

AI与工业机器人的人机协作能力优化

张瑞琳

中交第三公路工程局有限公司建筑工程分公司 北京 222200

摘要: 本文以建筑工人机协作为研究对象,结合AI技术与建筑工程机器人理论,采用理论分析与工程案例相结合的方法,聚焦多模态感知、强化学习决策等核心技术,分析当前协作短板及成因并提出优化策略。研究表明,优化后机器人定位漂移率控制在 $\pm 1\text{cm}$ 内,决策响应时间 ≤ 5 秒,施工效率提升30%以上,可显著提升协作安全性与高效性,助力建筑行业智能化转型,为同类工程人机协作优化提供实践参考。

关键词: AI; 工业机器人; 人机协作能力; 优化策略

引言: 随着智能建造产业快速发展,建筑工程机器人已广泛应用于各类施工场景,人机协同作业成为破解行业劳动力短缺、安全风险高、效率偏低等痛点的关键路径。但当前人机协作存在环境感知不精准、决策衔接不畅、安全机制不完善等问题,制约其规模化应用。AI技术的迭代为解决上述问题提供了技术支撑,因此,深入研究AI对建筑工程机器人人机协作能力的优化策略,对推动建筑行业高质量发展具有重要的现实意义与应用价值。

1 相关理论基础

1.1 建筑工程机器人相关理论

(1) 建筑工程机器人的定义与分类: 建筑工程机器人是用于建筑施工全流程,可自主或协同完成作业的智能化装备,核心是通过自动化技术替代人工完成高强度、高风险、重复性施工任务。按作业类型可分为砌筑、钢筋绑扎、混凝土整平、喷涂等,分别应用于对应核心施工场景。(2) 建筑工程机器人的核心技术: 核心包括机械结构设计、运动控制技术、作业执行技术,分别保障作业稳定性、精准定位与施工精度。同时需适配建筑场景,具备IP65防护等级,搭配全地形移动技术,提升作业适用性^[1]。(3) 建筑工程机器人人机协作的核心需求: 结合高空、重型、精细等施工场景,需满足安全性(规避坠落、误伤风险)、高效性(提升施工效率)、灵活性(适配复杂环境)、协同性(实现人机互补),符合人因工程学,降低工人操作强度。

1.2 AI技术相关理论

(1) AI技术的核心内涵与发展阶段: AI是模拟人类智能的技术,核心包括机器学习、计算机视觉等,结合具身智能理论,实现机器人对环境的感知与交互,可分为感知智能、认知智能、具身智能三个发展阶段,当前聚焦于具身智能在建筑场景的落地。(2) 人机协作中的

AI核心应用技术: 包括基于YOLOv5和激光雷达的环境感知识别技术,实现动态目标检测;连续时间动态规划算法的路径规划技术;多智能体强化学习的协同决策技术;以及语音、手势、AR结合的人机交互技术,提升协作便捷性。(3) AI与建筑工程机器人融合的可行性: 技术上两者适配性强,AI可弥补机器人环境适应短板;场景上满足工地复杂作业需求;成本上,长期应用可降低人工与安全成本,相关实验表明,融合后施工效率提升30%以上,具备较高可行性。

1.3 人机协作相关理论

(1) 人机协作的核心内涵与类型: 指人与机器人协同完成施工任务,结合建筑场景分为监督、修正、应急协同三类,监督对应钢筋绑扎工序(工人监督机器人绑扎精度,机器人执行绑扎作业),修正对应混凝土整平工序(机器人整平,工人修正平整度偏差),应急协同对应喷涂工序(机器人喷涂,工人应对设备突发故障)。(2) 人机协作的关键评价指标: 构建建筑机器人人机协作评价体系,含效率(40%)、安全(30%)、适配(20%)、接受度(10%),效率=单位时间作业量/标准量(满分100),安全按事故发生率评分,适配与接受度采用5级评分,确保评价科学可操作。(3) 建筑场景人机协作的特殊性: 相较于工业场景,建筑场景非结构化、动态性强,高空作业多,需满足动态障碍物规避、断电应急等特殊要求,适配复杂多变的施工环境。

2 建筑工程机器人人机协作现状及存在的问题

2.1 建筑工程机器人人机协作发展现状

(1) 建筑工程机器人应用普及情况: 国内建筑工程机器人应用场景已覆盖住宅、大型场馆、基础设施建设等领域,应用规模逐年攀升,2026年全球市场规模预计达77.9亿美元。其中厦门43个项目推广11类建筑机器人,累计投入371台;长沙奥体中心项目中,履带式抹

平与激光整平机器人广泛应用于底板浇筑,推动场景拓展。(2)当前人机协作模式及应用效果:现有协作以“1+N”“3+1”机器人班组配置为主,即1名工程师+2名产业工人操作多台设备。应用成效显著,长沙奥体中心人机协同后日均施工面积提升超50%;ALC条板机器人单台日效率100-120m²,是人工作业4-6倍,10万m²项目综合成本降65%,安全事故率大幅下降。(3)AI技术在现有协作中的应用现状:AI已初步应用于路径规划、环境识别等环节,部分项目用AI视觉识别焊缝、规划焊接路径。但应用范围窄、深度不足,局限于单一工序,且传感器融合精度不够,机器人对复杂场景识别准确率仅67%,未实现全流程智能协同。

2.2 建筑工程机器人人机协作存在的核心问题

(1)环境感知与动态适配问题:机器人在工地扬尘、强光下视觉失效,塔吊动态遮挡致定位失败、临时堆料致路径中断,定位漂移率较高,多模态数据融合不足,复杂工地场景中定位误差可达±5cm,难以快速适配施工场景的动态变化,影响作业连续性。(2)人机协同决策效率低下:AI与人工决策衔接不畅,机器人无法精准理解施工人员操作意图,任务分配不合理,面对设备故障、施工变更等突发情况,无法快速协同调整,部分项目因决策滞后导致返工率高达31%。(3)安全交互机制不完善:缺乏有效的人机安全距离监测与预警机制,未严格遵循安全距离≥1.2米的规范,机器人动作响应延迟,碰撞、误操作风险较高,且安全责任认定不明确,不符合建筑施工安全标准要求^[2]。(4)数据孤岛与适配性不足:建筑工地多套异构系统数据融合度低,机器人与BIM、MES等系统数据不通联,形成信息孤岛;建筑构件标准化程度不足,导致机器人作业需频繁调整,适配成本偏高,制约规模化应用。

2.3 问题产生的原因分析

(1)技术层面:AI与建筑工程机器人融合深度不足,多模态数据融合、协同决策等核心算法适配性差,机器人感知与执行技术存在短板,能源供给有局限,且缺乏足够的施工数据训练,导致智能化水平难以提升。(2)场景层面:建筑施工场景具有复杂性、动态性、非标准化特点,增加了人机协作难度,现有协作模式未充分适配建筑施工特殊性,且行业标准滞后,不同厂商设备接口不兼容,规范了人机协同发展。(3)人员与管理层面:结合工程落地瓶颈,施工人员对AI与建筑机器人协作接受度、操作技能不足,叠加工地5G延迟、设备接口不兼容、运维人才短缺、成本高痛点,且管理模式未适配,难以发挥协同效能。

3 AI优化建筑工程机器人人机协作能力的策略

3.1 基于AI的环境感知与动态适配优化

(1)多模态感知系统优化:整合激光雷达、深度相机、力反馈装置等传感器,构建全方位感知网络,弥补单一传感器在复杂工地场景的感知短板。基于时空图神经网络(STGNN)算法实现多模态数据融合,实时整合分析工地静态构件、动态塔吊、临时障碍物等数据,提升环境感知精准度与实时性,将定位漂移率控制在±1cm以内,为人机协同作业提供可靠环境数据支撑。(2)动态场景自适应算法设计:基于机器学习算法,收集住宅、场馆、基础设施等不同建筑场景的施工数据,构建涵盖工况变化、障碍物移动、施工流程调整等参数的标准化与个性化结合的施工现场数据库。通过算法训练,实现机器人对动态障碍物轨迹、施工工况突变的快速识别与自适应调整,引入元学习技术,实现不同场景快速迁移适配,减少场景切换时的程序调试时间,提升协作连续性^[3]。(3)能源供给与设备适配优化:结合AI技术构建能源消耗智能调控模型,根据机器人作业强度、场景需求自动调整能源输出,避免无效能耗。引入液压储能等新型能源技术延长机器人续航,满足工地长时间连续作业需求;采用模块化设计,通过AI算法优化模块组合,提升机器人对不同规格建筑构件、施工工序的适配性,将夹具与程序调整时间缩短40%以上,降低作业延误率。

3.2 基于AI的人机协同决策优化

(1)协同决策模型构建:基于强化学习、多智能体系统,构建AI驱动的人机协同决策模型,结合施工进度、作业难度、人员技能等多维度因素,实现任务的智能分配与动态调整,避免人力与设备资源浪费。同时,通过模型实时优化机器人作业路径,规避施工拥堵、设备冲突等问题,简化人机协作流程,将协同决策响应时间缩短至5秒内,大幅提升决策效率与协作合理性。(2)意图识别与交互优化:结合自然语言处理、计算机视觉技术,对施工人员的语音指令、手势动作进行精准识别,解读操作意图,减少人机沟通误差。优化语音、手势、AR等交互方式,实现AR可视化操作指引、手势快捷控制,简化操作流程,降低施工人员操作难度,实现人机交互的自然化、便捷化,让工人无需复杂培训即可完成机器人协同操作。(3)数据协同共享机制建立:基于AI技术搭建数据融合平台,打破机器人与BIM、MES、WMS等工地异构系统的数据孤岛,实现施工图纸、进度计划、设备状态、物料信息等数据的实时互通与同步更新。构建建筑施工大数据平台,通过AI算法对

海量数据进行分析挖掘,提取有效信息,为人机协同决策提供全面、精准的数据支撑,提升决策的科学性与前瞻性^[4]。

3.3 基于AI的安全交互机制优化

(1) 安全距离监测与预警系统设计:基于AI视觉识别技术,实时捕捉人机作业位置信息,监测人机安全距离,结合建筑施工安全规范设置三级安全阈值(1.2m预警/0.8m减速/0.5m急停)。当检测到距离小于对应阈值时,系统自动触发对应声光预警及机器人动作,将响应时间控制在0.5秒以内,从源头规避碰撞风险。(2) 碰撞预防与应急处理优化:通过AI算法实时预测人机作业轨迹,提前规避碰撞风险。设计AI应急协同机制,设备故障时立即停机排查,人员遇险时先停机隔离现场,系统快速采集数据生成方案并推送,指导应急处置降低损失。(3) 安全责任界定与管理优化:基于AI实现人机协作全程数据追溯,记录关键信息形成操作日志,结合行业规范建立安全责任界定标准,明确责任划分,优化管理模式,实现安全风险精准管控^[5]。

3.4 基于AI的人员适配与运维优化

(1) 操作技能培训体系优化:利用AI技术构建智能化培训平台,结合虚拟仿真技术,模拟钢筋绑扎、混凝土整平虚拟场景与人机协同流程,让施工人员在虚拟环境中实操训练,快速掌握技能。平台智能推送个性化内容,提升效率、降低门槛,解决技能不足问题。(2) 运维服务智能化升级:基于AI故障诊断技术,实时监测机器人状态,分析运行数据,故障预警准确率 $\geq 90\%$,提前预警隐患。搭建“边缘计算+云端”远程运维架构,技术人员远程诊断调试,缩短响应时间,完善服务体系,将设备故障率降低35%以上。(3) 工人接受度提升策

略:明确机器人“辅助而非替代”定位,用于高强度高风险作业,解放劳动力。加强宣传,展示协同优势,减少岗位焦虑,通过技能培训提升工人竞争力,提升其接受度与参与积极性。

结束语

本文创新点在于聚焦建筑施工场景,将多模态感知、强化学习决策等AI核心技术与建筑工程机器人深度融合,突破传统协作模式局限,构建了针对性的人机协作优化体系。实证结果显示,优化后机器人定位漂移率 $\leq \pm 1\text{cm}$ 、决策响应时间 ≤ 5 秒,施工效率提升30%以上,安全风险显著降低。本文研究成果可为中交三局智能建造提供技术支撑,助力其破解施工效率、安全管控痛点,推动建筑机器人规模化应用。展望分阶段落地:短期1-2年推广AI感知+安全预警,筑牢协作安全防线;中期3-5年实现全流程数字孪生协同,提升协同效能;长期5-10年达成大模型驱动自主协作,助力中交三局实现智能建造跨越式发展。

参考文献

- [1]袁烽,胡雨辰.人机协作与智能建造探索[J].建筑学报,2021,7(5):114-117.
- [2]孙澄.“智慧建筑与建造”专业教学体系探索新工科理念下的建筑教育思考[J].时代建筑,2020,12(2):10-13.
- [3]朱蔚然.数字建筑学的转向—数字孪生与人机协作[J].当代建筑,2023,21(4):24-29.
- [4]孙澄.人工智能与建筑师的协同方案创作模式研究:以建筑形态的智能化设计为例[J].建筑学报,2020,24(2):74-78.
- [5]周渐佳,闫超.数字工匠:人机协作下的建筑未来[J].建筑学报,2022,19(4):81-85.