

基于点云数据的古建筑测绘与数字化保护方法研究

赵杰, 应飞燕

云南工商学院, 云南 昆明 651700

DOI:10.61369/UAID.2026030062

摘 要 : 古建筑结构复杂、构件形制多样、残损病害隐蔽, 传统人工测绘存在效率低、精度离散、数据留存单一等短板。三维激光扫描获取的高密度点云数据, 具备非接触、高精度、全覆盖的技术优势, 契合古建筑不可破坏性测绘保护原则。本文依托文物建筑数字化测绘规范, 结合点位精度、点间距、配准误差等量化参数, 系统阐述点云测绘优势、精细化测绘策略与数字化保护技术路径, 实现古建筑精准测绘、病害监测、虚拟修复与永久存档, 为古建筑长效保护、活化利用提供标准化技术支撑。

关 键 词 : 古建筑; 三维激光扫描; 点云数据; 数字化测绘; 文物保护

Research on Ancient Architecture Surveying and Digital Protection Method Based on Point Cloud Data

Zhao Jie, Ying Feiyan

Yunnan Technology and Business University, Kunming, Yunnan 651700

Abstract : Ancient buildings have complex structures, diverse component shapes, and hidden damages and diseases. Traditional manual surveying has shortcomings such as low efficiency, scattered accuracy, and single data retention. The high-density point cloud data obtained by 3D laser scanning has the technical advantages of non-contact, high-precision, and full coverage, which is in line with the principle of non-destructive surveying and protection of ancient buildings. This article relies on the digital surveying and mapping standards for cultural relics and buildings, and combines quantitative parameters such as point accuracy, point spacing, and registration error to systematically explain the advantages of point cloud surveying, refined surveying strategies, and digital protection technology paths. It achieves precise surveying, disease monitoring, virtual restoration, and permanent archiving of ancient buildings, providing standardized technical support for long-term protection and revitalization of ancient buildings.

Keywords : ancient architecture; 3D laser scanning; point cloud data; digital surveying and mapping; cultural relics preservation

古建筑承载着地域历史文脉和传统营造技艺等, 是一种不可再生文化遗产资源。传统的卷尺和全站仪人工测绘模式容易对古建构件产生触碰破坏, 并且很难捕捉到曲面、斗拱和榫卯的复杂细部形貌, 测绘点位误差一般在15mm以上, 总体数据缺乏完整性。三维激光点云技术能够实现毫米级的无接触数据获取, 满足文物无损保护的原则。在现有古建筑数字化采集规范的基础上, 优化测站布设、点云校正、模型重建和病害分析的工艺过程, 可以建设高精度的古建三维数字化底座, 促进古建筑保护从经验修缮到数据化、精准化、智能化的保护转变。

一、基于点云数据的古建筑测绘与数字化保护优势

与传统人工测绘手段相比较, 三维激光点云测绘技术最突出的优点是无损采集、全域覆盖、精度可控和数据可回溯等, 与古建筑文物保护限制性要求充分适配, 传统的人工测绘需要攀爬和触碰构件, 容易对风化木构件、彩绘和砖雕等产生二次干扰, 并

且只能得到离散的特征尺寸而不能全面地记录建筑的空间形态和细微形变^[1]。三维激光扫描通过非接触式获取, 有效地避免了人工作业对文物造成破坏的风险。根据文物测绘的标准规定, 精细古建筑的主体点间距可以控制在 $\leq 5\text{mm}$ 的范围内, 点位的相对中误差也可以控制在 $\leq 10\text{mm}$, 而细部彩绘和雕花区域的点间距可以达到0.3mm, 与传统的厘米级测绘精度相比, 点位的精度明显优

作者简介:

赵杰 (1981.07—), 男, 白族, 云南大理人, 淮海工学院本科学士, 研究方向: 工程测量、土木工程;

应飞燕 (1982.09—), 女, 汉族, 云南宣威人, 淮海工学院本科学士, 研究方向: 工程造价、土木工程。

于0.1mm。同时点云数据能够完整地保留建筑的整体轮廓、细部纹理、细微裂缝和沉降偏移的所有原始空间信息,具有较大的数据容量和全面的维度以及时效性,本发明可以在复测对比、形变分析、病害溯源及虚拟复原等方面进行长期应用,解决了传统测绘数据碎片化、不可重用和不能动态监测等不足,为古建筑的全周期数字化保护工作提供了准确、完整、可迭代的数据基底。

二、基于点云数据的古建筑测绘策略

(一) 多站点协同扫描,优化测站布设

古建筑多为错落式木结构,坡屋面和叠层斗拱等构造,遮挡盲区较多,单站扫描很难实现全域全覆盖,需要多站协同扫描和科学的测站部署方案相结合,才能保证数据的完整性和获取的均匀性^[2]。参照古建筑的测绘等级标准,整体建筑遵循二等测绘准则,其中最大的点间距不超过10mm,而局部的精细构件则遵循一等标准,最大点间距不超过5mm。测站布设遵循“均匀布站、重叠覆盖、优先遮挡、高程分层”原则,站间重叠区域控制在30%~45%,有效提升后续配准融合精度。为了应对高墙、屋檐、梁柱背侧以及斗拱间隙等可能造成遮挡的区域,增加了密集的测站,并将扫描的俯仰角度限制在-45°至90°之间,以防止死角被漏扫。该设备使用了地面的三维激光扫描仪,其标准测距精度为 $\leq 2\text{mm} \pm 2 \times 10^{-6}\text{mm}$,角度测量精度为 $\pm 2''$,而在50m的测距范围内,点位的精度稳定不超过6mm。在外业中布设了与之相匹配的标靶控制点并建立了CGCS2000坐标系1个控制网,物方控制精度超过了总体测绘总精度的三分之一,确保了多站数据基准的统一。通过对测站布局的优化,可以显著减少空洞、残缺和密度不均等问题,从而确保整体点云的有效覆盖率超过99%,为后续的校正、重建和制图工作提供了高品质的原始数据支持。

(二) 点云配准和精度融合校正

多站扫描的原始点云具有坐标偏差、姿态偏移、密度不均和噪声冗余的特点,需要采用精准配准和精度融合校正的方法,对全站数据进行统一拼接和误差收敛,项目主流使用标靶自动配准和ICP迭代精配准的双重模式进行粗配准,粗配准依靠人工标靶完成站点的初始对准,并控制初始拼接偏差 $\geq 5\text{mm}$;精配准采用ICP算法进行迭代最优匹配,并设定迭代收敛阈值为0.001mm;最终站间配准误差趋于稳定 $\leq 2\text{mm}$;总体点位的平均误差为 $\leq 1.6\text{mm}$ ^[3]。对室外光照干扰、粉尘反射和远距离扫描等因素引起的漂浮噪点和离散杂点进行统计去噪和半径去噪相结合的滤波处理,去除距离均值偏差三倍标准差以外的异常点并保留建筑物真实结构点云的特征。同时介绍了系统误差补偿模型的建立方法,实现了仪器测距误差、温度漂移、大气折变和架设对中等误差的统一校正以及高差大地区高程精度的校正。在进行了融合校正之后,整体点云的平面误差不超过5mm,高程误差不超过8mm,这完全达到了古建筑一等精细测绘的标准要求,有效地解决了多站数据的分层、错位和重影问题,实现了全域点云的高精度一体化融合。

(三) 特征提取和几何轮廓重建

经过高精度去噪配准的完整点点可以采用算法自动识别和人

工精修相结合的方法,完成古建筑结构特征提取和三维几何轮廓重建,古建筑的梁柱、墙体、台基、斗拱和门窗等具有规则的几何特征和层级结构的特征,利用平面拟合、圆柱拟合和边界梯度提取等算法进行拟合,对墙体立面、柱体曲面和屋面坡面的主体结构特征点集进行了自动划分^[4]。对斗拱榫卯、雕花、转角和屋脊曲线这些不规则的精细构件利用局部高密度的点云进行精细化提取,以保留细微的曲面起伏及形制细节。重建流程按照“主体粗模——结构精模——细部补模”的层级构建原则进行,主体网格重构后三角面片的边长保持在3~8mm之间,细部构件的网格精度提高到0.5~2mm;网格拓扑结构规则,不存在自相交和空洞畸变现象。采用轮廓边界优化、曲面光滑迭代和结构闭合修复等方法恢复古建筑的真实空间形态,构件尺寸、倾斜形变及曲面弧度等。重建的模型在形状和位置的精确度上超过了8mm,其轮廓的边缘偏移被限制在0.5像素之内,这有助于准确地展现古建筑的原始结构和其当前的变形特点,为以后的制图、监控、修复建模等提供了高精度的几何基底。

(四) 矢量线划图的生成及误差评定

在高精度三维点云模型的支持下,能够对古建筑的二维矢量线划图进行自动的正射投影和生成,代替了传统的手工手绘测绘图纸的绘制,从而实现了平面、立面和剖面图的自动化和标准化的出图。利用点云切片技术截取指定高程位置处的截面轮廓,实现了墙体边线、柱网轴线、门窗洞口、屋面轮廓和台基边界矢量要素的自动生成,具有线型规则、比例均匀、大小准确的特点^[5]。根据文物测绘的标准,出图的比例被设定为1:50和1:100的精细制图标准,这些图层按照结构、装饰、病害和轴线进行分层管理,完全符合古建筑文物的归档制图规范。制图后进行了系统性的精度评定工作,选择建筑转角、柱中心、门窗对角和台基四角作为稳定特征检核点并对平面位置中间误差、高程中间误差和边长相对误差进行了统计。实测资料显示:矢量图纸平面点位中差 $\leq 6\text{mm}$ 、高程中差 $\leq 9\text{mm}$ 、边长相对差在1/2000以内,远远好于常规人工测绘的1/500精度指标。同时针对图面偏移、轮廓偏差和尺寸闭合差等进行残差分析和局部修正,以保证图纸的准确性、规范性和完整性符合文物验收、修缮设计及存档复用等方面的要求。

三、基于点云数据的古建筑的数字化保护方法

(一) 病害信息识别及三维标注

在高密度、高保真点云模型的基础上,能够对古建筑表面病害进行精细化识别、量化统计和三维空间标注等处理,解决了传统病害目视排查中主观性大、不能量化和定位模糊等问题,古建筑中常见的开裂、风化剥落、空鼓残损、彩绘褪色、砖面酥碱、木构件腐朽等等病害都可以利用点云高差突变、法向量突变和曲面曲率等异常特征进行智能识别。该系统通过匹配局部点云的密度差异和表面起伏偏差来自动圈定病害范围并准确提取裂缝走向、裂缝宽度、剥落面积和残损深度的量化指标,裂缝识别的最小宽度可达到0.2mm,深度误差可限制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 范围内。在三

维模型坐标系的支持下进行了空间精准标注工作,并将病害位置、病害类型、尺寸参数、病害等级和拍摄影像资料等信息与相应构件的空间位置进行绑定,从而形成直观的病害台账。与传统的平面拍照记录相比较,三维标注可以做到病害空间定位无偏移、数据可以量化、信息可以追溯,可以完整地保留古建筑病害现状的原始数据,为修缮方案的制定、病害等级评定和靶向修复治理等工作提供准确的数据依据,促进古建筑病害保护由定性描述向定量精准研判转变。

（二）结构变形监测和对比分析

采用不同时段多期次的点云数据进行叠加匹配,可以实现古建筑整体沉降、构件倾斜、结构位移和屋面形变等动态监测和定量分析,从而实现古建筑结构安全的正常监护,通过 CGCS2000 基准坐标系的统一,实现了年、季复测点云模型和首期原始基准模型的全局配准和叠合,并利用三维偏差色谱分析算法实现了配准,整体变形色差云图的自动生成直观地显示了位移、沉降、凸起和凹陷的面积分布情况。对木梁挠度、柱体倾斜、墙体偏移和屋面塌陷等重点风险部位布置了固定监测断面和特征控制点,实现了单点三维位移量、整体倾斜角度和构件挠曲变形量的自动输出。工程监测精度可以达到毫米级,单点位移的监测误差 $\leq 1.5\text{mm}$,角度偏差的监测精度 $\leq 0.02\%$ 。通过对多期资料的时序对比可以准确把握结构的变形速率、变形趋势及风险演化规律等,分辨出自然老化的匀速变形和异常的突发形变,对结构安全隐患进行超前预判,对古建筑的加固、纠偏和支护防护等工作提供时序化的数据支持,对古建筑结构的安全进行动态预警和科学管护。

（三）残缺构件的虚拟修复和推演

对于古建筑风化残缺、构件缺失、榫卯破损和局部坍塌的不可逆转的破坏,依靠高精度点云模型和传统营造形制规律可以进行无损虚拟修复和形制推演,以恢复建筑原始风貌,根据现有完整构件点云几何参数提取标准形制尺寸、曲面方程、榫卯咬合结构、对称排布规律,并采用镜像对称和形制拟合等方法进行拟合、参数复刻算法实现了残缺斗拱、断裂屋脊、缺失雕花和残损门窗的数字化补全修复。修复过程中严格按照同时期古建筑的营造工艺和形制特征进行复刻,并将现存的完好构件作为复刻参数

的参考依据,确保了复刻构件的比例、弧度、大小、结构咬合关系等和原生形制的高度一致。虚拟修复模型的网格精度能够达到 $0.5\sim 2\text{mm}$ 的范围,修复后的边缘连接误差不超过 1mm ,并且没有出现变形或突然的畸变。这种方法没有触及到真正的文物本体,充分符合文物最小干预的原则,能够恢复建筑的完整原始形制和弥补历史残缺的不足,对古建的修缮设计和复原重建具有重要意义、营造技艺的研究为可视化和参数化的复原奠定了基础,并有效地继承了古建筑的传统营造规制和工艺特征。

（四）数字化存档和展示平台的建设

在点云重建高精度三维实体模型、矢量图纸、病害台账、监测数据和修复模型等基础上,可以建设古建筑一体化的数字化存档体系和可视化展示平台,从而达到文物数据永久保存、重用和活化传播的目的。全部资料统一使用国家标准坐标系和高程基准,存档内容包括原始点云和去噪校正成果以及三维网格模型、纹理贴图、矢量图纸和病害报告等、形变监测数据、虚拟修复成果的整套数据,其数据精度、格式和图层体系等都满足古建筑数字化采集归档的标准。模型纹理贴图的分辨率 $\geq 50\text{dpi}$ 、色差平均偏差 ≈ 4 、模型总体精度 $\approx 20\text{mm}$,符合文物永久存档的验收要求。基于云端平台构建轻量化三维展示系统支持漫游查看、构件剖切、尺寸量测、病害查询、历史比对和虚实切换,打破了传统纸质档案不能进行三维展示、不能动态交互等局限性。标准化数字档案可以长期保存、迭代更新和共享复用,不仅实现了古建筑本体资源永久数字化保存,而且为文旅活化展示、学术研究、技艺传承和科普教育等提供了现代化传播载体。

四、结语

点云三维激光扫描技术以其毫米级精度、无损采集、全域覆盖和数据可回溯等特点有效地弥补了传统古建筑测绘与保护工作中存在的技术不足,该项技术可精准量化古建病害及结构变形情况,为修缮保护和形制复原提供科学支撑,达到永久保存文物真实资料的目的。不断普及将点云数字化技术运用于古建保护工作,能够促进传统文物修缮工作向数据化、精准化和智能化保护方向转变,有利于历史建筑文化遗产的长效传承和活化利用。

参考文献

[1]詹喜研,蔡欣恩,李德健.三维激光测量技术在古建筑测绘中的精度提升与数据修复方法研究[J].智能建筑与智慧城市,2025(08):24-26.
[2]肖好良,龙丹丹.三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应用研究[J].科技风,2025(27):4-6.
[3]胡大贺,王慧.数字化测绘技术在古建筑保护中的应用分析[J].山西建筑,2025,51(20):31-35.
[4]张灿新.激光扫描与贴近摄影测量在古建筑测绘的联合应用[J].江西测绘,2025(04):17-19.
[5]王琛.激光雷达点云数据在古建筑立面测绘中的处理方法探析[J].江西建材,2025(11):242-244.