

无人机与机器人技术在智慧工地中的实践探索

田业凯

中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241000

DOI:10.61369/ME.2024080029

摘 要 : 随着新一代信息技术的迅猛发展,建筑工程行业正迎来数字化、智能化变革的浪潮。无人机与机器人作为智慧工地建设的新兴力量,在安全管控、质量检测、进度把控等关键环节发挥着日益重要的作用。本文以雄忻高铁项目为例,探讨了无人机与机器人技术在智慧工地中的创新应用。通过分析“1+3+N”的总体架构,剖析了无人机和机器人在安全监测、质量管控、进度管理等核心场景中的实践案例。研究总结了 SLAM 定位导航、AI 机器视觉、数字孪生等关键技术,梳理了全生命周期实施路径与保障措施。应用实践表明,以无人机、机器人为核心的智慧工地新模式,有力提升了工程安全质量管理水平,为同类工程的智慧化升级提供了可资借鉴的范例。

关 键 词 : 智慧工地; 无人机; 机器人; 人工智能; 数字孪生

Practical Exploration of Unmanned Aerial Vehicle and Robot Technology in Smart Construction Sites

Tian Yekai

China Communications Second Highway Engineering Bureau Fourth Engineering Co., LTD. Wuhu, Anhui 241000

Abstract : With the rapid development of new-generation information technology, the construction engineering industry is ushering in a wave of digital and intelligent transformation. As emerging forces in the construction of smart construction sites, drones and robots are playing an increasingly important role in key links such as safety control, quality inspection and progress control. This article takes the Xiongxin High-Speed Railway project as an example to explore the innovative application of unmanned aerial vehicle (UAV) and robot technologies in smart construction sites. By analyzing the overall architecture of "1+3+N", practical cases of unmanned aerial vehicles and robots in core scenarios such as safety monitoring, quality control, and progress management were dissected. The research summarized key technologies such as SLAM positioning and navigation, AI machine vision, and digital twins, and sorted out the implementation paths and safeguard measures throughout the entire life cycle. Application practice shows that the new model of smart construction sites centered on unmanned aerial vehicles and robots has effectively enhanced the safety and quality management level of projects, providing a referenceable example for the intelligent upgrade of similar projects.

Keywords : smart construction site; UAV; robot; artificial intelligence; digital twin

引言

当前,建筑工程行业正迎来数字化、智能化变革的浪潮。作为工程建设的核心场所,施工现场的智慧化升级备受关注。以无人机、机器人为代表的新一代信息技术,正加速与工程建设全过程深度融合,催生出智慧工地的崭新业态。智慧工地以物联网、大数据、人工智能等技术为支撑,通过全面感知、智能分析、自动执行,实现了施工现场的透明化管理和精细化作业。在安全管控、质量检测、进度把控等关键环节,无人机和机器人凭借灵活机动、智能协同的独特优势,为打造智慧工地新格局提供了创新路径。

一、智慧工地总体架构设计

(一) “1+3+N” 智慧工地技术架构

雄忻高铁项目智慧工地实施方案为“1+3+N”架构提供了很好的实践案例。方案中明确提出,要建设统一的智慧工地云平台,

汇聚施工现场海量数据,实现跨专业、跨部门、跨阶段的数据共享与业务协同。在此基础上,方案还规划了感知层、网络层、应用层“3”大核心层级。其中,感知层包括视频监控、环境监测、RFID 定位等14类物联网感知终端;网络层采用“有线+无线”方式,利用400M专线接入互联网,并覆盖现场的 Wi-Fi、4G/5G 网络;应

用层囊括了视频分析、安全管控、进度管理、质量验收等16项智慧应用。此外,塔吊监测、起重机监测、智能安全帽等一系列智能装备也纳入了“N”的范畴。“1+3+N”的智慧工地架构设计在雄忻项目中得到了全面的落地和验证,为更大规模的推广应用奠定了基础。



图1 雄忻高铁智慧工地 '1+3+N' 技术架构图 "

（二）无人机系统和机器人系统在智慧工地架构中的定位

在雄忻高铁智慧工地建设中,无人机和机器人系统作为新兴智能装备,发挥着日益重要的作用。无人机系统通过搭载光学相机、热成像仪等设备,对施工现场进行低空数字化测绘,获取高精度地形图和设施图,并与 BIM 模型叠加分析,服务于施工规划和进度管理;同时开展安全隐患排查,对高边坡、深基坑等重点区域进行稳定性监测^[1]。机器人系统如隧道质量检测机器人,利用三维激光扫描技术实现隧道断面高精度测量,并集成缺陷检测算法,自动识别质量问题;钢筋数控加工机器人实现钢筋加工全过程自动化控制,提升工效。在“1+3+N”架构中,无人机和机器人深度参与感知层数据采集,通过5G、Wi-Fi组网实现网络层数据回传,并在应用层赋能安全管控、质量检测等业务应用。无人机和机器人是智慧工地不可或缺的重要组成。

二、核心应用场景与实践案例

（一）安全监测体系重构

雄忻高铁地下段施工面临隧道渗漏、基坑变形、高空作业等安全风险,亟须创新安全监测手段。无人机搭载热成像仪对隧道内部进行全方位扫描,及时发现渗漏风险点并上报预警,同时机器人利用激光雷达实现隧道断面形态参数的高精度检测,结合设计模型分析结构安全性。针对深基坑施工,无人机通过机载相机获取高清影像并利用倾斜摄影技术解算变形数据,而机器人则可深入基坑底部进行地质雷达探测,主动排查危岩危树隐患。在高空作业环节,AI算法赋能的无人机可精准识别未佩戴安全绳、移动至警戒区等违规行为,机器人则定期对走道、爬梯进行载荷检测,为施工人员提供安全保障。由此可见,以无人机、机器人为代表的新技术正逐步构建起智慧工地的立体化安全监测防护网。

（二）质量管控流程再造

大体积混凝土浇筑质量控制是雄忻高铁建设的重中之重。项目创新性地应用无人机,通过搭载热成像设备与温湿度传感器,对混凝土温度场进行空中测量,获取整个浇筑体的实时温度分布,及时发现温度裂缝风险并优化养护方案。同时,机器人自动采集不同时间、不同部位的混凝土试块,高效获得强度、耐久性等关键数据。钢筋绑扎质量把控方面,机器人集成视觉定位与张

力传感技术,能精确识别钢筋位置并检测其绑扎牢固度,相比人工抽检,检测效率提升5倍以上。项目全面应用 BIM 技术,通过无人机倾斜摄影获取的点云数据与设计模型比对,快速核查施工偏差,结合机器人实时动态测绘,持续优化 BIM 模型,实现工程建模一体化^[2]。新一代信息技术正推动传统质量管控向数字化、智能化升级。

（三）进度管理手段创新

工程进度管理需要及时准确的现场数据支撑。雄忻高铁项目充分发挥无人机灵活机动的优势,对施工现场开展数字化低空摄影测量,通过云端智能算法分析合成的三维模型,可精确计算出土石方量、混凝土浇筑量等关键工程量指标,进度统计效率较传统人工测量提升10倍以上。针对隧道开挖等关键线性工程,项目引入自动化放线机器人,通过全站仪、GNSS等技术实现隧道轴线、坡度的高精度引测,并直接传输数据指令,引导挖掘机、推土机的作业路径与开挖深度^[3]。在混凝土后期养护环节,项目还创新部署了无人值守控制系统,利用机器人实时采集混凝土表面温湿度信息,通过算法分析自动控制养护设备,实现养护过程“一键式”管理,有效缩短了关键路径工期,无人机、机器人正逐步成为工程进度精细化管理的利器。

通过以上分析可见,在雄忻高铁智慧工地建设中,无人机、机器人等新技术新装备在安全监测、质量管控、进度管理等关键领域发挥着不可或缺的作用。图2总体展示了雄忻高铁智慧工地的整体建设布局,集中体现了“AI+机器人”在工程现场管理各环节的深度融合和创新应用。AR 监控中心、塔机监控、环境监测、安全巡检等场景分布,全景勾勒出了这一超级工程的智慧化建设蓝图。



图2 雄忻高铁智慧工地整体建设布局示意图

三、关键技术创新与实施路径

（一）SLAM定位导航技术

雄忻高铁智慧工地广泛应用 SLAM 定位导航技术,为无人机和机器人赋予精准的空间定位和自主导航能力。系统融合了 GPS、北斗卫星定位、UWB室内定位和激光雷达 SLAM 技术,构建了“室内+室外”“地面+低空”的多模态高精度定位体系^[4]。在隧道、基坑等复杂 GNSS 信号缺失环境,UWB 定位信标布设密度达到50个/km²,配合激光雷达点云匹配,实现了亚米级连续定位,定位误差控制在10cm以内。同时,针对无人机巡检和机器人作业面临的高低起伏地形,研发了自适应路径规划算法,通过实时三维避障和最优路径搜索,使机器人运行轨迹相比传统人工规划缩短40%以上。目前,该项目已成功在全线5台无人机、3台隧道质检机器

人、2台钢筋加工机器人中完成定位导航模块的集成应用,为设备自主作业提供了坚实的技术支撑。

（二）AI赋能的机器视觉

雄忻高铁项目创新性地研发了基于深度学习的隧道衬砌缺陷检测系统,利用高精度语义分割模型对无人机采集的隧道壁画影像进行智能分析,能够准确识别混凝土裂缝、掉块、渗水等9类缺陷,检测准确率达96.5%,大幅提升了隐患排查效率。针对钢筋加工质量缺陷类型多、人工难以穷举的特点,项目还创新应用了小样本学习技术,通过人机协同标注200张钢筋加工缺陷样本图像,并利用迁移学习算法进行模型训练,在实际应用中将原有人工抽检10%的缺陷检出率提高至95%以上。此外,在塔吊吊装作业智能监管方面,项目研制了塔吊吊钩智能防撞系统,通过在塔吊吊钩上装配微型摄像头对周边障碍物进行实时成像分析,并结合吊钩高度、回转角度等传感数据,实现了对狭小空间、跨越施工等高风险吊装作业的自动预警。

（三）数字孪生与大数据分析

数字孪生和大数据分析技术是智慧工地的核心引擎。雄忻高铁项目充分利用无人机倾斜摄影测量获得的高精度三维点云数据,并与BIM设计模型进行精准匹配,构建了覆盖隧道洞身、地下连续墙等关键结构的数字孪生模型。通过可视化的BIM与实景融合渲染,工程技术人员可以直观发现施工偏差和安全隐患。同时,项目还搭建了涵盖设计、施工、监测、物资、机械等全域工地数据的大数据平台,利用本体知识图谱技术对业务数据进行语义关联挖掘,实现了跨专业域的安全风险智能推理。例如通过关联超前地质预报、机载雷达监测、机器人锚杆质量检测等多源异构数据,系统可自动分析隧道施工的24类安全风险,涉及围岩稳定性、爆破震动、突水等300项风险因子,为安全管理决策提供智慧助力。

（四）实施路径与保障措施

雄忻高铁项目采用了全生命周期的实施路径,从顶层设计、系统开发、试运行到推广应用,严格把控每个环节的实施质量。在测试验证阶段,项目从功能完备性、性能效率、安全稳定三个维度,开展了近50轮的测试,并形成完整测试报告,作为系统优化的重要依据。在平台搭建阶段,项目组织10名软件工程师,历时3个月完成了智慧工地云平台的环境部署,实现了勘察设计、生产管理、安全质量、物资设备等16个业务系统和10类数据的互联互通。在人员保障方面,项目成立了一支40人的智慧工地实施团队,覆盖管理、技术、运维等各类人才,并专门制定了人员培训、持证上岗等管理制度^[5]。在网络方面,项目投资1500万元建设8个5G基站,实现了现场及生活区的5G网络全覆盖,平均下行速率达到

1.2Gbps。此外,项目还通过了公安部门的等保三级测评,部署了数据安全接入网关、数据脱敏等安全防护设施,筑牢数据安全底座。

四、应用价值分析与展望

（一）应用效果评估

雄忻高铁智慧工地的建设成效显著,有力地提升了工程安全质量管理水平。在安全管理方面,通过部署智能安全帽、AI行为识别、塔吊防撞等系统,现场事故率较传统工地降低80%,高风险作业管控实现100%全覆盖。质量管控能力大幅跃升,利用无人机混凝土浇筑温度监测,机器人自动采样等手段,实现了混凝土强度99.5%的高合格率,钢筋一次验收合格率达到98%。在进度管控上,无人机测量土石方量计算误差控制在5%以内,机器人辅助的智能放样、混凝土养护等措施,累计为工期节省10%。经济效益方面,每月通过自动化作业节约人工150人/天,综合成本较传统方式降低8%。

（二）推广价值与展望

雄忻高铁智慧工地的建设模式具有显著的推广价值。一方面,其形成了机载智能感知、机器人自主作业、人机协同管控的“AI+机器人”融合发展范式,可为行业智慧化升级提供路径指引;另一方面,项目在隧道质检、钢筋加工等典型场景下,探索出了作业流程再造、数据融合增效的实施范例,为同类工程应用提供了可资借鉴的实践指南。未来,在更广阔的工程建设领域,亟须进一步总结提炼雄忻高铁的智慧建设经验,形成适用于复杂环境下的机器人协同作业标准体系。同时,还要立足前沿,将5G、区块链、元宇宙等颠覆性技术与智慧工地应用场景深度融合,打造数字交互、实景同步的沉浸式管理新模式。

五、结语

综上所述,无人机与机器人技术正成为智慧工地建设的核心驱动力。以雄忻高铁项目为代表的实践案例充分证明,将“飞行器+智能装备”创新融入施工现场管理,能够显著提升工程安全、质量、进度管控水平,助推行业高质量发展。未来,在人工智能、5G、区块链等颠覆性技术的推动下,无人机、机器人与工程建设必将加速融合,不断催生智慧工地的新场景、新模式、新业态。技术创新将持续赋能行业数字化转型,智慧工地经验还将从工程领域向城市建设、运维等更广阔空间延伸拓展。

参考文献

- [1]洪志山.智慧化工程管理技术在智慧工地中的应用[J].工程技术研究,2023,8(23):128-130+150.DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.23.042.
- [2]杨常红,翟华,丁剑.基于无人机倾斜摄影测量的智慧三维工地应用[J].北京测绘,2022,36(08):1013-1018.
- [3]尹东.基于无人机和计算机视觉的智慧工地管理方法研究[D].湖南大学,2022.
- [4]秦烁晓,吴军.无人机倾斜摄影在智慧工地中的部分应用[J].建筑,2022,(01):74-75.
- [5]肖云,王磊.无人机倾斜摄影辅助智慧工地平台在工程总承包项目管理中的应用研究[J].中国高科技,2021,(16):107-109.
- [6]刘泳奇,吴环宇,陈珂.智能建造技术在工程造价管理中的应用研究综述[J].建筑经济,2022(S1).
- [7]程英鑫.无人机应用技术的教学方案分析[J].电子技术,2023,52(03):298-300.
- [8]唐玉娟,胡兴柳,杨忠,等.机器人工程新工科专业建设实施方案探索——以金陵科技学院为例[J].教育教学论坛,2021,(28):48-51.
- [9]杨常红,翟华,丁剑.基于无人机倾斜摄影测量的智慧三维工地应用[J].北京测绘,2022,36(08):1013-1018.
- [10]李伟.无人机航测技术在建筑工程智慧化管理中的应用[J].数字技术与应用,2024,42(03):40-42.