

工业机器人轨迹规划算法优化与运动精度提升研究

谢梦莎 林丽华 张雪 张益

鹰潭职业技术学院

摘要:在人口红利减少,中国制造2025等大背景下,机器人的应用得到更多关注,机器人应用过程中的效率是一大关注重点。本文以工业机器人轨迹规划算法优化与运动精度提升为核心研究方向,先明确相关理论基础,再针对性提出算法优化路径,最后探索运动精度提升策略,通过梳理核心技术瓶颈、整合前沿优化思路,实现轨迹规划的高效性、平滑性与运动精度的稳定性、精准性提升,为工业机器人在高端制造中的规模化应用提供理论支撑与技术参考,推动工业机器人技术向高精度、高可靠性方向升级。

关键词:工业机器人;轨迹规划算法;算法优化;运动精度;精度提升

引言

随着工业4.0战略的深入推进,制造业向智能化、柔性化转型步伐加快,工业机器人已广泛应用于机械加工、电子装配、汽车制造等多个领域,成为实现生产自动化、提升产业竞争力的关键载体。轨迹规划作为工业机器人运动控制的核心环节,其算法性能直接决定机器人末端执行器的运动轨迹合理性,而运动精度则是工业机器人完成精密作业的核心指标,二者共同构成工业机器人作业能力的核心支撑。当前,传统轨迹规划算法如多项式插值、直线插补等,在复杂作业场景下存在轨迹平滑性差、动态响应不足、多约束协调能力弱等问题,易导致机器人运动过程中出现速度突变、振动等现象,进而影响运动精度;同时,机器人机械结构误差、关节摩擦、环境温度波动等因素,进一步加剧了运动精度偏差,难以满足航空航天、精密电子等高端制造领域对微米级精度的作业要求。因此,开展工业机器人轨迹规划算法优化与运动精度提升研究,破解算法瓶颈、弥补精度短板,具有重要的理论价值与工程实践意义。本文严格遵循学术规范,聚焦核心问题,分层次、有重点地开展研究,为工业机器人技术的优化升级提供可行路径。

1 工业机器人轨迹规划算法优化与运动精度概述

1.1 轨迹规划算法的核心类型与特性

随着科学技术的发展,机器人在工业生产中得到了越来越广泛的应用。在实际应用的过程中,机器人在执行某项操作任务时,由于一些客观的限制,往往会有一些约束条件,如按照指定的路径运动,这就需要对机器人的运动轨迹进行规划,而运动轨迹规划的好坏直接影响了工业机器人作业的质量,因此,对工业机器人轨迹算法进行研究就非常重要。

当前工业机器人轨迹规划算法主要分为传统插值算法与智能优化算法两大类,二者特性差异显著。传统插值算法是基础,主要包括多项式插值、直线插补、圆弧插补等:多项式插值通过拟合路径点实现关节平滑运动,三次多项式保证位移与速度连续,五次多项式可实现加速度连续,但全局优化能力弱、多约束适配性不足;直线插补与圆弧插补计算简便、易于实现,适用于基础作业,但前者易出现速度突变,后者轨迹灵活性差,均影响运动精度。智能优化算法是近年来轨迹规划领域的研究热点,包括遗传算法、粒子群算法、神经网络算法等,具备强大的全局搜索与多约束协调能力,可实现多目标优化,但存在计算复杂度、动态响应滞后等短板,实际应用中需结合场景改进,各类算法的互补性为优化研究提供了空间。

1.2 工业机器人运动精度的核心影响因素

工业机器人运动精度是指末端执行器实际运动轨迹与理论规划轨迹的重合程度,主要包括定位精度与重复定位精度,其受多种因素综合影响,可分为机械结构因素、控制算法因素与环境因素三大类,明确这些影响因素是提升运动精度的关键。机械结构因素是先天性影响因素,包含关节间隙,连杆尺寸误差,减速器回程间隙以及关节摩擦等方面,这些误差大概占据整体误差的70%到80%,关节间隙和减速器回程间隙会产生空程误差,连杆尺寸误差会影响轨迹映射的准确程度,关节摩擦还会加重运动的迟缓状况。控制算法因素主要与轨迹规划算法、控制策略相关,轨迹规划算法是否合理左右理论轨迹的精度,传统的PID控制等策略很难处理复杂的干扰因素,很容易引发轨迹偏离现象。环境因素主要包括温度波动、振动干扰、粉尘污染等,温度发生波动时,机械结构就会

作者简介:谢梦莎(1993—),女,硕士,助教,研究方向为工业机器人。

出现热胀冷缩的状况,震动会破坏轨迹的稳定性,粉尘则会加重关节之间的摩擦力,这些要素彼此关联,给精度的优化造成了困难。

2 工业机器人轨迹规划算法优化

2.1 传统插值算法的优化改进

针对传统插值算法存在的轨迹平滑性差、多约束适配性不足、易出现速度突变等问题,结合工业机器人作业的实际需求,从插值函数优化、约束条件融入两个方面开展优化改进,提升传统算法的性能与适用性。插值函数优化上,引入B样条插值改进传统多项式插值,其具备几何不变性、导数连续性等优点,可通过调整控制顶点灵活控制轨迹,避免空格现象,实现速度、加速度连续平滑,减少振动冲击,且计算复杂度适中,易于工程实现。在约束条件融入方面,传统插值算法往往忽略关节角速度、角加速度、力矩等动力学约束,导致规划轨迹难以满足机器人物理性能要求,优化过程中需将这些约束条件融入插值函数的构建过程,通过设置关节运动参数的阈值,对插值轨迹进行约束修正,确保规划轨迹在满足作业需求的同时,符合机器人机械结构的物理限制,避免出现关节过载、速度突变等问题,同时引入轨迹分段插值策略,针对不同作业阶段的需求,灵活调整插值精度与平滑度,实现传统插值算法的性能升级,使其能适配更多基础作业场景的需求。

2.2 智能优化算法的融合与改进

智能优化算法具备强大的全局搜索能力与多目标优化能力,但单一智能算法存在计算复杂度高、动态响应滞后、局部搜索能力不足等短板,通过算法融合与参数改进,可有效提升智能算法在轨迹规划中的适用性与性能。针对遗传算法局部搜索能力差、易早熟收敛的问题,将粒子群算法与遗传算法进行融合,利用遗传算法的全局搜索能力与粒子群算法的局部搜索优势,构建混合智能优化算法,通过优化遗传算法的交叉、变异概率,调整粒子群算法的惯性权重与学习因子,实现算法搜索精度与搜索速度的平衡,有效避免早熟收敛问题,同时降低计算复杂度。针对神经网络算法模型模糊、准确率不足的问题,引入深度学习技术,构建CNN与GRU混合模型轨迹规划算法,利用深度学习的特征提取能力捕捉机器人运动动态特征,优化轨迹映射关系,提升规划准确性与动态响应能力,同时通过样本训练优化模型参数,减少模型训练过程的繁杂性,降低对计算机性能的要求。

2.3 多目标协同优化策略的构建

工业机器人轨迹规划过程中,往往需要同时满足

时间最短、能耗最低、轨迹平滑、精度最高等多个优化目标,而这些目标之间存在相互冲突的关系,如追求最短运动时间往往会导致能耗增加、轨迹平滑性下降,因此构建多目标协同优化策略,实现各目标的平衡优化,是轨迹规划算法优化的核心方向。首先,结合不同作业场景需求,明确时间、能耗、轨迹平滑度、轨迹偏差等核心优化目标,通过归一化处理统一量纲,避免量纲差异导致的优化偏差。其次,采用加权求和法与Pareto前沿求解相结合的方式构建优化函数,根据场景优先级动态调整各目标加权系数,实现目标平衡;通过Pareto前沿求解获取非支配解集合,为轨迹规划提供多样化选择。最后,引入自适应调整机制,根据机器人运动动态变化,实时调整目标权重与算法参数,确保策略动态适配性,避免局部最优解,实现全局最优,同时兼顾算法实时性与可行性,保障其在工业机器人上高效运行。

3 工业机器人运动精度提升

3.1 机械结构误差的补偿与修正

机械结构误差属于影响工业机器人运动精度的关键要素,其具有先验性以及稳定性欠佳等特性,经由执行误差补偿并修正结构之后,可以有效地缩减机械结构误差给运动精度带来的影响,进而为改善运动精度形成一定的基础。对于关节间隙,减速器回程间隙这些存在的间隙误差而言,利用间隙补偿算法,依靠传感器随时获取关节运动的相关数据,从而精确地判别出间隙误差的大小及其方向,创建起相应的间隙误差补偿模型,在轨迹追随期间及时给出补偿值,用以校正关节的运动偏差,削减空程误差对运动精度造成的不良后果,而且还能借助改良关节结构设计,选用高精度的减速器和轴承,从根本上减小间隙误差的发生概率。至于连杆尺寸误差,关节轴线偏移之类的几何误差,则可凭借运动学标定技术,利用激光跟踪仪,球杆仪等高精度测量工具,收集机器人各个关节的真实运动情况,创建起机器人实际的运动学模型,修正DH参数,做到几何误差的精确补偿,此方法能够把绝对定位误差从正负5毫米缩减到正负1毫米左右,大幅优化了运动精度。此外,关节摩擦误差方面,采用自适应摩擦补偿算法,该算法可及时识别摩擦系数的变动情况,并动态调节补偿参数,以此减轻摩擦对运动轨迹的干扰。还要定期给关节做润滑保养,缩减摩擦损耗,从而进一步巩固机械结构的稳定性,缩减误差的累加幅度。

3.2 轨迹跟踪控制策略的优化

轨迹跟踪控制处于轨迹规划和实际运动之间,其

控制策略是否合理会直接影响轨迹跟踪的精准度,改良轨迹跟踪控制策略有益于减小轨迹跟踪误差并提高工业机器人的运动精准度。传统PID控制策略很难解决复杂的动态干扰问题,且轨迹跟踪精准度较低,于是改良了PID控制策略,形成模糊PID控制策略。凭借模糊控制的自适应特性,随时调整PID控制器的相关系数,从而根据机器人运动时的动态变化来灵活满足轨迹跟踪需求,减少外部干扰和模型误差对跟踪精准度的影响。又采用积分分离策略防止出现积分饱和情况,进而提高控制策略的稳定性。在复杂动态场景当中,轨迹跟踪存在响应迟缓的情况,为解决此问题,采用滑模控制策略,并创建滑模变结构控制器,利用滑模控制的鲁棒性强、响应速度快的优势,有效抑制外界干扰与参数摄动,增强轨迹跟踪的速度与准确性,经由设计饱和函数来替换传统滑模控制中的切换函数,这样就能减少抖振现象的发生,免除抖振对运动精度产生的不良影响。

3.3 环境干扰与动态误差的抑制

工业机器人的工作环境较为复杂,存在温度起伏、振动干扰、粉尘污染等环境因素,还有负载改变,动态障碍物等动态因素,这些都会引发动态误差,进而影响运动精度,创建干扰抑制机制之后,可以有效地减轻各种干扰给运动精度带来的影响。就温度波动造成的热变形误差而言,利用温度补偿技术,在机器人关键位置设置温度传感器,随时收集温度信息,形成温度-变形误差模型,按照温度的改变即时给出补偿值,纠正由于热胀冷缩而产生的路径偏移,而且改善机器人的安装场所,缩减温度波动范围,免除温度骤变对机械框架造成不良后果。对于振动干扰,利用振动抑制技术,在机器人底座安装减震装置以缩减外界振动对机器人运动的影响,还要改良轨迹规划算法来减小机器人运动时的振动与冲击,从根本上防止振动误差的发生,如果是在高精度作业环境下,可以运用

主动振动控制技术,经由传感器及时检测振动信号,并发出反向振动信号,从而抵消外界振动带来的影响。至于负载变化、动态障碍物等动态因素所引发的误差,则需依靠即时的闭环反馈控制,把激光跟踪仪,视觉传感器或者惯性测量单元整合到机器人末端,随时监测末端执行器的真实位姿,把它同理论轨迹做比较,算出偏差并且立即加以修正,以此做到对动态误差的即时压制。

4 总结

工业机器人轨迹规划与运动精度是决定其作业能力的核心要素,二者相互关联、相互影响,轨迹规划算法的合理性为运动精度提升提供基础,而运动精度的提升则进一步体现轨迹规划算法的优化价值。在轨迹规划算法优化方面,通过传统插值算法的改进、智能优化算法的融合、多目标协同优化策略的构建,有效解决了传统算法平滑性差、智能算法复杂度高、多目标冲突等问题,实现了轨迹规划的高效性、平滑性与全局最优性,提升了算法的适配性与实用性。在运动精度提升方面,针对机械结构误差、轨迹跟踪误差、环境与动态干扰等核心影响因素,通过机械结构误差补偿、跟踪控制策略优化、干扰抑制机制构建,有效降低了各类误差对运动精度的影响,提升了工业机器人运动的精准性与稳定性,可满足不同作业场景的精度需求。

参考文献:

- [1] 李猛. 工业机械臂智能轨迹优化算法研究 [D]. 电子科技大学, 2025.
- [2] 李焕楷. 基于 RTX 系统的工业机器人轨迹规划算法 [D]. 广西大学, 2022.
- [3] 郭勇, 赖广. 工业机器人关节空间轨迹规划及优化研究综述 [J]. 机械传动, 2020, 44(02): 154-165.
- [4] 郭庆鹏, 张长青. 工业机器人轨迹规划算法研究综述 [J]. 木材加工机械, 2019, 30(06): 8-13+24.