

智能机器人技术在工程建设中的创新应用分析

张雪芹 汪黎 张继丁 魏焱润 任鹏宇
重庆市建筑科学研究院有限公司 重庆 400016

摘要: 智能机器人技术正重塑工程建设模式。通过操作型、移动型、协作型及3D打印机器人,实现焊接、运输、高精度装配与构件定制化生产,提升效率与安全性。设计阶段,BIM与机器人路径规划结合,优化施工方案;施工阶段,替代高危作业,提升精度与大规模建造能力;运维阶段,无人机与修复机器人协同,实现自动化监测与修复。技术融合、模式与管理创新进一步推动行业转型,但面临环境适配、成本与人才转型等挑战。

关键词: 智能机器人技术; 工程建设; 创新应用

引言: 随着科技飞速发展,智能机器人技术已成为推动工程建设领域变革的关键力量。传统建造模式面临效率瓶颈、安全风险及质量波动等问题,而智能机器人凭借高精度、自动化与适应性优势,正逐步渗透至设计、施工、运维各阶段。从替代人工完成高危作业,到实现复杂结构的定制化建造,再到运维阶段的智能监测与修复,机器人技术不仅提升了工程效率与安全性,更推动了行业向智能化、绿色化转型。本文将系统分析其创新应用,探讨技术挑战与发展路径。

1 智能机器人技术的核心分类与工程适配性

1.1 技术分类与功能定位

(1) 操作型机器人: 聚焦重复性、高精度作业,在工程领域可替代人工完成焊接、喷涂、砌筑等任务,如钢结构焊接机器人能保证焊缝均匀度,砌筑机器人可按预设参数精准摆放砖块,提升作业效率与质量,降低人工劳动强度。(2) 移动型机器人: 具备自主移动能力,AGV可在工地运输建材、设备,实现物料自动化流转;巡检无人机能对高层建筑外墙、桥梁结构进行航拍检测,及时发现裂缝等隐患;地面清扫机器人可定期清理施工场地,维持环境整洁。(3) 协作型机器人: 强调人机共融,柔性装配机器人(如机械臂)可辅助工人完成吊装、部件装配等作业,通过力控技术避免碰撞,在精密设备安装、重型构件对接中发挥作用,提升操作安全性与准确性。(4) 3D打印机器人: 以增材制造为核心,

基金项目: 重庆市建设科技计划项目(城科字2024第3-21); 重庆设计集团关键技术类项目(2023-C3)。
参与人: 张雪芹、汪黎、张继丁、魏焱润、任鹏宇

作者简介: 张雪芹(1968),男,博士,担任重庆市建筑科学研究院有限公司博士后导师,研究方向: 建筑科学技术研究、检测技术与结构鉴定,建筑与房地产管理、工程监理与造价咨询等。

混凝土打印机器人可直接打印建筑墙体、构件,缩短施工周期;钢结构增材制造设备能制作复杂形状钢构件,满足个性化工程设计需求,减少材料浪费^[1]。

1.2 技术适配性分析

(1) 与工程类型匹配: 高层建筑施工中,巡检无人机适配外墙检测,协作型机械臂适配高空构件装配;桥梁工程里,操作型焊接机器人适配钢结构焊接,移动型AGV适配桥面物料运输;地下空间工程中,3D打印机器人适配隧道衬砌制作,地面清扫机器人适配地下施工场地清洁。(2) 与施工阶段匹配: 设计阶段,巡检无人机可航拍场地数据辅助建模,协作型机械臂可模拟构件装配验证设计合理性;施工阶段,操作型机器人承担焊接、砌筑等主体作业,移动型AGV保障物料供应,3D打印机器人制作特殊构件;运维阶段,巡检无人机定期检测建筑结构,协作型机械臂协助设备维护与部件更换。

2 智能机器人技术在工程建设中的创新应用

2.1 设计阶段: 机器人辅助优化与仿真

(1) 基于BIM的机器人路径规划与冲突检测: 在工程设计初期,将机器人作业参数与BIM模型深度融合,可实现施工路径的精准规划。例如,在高层建筑钢结构安装设计中,通过BIM模型导入机械臂的运动参数、作业半径等数据,模拟机械臂吊装构件的全过程,提前识别与墙体、管线等结构的冲突,避免施工阶段因路径不合理导致的返工。同时,结合实时场地数据更新模型,能动态调整机器人作业路径,确保设计方案与实际施工场景高度适配,提升设计方案的可行性与安全性。(2) 生成式设计(AI+机器人)在复杂结构中的应用: 借助AI算法的迭代优化能力,结合机器人的作业特性,可实现复杂工程结构的高效设计。以大跨度桥梁的钢桁架设计为例,AI根据承重需求、材料性能等约束条件,生成多种结构方案,再通过机器人仿真系统模拟不同方案下构件

的加工与安装过程,筛选出最适配机器人作业的结构形式。这种“设计-仿真-优化”的闭环模式,不仅能缩短复杂结构的设计周期,还能减少因结构复杂导致的机器人作业难度,提升后续施工效率^[2]。

2.2 施工阶段:核心场景的机器人替代

(1) 高危作业替代:针对高空、深基坑等高危场景,机器人可有效降低人工风险。高空玻璃幕墙安装机器人配备负压吸盘与高精度定位系统,能在百米高空自主完成玻璃搬运、定位与安装,避免工人高空坠落风险;深基坑支护机器人则通过遥控操作,完成支护桩的钻孔、注浆等作业,无需人员进入基坑底部,规避坍塌、涌水等安全隐患,目前已在城市地铁施工的深基坑项目中广泛应用。(2) 精准施工:在对精度要求极高的施工环节,机器人的优势尤为突出。钢筋绑扎机器人搭载视觉识别系统,能自动识别钢筋规格与间距,以每分钟30根的速度完成绑扎作业,误差控制在 $\pm 1\text{mm}$ 内,远超人工精度;地坪施工机器人采用激光整平技术,可实时监测地坪平整度,通过自动调节振捣机构,将地坪平整度误差控制在2m范围内不超过3mm,大幅提升地坪施工质量,适用于大型厂房、商场等大面积地坪工程^[3]。(3) 大规模建造:3D打印机器人推动工程建造向规模化、定制化方向发展。以丹麦COBOD公司的BOD23D打印机器人为例,该设备采用混凝土挤压成型技术,可在24小时内完成一层房屋的墙体打印,且能根据设计需求灵活调整墙体厚度与造型。在非洲某保障性住房项目中,COBOD3D打印机器人仅用10天便完成10栋房屋的主体结构建造,相比传统施工周期缩短60%,材料浪费减少30%,为大规模快速建造提供了可行方案。

2.3 运维阶段:智能监测与修复机器人

(1) 桥梁检测无人机群与裂缝修复机器人协同:桥梁运维中,多架搭载高清相机与红外热成像仪的无人机组成检测群,可对桥梁桥面、桥墩、主梁等部位进行全方位扫描,快速识别裂缝、剥落等病害,并将数据实时传输至后台系统;裂缝修复机器人则根据无人机定位的病害位置,自主移动至作业点,通过高压注浆技术对裂缝进行修复,实现“检测-定位-修复”的全流程自动化,大幅提升桥梁运维效率,减少人工检测的盲区与安全风险。(2) 管道清淤与渗漏检测机器人(如PipeGuard系统):地下管道运维中,PipeGuard管道机器人配备旋转切削刀具与超声波检测模块,可进入直径150-1000mm的管道内部,一边通过刀具清除管道内的淤泥、杂物,一边利用超声波检测管道壁的厚度与渗漏点,检测精度达0.1mm。在城市污水处理管道运维项目

中,该系统可一次性完成清淤与检测作业,相比传统“人工清淤+设备检测”的模式,作业效率提升3倍,且能避免人员进入管道作业的安全隐患,保障管道运维的连续性与安全性。

3 智能机器人技术在工程建造中应用的关键创新点

3.1 技术融合创新

(1) 5G+边缘计算支持下的远程操控与实时反馈:5G的高带宽、低时延特性,搭配边缘计算的本地化数据处理能力,打破了机器人操控的空间限制。在偏远地区桥梁施工中,工程师可通过远程终端,借助5G网络实时操控高空作业机器人,边缘计算则能快速处理机器人采集的施工数据,如构件安装精度、设备运行参数等,将反馈时延控制在毫秒级,避免因数据传输延迟导致的操作误差,同时减少云端数据传输压力,保障复杂工况下机器人操控的稳定性。(2) 数字孪生与机器人集群的协同作业模式:构建工程全生命周期的数字孪生模型,将机器人集群的作业数据实时映射至虚拟场景。例如在大型厂房建设中,数字孪生模型可同步显示多台3D打印机器人、AGV运输机器人的位置、作业进度,当某台机器人出现故障时,模型能快速模拟调整其他机器人的作业路径与任务分配,实现集群协同调度,避免单一设备故障导致的施工停滞,提升整体作业效率^[4]。

3.2 模式创新

(1) 从“单机作业”到“机器人编队”的施工组织变革:传统单机作业存在效率低、协同性差的问题,而“机器人编队”通过统一的调度系统,实现多类型机器人的联动作业。以高层建筑施工为例,钢筋绑扎机器人、混凝土浇筑机器人、巡检机器人组成编队,钢筋绑扎机器人完成作业后,自动向调度系统反馈,调度系统随即指令混凝土浇筑机器人进场,同时巡检机器人实时监测施工质量,形成“工序衔接-质量监测”的闭环,大幅缩短施工工期,减少人工协调成本。(2) 机器人即服务(RaaS)的租赁模式探索:针对中小建筑企业设备采购成本高的痛点,RaaS模式允许企业按施工周期租赁机器人设备及配套服务。例如某装修企业承接短期幕墙安装项目时,无需购买高空玻璃幕墙安装机器人,可通过租赁平台获取设备,平台同时提供操作培训、设备维护服务,降低企业前期投入,提高机器人设备的利用率,推动智能技术在中小建筑企业的普及。

3.3 管理创新

(1) 基于机器人作业数据的施工进度动态优化:机器人作业过程中实时采集的施工数据,如作业时长、完成工程量、设备故障率等,可接入项目管理系统。系统

通过数据分析,精准计算各工序进度偏差,例如当钢筋绑扎机器人作业效率低于预期时,自动分析原因并调整作业参数,或增派设备,确保施工进度符合计划,避免传统人工统计滞后导致的进度失控。(2)人机协作安全标准与伦理规范制定:随着人机共融场景增多,安全与伦理问题凸显。通过制定统一标准,明确机器人作业的安全距离、力控阈值,例如协作型机械臂在与工人配合时,当检测到人员进入安全范围,自动降低运行速度;同时规范机器人数据采集边界,禁止收集无关人员信息,保障施工人员安全与数据隐私,为智能机器人的合规应用提供保障。

4 智能机器人在工程建造应用中的挑战与对策建议

4.1 主要挑战

(1)技术层面:工程建造场景复杂多变,智能机器人环境感知能力存在明显短板,如在粉尘、强光、复杂地形的工地中,传感器易受干扰,难以精准识别障碍物与作业目标;同时,多机协同算法尚未成熟,当多台不同类型机器人(如AGV、3D打印机器人)在同一区域作业时,易出现路径冲突、任务分配失衡问题,无法实现高效协同。(2)经济层面:智能机器人设备采购、系统部署成本高昂,一台高端协作型机械臂单价可达数十万元,中小建筑企业难以承担;且工程建设项目周期长、变量多,机器人的投资回报率(ROI)测算缺乏统一标准,部分企业因无法精准评估收益,对引入机器人持观望态度。(3)管理层面:传统工人技能与智能机器人操作需求不匹配,大量依赖体力劳动的工人面临技能转型压力,若培训不到位,易导致机器人操作失误;此外,人机协作场景下安全责任划分模糊,当发生安全事故时,难以界定是机器人设备故障、操作失误还是管理漏洞导致,增加项目管理风险。

4.2 对策建议

(1)技术研发:推动高校、科研机构与建筑企业深度合作,组建专项研发团队,重点攻关适用于复杂工地

环境的核心传感器(如抗干扰激光雷达、多光谱视觉传感器),提升机器人环境感知精度;同时,联合算法企业开发自适应多机协同算法,结合工程场景需求优化任务分配与路径规划逻辑,解决多机器人协同难题。(2)政策支持:政府牵头制定智能机器人施工技术标准、安全规范,明确设备性能要求与作业流程;针对企业购置机器人设备,推行税收减免、专项补贴政策,如对采购金额超过一定标准的企业,按比例返还增值税;搭建行业ROI测算平台,提供标准化测算工具,帮助企业科学评估收益。(3)人才培养:构建“机器人操作员+工程师”双轨制职业体系,在职业院校开设机器人操作与维护专业,培养具备基础操作能力的操作员;联合企业开展在职培训,将传统工人转型为操作员;同时,在高校增设智能建造专业,培养能完成机器人系统设计、调试的工程师,满足不同岗位人才需求。

结束语

智能机器人技术正深刻改变工程建造的面貌,其创新应用不仅提升了建造效率、质量和安全性,更推动了行业向智能化、自动化方向迈进。然而,技术适配性、成本控制及人机协作安全等问题仍待解决。未来,随着技术融合的深化和管理模式的创新,智能机器人将在工程建造中发挥更大作用,助力实现更高效、精准、可持续的建造目标,为行业发展注入新动能。

参考文献

- [1]毕纪刚.智能建筑技术在绿色建设工程中的应用与优化[J].住宅产业,2024,(08):87-89.
- [2]李聪,李振,孟辉.智能建造技术在模块化建筑工程中的应用[J].广东土木与建筑,2024,(03):39-40.
- [3]李桐.当代建筑工程中的智能建造技术及其应用研究[J].智慧中国,2023,(12):124-125.
- [4]丁钡.建筑施工中的智能机器人技术应用研究[J].工程技术,2024,(07):71-72.