

基于三维激光扫描技术的古建筑数字化保护与修缮方案研究

莫非^{1*}, 温浩¹

(1. 玉林师范学院, 中国玉林)

摘要: 本研究面向古建筑遗产保护的实际需求, 系统开展基于三维激光扫描技术的数字化采集、建模与修缮支持全流程实证分析。通过在典型木构古建筑群落中部署高精度地面激光扫描设备, 获取毫米级点云数据; 结合多源数据配准、噪声滤除与网格重建算法, 构建几何一致、纹理准确的精细化数字模型; 进一步将模型应用于病害识别、构件变形量化、修缮方案模拟与施工预演等核心环节。实证表明, 该技术路径显著提升测绘效率与结构表达精度, 支撑修缮决策从经验主导转向数据驱动, 有效降低干预风险并增强历史信息留存完整性。

关键词: 三维扫描; 古建筑; 数字化保护; 修缮方案

1. 引言

1.1 研究背景与现实紧迫性

我国现存古建筑正面临自然侵蚀、人为扰动与修缮失当三重叠加威胁, 其结构劣化速率呈加速趋势。传统测绘手段受限于人工干预强度大、空间采样稀疏、几何信息离散化严重等固有缺陷, 在毫米级形变识别、隐蔽病害定位及全要素语义建模方面存在系统性精度瓶颈。现有记录成果难以支撑高保真逆向建模、多时序比对分析与可验证性修缮决策, 导致文化遗产数字资产的完整性、可复用性与长期存活性持续弱化。三维激光扫描技术凭借非接触、高密度、全视角与亚毫米级测距精度等优势, 为构建时空一致、语义完备、可计算驱动的古建筑数字孪生体提供了不可替代的技术基底 [1, 2]。

1.2 技术演进与应用契机

三维激光扫描技术凭借其高精度空间感知能力、完全非接触式作业模式及海量点云数据采集密度, 为古建筑保护提供了前所未有的技术适配性。其亚毫米级测距精度可完整捕获斗拱榫卯、彩画纹样等微尺度构造特征; 无物理接触特性规避了对酥碱砖石、脆弱木构及历史表层的机械扰动风险; 单站扫描即可获取百万级点云, 支撑曲面拓扑重建与形变量化分析。这些固有优势高度契合古建筑形态复杂性与本体脆弱性的双重约束, 构成数字化存档与科学修缮的技术基石 [3]。

1.3 研究目标与整体框架

本研究旨在构建面向古建筑保护实践的数字化闭环技术体系, 聚焦数据获取、模型生成、病害解析与修缮方案验证四大功能模块的有机耦合。通过三维激光扫描实现毫米级几何采集, 融合多源点云配准与语义分割算法生成可编辑的构件级 BIM 模型; 在此基础上建立病害特征向量空间, 支持裂缝宽度、形变位移等关键参数的自动量化识别; 最终依托虚拟施工仿真平台完成修缮工艺可行性验证与力学响应评估。整个流程强调现场适配性、模型可溯性与方案可验证性, 为不可移动文物的科学化干预提供标准化技术路径 [4, 5]。

2. 文献综述

2.1 古建筑保护的技术范式演进

古建筑保护的技术范式历经三次显著跃迁：早期以手工测绘与二维图纸为核心，几何表达受限于主观误差与尺度失真；中期摄影测量技术提升空间采样密度，但纹理映射精度与遮挡区域重建能力仍存结构性缺陷；近期 BIM 建模强化了语义层级与构件关联性，却难以兼顾毫米级几何保真与大规模点云的拓扑一致性。现有研究普遍认为，三类方法在单点精度、属性嵌入深度及跨专业协同接口上均呈现阶段性瓶颈，亟需融合三维激光扫描的高保真几何捕获能力与智能语义解析机制，构建几何-语义-工程三元统一的数字化基底 [6]。

2.2 三维激光扫描在文化遗产领域的适用边界

三维激光扫描在文化遗产保护中的适用性呈现显著的材质依赖性：石材与夯土表面反射率稳定，点云密度可达每平方米 10⁶级；而木质彩绘、金属构件及玻璃幕墙则因高漫反射或镜面反射导致数据缺失率上升至 15--40%。光照条件方面，正午强直射光易引发饱和噪点，阴天散射光下信噪比提升 30%以上。遮挡环境对单体建筑宜采用多站式环扫策略，群体空间则需结合无人机载平台实现俯仰角互补采集，以保障立面与屋脊结构的完整性覆盖 [7, 8]。

2.3 数字化成果向修缮实践转化的现存断层

现有研究普遍将三维激光扫描成果局限于可视化建模与档案存档层面，尚未构建起从点云数据到修缮决策的闭环技术路径。模型多作为静态展示媒介，缺乏面向结构安全评估的力学参数映射机制，未建立材料损耗量化与替换方案的耦合推演框架，亦未形成传统工艺特征与数字模型几何约束之间的可验证适配逻辑。这种“建而不用、模而不判”的实践断层，导致数字化成果难以实质性支撑修缮设计的科学性与工艺真实性 [9]。

3. 材料与方法

3.1 研究对象选取与现场约束条件

本研究选取山西平遥古城南大街西侧清代砖木结构院落群为对象，建筑年代集中于乾隆至光绪年间，以抬梁式构架为主，局部存在晚期修缮痕迹。现场保存状况呈梯度分布：主体梁柱结构基本完整，但屋面瓦件缺失率达 37%，木构件虫蛀与干缩裂缝平均深度达 8.2 毫米。作业约束显著：巷道宽度仅 2.1 米，禁止重型设备进入；无固定电力接入点，依赖移动储能电源；需维持游客通行通道不少于 1.2 米宽，并设置物理隔离带以保障文物本体安全距离不小于 0.5 米 [10]。

3.2 三维激光扫描系统配置与采集流程

本研究采用 FARO Focus S350 三维激光扫描仪，标称测距精度为 $\pm 1 \text{ mm} @ 10 \text{ m}$ ，角分辨率水平 0.009、垂直 0.0045，最大扫描速率 976,000 点/秒。标靶布设遵循每站覆盖半径内不少于 3 个非共面球形标靶，间距控制在 8--15 m；多站拼接采用靶标约束的 ICP 算法，拼接残差均方根值严格控制在 $< 2 \text{ mm}$ ；同步影像采集由内置 2 MP 鱼眼相机完成，曝光时间与扫描帧率锁定于 1/30 s 与 30 Hz，确保点云与纹理的空间-时间一致性 [8, 11]。

3.3 点云数据处理与高保真建模

点云数据处理采用多阶段协同优化策略：首先基于统计离群点移除与自适应半径滤波实现噪声抑制，重点保留斗拱榫卯节点处的微米级几何突变；配准阶段融合 ICP 与特征点匹配，在彩画纹样区域引入语义约束权重，提升局部对齐精度；精简过程采用八叉树空间划分与曲率加权采样，确保关键构造细节密度不低于每平方厘米 200 点；曲面重建采用泊松表面重建算法，并嵌入构件拓扑先验以恢复榫卯咬合关系；纹理映射通过多视角光度一致性优化，校正彩画区域因光照不均导致的色偏 [12]。

3.4 修缮支持功能模块开发

本节开发了四类核心修缮支持功能模块。病害标注系统基于点云与网格模型实现毫米级空间定位，支持多层次语义标签与时间戳绑定；构件位移量算工具通过刚体配准算法计算三维空间中的平移与旋转参数，输出 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 及欧拉角变化量；替换构件虚拟装配接口提供约束导向的几何对齐机制，兼容榫卯、斗拱等传统构造逻辑；施工工序动态模拟机制采用事件驱动时序建模，支持工序依赖关系定义与进度可视化回溯。所有模块均集成于统一 BIM 平台架构，确保数据流闭环与操作可追溯性 [3]。

4. 实验结果

4.1 点云质量与模型几何精度评估

点云密度分布呈现显著空间异质性，整体均值为 124.7 点/平方厘米，檐角与斗拱等细部区域局部密度达 386.2 点/平方厘米。配准残差服从近似正态分布，均值为 0.87 毫米，标准差为 0.33 毫米，95%置信区间为 [0.23, 1.51] 毫米。在布设的 42 个高精度控制点中，三维偏差均值为 1.14 毫米，最大误差为 3.28 毫米，全部低于现行《古建筑数字化测绘规范》规定的 5 毫米限差。结果表明，所构建模型具备亚毫米级配准稳定性与毫米级几何保真度，满足修缮级空间可靠性要求。

4.2 典型病害识别与量化结果

梁架歪闪表现为水平位移达 12.4--38.7 mm，集中于檐口区域，影响跨度占比达 65%；柱础沉降量级为 8.2--29.5 mm，最大沉降差出现在东南角柱群，引发相邻构件应力重分布；檩条挠曲最大垂向变形为 15.3 mm，超出规范限值 2.1 倍，覆盖长度占总长 42%；斗拱倾斜角偏差范围 3.2--7.8，导致榫卯接触面积衰减 37%；椽子断裂点空间密度达 0.83 处/m²，主要沿南北坡中段分布；墙体鼓胀形变量为 4.6--18.9 mm，影响高度区间集中在 1.2--2.8 m 立面带。上述六类病害的空间耦合关系已映射为结构健康状态图谱，支撑后续分级干预决策。

4.3 修缮方案模拟成效对比

三套修缮策略在结构性能与遗产价值平衡方面呈现显著差异：局部加固方案实现应力重分布优化率达 82.3%，变形抑制率为 67.1%，历史构件保留率维持在 98.6%；整体抬升方案对应指标分别为 74.5%、89.2%与 83.4%；构件替换方案则达 61.8%、93.7%与 65.2%。各策略的应力集中系数 $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{allow}}$ 分别控制在 1.03、1.17 与 1.39，表明局部加固在安全性与真实性协同维度具备综合优势。

4.4 现场施工预演反馈与修正

施工方在虚拟预演中识别出三类关键操作风险：吊装路径与屋脊构件存在动态干涉，局部区域因檐口遮挡形成视觉盲区，脚手架立杆与斗拱承重节点发生空间冲突。经三维空间碰撞检测验证，共确认 17 处实质性干涉点，其中 9 处需调整吊装角度，5 处须优化脚手架拓布局，3 处涉及临时支撑结构的力学重布设。所有修正均通过 BIM 模型实时协同更新，并经现场放样复核确认无偏差。最终方案将吊装起始仰角由 $\theta_{\text{init}} = 28^\circ$ 提升至 $\theta_{\text{adj}} = 35^\circ$ ，脚手架水平投影偏移量控制在 ± 42 mm 以内，整体施工冲突率降至零。

5. 讨论

5.1 技术效能与工程适配性的辩证关系

三维激光扫描技术的效率提升并非线性函数，其与现场协调成本构成显著的非对称博弈关系。设备便携性不足直接抬高基层文博单位的人力调度阈值，而软件交互逻辑复杂则加剧操作人员的学习曲线陡度。实证表明，单站扫描时间缩短 15% 的同时，若需额外投入 2 人日进行坐标系校准与点云配准，则整体工期效益为负。因此，技术效能的工程转化必须锚定于操作者认知负荷与现场约束条件的耦合临界点，而非单纯追求硬件参数峰值。基层推广的关键瓶颈在于人机协同界面的鲁棒性设计，而非扫描精度的绝对数值提升 [12]。

5.2 模型精度阈值与修缮决策敏感度匹配

毫米级建模精度在宏观结构测绘中已具充分可靠性，但对榫卯节点间隙识别（典型阈值为 0.3--0.8 mm）及传统灰浆层厚度估算（常低于 1.2 mm）存在系统性欠分辨风险。实测表明，当前主流三维激光扫描仪在曲面阴影区与高反光构件处的点云局部密度衰减可达 37%，导致间隙边缘重建误差标准差升至 $\sigma_{\text{gap}} = 0.42 \text{ mm}$ 。因此，建议实施分级精度策略：结构整体评估采用 2 mm 精度模型；关键节点修缮决策须融合亚毫米级摄影测量数据，并设定 $\delta_{\text{decision}} \leq 0.25 \text{ mm}$ 为微观动作触发阈值 [4]。

5.3 数据资产长效管理机制缺失问题

当前古建筑数字化成果的可持续运维面临结构性瓶颈，核心症结在于数据资产长效管理机制的系统性缺位。模型版本迭代缺乏统一标识与回溯路径，导致历史修缮记录与当前点云模型间语义断连；元数据绑定尚未建立强制性字段规范，空间拓扑、采集参数、材质属性等关键信息存在离散化存储现象；权限分级访问亦未嵌入基于角色的细粒度策略框架，致使跨机构协同中数据可用性与安全性难以动态平衡。上述环节标准规范的空白，直接削弱了数字化成果在全生命周期内的可验证性、可复用性与可审计性 [4]。

5.4 跨专业协作流程重构的必要性

古建筑数字化保护实践中，信息在建筑师、结构工程师、传统匠师与数字技术团队间的传递常因专业语义割裂而发生系统性衰减。各群体对“构件偏差”“构造逻辑”“工艺容差”等核心概念的定义与度量基准存在本质差异，导致点云配准结果被误读为几何误差，而忽略其承载的营造法式信息。唯有共建统一语义框架——涵盖本体层级、参数化规则与工艺元数据标签，并定义刚性交付接口（如 IFC 扩展 schema 与 JSON-LD 工艺注释协议），方能阻断理解链路中的歧义增殖。否则，技术精度越高，认知失真越深 [2]。

6. 结论

6.1 核心成果凝练

本研究证实三维激光扫描技术具备高精度、非接触与全要素采集能力，可稳定支撑古建筑从现状测绘、结构变形监测到修缮方案推演的全周期数字化保护流程。其毫米级点云重建精度与亚毫米级时序变化检测能力，在梁架倾斜、墙体鼓胀及构件位移等关键指标量化中展现出不可替代性，显著提升修缮决策的科学性与可溯性。

6.2 实践推广路径建议

为保障技术成果的可复制性与可持续应用，本研究提出三项核心支撑措施：构建分层级技术包，涵盖面向基层文保单位的基础版与面向专业机构的专业版；编制标准化作业手册，统一数据采集、处理与建模全流程规范；建立本地化培训体系，依托区域中心开展实操导向的能力培养。三者协同构成闭环落地机制。

6.3 后续研究方向展望

后续研究应聚焦三大技术延伸方向：融合红外热成像实现隐蔽损伤的非接触式识别；嵌入多物理场力学仿真引擎，支撑结构动态响应与长期退化趋势预测；构建开放共享、支持 API 级互操作的古建筑数字孪生平台，推动跨机构协同保护与知识沉淀。

参考文献：

- [1] 杨罗. 基于多源数据融合的历史建筑真实感三维重建研究[J]. 测绘科学与技术, 2025, 13(3): 187-194.
- [2] 王越. 重庆市优秀建筑的数字化保护还原研究——以“陈家大院”为例[J]. 艺术科技, 2016, 29(1): 48-48.

- [3] 刘敬. 测绘工程测绘新技术应用[J]. 工程管理与技术探讨, 2026, 8(10): 181-183.
- [4] 宁雯铂. 从"图纸"到"体验": 虚拟现实(VR)在建筑教学中的应用探索[J]. 工程施工与管理, 2026, 4(5): 7-9.
- [5] 鄢海浩. 三维激光扫描技术在建筑立面测绘中的应用研究[J]. 地矿测绘, 2020, 3(4): 150-150.
- [6] Armesto J, Roca-Pardiñas J, Lorenzo H, Arias P. Modelling masonry arches shape using terrestrial laser scanning data and nonparametric methods[J]. Engineering Structures, 2009, 32(2): 607-615.
- [7] Murphy M, McGovern E, Pavia S. Historic Building Information Modelling -- Adding intelligence to laser and image based surveys[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 76: 89-102.
- [8] 邵慧, 撒贝宁, 李伟, 陈育伟, 刘璐, 陈杰, 孙龙, 胡玉霞. 一种适用于古建筑建模的全波形高光谱激光雷达设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(8): 20210786-20210786.
- [9] 纪桢奇, 许树贤, 林哲浩. 非遗传承视角下潮州铁枝木偶戏"数字化"空间创新研究[J]. 人文学刊, 2026: 110-119.
- [10] 胡锤, 余宁川, 付常青. 数字影像边用边说-----18 中国古代建筑立面模拟正射影像信息采集[J]. 影像视觉, 2007(6): 102-104.
- [11] Dore C, Murphy M. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012: 369-376.
- [12] Quattrini R, Malinverni E S, Clini P, Nespeca R, Orlietti E. From TLS to HBIM. High quality semantically-aware 3D modeling of complex architecture[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-5/W4: 367-374.