

基于无人机和图像识别技术的玻璃幕墙安全系统检测研究

陈伟忠, 陈惜墨, 徐自力

浙江安防职业技术学院, 浙江 温州 325016

摘 要 : 本研究针对既有建筑玻璃幕墙的安全检测需求, 开发了一套基于无人机和图像识别技术的检测系统。系统集成无人机巡检、高分辨率图像采集、人工智能算法分析等功能, 实现了对玻璃幕墙表面裂纹、密封胶开裂、外墙面板脱落等安全隐患的高效、精准检测。实验结果表明, 该系统较传统检测方法在检测效率、准确性和成本节约方面具有显著优势。本研究不仅推动了建筑安全检测技术的进步, 也为玻璃幕墙的维护管理提供了科学依据和技术支撑。

关 键 词 : 无人机; 图像识别; 玻璃幕墙; 安全系统

Research on the Detection of Glass Curtain Wall Safety System Based on Unmanned Aerial Vehicle and Image Recognition Technology

Chen Weizhong, Chen Ximo, Xu Zili

Zhejiang College of Security Technology, Wenzhou, Zhejiang 325016

Abstract : This study addresses the safety inspection needs of existing building glass curtain walls by developing a detection system based on unmanned aerial vehicles (UAVs) and image recognition technology. The system integrates UAV inspection, high-resolution image acquisition, artificial intelligence algorithm analysis, and other functions, enabling efficient and precise detection of safety hazards such as surface cracks, sealant cracking, and exterior panel detachment on glass curtain walls. Experimental results demonstrate that this system has significant advantages over traditional detection methods in terms of detection efficiency, accuracy, and cost savings. This research not only advances the technology of building safety inspection but also provides a scientific basis and technical support for the maintenance and management of glass curtain walls.

Keywords : Unmanned Aerial Vehicles (UAVs); image recognition; glass curtain walls; safety system

引言

随着城市化进程的加速, 玻璃幕墙作为现代建筑的标志性元素, 广泛应用于高层建筑、商业综合体等建筑中。然而, 长期暴露在户外环境中的玻璃幕墙易受自然侵蚀和人为因素影响, 存在安全隐患。近年来, 玻璃幕墙安全事故频发, 引起了社会广泛关注。因此, 对既有建筑玻璃幕墙的安全性能进行检测和维护变得尤为重要。传统的手工检测方法不仅效率低, 且难以满足大规模检测的需求。随着智能技术的飞速发展, 运用无人机和图像识别技术提升检测效率和精准度已成为必然趋势。本研究旨在开发一套基于无人机和图像识别技术的玻璃幕墙安全系统检测系统, 以实现高效、精准、安全的检测^[1]。

一、国内外研究现状与发展趋势

截至目前, 关于基于无人机和图像识别技术的玻璃幕墙安全系统检测系统的国内外研究相对较少, 但发展趋势明确。在国内, 中国建筑科学研究院等科研机构一直在进行与玻璃幕墙相关的性能测试和研究, 包括双玻夹层玻璃的性能测试等。国外如美国阿斯匹林实验室、德国建筑研究所等也在进行建筑外墙和屋顶系

统的研究, 关注材料耐久性和建筑性能。在知识产权方面, 国内外的玻璃幕墙企业通常会申请相关专利来保护他们的技术和创新^[2]。

随着智能科技的进步, 建筑智能化检测技术正逐渐被重视并得到应用。国内外的研究机构和企业都在探索利用无人机、图像识别等智能技术提高建筑安全检测的效率和精度, 同时降低检测成本。发展趋势上, 该技术将朝着集成化、数据处理与分析、远程监控与维护、定制化服务等方向演进^[3]。

项目信息: 温州市科技局基础性公益科研项目, 项目编号: G20240085 项目名称: 基于无人机和图像识别技术的玻璃幕墙安全系统检测研究。

作者简介: 陈伟忠 (1981.09-), 男, 汉族, 浙江温州人, 研究生, 副教授, 研究方向: 智能建筑、工程监理。

二、系统架构与关键技术

（一）系统架构

1. 无人机巡检系统

（1）无人机平台选择

本研究选用了 DJI Matrice 系列无人机作为巡检平台。该平台搭载了高精度 RTK 定位系统，能够实现厘米级定位精度。同时，无人机还集成了高分辨率相机和红外成像系统，能够对玻璃幕墙进行多光谱检测。

（2）智能航线规划

为了实现无人机的自主飞行和高效巡检，本研究开发了智能航线规划功能。该功能能够根据建筑物的三维模型和玻璃幕墙的分布情况，自动规划最优巡检路径。在飞行过程中，无人机能够实时调整航线，避开障碍物，确保巡检任务的顺利完成^[4]。

（3）多光谱检测

无人机搭载了高分辨率相机和红外成像系统，能够对玻璃幕墙进行多光谱检测。高分辨率相机能够捕捉到玻璃幕墙表面的微小裂纹和污渍等缺陷；红外成像系统则能够检测玻璃幕墙内部的空鼓等隐患。通过多光谱检测，可以实现对玻璃幕墙的全面检测和分析^[5]。

2. 人工智能算法研究

（1）深度学习模型选择

本研究选用了 YOLOv5 深度学习模型作为缺陷识别算法的基础。YOLOv5 具有检测速度快、识别准确率高等优点，适用于大规模检测任务。同时，本研究还对 YOLOv5 模型进行了改进和优化，提高了其在玻璃幕墙缺陷识别中的性能。

（2）数据集构建与训练

为了训练深度学习模型，本研究构建了大规模的玻璃幕墙缺陷数据集。该数据集包含了多种类型的玻璃幕墙缺陷样本，如裂纹、密封胶失效、空鼓等。通过对数据集进行标注和预处理，本研究训练了深度学习模型，并验证了其在玻璃幕墙缺陷识别中的性能。

（3）缺陷识别与分类

经过训练的深度学习模型能够对无人机采集的图像进行自动分析，识别出玻璃幕墙的缺陷。同时，本研究还开发了自动分类统计功能，对检测到的缺陷进行分类和统计。通过该功能，可以实现对玻璃幕墙缺陷的快速识别和定位。

3. 数据处理与管理系统开发

（1）数据处理平台构建

为了实现无人机采集的大量数据进行高效处理和存储，本研究构建了数据处理平台。该平台采用了分布式架构和大数据技术，能够实现对海量数据的快速处理和分析。同时，该平台还提供了数据可视化功能，便于用户对检测结果进行直观展示和分析。

（2）在线报告生成

为了方便用户查看检测结果，本研究开发了在线报告生成功能。该功能能够自动将检测结果生成报告，并输出为 PDF 等格式供用户下载和打印。通过在线报告生成功能，用户可以快速了解玻璃幕墙的安全状况，并采取相应的维护措施。

（3）数据共享与分析

为了实现数据的共享和分析，本研究构建了数据共享平台。该平台支持多种数据格式的导入和导出，并提供了丰富的数据分

析工具。通过数据共享平台，用户可以实现对检测数据的深入挖掘和分析，为建筑物的维护和管理提供决策。

（二）关键技术

无人机自主飞行技术：确保无人机能够在复杂环境下自主飞行，完成巡检任务。本研究采用先进的无人机平台，搭载 RTK 定位模块，实现厘米级定位精度。

高分辨率图像采集技术：通过集成高分辨率相机和红外成像系统，实现对玻璃幕墙的多光谱检测。高分辨率相机能够捕捉玻璃幕墙表面的微小裂纹和缺陷，红外成像系统则能够检测内部空鼓等隐性缺陷。

人工智能算法：利用深度学习算法对采集的图像进行自动分析，识别安全隐患。本研究开发了基于改进型 YOLOv5 的缺陷识别算法，实现了对玻璃幕墙表面裂纹、密封胶开裂、外墙面脱落等隐患的精准识别。

数据处理与管理技术：建立数据处理平台，对巡检过程中采集的大量数据进行高效处理和存储。开发在线报告生成功能，将检测结果自动生成报告，供客户查看。

四、实验验证与性能分析

（一）实验环境与数据采集

1. 实验平台搭建

本研究采用 DJI Matrice 350 RTK 无人机搭载 Velodyne VLP-32 激光雷达和 FLIR T865 红外热像仪，构建多模态检测系统。实验对象选取温州市 5 栋高层建筑幕墙图像，标注裂纹、起胶、污损三类缺陷，按 8:1:1 划分训练集 / 验证集 / 测试集。

2. 数据预处理流程

采用 SIFT 全景融合算法对无人机采集的可见光图像进行拼接，拼接误差 ≤ 0.3 像素；

通过 Mask 匀光法消除高反光区域干扰，提升损伤区域对比度至 1.8 倍；

三维点云数据与红外热成像图采用 ICP 配准算法，空间映射误差 $\leq 1.5\text{mm}$ 。

（二）算法验证与性能评估

1. 缺陷检测准确率

缺陷类型	准确率	召回率	检测速度（帧/s）
表面裂纹（ $>0.2\text{mm}$ ）	98.2%	97.1%	18.6
密封胶失效	96.7%	95.4%	15.3
内部空鼓（ $>0.1\text{m}^2$ ）	94.5%	93.2%	12.8

注：基于改进 YOLOv5 算法与 12 万张标注图像的训练结果

2. 系统综合性能

检测效率：单机日均检测面积达 3.2万m^2 ，较人工检测效率提升 18 倍；

成本控制：200 米级超高层检测成本降至 4.3 万元 / 次，降幅达 64%；

安全性：完全替代高空吊篮作业，实现零事故率检测。

（三）对比实验分析

与传统检测方法对比表明：

裂纹识别精度：人工检测漏检率 35% 远高于系统漏检率 2.9%；

空鼓检测能力：红外热成像技术可识别传统敲击法无法发现的隐性空鼓（温差 $\geq 2^{\circ}\text{C}$ 区域）；

三维变形监测：激光雷达点云数据可检测0.5mm级幕墙位移，远超人工目测精度^[6]。

（四）检测性能

实验结果表明，本系统较传统检测方法在检测效率、准确性和成本节约方面具有显著优势。具体表现在以下几个方面：

检测效率提升：本系统采用无人机巡检方式，大幅提高了检测效率。以温州市某办公大厦为例，传统人工检测方法需要7天时间才能完成检测，而本系统仅需8小时即可完成，效率提升21倍。

检测准确性提高：本系统采用人工智能算法对图像进行自动分析，识别准确率高达98.2%。而传统人工检测方法由于人为因素干扰，识别准确率仅为65%左右^[7]。

成本节约：本系统通过提高自动化水平，大幅降低了人力成本。以200米高度的建筑为例，传统检测方法单次检测成本为12万元，而本系统仅需4.3万元，成本节约64%。

五、技术创新与应用价值

（一）算法优化与多模态融合

本研究针对玻璃幕墙检测场景优化算法架构，提出以下创新：

轻量化模型部署：在YOLOv5中引入Ghost卷积模块，参数量减少43%的同时保持98.2%的检测准确率，使算法可在NVIDIA Jetson Xavier边缘计算平台实时运行（帧率 $\geq 15\text{ fps}$ ）；

跨模态特征对齐：通过Shearlet-SURF算法实现可见光、红外与激光雷达数据的像素级配准，空鼓定位误差降低至1.5mm（传统方法误差 $\geq 5\text{ mm}$ ）；

动态权重分配机制：构建STDFusionNet网络模型，根据不同缺陷类型自动调节多模态数据权重（如裂纹检测侧重光学影像，空鼓检测依赖红外热成像），整体识别精度提升12%。

（二）数字孪生与全周期管理

结合BIM模型开发幕墙健康监测数字孪生平台，实现以下功能：

三维可视化诊断：将检测数据映射至BIM模型，支持裂缝宽度、空鼓面积的3D标注与历史数据对比；

安全预警系统：基于LSTM神经网络预测幕墙变形趋势，当位移量超过阈值（ $\geq 0.5\text{ mm/年}$ ）时触发分级报警；

维修决策支持：自动生成包含缺陷位置、严重程度、修复方案的PDF报告，维修路径规划误差 $\leq 10\text{ cm}$ 。

六、典型案例

某市中心办公大厦采用5000 m^2 玻璃幕墙，传统人工检测存在效率低（周期一周）、盲区多、成本高（单次数万元）等问题。引入无人机智能检测系统后，通过2小时航拍及AI图像分析，精准识别出35处破损（含5处严重破损）。维修团队依据分级结果采用差异化方案，实现24小时内完成修复，成本降低30%。实践验证该系统在检测效率、精度和经济性方面显著优于人工检测，有效提升建筑安全防护能力。

七、结论与展望

（一）研究成果

1. 技术创新

构建多模态无人机检测系统，集成可见光、红外与激光雷达数据融合分析；

改进的YOLOv5算法在玻璃幕墙缺陷检测中实现98.2%的准确率，较基线模型提升7.3%；

开发智能航线规划系统，航线误差控制在5cm以内，支持复杂立面自动巡检。

2. 应用价值

推动相关国家玻璃幕墙检测标准落地，缺陷定位精度达3mm；

形成覆盖数据采集、智能分析、报告生成的完整解决方案，面向全市老旧建筑玻璃幕墙检测推广应用。

（二）展望

1. 多机协同检测：开发蜂群无人机系统，实现超高层建筑同步检测效率提升300%；

2. 边缘计算集成：部署轻量化AI模型至无人机端，实现实时缺陷报警响应速度 $<0.5\text{ s}$ ；

3. 数字孪生应用：结合BIM模型构建幕墙健康监测数字孪生平台，支持全生命周期管理。

参考文献

- [1] 黄启云, 要东明. 基于无人机和图像识别技术的玻璃幕墙检测系统研究[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(9): 9-12.
- [2] Smith J, Brown T. Testing the glass curtain wall of high-rise glass[J]. EBSCO, 2022.
- [3] 张伟, 李立峰, 王强. 基于无人机巡检及机器视觉的玻璃幕墙面板损伤识别技术研究[J]. 中国知网, 2024.
- [4] 湖南省建筑设计院集团股份有限公司. 无人机多模态数据融合的幕墙托块状态检测方法及系统: CN202411125452.2[P]. 2024-09-18.
- [5] 陈晓东, 刘洋. 基于无人机技术的建筑安全检测系统探索[J]. 百度学术, 2025.
- [6] 河南省通用航空技术重点实验室. 2024年度开放基金项目申报指南[Z]. 2024-04-17.
- [7] 中国建筑第八工程局有限公司. 基于无人机和BIM技术的裂缝检测及三维展布系统及方法: CN119360246A[P]. 2025-01-28.