

文物活化基于生成式智缮系统——以泾县查济古建集群为例

黄文浩 李雨城 马永慧 王景龙 杭旭
安徽文达信息工程学院

DOI:10.32629/etd.v7i6.21033

[摘要] 位于安徽省泾县的查济古村落集群,作为徽派建筑的典范,被称为“中国民居建筑的活化石”,始建于明清时期,至今仍保留着百余处的遗产财富,展现了徽派建筑的梁枋彩绘与历史气息。查济古建集群存在着极高的建筑艺术价值,还具有丰富的江南气息,是发掘徽商文化以及明清时期的佐证。基于生成式对抗网络产出的孪生数据资产,经历史的冲刷下,历史气息在渐渐飘散,可通过无人机三维重建结合生成式方案敲定保护方案,得出最高效的方案以及形成自己的数据资产,整合智能诊断进行动态预演,配合SOP输出。让匠人匠心与现代化数据连接,以传统技术支撑技术创新,活化对徽派建筑“修旧如旧”的原则。同时保留技术阐述的拓展性,为今后研究创造科技端口。

[关键词] 查济古建筑; 无人机; 修复方案; 数据资产

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A

The AI Visualization Intelligent Restoration System for Cultural Relics Treasures: A Case study of the Ancient Architectural Complex in Chaji, Jingxian County

Wenhao Huang Yucheng Li Yonghui Ma Jinglong Wang Xu Hang

Anhui Wenda University of Information Engineering, School of Unmanned Aerial Vehicles, School of Urban Construction

[Abstract] As a typical representative of Huizhou architecture, Chaji ancient village cluster, located in Jingxian County, Anhui Province, is called "the living fossil of China residential architecture". It was founded in the Ming and Qing Dynasties and still retains more than 100 heritage treasures, showing the Liang Fang painting and historical atmosphere of Huizhou architecture. Chaji ancient building cluster has high architectural artistic value and rich Jiangnan flavor, which is the supporting document for exploring Huizhou merchant culture and Ming and Qing dynasties. The twin data assets based on the production of generative countermeasure network, after the historical erosion, the historical atmosphere is gradually drifting away. The protection scheme can be finalized by combining the three-dimensional reconstruction of UAV with the generative scheme, and the most efficient scheme can be obtained, and its own data assets can be formed, and the intelligent diagnosis can be integrated for dynamic preview to cooperate with the SOP output. Let the craftsman's ingenuity connect with modern data, support technological innovation with traditional technology, and activate the principle of "repairing the old as the old" for Huizhou architecture. At the same time, it retains the expansibility of technical elaboration and creates a scientific and technological port for future research.

[Key word] Zhaji ancient architecture; drone; restoration plan; data assets

引言

安徽泾县有座查济古城^[1]以精雕细琢,历史浓厚,青砖绿瓦的形式诉说着明清时徽商文化的大唐盛世^[2]。是现存的中国最大的古民居村落之一,查济至今仍保存有国保单位二甲祠、宝公祠、洪公祠等元、明、清古建筑136处。正在面临着木质结构的侵蚀虫蛀,门梁石雕的残缺不齐,涂料的分层脱离,以不可逆转

的局势消散。与传统修缮工人来比,虽然修旧如旧,但有着经验传承与受损化判别的限制束缚。难以适应复杂化系统保护传承,新兴科技的深度融入为文物保护的道路保驾护航。本文提出的一种“生成式智缮系统”,以家乡查济作为研究本体,创建集成式三维采集规程,结合生成式技术与虚拟重建转换成具有示范性的高精度模型。从诊断判别到SOP动态预演再到最后的古建孪

生数据资产,形成技术闭环。相对于传统修缮技术,此技术从维度上远超于传统修缮实现“科技人文协同”。基于结构监测与数据分析的动态保护策略,同时为国内木作结构遗产的保护提供了可持续发展的创新。

1 政策与技术

安徽省宣城市泾县查济村具有皖南地区经典民居建筑,该村凭借自身深厚传统文化与自然风土人情形成了集生态度假与乡村旅游体验于一体的旅游体系,当地特色饮食与传统民风民俗也涵盖其中。位列中国十大建筑体系的徽派建筑,以雕梁画栋,白墙青瓦,四水归堂的形象特征而著称,充满着与其他建筑体系不同的历史气息。近些年横空出世的新兴科技在与传统技术不断融合,技术也在一点一滴地更新换代。

1.1 木结构的发展受到国家大力支持

自《中华人民共和国文物保护法》^[3]的生效实施至今,国内的历史建筑保护制度已经形成完整的架构体系。在制度创新时期,“活化利用”的需求在文物保护法修订草案中创新性介入,以功能优先,作用再生的技术方针。从技术上规范保护标准,在皖南地区开展保护实践,做到修旧如旧。

近年来,泾县桃花潭、查济文化旅游区管委会不断完善文物巡查、文保员管理、文物维护等相关制度,对所有古建筑实行挂牌管理,坚持每日巡查不间断,对发现的问题抓早抓小,提前介入,同时不断探索文物保护“以奖代补”维护机制,充分调动查济原住民自主维护古建筑的积极性。

1.2 技术引导

目前来看,致力徽派古建筑文物已形成较为成熟的完整商业模式,从“政策扶持-赋能科技-活化利用^[4]”。国家层面的重点层面帮衬,在今后的文化保护当中,不光徽派建筑以及更多建筑体系将更注重数字化建档(如古建筑孪生数据资产)进行预防性保护。怎样在现实未来当中还原历史,仍需在材料科学、数据领域等领域持续突破,注入新鲜血液。

2 查济古建筑群文化遗产概述

2.1 查济古建筑群概述

作为徽商文化的重要历史载体,查济见证了“贾而好儒”的徽商精神,其建筑布局遵循“枕山、环水、面屏”的风水理念,形成“依山造屋、傍水结村”的聚落形态。砖雕门楼、木雕梁枋、石雕柱础构成“无宅不雕”的装饰体系,如图1所示为徽派建筑的建筑集群。典型纹样包括“福禄寿”三星图、“暗八仙”等儒道融合^[5]。采用“抬梁穿斗混合式”木构架,马头墙以五岳朝天式为主,兼具防火与美学功能。

2.2 查济古建筑群文化遗产概述

以动态的农耕文明史料的记录,作为历史时期徽商文化的文化遗产的载体,查济明清古建筑集群所呈现的各项价值,其结合几何协调美学、种族家庭文化、风水美学相互交融,在时间的流逝当中融为一体,为如今弘扬中华建筑文化提供了文化自信,开创了传播窗口。

《查济宗谱》中曾有记载:“东有丹山文笔插天,西有薪荻

平高若屏,南有由山之翠岫,北有柏岭之丹崖,四山环峙,若诚郭然”。查济村落古建筑基本遵循“即景乃冈,相其阴阳。”



图1 徽派建筑的建筑集群(自摄)



图2 天井仰视图(自摄)

2001年,安徽查济明清古建筑集群列入全国重点文物保护单位^[6]。见证了盛世期间皖南江南地区的宗族兴旺、商贸往来,小桥流水的生活气息的徽派建筑不仅仅是生活典范,其更是中国传统村落营造以及劳动人民智慧的汗水结晶。建筑主体结构严谨,梁柱粗壮,注重力学与美学的统一,以青砖绿瓦,白墙绿植为体,墙体围护高大肃清,采用硬山结构的屋盖体系,层层叠叠的砖砌马头墙,具有错落有致的艺术美感。以天井为中,营造“四水归堂”的风水划分,寓意聚财纳福,同时兼顾采光通风与排水,真正做到以人为本,人与自然和谐共生的体系,融入儒家礼制、道家自然观等艺术特点,如图2为天井仰视图。

3 徽派集群面临的痛点与发展难点

3.1 技术局限性

古建筑文物修复^[7]行业市场在如今拥有诸多系统性的修复痛点:技术人员极度匮乏完全凭借经验而言,匠艺师傅全国不足前任,采取传统技术修复效率低下,至今无标准化规程,修复一栋规模较大的建筑则长达数年;另外技术无法更新换代,传统测

绘则偏差近百分之十,如斗拱,雕梁难以精细化复原,且近六成的无用功。其次,修复成本过于昂贵,特殊结构的材料是现代材料的几倍,其中工人劳务费用占七成,试错材料不断抬高修复成本,单次的试验仪器、材料耗费万元以上且时间周期长,修复失败损失平均超百万元。最后,创新技术明显受限无法突围,目视漏查高达30%,无法识别隐蔽损伤;三维重建依赖单一数据源,复杂曲面失真超15%,榫卯等特色构件建模需人工干预。数字化体系缺失,仅30%古建筑完成数据建档,得出数据分散且缺乏多模态融合规程,被动式“抢救性修复”导致近40%严重损伤,因预警停留而恶化不断。

3.2 文化遗产数字化保护体系不完善

在国内古建筑修缮技术市场,拥有两大技术瓶颈挑战,文化遗产的永久保护持续受阻,分别是损伤识别^[8]能力薄弱与数字化保护体系^[9]。介于局限性的损伤检测方案,老旧方案仅凭人工目视,对于内部的虫蛀空心、细小微裂等肉眼无法检测的损伤,漏检率近30%,如某明代木构建筑因未及时发现梁架内部白蚁侵蚀,修复后仅两年随后发生局部坍塌。砖木结构的损伤剖析缺少跨学科领域工具,修复方案清一色对缝隙采用砂浆填补,无视结构中木构件的潮湿腐朽,引发在原有部位扩大开裂近25%引诱二次开裂。对于多保真三维重建技术的精确度至今无法突破技术瓶颈,现有方案获取单一数据,仅来源于无人机RTK数据采集以及激光数据扫描。复杂曲面的飞檐翘角的多维重建的曲率误差接近20°,榫卯等细节构件因缺乏专用算法库,无法自动化建模,需人工逐点搭建,耗时耗力。紧接数据化体系保护措施系统性缺失,国内仅30%的古建筑完成基础数字化建档,无统一规范,间接导致AI模型训练样本量不足且质量参差。多模态数据整合更是缺乏标准。



图3 查济徽派建筑破损图(自摄)

老旧“抢救性修复”模式被动应对已破损构件,不能建立温湿度、震动等环境参数与木材腐朽速率的程度预测参照,导致超过40%的严重损伤因预警滞后而加剧损害(江南园林因未及时监测梅雨期湿度骤升,造成大面积彩绘霉变,修复成本增加3倍)。这些技术缺陷共同迫使古建筑保护陷入“修不胜修”的困境,如今需通过智能温测技术与数字化标准多保真三维重建

技术实现质的突破。如图3为遭受自然侵蚀的图片,图4为修缮后的图片。



图4 查济徽派建筑修缮完成图(自摄)

4 基于AI可视化智能修复系统

构建融合当前技术前沿的智能古建筑修复体系,以AI辅佐数据,可视化穿越建筑为核心方针。前期工作结合搭载毫米级精度高清测绘设备的无人机,对于地形地貌,建筑布点与内部结构进行数据全面覆盖,作为数字化多维重建的精度基础;配合VR技术快速响应搭建,联合AI算法以及系统专业的交互调整,生成标准化操作程序(SOP)动态施工方案,包括材料选型、施工方法、质量控制等全流程,确保加固规程的规范性与可执行性。系统通过集成无人机测绘、VR建模、AI分析与创新加固技术,将海量数据布点转化为可视化修复指南,提升效率与安全性,同时,最终形成的SOP文件包含详细步骤与参数,实现古建筑修复从数据采集、智能决策到精准实施的全链条科技赋能,为文化遗产保护提供高效、可靠的技术支撑。

4.1 基于图像修复的深度学习图像修复

凭借生成式对抗网络算法的深度融合图像修复技术,借助生成判别器的训练机制,呈现对图像失真损坏或损伤部位的保真修复。学习图像处理的生成器隐藏分布,联系动态数据对缺失部分进行AI填缺,使其图像无缝融合;判别器则不断拓展优化鉴别参数,限制结果在视觉上的真实性。对比老旧方法,算法高效处理复杂场景下的非规则破损(如大面积遮挡、划痕或噪点),并在修复过程中保留细节层次与全局连贯性。在文物数字化修复中,该技术可基于残缺壁画或老照片的局部特征,生成符合历史原貌的补全内容。

不然,生成式AI修复技术仍面临诸多瓶颈。训练需依赖海量高质量数据布点以覆盖多样化的破损类型;对抗训练的稳定性可能对修复区域与背景无法融合,特别是边缘细节处易产生伪影;针对高分辨率图像的修复需求,模型的计算复杂度与内存消耗急剧上升,限制应用效率。当前研究通过引入注意力机制、多尺度生成架构以及自监督学习策略,逐步优化生成结果的精细度与鲁棒性,推动该技术在文化遗产保护、医学影像增强等领域的深化应用。

4.2 古建筑受损表面损伤识别分析

在历史文化遗产保护当中, 古建筑表面损伤检测非常关键。过去常采用老旧人工检测和经验决策, 这种方式效率低下, 且误差过大无法避免消除。如今通过新型技术(多光谱、三维激光扫描、无人机测绘), 获取古建筑表面高保真数据布点, 联立AI深度算法辅助学习, 就能建立起损伤识别模型, 自动检测出像风化剥落、裂缝、生物侵蚀等常见的损伤。图像分割处理技术对墙面斑块损伤进行像素级划分, 量化网格侵蚀面积与形态特征; 借助热红外成像识别内部空鼓或渗水隐患, 揭示肉眼不可见的潜在风险。系统通过对比历史数据与健康样本库, 建立损伤程度评估体系, 为修复优先级提供科学依据。如图5为表面受损识别图。



图5 古建筑受损表面识别图(自摄)



图6 徽派古建筑无人机数据采集(自绘)

在深度剖析中, 联合多学科内容(结构力学、材料力学、材料学、计算机等)融合识别损伤, 使用有限元网格模拟实验获取应力分布对表面缝隙处理, 评估多方面耦合影响; AI算法的损伤演化模型还原不同环境因素与时间维度下的劣化走向, 制定预防性保护策略。从识别-评估-预测的模式, 高效提升了古建筑保护的科学与前瞻性, 也为数字化修复方案的动态调整提供了数据驱动的基础。

4.3 基于测绘影像的三维重建技术^[10]

通过测绘布点的三维高保真重建技术融合多视角影像数据与AI视觉算法, 实现从二维到高保真多维模型的数字化^[11]。其重心在于如无人机倾斜摄影、激光雷达扫描、特征点匹配、点云生成及网格化建模, 联合几何光束法平差优化, 确保模型几何精度与纹理真实性。例如, 在古建筑保护中, 该技术可对残损墙面、檐角等复杂结构进行毫米级重建, 精准捕捉裂缝、风化等损伤细节, 如图6所示; 通过RGB与信息的深度融合, 生成带真实纹理的多维模型, 为修复方案设计提供可视化依据^[12]。三维重建技术大幅提升数据获取效率, 且能通过云端平台实现模型的远程协作与动态更新。

该技术面临复杂场景下的适应性瓶颈。如密集植被遮挡、弱纹理区域易导致匹配失败, 需结合语义分割与先验知识补全缺失信息; 高分辨率影像带来的海量数据对算力与存储提出更高要求, 需轻量化算法与分布式计算优化。当前研究通过引入深度学习(如Transformer网络)增强特征提取鲁棒性, 并探索神经辐射场(NeRF)技术实现隐式建模, 进一步提升重建质量与效率。

5 总结

(1) 本研究方向融合新型技术组建古建筑智能修复体系: 数据采集采用无人机测绘与微米级三维扫描, 实现高倍效率提升与高精度数据采集, 结合VR与BIM技术构建多维可视化模组; AI修复通过生成式自动生成标准化修复规程, 支持动态方案预演。综合热红外、点云等多模态数据, 实现损伤智能识别与结构安全评估。

(2) 创新工艺结合CFRP材料加固与传统榫卯技艺, 增强承压能力, 并通过传感器与数字孪生技术实时监测结构力学, 模拟劣化趋势, 支撑预防性保护。技术链覆盖全流程, 兼顾效率、精度与文化真实性, 为文化遗产保护提供数字化新范式。

(3) 在技术拓展上, 向石窟、壁画等多元文化遗产延伸, 构建全域文物数字化保护网络, 推动三维重建在文化遗产保护、智慧城市等领域的深度应用, 为历史建筑的数字化存档与虚拟修复开辟新路径。

[基金项目]

安徽高校自然科学研究重点项目: 徽派古建筑木结构关键构件力学特性与建造修缮方法研究(2023AH052822), 安徽高校自然科学研究重点项目: 基于硅灰浆液改性煤矸石骨料的高性能混凝土研究(2022AH052853), 校级自然科学项目: 徽派古建筑木构架修缮加固后的抗震性能研究(XZR2024A14), 校级自然科学项目: 基于绿色材料的村镇住宅装配式复合剪力墙抗震性能研究(XZR2024B07)。

[参考文献]

- [1] 罗鑫. 佳境千万曲古村展新颜[N]. 安徽日报, 2024-08-23 (007).
- [2] 杨耀东. 社会记忆理论视角下的泾县查济村落遗产保护利用研究[D]. 安徽大学, 2023.

[3]姚娟,曹伟,王小德.查氏族居桃花潭畔风疏山朗人间瑰宝——我国现存规模最大的明清古村落查济[J].中外建筑,2021,(09):76-80.

[4]罗鑫.文物“活”起来绽放新光彩[N].安徽日报,2023-07-07(008).

[5]李紫悠.皖南宗祠建筑空间形态与装饰文化探究——以查济村为例[J].居舍,2020,(35):21-22+54.

[6]陈倩.皖南查济古村落民歌的活态传承研究[D].中国矿业大学,2021.

[7]张娜娜.论景德镇传统历史文化名城街区保护再现研究[D].景德镇陶瓷学院,2011.

[8]孙伟明.基于小波包能量曲率差和GA-BP神经网络的木框架损伤识别研究[D].聊城大学,2024.

[9]赵毓.大同古建筑构建数字化保护及应用[J].文物鉴定

与鉴赏,2022,(01):50-52.

[10]于皓,钟宁,张献兵,等.深切河谷区活断层鉴定方法初探:以巴塘断裂为例[J/OL].地质学报,1-14[2025-04-25].

[11]金良,吴健,俞天秀,等.瓜州锁阳城及塔尔寺遗址三维重建方法研究[J].石窟与土遗址保护研究,2024,3(03):54-63.

[12]杨媛.基于Django技术和MVS网络的无人机遥感数据三维重建可视化平台设计[J].计算机测量与控制,2025,33(02):221-228.

作者简介:

黄文浩(2004--),男,汉族,安徽泾县人,本科,实验教师,研究方向:主要从事无人机系统运用、行业场景技术运用、空气动力学、智慧城市管理、多模态感知融合应用场景、木结构、钢筋混凝土结构、钢结构抗火理论与安全评估方面的研究。