

基于机载LiDAR的古建筑三维建模与纹理映射技术应用

杨成佩

吉安众晟测绘有限公司 江西吉安 343000

摘要: 古建筑作为文化遗产的重要载体,其数字化保护与传承已成为当前文化遗产领域的研究热点。机载LiDAR技术凭借其快速、高精度、非接触式的数据获取能力,在古建筑三维建模中展现出显著优势。本文围绕基于机载LiDAR的古建筑三维建模与纹理映射技术应用展开研究,首先阐述了机载LiDAR数据采集的关键流程,包括航线规划、点云数据获取与预处理;其次,重点分析了点云去噪、滤波、分割等数据处理方法,实现了古建筑几何特征的精准提取;在此基础上,结合三维重建算法构建了古建筑的三维几何模型,并探讨了基于影像的纹理映射技术,通过影像匹配、纹理坐标映射与融合,提升了模型的真实感与细节表现力。最后,通过实际案例验证了该技术在古建筑数字化建档、保护修复与展示利用中的有效性,为古建筑文化遗产的数字化保护提供了一种高效、可靠的技术方案。

关键词: 机载LiDAR; 古建筑; 三维建模; 点云处理; 纹理映射

引言

古建筑是历史文化物质见证,承载丰富历史、艺术与科学价值。但受自然侵蚀、人为破坏等影响,大量古建筑面临损坏消亡风险,其数字化保护需求迫切。传统古建筑三维建模方法(如全站仪测量、手工建模)效率低、成本高、对复杂结构适应性差,难以满足大规模高精度建模需求。机载LiDAR技术作为主动式遥感手段,发射激光脉冲接收回波信号,可快速获取目标三维坐标,形成高密度高精度点云数据。它穿透性强、受天气影响小、采集效率高,能克服传统方法局限,为古建筑三维建模提供新途径。同时,纹理映射技术可将高分辨率影像纹理赋予三维模型,提升视觉真实性,支持古建筑数字化展示、虚拟修复与文化传播。近年来,机载LiDAR技术虽在地形测绘、城市规划等领域广泛应用,但针对古建筑复杂结构(如飞檐、斗拱、雕花)的三维建模与纹理映射研究仍有挑战:一方面,古建筑点云数据含大量噪声与冗余信息,精细点云分割与特征提取是建模精度关键;另一方面,古建筑纹理色彩不均、细节丰富、易受遮挡,精准匹配与无缝融合仍是技术难点。

一、机载LiDAR技术原理与特点

(一) 机载LiDAR技术概述

机载LiDAR(Light Detection and Ranging)是一种主动式遥感探测技术,通过搭载在飞行平台上的激光雷达系统发射激光脉冲并接收回波信号,实现对地表及地物目标的高精度三维空间信息获取。该技术系统主要由激

光扫描仪、高精度定位系统(GNSS/IMU)、控制单元及数据存储模块组成。激光扫描仪以高频脉冲发射激光束(波长通常为1064 nm或1550 nm),记录激光脉冲发射到返回的时间差,结合光速计算目标距离;高精度定位系统实时记录飞行平台位置与姿态,联合解算将激光点云数据转换至大地坐标系。机载LiDAR技术具备高精度(平面厘米级、高程分米级)、高密度(每平方米获数百至上千个点云数据)、强穿透性(可穿透部分植被)及全天候作业(不受光照限制)等特点,适用于古建筑复杂结构三维信息采集^[1]。

(二) 数据采集与处理流程

机载LiDAR数据采集与处理流程包括航摄规划、外业数据采集、内业数据处理及质量检查四个主要环节。航摄规划阶段需根据古建筑分布范围、结构复杂度及精度要求,设计飞行航线(如重叠度 $\geq 60\%$)、飞行高度(通常为50~200米)及激光脉冲频率(如100~500 kHz),确保数据覆盖完整性与精度;外业数据采集阶段通过同步获取激光点云、POS数据(位置与姿态)及地面控制点坐标,建立空间基准;内业数据处理阶段包括点云解算(结合POS数据与激光测距数据生成三维点云)、去噪(剔除植被、飞鸟等非建筑点云)、分类(分离地面点与非地面点)、配准(多航带点云拼接)及精化(通过地面控制点校正系统误差);质量检查阶段通过对比已知控制点坐标或高精度测量数据,评估点云精度(如RMSE ≤ 5 cm),确保数据满足建模要求。整个流程需严格遵循《机载激光雷达数据获取技术规范》(CH/T 8024)

等标准, 保证数据的可靠性与一致性。

(三) 技术在古建筑保护中的优势

机载LiDAR技术在古建筑保护中具有显著优势, 主要体现在高精度三维信息获取、非接触式作业、复杂结构适应性强及数据可重复利用等方面。高精度三维信息获取方面, 该技术可完整记录古建筑的几何特征(如斗拱、屋脊、雕刻等细节), 点云密度可达每平方米数百点, 远高于传统测量方法(如全站仪单点测量), 为三维建模提供基础数据; 非接触式作业方面, 无需接触古建筑本体, 避免对脆弱结构造成物理损伤, 符合文物保护“最小干预”原则; 复杂结构适应性强方面, 可穿透部分植被覆盖, 获取被遮挡建筑轮廓, 适用于高耸结构与密集建筑群的全面扫描; 数据可重复利用方面, 获取的三维点云数据可长期存储, 用于变形监测、虚拟修复及数字化存档。这些优势使机载LiDAR技术成为古建筑保护重要手段, 为文物保护、修复与研究提供科学依据^[2]。

二、古建筑三维建模方法

(一) 三维建模的基本流程

古建筑三维建模的基本流程包括数据预处理、模型构建、拓扑优化及模型验证四个阶段。数据预处理阶段主要包括点云去噪、坐标配准与数据分割等操作。点云去噪通过统计滤波(如半径滤波、统计离群值移除)消除由环境干扰(如飞鸟、灰尘)产生的离群点, 确保点云数据的纯净性; 坐标配准采用迭代最近点(ICP)算法或多站配准技术, 将不同航带或不同视角的点云数据统一至同一坐标系下, 配准精度需控制在厘米级以内; 数据分割则基于几何特征(如平面、曲面)或语义信息(如屋顶、墙体)将点云划分为若干子集, 为后续模型构建提供结构化数据。模型构建阶段采用表面重建算法(如泊松重建、Delaunay三角剖分)生成初始网格模型, 其中泊松重建适用于复杂曲面(如斗拱、雕刻), Delaunay三角剖分适用于平面结构(如墙体、地面)。拓扑优化阶段通过网格简化(如边折叠、顶点聚类)减少冗余三角面片, 同时保持模型几何特征, 简化率通常控制在30%~50%; 通过孔洞修补(如基于曲率的孔洞填充)修复数据缺失区域(如被遮挡的屋檐)。模型验证阶段通过对比点云与模型的偏差(如Hausdorff距离)评估模型精度, 偏差需控制在2 cm以内, 确保模型与实际建筑的一致性^[3]。

(二) 点云数据处理与模型构建

点云数据处理是三维建模的核心环节, 主要包括特征提取、表面拟合与模型优化。特征提取通过法向量计算、曲率估计及主成分分析(PCA)识别点云中的几何

特征(如边缘、角点、平面), 其中法向量计算采用邻域点协方差矩阵分解, 曲率估计通过拟合局部二次曲面实现; 特征提取结果用于指导数据分割(如平面区域采用RANSAC算法分割), 提高模型构建的针对性。表面拟合采用参数化曲面(如NURBS曲面)或隐式曲面(如径向基函数)对点云进行拟合, 其中NURBS曲面适用于规则结构(如圆柱形柱子、拱形门窗), 隐式曲面适用于复杂雕刻(如龙纹、花卉); 拟合精度通过点到曲面距离评估, 需控制在1 cm以内。模型构建采用分层建模策略, 先构建主体结构(如墙体、屋顶), 再添加细节构件(如斗拱、瓦当), 最后通过布尔运算(如并集、差集)整合各部分模型; 模型构建过程中需保持拓扑一致性(如无重叠面、无悬挂边), 确保模型可用于后续分析(如力学模拟、纹理映射)。点云数据处理与模型构建的精度直接影响最终模型的质量, 需通过算法优化(如自适应阈值设置)与人工干预(如关键点调整)相结合的方式提高建模效率与精度。

(三) 建模精度与质量控制

建模精度与质量控制是确保三维模型可靠性的关键环节, 主要包括精度评估、误差控制与质量验证。精度评估通过对比模型与原始点云的几何偏差(如平均偏差、最大偏差)量化模型精度, 偏差需满足《古建筑三维建模技术规范》(GB/T 39635)中的要求(如主体结构偏差 ≤ 2 cm, 细节构件偏差 ≤ 1 cm); 同时通过模型间对比(如不同时期模型)评估变形监测精度, 变形量需大于误差阈值(如3 cm)方可认定为实际变形。误差控制主要通过优化数据采集参数(如提高点云密度至每平方米500点以上)、改进建模算法(如采用基于深度学习的点云分割算法)及增加人工校核(如关键尺寸复核)减少误差来源; 误差控制需贯穿建模全过程, 如数据采集阶段需检查GNSS信号质量(如PDOP值 ≤ 3), 模型构建阶段需验证拓扑正确性(如无自相交面)。质量验证通过多指标综合评价模型质量, 包括几何精度(如尺寸误差)、拓扑完整性(如无孔洞)、语义一致性(如构件分类正确)及实用性(如可用于有限元分析); 验证结果需形成质量报告, 明确模型适用范围(如可用于数字化存档、虚拟修复或结构分析)。建模精度与质量控制的严格实施, 可确保三维模型真实反映古建筑的几何特征与结构状态, 为文物保护、修复与研究提供高精度数据支撑^[4]。

三、纹理映射技术应用

(一) 纹理映射的基本原理

纹理映射的核心是将二维纹理图像精准贴合至机载

LiDAR获取的古建筑三维几何模型表面，其过程需依托坐标系统的协同关联。首先，通过机载LiDAR采集的点云数据构建古建筑的三维几何框架，该框架包含每个点的三维空间坐标（X、Y、Z）及对应的法向量信息，用于确定模型表面的朝向与形态；同时，机载系统同步搭载的高分辨率相机采集的纹理图像，包含像素级的色彩与细节信息，且每幅图像均附带拍摄时的位置（经纬度）、姿态（滚转角、俯仰角、航向角）及焦距等参数。纹理映射时，先通过空间坐标转换，将纹理图像的像素坐标与三维模型的空间坐标建立一一对应关系，再依据模型表面的法向量调整纹理图像的投影角度，确保纹理贴合时无拉伸或扭曲；此外，需通过纹理坐标插值算法处理模型表面的非规则区域（如古建筑的斗拱、雕花等复杂构件），使纹理在曲面或折线处平滑过渡，最终实现二维纹理与三维几何的精准融合，构建兼具几何精度与视觉细节的模型。

（二）纹理获取与配准方法

纹理获取需针对古建筑的结构特征与材质属性优化采集方案，采用机载高分辨率面阵相机，设置符合古建筑细节捕捉需求的拍摄参数——分辨率不低于2000万像素，帧率与飞行速度匹配以保证图像重叠率（航向重叠率 $\geq 60\%$ 、旁向重叠率 $\geq 30\%$ ），同时避开强光或逆光时段，减少阴影对纹理细节的遮挡，确保采集的纹理能清晰呈现古建筑的砖瓦纹路、木构肌理及彩绘图案。纹理配准阶段，先对采集的纹理图像进行预处理，通过图像去噪算法消除拍摄时的光斑或灰尘干扰，再采用基于特征点的配准方法：提取纹理图像与LiDAR点云模型的共同特征点（如古建筑的转角、窗棂轮廓、斗拱节点等），利用SIFT（尺度不变特征变换）算法实现特征点的跨模态匹配，建立纹理图像与三维模型的空间关联；随后通过最小二乘法优化配准误差，将配准后的纹理图像按模型表面的拓扑结构分割为若干纹理块，针对相邻纹理块的重叠区域，采用图像融合技术统一色彩与亮度，避免拼接缝隙，确保纹理在模型表面的连续性与一致性^[5]。

（三）纹理映射对模型真实感的提升作用

纹理映射能显著弥补LiDAR三维模型仅侧重几何形态的局限，通过还原古建筑的视觉细节与材质特性提升模型真实感。在材质细节呈现上，纹理映射可精准复现古建筑不同构件的材质纹理——如青砖的凹凸质感、木材的年轮纹路、彩绘的色彩层次与褪色痕迹，这些细节

使模型能直观反映古建筑的建造工艺与岁月痕迹，而非仅呈现抽象的几何轮廓；在结构细节还原上，针对古建筑的斗拱、雕花、窗棂等复杂装饰构件，纹理映射可通过清晰的纹理细节强化构件的空间层次，使模型能准确展现构件的造型特征与组合关系，避免几何模型因细节简化导致的结构模糊；从应用价值来看，高真实感的模型可直接服务于古建筑保护与研究——保护人员能通过模型的纹理细节判断材质老化程度（如木材开裂、砖石风化），研究人员可基于纹理还原的彩绘图案分析历史时期的装饰风格，同时也为古建筑的数字化展示提供了直观载体，让公众能更清晰地感知古建筑的历史风貌，推动文化遗产保护与传播的深度结合。

结语

机载LiDAR技术与纹理映射技术的结合，为古建筑的三维建模提供了全新的解决方案。这种技术不仅能够高效获取高精度的几何数据，还能通过纹理映射还原古建筑的视觉细节，从而生成兼具科学性与艺术性的数字化模型。在实际应用中，该技术体系展现出强大的适应性与扩展性，可广泛应用于古建筑保护、修复设计、变形监测及虚拟展示等多个领域。未来，随着硬件设备的进一步升级和算法优化的不断深入，机载LiDAR与纹理映射技术将在分辨率、处理效率及自动化程度上取得更大突破，为文化遗产保护事业注入更多科技力量。同时，跨学科合作的深化也将推动这一技术体系向更智能化、更精细化的方向发展，助力古建筑研究与保护迈向新高度。

参考文献

- [1] 李嘉禾. 基于机载LiDAR的实测点云处理方法及地形建模研究[D]. 昆明理工大学, 2022.
- [2] 何桂凤, 谢雄军. 无人机机载激光LiDAR系统在不动产测绘中的应用[J]. 经纬天地, 2022(5): 46-49.
- [3] 王旭科, 闫世伟, 李艳芳, 等. 基于机载LiDAR和倾斜影像的城市三维建模方法[J]. 北京测绘, 2021, 35(1): 5. DOI: 10.19580/j.cnki.1007-3000.2021.01.011.
- [4] 马随阳, 谢齐, 余永周. 基于无人机影像与三维激光数据融合的桥梁三维建模方法研究[J]. 中国水运: 航道科技, 2021, 000(005): P.70-73.
- [5] 袁慧敏. 基于机载LiDAR数字化技术的地形高空航测误差校正研究[J]. 新探索, 2021(003): 000.