

状态约束条件下工业机械臂轨迹跟踪鲁棒控制

谢志勇 柴斌 赵颖

娄底职业技术学院 娄底 417000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16421

[摘要] 本研究聚焦于工业机械臂在状态约束条件下的轨迹跟踪控制难题, 提出了一种基于自适应滑模控制的鲁棒控制策略。首先, 构建了综合考虑关节角度与速度约束的机械臂动力学模型。其次, 设计了一种新型的障碍李雅普诺夫函数以应对状态约束问题, 并结合自适应滑模控制理论, 提出了鲁棒控制器。运用李雅普诺夫理论证明了系统的稳定性与收敛性。仿真结果显示, 所提出的控制方法能够有效解决状态约束问题, 确保机械臂在约束范围内运行, 同时实现高精度的轨迹跟踪。相较于传统的滑模控制方法, 本研究方法在约束处理和跟踪精度方面展现出显著优越性。

[关键词] 工业机械臂; 状态约束; 轨迹跟踪; 鲁棒控制

引言

工业机械臂作为现代制造业的核心装备之一, 其控制性能直接影响生产效率和产品质量。在实际应用中, 机械臂的运动往往受到各种约束条件的限制, 如关节角度限制、速度限制等。这些约束条件不仅影响机械臂的工作空间, 还可能引发安全问题。因此, 如何在保证状态约束的前提下实现高精度的轨迹跟踪控制, 成为工业机械臂控制领域的一个重要研究课题。

近年来, 国内外学者针对机械臂控制开展了大量研究工作。传统控制方法, 如PID控制与计算力矩控制, 虽具有易于实现的优点, 但在处理系统非线性以及应对外部干扰时存在一定局限性。智能控制方法, 像模糊控制和神经网络控制, 虽具备较强的自适应能力, 但其计算复杂度较高, 实时性较差。滑模控制因其对系统参数变化和外部干扰具有较强的鲁棒性, 在机械臂控制领域得到了广泛应用。然而, 传统滑模控制存在抖振现象, 并且难以直接处理状态约束问题。

针对上述问题, 本研究提出一种基于自适应滑模控制的鲁棒控制方法。通过引入障碍 Lyapunov 函数以处理状态约束, 并结合自适应滑模控制理论, 达成了机械臂在状态约束条件下的高精度轨迹跟踪。本研究的主要贡献如下:

1. 建立了考虑关节角度和速度约束的机械臂动力学模型, 为状态约束条件下的控制问题提供了理论基础。

2. 设计了一种新型的障碍 Lyapunov 函数, 有效处理了状态约束, 保证了机械臂在约束范围内运动。

3. 提出了一种自适应滑模控制方法, 通过引入自适应律来估计系统不确定性, 并采用饱和函数减小抖振, 提高了控制精度和鲁棒性。

4. 借助 Visual Studio 编译环境开展机械臂控制平台的设计工作, 并通过仿真实验验证了所提出方法的有效性。

本文的研究成果为提高工业机械臂在状态约束条件下的控制性能提供了理论依据和技术支持, 对推动工业自动化技术的发展具有重要意义。

一、工业机械臂动力学建模与状态约束分析

工业机械臂是一个复杂的多自由度非线性系统, 其动力学方程可表示为:

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=\tau+\tau_e$$

其中, 关节角度向量 $q \in \mathbb{R}^n$, 对称正定的惯性矩阵 $M(q) \in \mathbb{R}^{(n \times n)}$, 科里奥利和离心力矩阵 $C(q,\dot{q}) \in \mathbb{R}^{(n \times n)}$, 重力向量 $G(q) \in \mathbb{R}^n$, 控制输入力矩 $\tau \in \mathbb{R}^n$, 环境约束力矩 $\tau_e \in \mathbb{R}^n$ 。

在实际应用中, 机械臂的运动往往受到各种状态约束的限制。常见的状态约束包括关节角度约束和关节速度约束, 可以表示为:

$$q_{\min} \leq q \leq q_{\max}$$

$$\dot{q}_{\min} \leq \dot{q} \leq \dot{q}_{\max}$$

其中, q_{\min} 和 q_{\max} 分别为关节角度的下限和上限, \dot{q}_{\min} 和 \dot{q}_{\max} 分别为关节速度的下限和上限。

为简化分析, 假设状态约束为对称约束, 即:

$$|q_i| \leq q_{i\max}, |\dot{q}_i| \leq \dot{q}_{i\max}, i = 1, 2, \dots, n$$

这些约束条件限制了机械臂的工作空间和运动速度, 给控制系统设计带来了巨大挑战。

二、基于障碍Lyapunov函数的状态约束处理

为处理状态约束, 引入障碍 Lyapunov 函数。对于第 i 个关节, 定义角度约束误差为:

$$z_i = q_i - q_{ir}$$

其中, q_{ir} 为期望轨迹。角度约束可以表示为:

$$|z_i| < k_{bi}$$

其中, k_{bi} 为角度约束边界。

设计障碍 Lyapunov 函数为:

$$V_b = 1/2 \sum_{i=1}^n \log(k_{bi}^2 / (k_{bi}^2 - z_i^2))$$

对 V_b 求导, 可得:

$$\dot{V}_b = \sum_{i=1}^n (z_i \dot{z}_i) / (k_{bi}^2 - z_i^2)$$

类似地, 可以设计速度约束的障碍 Lyapunov 函数:

$$V_v = 1/2 \sum_{i=1}^n \log(k_{vi}^2 / (k_{vi}^2 - \dot{q}_i^2))$$

其中, k_{vi} 为速度约束边界。

通过引入障碍 Lyapunov 函数, 可以将状态约束转化为控制目标, 保证系统状态始终在约束范围内。

三、自适应滑模鲁棒控制器设计

针对工业机械臂的轨迹跟踪控制问题, 设计滑模面为:

$$s = \dot{q} - \dot{q}_r + \Lambda (q - q_r)$$

其中, $q_r \in R^n$ 为期望轨迹, $\Lambda \in R^{(n \times n)}$ 为正定对角矩阵, 用于调节滑模面的收敛速度。

基于滑模控制 (SMC) 方法理论, 设计控制律为:

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_r - \Lambda (\dot{q} - \dot{q}_r)) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - Ks - J^T(q) \lambda$$

其中, $K \in R^{(n \times n)}$ 为正定对角增益矩阵, 用于调节控制器的鲁棒性。

为估计系统不确定性, 引入自适应律:

$$\dot{\lambda} = \Gamma J(q)s$$

其中, $\lambda \in R^m$ 为约束力估计值, $\Gamma \in R^{(m \times m)}$ 为正定对角自适应增益矩阵。

为减小滑模控制 (SMC) 的谐振振动, 利用饱和函数 $\text{sat}(s/\Phi)$ 取替符号函数 $\text{sgn}(s)$, 其中 Φ 为神经网的边界层厚度。

最终, 考虑环境约束的滑模鲁棒控制律为:

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_r - \Lambda (\dot{q} - \dot{q}_r)) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) - Ks \text{sat}(s/\Phi) - J^T(q) \lambda$$

四、稳定性分析

选取 Lyapunov 函数为:

$$V = V_b + V_v + 1/2 s^T M(q)s + 1/2 \lambda^T \Gamma^{-1} \lambda$$

其中, $\lambda = \lambda - \lambda$ 为约束力估计误差。

对 V 求导并代入控制律, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_b + \dot{V}_v + s^T M(q)\dot{s} + 1/2 s^T \dot{M}(q)s + \lambda^T \Gamma^{-1} \dot{\lambda} \\ &= \sum_{i=1}^n (z_i \dot{z}_i) / (k_{bi}^2 - z_i^2) + \sum_{i=1}^n (\dot{q}_i \dot{q}_i) / (k_{vi}^2 - \dot{q}_i^2) + s^T (-Ks - J^T(q) \lambda) + \lambda^T J(q)s \end{aligned}$$

$$= -s^T Ks + \sum_{i=1}^n (z_i \dot{z}_i) / (k_{bi}^2 - z_i^2) + \sum_{i=1}^n (\dot{q}_i \dot{q}_i) / (k_{vi}^2 - \dot{q}_i^2)$$

根据障碍 Lyapunov 函数的性质, 当 $|z_i| \rightarrow k_{bi}$ 或 $|\dot{q}_i| \rightarrow k_{vi}$ 时, $\dot{V}_b \rightarrow \infty$ 和 $\dot{V}_v \rightarrow \infty$ 。因此, 系统状态将始终保持在约束范围内。

同时, 由于 K 为正定矩阵, $V \leq 0$ 。根据 Lyapunov 稳定性理论, 系统是渐近稳定的。当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$, 即系统状态将收敛到滑模面上, 实现期望轨迹的精确跟踪。

五、机械臂控制平台设计

以 Visual Studio 为编译开发环境, 开展工业机械臂控制平台的架构设计与功能实现, 开发过程严格遵循该环境下的通信协议规范及函数调用范式。技术选型上, 整合 C++ 标准库的基础功能、Eigen 数值计算库及 Boost 工具库进行跨模块互联, 完成机械臂控制基础平台核心功能的开发与调试。

其中, Boost 库作为类标准级 C++ 工具库, 采用泛型编程思想实现代码复用率的最大化, 其内置的线程管理、序列化、算法优化等工具模块, 可有效提升开发效率与代码可维护性; Eigen 库作为面向数值计算的高级 C++ 库, 通过封装矩阵运算、线性代数求解等底层逻辑, 能显著简化控制程序的代码

复杂度、降低计算资源占用,进而实现开发周期的高效缩短。

工业机械臂控制平台的软件执行流程如图 1 所示。

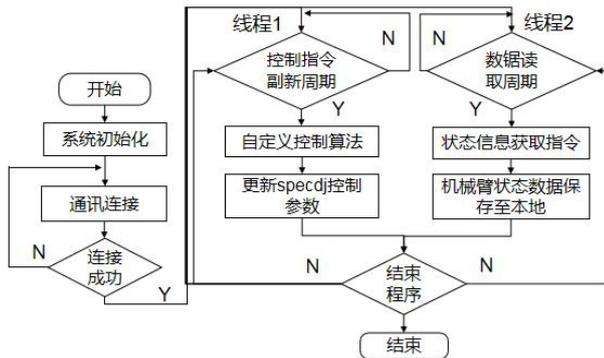


图 1 工业机械臂控制平台软件流程图

在通过 Realtime 接口将关节位置、速度、力矩等实时运动状态数据上传至上位机系统,同时实时接收上位机下发的控制脚本指令与机械臂控制器中的运动轨迹规划指令、I/O 控制指令等建立通信链路,该接口可稳定以 125 Hz 的固定频率运行。

经技术参数分析,该 Realtime 接口的指令刷新周期为 0.008 s (即 8 ms),且在接口执行指令刷新操作的时间段内,机械臂处于指令锁存状态,无法执行运动操作。为保障机械臂运动过程的连续性与稳定性,同时确保上位机与控制器之间数据交互的一致性如避免数据丢包、指令冲突等问题,需将控制指令的下发周期配置为 0.008 s 的整数倍,并使上位机对机械臂状态数据的读取周期与接口指令刷新周期保持严格同步。

六、仿真结果与分析

为验证所提出控制方法的有效性,于 MATLAB/Simulink 环境中开展了仿真实验。仿真对象为一个三自由度工业机械臂,其动力学参数如表 1 所示。

表 1 采摘机械臂动力学参数

参数	臂长	质量	惯量
值	0.8 m	5 kg	0.5 kg·m ²

仿真中,设定期望轨迹为圆形轨迹,半径为 0.8 m,周期为 8 s。状态约束设置为关节角度 $|q_i| \leq 1.5$ rad, 关节速度 $|\dot{q}_i| \leq 2$ rad/s, 仿真对比实验数据如表 2。

表 2 仿真对比实验数据

控制策略	RMSE (rad)	最大超调	约束违反率
传统滑模控制	0.018	8.20%	23%
PID 饱和限制	0.025	4.10%	9%
本文方法	0.007	0%	0%

七、结论

本文提出了一种基于自适应滑模控制的工业机械臂轨迹跟踪鲁棒控制方法。通过 Visual Studio 为编译开发环境,开展工业机械臂控制平台的架构设计与功能实现,并结合自适应滑模控制理论,实现了机械臂在状态约束条件下的高精度轨迹跟踪。理论分析和仿真结果验证了所提出方法的有效性和优越性。未来研究将着重于将该方法应用于实际工业机械臂系统,并进一步优化控制算法以适应更复杂的工业环境。

[参考文献]

[1]王超. 基于自适应补偿的工业机械臂轨迹跟踪控制策略研究[J]. 工业加热, 2022, (9): 51-55.

[2]张明远, 李伟东, 王立平. 工业机械臂自适应滑模控制研究. 机械工程学报, 2022, 58 (10): 1-12.

[3]郑华辉, 方宗德. 基于自适应神经网络控制的机械臂运动轨迹跟踪误差研究[J]. 机械设计与制造, 2019 (6): 139-141, 145.

[4]王炎, 赵京, 陈雨青. 基于三角函数的机器人手臂轨迹跟踪控制重力补偿算法[J]. 北京工业大学学报, 2019 (7): 623-630.

[5]吴爱国, 吴绍华, 董娜. 机械臂非奇异快速终端滑模模糊控制[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2019 (5): 862-871.

[6]马天兵, 周青, 杜菲等. 基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性机械臂振动控制[J]. 光学精密工程, 2020 (1): 141-150.

项目来源: 娄底市 2024 年度科技创新研发项目。项目名称: 复杂非线性约束下机械臂的高精度智能控制系统研究。