral sum conjuncture[J]. Image Analysis and Recognition, 2018, 10882: 363-369.

通讯作者: 刘宇, E-mail: mseliuyu@xmu.edu.cn.

A Method of Edge Milling for Industrial Robots Guided by Binocular Vision

LIU Yu, PI Xinglai, ZHOU Zhijun

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

[ABSTRACT] A method of edge milling for industrial robots guided by binocular vision is proposed, which is suitable for machining workpieces composed of 3D planes. Firstly, the Zhang Zhengyou's calibration method and the Tsai-Lenz hand-eye calibration method are used to calculate the internal/external parameters of binocular cameras and the hand-eye transition matrix between binocular cameras and an industrial robot. Then edges of workpieces are detected by binary processing of the binocular images. And corresponding relationships of points sampled from edges in the binocular images are established based on some preset ArUco markers. Finally, the 3D points on edges of workpieces are calculated according to the hand-eye transition matrix and the matched edge points. And robot milling trajectories are generated and sent to the robot controller so that the robot can execute edge milling processes. In the experiments of milling circular and straight edges, the results show that smooth edges are produced by our method and the maximum edge error is less than 0.5mm.

Keywords: Edge milling process; Stereo vision guidance; Hand-eye calibration; Stereo matching

(责编 大漠)