多旋翼无人机古建筑三维细部测绘数据研究

张宇华，吴宝亚
湖北省神龙地质工程勘察院有限公司，湖北 武汉 430056
DOI:10.61369/UAID.2026040062

摘　　要： 古建筑构件繁杂、遮挡严重、纹理趋同，制约三维测绘精度。以广水市项目为载体，构建涵盖航线分级规划、联合平差、点云生成、网格重建、纹理映射与精度检核的完整流程。以武胜关桃源村验证，采集有效影像4505张，点云密度达680点 /m²，平面与高程相对中误差分别为3.2 mm和4.7 mm，整体精度控制在5 mm以内。成果支撑数字建档、残损识别与修缮工程量核算。多旋翼无人机与地面激光扫描协同可提升复杂遮挡区域数据完整性，为传统村落遗产保护提供可复制技术范式。

关 键 词： 多旋翼无人机；古建筑测绘；三维重建；密集点云；数据处理

Research on 3D Detailed Surveying Data For Ancient Architectural Structures Using Multi-Rotor UAVs

Zhang Yuhua , Wu Baoya
Hubei Shenlong Geological Engineering Survey Institute Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430056

Abstract: Ancient buildings feature complex components, severe occlusions and similarlooking textures, which limit the accuracy of 3D surveying and mapping. Taking the project in Guangshui City as a case study, this paper establishes a complete workflow including hierarchical flightroute planning, combined adjustment, point cloud generation, mesh reconstruction, texture mapping and accuracy verification. Validated at Taoyuan Village of Wushengguan, 4505 effective images were acquired, yielding a pointcloud density of 680 points/m². The relative mean square errors of plane and elevation were 3.2 mm and 4.7 mm respectively, with the overall accuracy kept within 5 mm. The outputs support digital archiving, damage identification and renovationquantity calculation. The synergistic use of multirotor UAV and terrestrial laser scanning improves data completeness in heavily occluded areas, providing a replicable technical paradigm for heritage conservation of traditional villages.

Keywords: multi-rotor UAV; ancient architectural surveying; 3D reconstruction; dense point cloud; data processing

引言

古建筑三维细部测绘需记录建筑整体形态，还原斗拱组合、屋面曲线、木构节点和装饰纹样。多旋翼无人机可近距离获取多角度影像[1]，复杂遮挡、光照波动、控制点不足与参数适配偏差，造成影像数据难以稳定构建高精度模型。航测成果质量依托采集设计、影像解算、点云处理和精度验证的协作水平[2]。贴合古建筑空间特征搭建数据处理路径，缓解模型孔洞、边缘粘连与纹理错位现象，提升三维成果运用于数字化保护、病害监测和修缮设计的实际效能。

一、古建筑三维细部航测数据处理问题识别

（一）构件遮挡与影像覆盖缺陷

古建筑外形存在显著不规则特点，屋脊、飞檐、斗拱、雀替与雕刻构件形成多层堆叠、相互遮蔽的空间形态，常规垂直航线获取的影像无法完整捕捉构件底部、背侧以及檐下空间[3]。不少航测方案优先保障建筑整体轮廓，航高、镜头倾角和旁向重叠参数没有结合细部尺寸调整，局部影像分辨率达不到标准，能够匹配的同名点数量有限。屋面瓦面纹理趋同，木质构件色调接近，阴影区域明暗差距突出，影像特征点提取状态受到干扰，空中三角测量出现连接薄弱、姿态解算偏差与局部模型断裂现象[4]。

（二）数据预处理缺陷与控制点约束不足

数据预处理环节有着影像质量管控疏漏与基础参数校正欠缺的问题。无人机近距离飞行易受阵风、振动和光照变化干扰，部

作者简介：张宇华（1988-），男，汉族，湖北黄冈市人，硕士研究生，中级工程师，注册测绘师，主要从事航测遥感测绘应用、地理信息生产及管理工作。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

分影像产生模糊、曝光不均、畸变放大及构件边缘拖影，清晰度筛选、色彩均衡和镜头畸变校正工作缺失，误差将在后续匹配与建模过程不断累积[5]。古建筑周边存在树木、围墙及附属设施形成的遮挡，控制点可布设范围受到限制，地面控制点集中布置在建筑外围或是低层区域，屋顶和高位构件得不到有效的约束条件。控制点存量偏少、分布高差单一或是坐标测定水准波动，引发模型整体倾斜、局部拉伸及尺度失真现象。

（三）三维重建阶段的系统性误差

三维重建阶段的问题集中于密集点云完整程度、网格结构连续性和纹理呈现效果。弱纹理、深阴影及高反光区域易产生点云孔洞和离群点，斗拱衔接、檐口转折及雕饰凹槽受视角限制形成结构粘连，相邻构件边界无法清晰区分[6]。点云滤波参数取值过高会剔除细小构件与表层纹饰，参数取值过低留存飞点、噪声和重叠曲面，干扰网格生成效果。纹理映射阶段不同架次影像亮度、色温和拍摄尺度存在区别，接缝、重影与色彩跳变现象频繁产生。

上述三类问题构成一条误差传导链——影像获取质量决定特征匹配上限，控制点约束决定几何精度下限，重建参数决定细节还原程度，三者相互耦合，任一环节失控均会导致最终模型失真。

二、多旋翼无人机航测数据处理路径构建

（一）分级采集与航线规划策略

多旋翼无人机航测数据处理参照古建筑构件尺度、空间层次及遮挡分布情况，同步设定影像采集参数适配后续建模需求[7]。作业阶段搭建融合建筑整体轮廓与重点细部内容的分级采集方案，环绕航线与倾斜航线运用于整体区域，采集屋面、墙体和主体结构影像，低空近距补充航线布置在斗拱、檐口、屋脊、雀替及雕饰区域。航高按照地面分辨率标准设定，航向重叠度与旁向重叠度适配多视影像匹配标准，复杂转角及遮挡区域增设交叉拍摄方位。

控制点和检查点兼顾平面布局与高程起伏，安置在建筑外围、院落开敞区域以及特征辨识度稳定的点位，构筑覆盖建筑底部、中部和顶部的空间约束结构。地面采样距离（GSD）与飞行高度的关系可用下式表达：

$$GSD = \frac{H \cdot s}{f}$$

其中，为飞行高度（m），为传感器像元尺寸（mm），f为镜头焦距（mm）。对于古建筑细部测绘，要求 $GSD \leq 5\text{mm}$，据此可反算最大允许飞行高度，指导分级航线的高度分配[8]。

（二）影像预处理与空中三角测量

影像导入处理系统后，依次开展质量筛选、参数校正与数据组织完成预处理。清晰度、曝光状态、镜头姿态与影像重叠程度作为筛选标准，清除模糊、过曝以及重复低效影像，留存画面完成镜头畸变校正、亮度平衡与色彩统一，弱化不同航次、不同时段采集形成的辐射偏差。影像划分整体航测、立面补拍、细部近景三类组别管理，依托时间、定位与拍摄方位搭建影像检索目录。

空中三角测量阶段，提取稳定特征点，完成同名点匹配与连接状态核验，导入控制点坐标开展联合平差。连接点稀缺、重投影误差偏高、相机姿态异常的区域执行局部加密或二次匹配，阻断误差向密集点云生成流程传导。平差质量以单位权中误差（σ_0）评估：

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{r}}$$

其中，V为观测值残差向量，P为权矩阵，r为多余观测数。σ_0值偏大表明存在粗差或系统误差，需对异常像对执行剔除或重新匹配处理，以保证后续点云生成的基础质量。

（三）密集点云生成与三维重建

影像定向完成后，依照古建筑细部表达标准生成高密度点云，对离群点、漂浮点和重叠表面实施分类处理[9]。滤波参数留存瓦当边缘、斗拱轮廓、雕刻凹槽及木构件转角等小尺度信息，统一强度不可直接平滑全部区域。点云分块后构建三角网格，孔洞区域依托相邻影像重新运算，简单封闭会造成构件形态失真。纹理映射优先选取视角正、清晰度高且光照平稳的影像，接缝优化与色彩补偿弱化拼接痕迹，见表1。

表1 古建筑三维细部测绘各阶段关键参数参考表

处理阶段	关键参数	推荐取值范围	说明
分级航线规划	地面采样距离（GSD）	≤5 mm	细部构件精度要求
分级航线规划	航向重叠度	≥80%	保障特征点匹配密度
分级航线规划	旁向重叠度	≥70%	覆盖复杂遮挡区域
影像预处理	镜头畸变校正残差	≤0.5像素	避免误差累积传导
空中三角测量	单位权中误差（σ_0）	≤0.5像素	平差质量门限
密集点云生成	点云密度	≥500点/m²	支撑构件细节还原
精度检核	平面相对中误差	≤5 mm	以独立检查点为准
精度检核	高程相对中误差	≤8 mm	以构件特征量比对为准

三、广水传统村落数字化测绘实践

（一）项目背景：广水市文旅资源普查中的传统村落任务

广水市位于湖北北部，长江—淮河分水岭、中国南北过渡带东段，总面积2647 km²。2024年，湖北省地质局物探大队承担该市文化和旅游资源普查项目，组建12人项目组，经“三检三审”质量管控，查明旅游资源单体608处，其中建筑与设施类283处、历史遗迹类148处，两类合占70.5%[10]。普查采用3S技术、无人机航拍、三维建模与VR全景拍摄相结合，武胜关镇桃源村因完整

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

保留清代民居群落、石砌围墙与木构架建筑体系，被列为数字化建模重点对象。

（二）武胜关桃源村实施方案

桃源村建筑群依山地地形展布，单体建筑密集排布，相邻建筑檐口间距最窄处不足2米，普通垂直航拍严重受限。针对这一特点，作业方案采取三层分级飞行模式：第一层，在建筑群上方50 m高度执行环绕倾斜航线，获取屋面全貌及建筑群整体拓扑关系；第二层，在20—30 m高度对重要单体建筑执行立面贴近飞行，覆盖外墙砌筑、木雕窗棂与石雕门框；第三层，操控无人机悬停于斗拱、屋脊转角及檐口下方，近距采集1:10尺度细部影像，见图1。

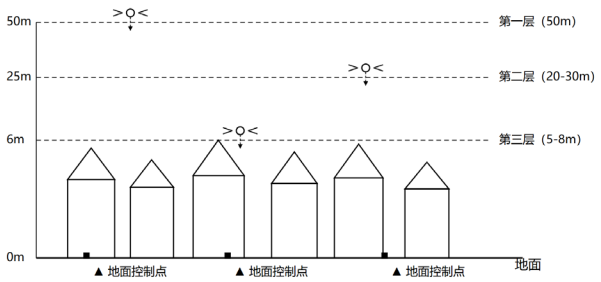


图1 桃源村三层分级飞行方案示意图

地面控制点采用RTK-GNSS实测，建筑外围及院落区域均匀布设8个控制点，高差覆盖范围从院落地面至屋顶高度，克服了山地地形高差引起的控制点高程层次单一问题。激光扫描仪在檐下、廊道及室内区域补采点云，与无人机影像数据通过特征点提取、坐标转换、粗精配准形成统一数据集，有效弥补航测数据在遮挡区域的结构性盲区。

（三）数据处理流程落地执行

影像预处理阶段，共采集有效影像4817张，按三层分级组别管理；经清晰度与曝光筛查剔除劣质影像312张，最终纳入解算4505张。镜头畸变校正残差控制在0.3像素以内，辐射均衡处理消除了上午与下午两个飞行时段之间的色温差异。空中三角测量导入8个控制点坐标联合平差，单位权中误差为0.38像素，满足精度要求；对屋脊转角处连接点不足区域执行局部加密，新增连接点217个，连接薄弱问题得到有效消除。

密集点云生成阶段，以高密度模式匹配生成点云总量约2.4亿个点，平均点密度达680点/m²。滤波处理分区执行，屋面、墙体、细部构件三个分区分别设定滤波强度参数，保留斗拱轮廓与雕刻凹槽的小尺度特征。三角网格重建后，孔洞区域（主要集中于廊道顶部及窗台内侧）结合邻近影像重新运算补全，共修复孔洞面积约18 m²。

四、三维细部模型精度检验与应用效能评估

（一）几何精度验证

三维细部模型精度验证围绕空间定位、构件尺寸和表面形态三个层面展开。空间定位精度借助6个独立检查点测算平面误差与高程误差，规避控制点参与检核带来虚高的检测结果；构件尺寸精度选取柱径、柱间距、檐口高度、屋脊长度及门窗洞口宽度等特征量，与全站仪或激光测距仪实测数据逐项比对；表面形态精度将模型点云与高精度地面激光扫描点云相互配准，分析点间距与局部偏差分布。

桃源村实测结果：平面相对中误差3.2 mm，高程相对中误差4.7 mm，整体相对中误差控制在5毫米以内，满足《古建筑测绘技术规程》对一级测绘精度的要求。斗拱转角、瓦垄曲面、雕刻凹槽等复杂区域单独布设检测断面，几何完整度、边缘清晰度和纹理一致性纳入评价标准，避免整体误差达标而细部出现局部形变。融合模型完整呈现屋顶曲面、墙体转折与木构架空间关系，弥补了单一航测数据在檐下与室内产生的模型孔洞，印证了本文数据处理路径对古建筑细部测绘几何精度要求的适配性。

（二）应用效能检验

应用效能检验依托模型成果在保护业务中的实际使用情况展开。桃源村模型按多种比例完成三维打印，投入室内外数字展示，验证了模型数据可支撑实体缩尺复制、建筑形态解析和可视化传播。高密度点云能够提取平面图、立面图、剖面图及典型构件尺寸，为构件编号、残损位置标记和修缮工程量核算提供数据基础。

从广水市普查项目整体来看，本次无人机航飞与数字化建模任务所形成的数字档案，直接纳入广水市文旅资源普查成果数据库，与608处旅游资源单体调查成果形成数据互补。建筑与设施类283处、历史遗迹类148处资源中，有三维建模成果支撑的资源在评级审查中提供了更为翔实的空间信息，普查报告最终认定特品级资源8处、优良级131处，三维模型成果对高等级资源的价值认定提供了客观的空间形态依据。

（三）动态监测潜力与推广价值

不同时期航测模型纳入统一坐标框架，可识别墙体倾斜、屋面沉降、构件位移和表层缺损范围变化；模型纹理留存瓦面破损、木构件开裂及墙体风化状态，助力搭建可查询、可量测和可更新的古建筑数字档案。广水市境内尚有大量传统村落建筑尚未完成系统性数字建档，本文所形成的技术路径与参数规范，可直接复用于后续批次的传统村落测绘任务，具备区域推广的工程基础。

区域性传统村落的批量测绘不同于单体古建筑的精细化项目，面临点多、面广、交通不便、资金有限的现实约束。本文实践表明，以多旋翼无人机为主、地面扫描为辅的协同作业模式，可在单栋建筑3—5个工作日内完成全流程数据处理，整体作业效率较传统全站仪测绘提升约4倍，在广水文旅资源普查项目工期的约束条件下，该效率指标具有现实可行性。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

五、结语

传统村落是中华文明的空间载体，损毁难复原，精准数字记录是保护基础。多旋翼无人机凭借低空灵活优势，配合系统数据处理，正将数字记录变为工程现实。广水普查表明，技术有效性不仅体现于几何精度，更在于与保护业务深度融合，从资源认定、残损标记到工程量核算与动态监测，三维模型贯穿遗产保护全链条。随着自动化质控与 AI 辅助识别技术成熟，数字化手段将从记录工具演进为决策平台，推动传统村落保护从被动抢救走向科学持续的系统管理。

参考文献

[1] 王同庆 . 无人机航测技术在城市建筑违建排查中的应用实践 [J]. 无人机 ,2026,(8):40-42.

[2] 顾磊 . 无人机航测地形图测绘关键技术研究 [J]. 无人机 ,2026,(5):60-62.

[3] 刘佳嘉 , 魏琪 . 面向复杂体型建筑物的无人机倾斜摄影航线规划研究 [J]. 南京信息工程大学学报 (自然科学版),2023,15(4):496-504.

[4] 齐涛 . 无人机倾斜摄影中密集匹配点云的处理与应用研究 [J]. 中国新技术新产品 ,2024,(13):19-21.

[5] 姜琪 . 一种基于无人机低空遥感的多光谱影像采集与处理方法 [J]. 中国宽带 ,2023,19(5):53-55.

[6] 代硕 . 面向无人机航拍图像的三维重建技术研究 [D]. 山东工商学院 ,2024.

[7] 刘欣悦 . 无人机贴近摄影测量三维航线规划研究 [D]. 武汉大学 ,2022.

[8] 范凯 . 地质测绘中无人机航测成像技术研究 [J]. 中国金属通报 ,2026,(3):159-161.

[9] 王龙 . 无人机倾斜影像密集匹配点云的处理与应用 [D]. 贵州师范大学 ,2021.

[10] 马联涛 . 无人机测绘技术在建筑工程测量中的应用 [J]. 无人机 ,2026,(7):140-142.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.