

无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用研究

邓 超

(南京轨道交通产业发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要 无人机智能感知技术和城市轨道交通低空巡检需求相结合, 给传统巡检模式带来了革命性的改变。智能感知系统借助集成高分辨率视觉传感器、激光雷达、红外热像仪等多种传感设备, 实现对城轨基础设施的全方位自动化监测。多传感器融合技术切实有效提升了缺陷识别的精度, 深度学习算法在轨道设备状态评估中展现出了优异的性能。实验验证的结果明确显示, 智能感知巡检系统在检测准确率、巡检效率以及成本控制等多个方面都优于传统人工巡检方式, 该技术为城轨行业信息化运维提供了新的技术路径。

关键词 无人机; 智能感知; 城市轨道交通; 低空巡检; 多传感器融合

中图分类号: TP391; V279; U231.8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.010

0 引言

城市轨道交通系统属于现代城市重要的公共交通基础设施, 承担着巨大的客运压力, 其安全运营和社会稳定与经济发展直接相关。传统人工巡检方式存在效率低下、成本高昂、安全风险大等诸多问题, 难以满足现代化城轨系统对巡检工作的高标准要求。无人机技术快速发展为城轨巡检提供了新的技术路径, 尤其是智能感知技术日趋成熟让无人机能在复杂低空环境实现精准自主巡检。智能感知技术融合计算机视觉、机器学习、传感器技术等多领域先进成果, 为城轨系统信息化运维管理奠定了坚实的技术基础。

1 无人机智能感知技术概述与城轨巡检需求分析

无人机智能感知技术已经从简单的遥感监测发展到复杂的智能识别, 并形成以计算机视觉、激光雷达、多光谱成像为核心的综合感知体系^[1]。

技术架构从单一传感器朝着多传感器融合方向转变, 算法从传统图像处理向深度学习不断演进, 激光雷达能够实现厘米级精度的三维建模, 卷积神经网络大幅提升了感知系统的智能化水平^[2]。

城轨系统对于巡检工作需求呈现出高频次、高精度且全覆盖的特点, 轨道基础设施包含钢轨、接触网、信号设备等关键部件, 需要进行定期的状态监测与缺陷识别。

多传感器融合技术能够实现不同类型设备缺陷的全面检测, 深度学习算法在处理大量巡检数据方面具备显著优势^[3]。

2 无人机智能感知技术在城轨低空巡检中的应用

2.1 智能感知巡检系统架构应用

智能感知巡检系统采用的是分层架构设计方式, 包含了硬件平台层、数据采集层、信息处理层和应用服务层这四个核心层次, 各层次之间依靠标准化接口来实现数据交互以及功能协同^[4]。图1详细展示了系统的整体架构设计情况, 硬件平台层以多旋翼无人机作为载体, 并且搭载了高分辨率相机、激光雷达、红外热像仪等多种传感设备, 这种采用模块化的架构设计方式能够确保系统拥有良好的可扩展性, 同时也保证了系统具备维护方面的便利性, 这为后续开展技术升级工作奠定了坚实的基础。数据采集层负责实时获取多源异构的感知数据, 建立标准化的信息化数据接口, 采用高速数据链路来确保信息传输的实时性与可靠性。信息处理层集成了图像预处理、特征提取、模式识别、数据融合等核心算法模块, 通过边缘计算与云端计算的协同处理来实现智能分析功能, 应用服务层提供巡检任务规划、缺陷识别报告、维护建议生成等业务功能, 支持与城轨信息化运营管理系统进行无缝对接^[5]。

2.2 多传感器融合技术应用

多传感器融合技术整合视觉激光红外等不同模态感知信息, 显著提升巡检系统对复杂环境适应能力与检测精度, 融合算法采用加权平均方式综合各传感器检测结果, 权重分配基于传感器可靠性评估与环境适应性分析, 实施多层次融合策略有效解决单一传感器

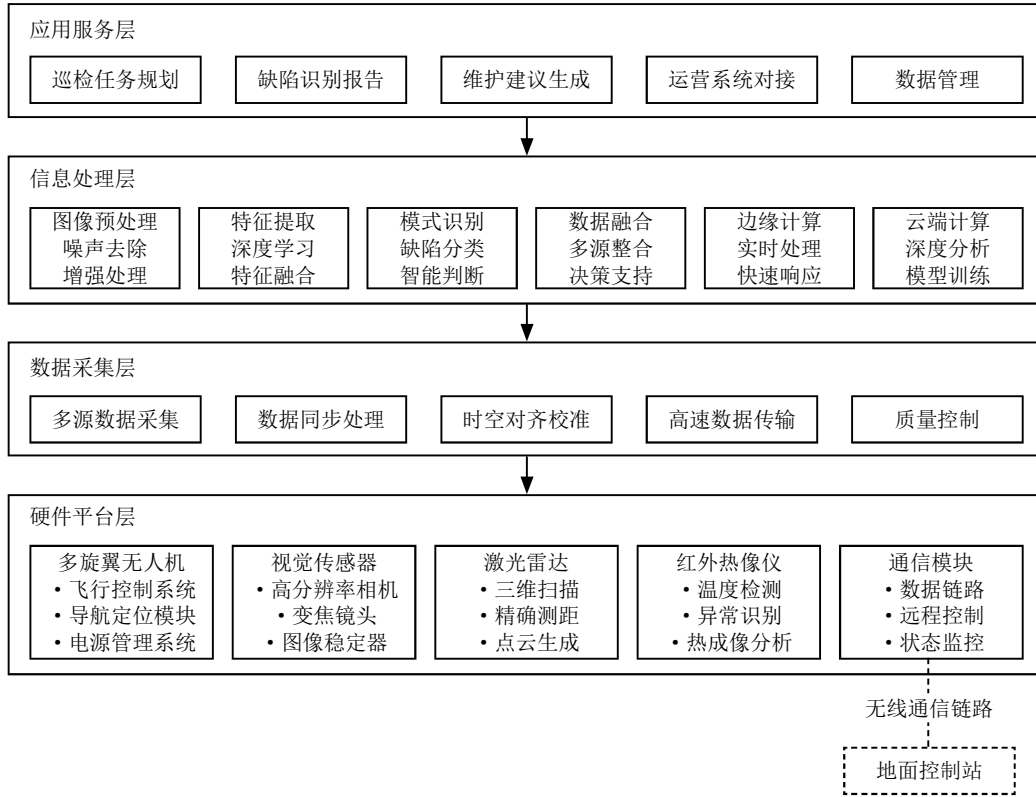


图 1 智能感知巡检系统架构

在特定环境下的局限性问题的，大幅提升系统的鲁棒性与可靠性。数据层融合实现多源数据时空对齐与格式统一，特征层融合提取不同传感器数据互补特征，决策层融合综合多个检测结果形成最终判断。融合精度计算公式为：

$$P_{fusion} = \sum_{i=1}^n w_i \times P_i \times R_i \quad (1)$$

式（1）中， P_{fusion} 为融合后的检测精度（%）， w_i 为第 i 个传感器的权重系数（无量纲）， P_i 为第 i 个传感器的单独检测精度（%）， R_i 为第 i 个传感器在当前环境下的可靠性系数（无量纲）， n 为传感器总数（个）。该公式通过动态权重分配机制确保不同环境条件下传感器数据最优融合效果。

2.3 智能识别算法在巡检中的应用

智能识别算法把深度卷积神经网络当作核心，构建出面向城轨设备缺陷检测的专用模型，实现了对钢轨裂纹、接触网磨损、信号设备异常等多种缺陷类型的自动识别，算法采用端到端的训练方式，通过大量标注数据的学习建立从原始图像到缺陷类别的直接映射关系，引入深度学习模型后系统能自动学习复杂缺陷特征模式，和传统图像处理方法相比在识别精度与

泛化能力上有质的飞跃。网络结构包含特征提取模块、注意力机制模块、分类决策模块，能够有效处理复杂背景下的微小缺陷识别问题，算法在训练过程中采用数据增强技术来扩大样本规模，使用迁移学习方法以加速模型收敛。识别准确率计算公式为：

$$A = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \times 100\% \quad (2)$$

式（2）中， A 为识别准确率（%）， TP 为真正例数量（个）， TN 为真负例数量（个）， FP 为假正例数量（个）， FN 为假负例数量（个）。该公式通过混淆矩阵的方式全面评估算法在不同缺陷类型识别中的综合性能表现。

3 系统实验验证与应用效果分析

3.1 实验验证方案设计

实验验证方案从系统性能评估和实用性验证两个维度来展开，构建起涵盖室内模拟环境与实际线路环境的分层测试体系。室内测试环境模拟典型城轨线路场景，其中包括直线段、弯道段、高架段等不同线路类型，还设置标准化缺陷样本用于算法精度验证，测试指标体系包含检测精度、识别速度、系统稳定性、环境适应性四个维度，且每个维度都设定量化的评价

标准与测试方法。实验运用对比测试的方式把智能感知巡检系统与传统人工巡检以及单一传感器巡检做全面比较，测试数据收集采用标准化的数据记录格式以此确保实验结果的客观性与可重复性，实验周期设定为连续三个月且覆盖不同天气条件与光照环境来全面验证系统的工程适用性。

3.2 应用效果测试与分析

应用效果测试的结果明确显示智能感知巡检系统在多项关键指标上都实现了显著提升，该系统的综合性能优势由此得到了充分验证。基于信息化技术的智能感知巡检系统与传统方式对比如表 1 所示，智能感知巡检和传统巡检方式在检测精度、作业效率以及成本投入等方面的差异，相关数据表明智能系统的检测精度达到了 95.8%，相比人工巡检提升了 12.3%，在巡检效率方面，智能系统完成单公里线路巡检的时间为 8.5 分钟，较传统方式缩短了 75%。系统稳定性测试的情况表明在连续运行 180 小时的情况下，故障率能够控制在低于 0.5% 的水平，完全可以满足工程应用方面的要求，环境适应性测试最终验证了系统在不同气象条件当中具备可靠运行的能力。

表 1 智能感知巡检与传统巡检效果对比

评价指标	传统人工巡检	智能感知巡检	提升幅度
检测精度（%）	83.5	95.8	+12.3
单公里巡检时间（分钟）	34.0	8.5	-75.0%
人员需求（人）	6	2	-66.7%
单次巡检成本（元）	2 800	850	-69.6%
缺陷漏检率（%）	8.2	2.1	-74.4%
误报率（%）	12.6	3.8	-69.8%
危险区域适应性	受限	良好	显著改善
夜间作业能力	有限	全天候	全面提升
数据记录完整性	一般	完整	大幅提升

3.3 技术优化与改进方向

技术优化工作主要聚焦于算法精度提升、系统集成度改进以及环境适应性增强这三个方面，其目的是进一步提升智能感知巡检系统的工程实用性。算法优化方向涵盖引入更先进的深度学习架构、优化训练策略以及扩大训练数据集规模等措施，预期能够将识别精度提升到 98% 以上，系统集成度改进重点是开展硬件模块的小型化与轻量化设计，通过采用新型传感器芯片和高效能计算平台，以实现系统重量降低 30%、功耗降低 40% 的目标。表 2 详细地展示了各项技术指标

当前水平与优化目标，给系统改进提供了明确的技术路线图，环境适应性增强措施涵盖开发全天候作业能力、提升电磁干扰抗性、增强恶劣天气适应性等内容，同时完善信息化运维管理平台建设。

表 2 技术优化指标与改进目标对比

技术指标	当前水平	优化目标	改进措施
识别精度（%）	95.8	98.2	深度学习架构升级
系统重量（kg）	12.5	8.8	硬件轻量化设计
功耗（W）	180	108	高效能计算平台
响应速度（ms）	85	50	边缘计算优化
电磁干扰抗性（dB）	35	45	屏蔽技术改进
恶劣天气适应性	中等	优秀	防护等级提升
续航时间（小时）	2.5	4.0	电池技术升级
传感器集成度	分离式	一体化	模块化集成
故障率（%）	0.5	0.2	可靠性设计优化

4 结束语

无人机智能感知技术用于城轨低空巡检的应用研究显示，该技术有广阔的发展前景和实用价值。智能感知系统通过多传感器融合与深度学习算法有机结合，显著提升巡检作业自动化水平和检测精度，有效降低人工成本和安全风险。实验验证，系统在实际应用环境中具备可靠性与稳定性。随着人工智能技术持续进步和传感器性能不断提升，智能感知巡检系统将在算法优化、环境适应性、系统集成度等方面实现进一步突破，为城市轨道交通信息化运维提供更完善的技术支撑，推动城轨行业朝着更高水平信息化与智能化方向发展。

参考文献：

[1] 史龙,孙亮,叶轲,等.低空铁路巡检场景技术研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(05):1-8.
[2] 李慧,蔡伯根,傅卫国,等.铁路基础设施低空无人机巡检现状与应对策略[J].铁道通信信号,2025,61(06):1-10.
[3] 李浩,牛洪蛟,李夏洋,等.基于无人机协同编队控制的铁路智能巡检方法[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):11-17,70.
[4] 秦勇,张紫城,杨怀志,等.轨道交通基础设施自主无人机智能巡检技术现状与发展趋势[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(02):1-10.
[5] 蔡伯根,李智宇,王剑,等.面向铁路巡检的低空无人机智能感知与精密定位研究[J].铁路通信信号工程技术,2025,22(01):1-12.