

基于预设性能的机械臂自适应固定时间跟踪控制

李小飞^{1,2,3}, 王进^{1,2,3}, 张海运⁴, 陆国栋^{1,2,3}, 陈益飞⁵, 吴加春⁶, 张驰⁶

¹浙江大学流体动力基础件与机电系统全国重点实验室, 中国杭州市, 310027

²浙江省全省工业大数据与机器人智能系统重点实验室, 中国杭州市, 310058

³余姚市机器人研究中心, 中国宁波市, 315400

⁴宁波工程学院机器人学院, 中国宁波市, 315211

⁵智昌科技集团股份有限公司, 中国宁波市, 315400

⁶杭州海康机器人技术有限公司, 中国杭州市, 311507

摘要: 机械臂常因动力学不确定性导致定位精度不足, 现有大部分控制算法难以兼顾快速响应和高跟踪精度, 并且依赖复杂的动力学模型计算, 限制了核心算法的部署应用。本文提出面向机械臂动力学不确定性的实时跟踪控制方法, 其能够平衡整体控制性能、计算复杂度与参数设置, 适合直接部署在计算资源有限的嵌入式硬件上, 无需进行复杂的动力学计算或学习逼近。首先设计了无模型的自适应延时估计器, 用于估计并补偿机械臂的广义不确定动力学, 其增益矩阵直接由跟踪误差的滑模变量幅值进行更新, 以实现优异的整体性能。其次设计了具有预设性能的自适应固定时间非奇异终端滑模控制器, 在预先设定的固定时间内镇定机械臂跟踪误差。该控制器参数通过解析推导的表达式确定了固定收敛时间的上界, 实际整定时间都能自动得到保证, 不受初始条件影响。同时瞬态响应速度和稳态跟踪精度由预设性能约束, 从而提升机械臂在实时作业任务中的加工质量和效率。此外, 进一步设计了跟踪控制器增益的自适应更新律, 保证闭环控制系统的固定时间稳定性, 同时消除动力学不确定性或其估计误差上确界的先验知识。该机械臂跟踪控制方法因参数整定便捷、计算负担小而易于实现, 其有效性已通过仿真和实验验证。

关键词: 自适应延时估计; 自适应固定时间控制; 动力学不确定性; 预设性能; 机械臂; 跟踪控制

<https://doi.org/10.1631/ENG.ITEE.2026.0166>