

无人机倾斜摄影测量技术优化古建筑三维建模效果

张萍萍

江西省国土资源测绘工程总院有限公司 江西 南昌 330038

【摘要】：无人机倾斜摄影测量技术在古建筑三维建模中的应用，通过多视角影像采集与数据融合处理，可显著优化建模效果。该技术依托无人机平台搭载多镜头相机，从不同角度获取古建筑细节信息，结合空三加密、三维重建算法，生成高精度三维模型。相比传统建模方法，其能更完整捕捉古建筑复杂构件形态，减少数据缺失与变形，提升模型纹理清晰度与几何精度。实践表明，该技术可高效完成大尺度古建筑群体建模，为古建筑保护、修复规划及数字化展示提供可靠的三维数据支撑，在文化遗产保护领域具有重要应用价值。

【关键词】：无人机；倾斜摄影测量；古建筑；三维建模；建模优化

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.024

引言

古建筑承载着丰富的历史文化价值，其三维建模是实现数字化保护与传承的关键手段。传统建模技术存在数据采集效率低、细节还原不足等问题，难以满足古建筑复杂结构的建模需求。无人机倾斜摄影测量技术凭借多视角观测优势，可快速获取古建筑全方位影像信息，为高精度三维重建提供数据基础。探究该技术在古建筑三维建模中的优化效果，对推动文化遗产数字化保护技术发展具有重要意义。

1 传统古建筑三维建模技术的突出问题

（1）数据采集的局限性显著

传统古建筑三维建模技术在应对古建筑复杂结构、精细装饰及大规模群体建模时，暴露出一系列难以忽视的突出问题，这些问题直接制约了建模成果的质量与应用价值。传统技术依赖人工实地测量或单一视角影像采集，难以全面覆盖古建筑的立体空间与细节特征。对于具有多层飞檐、镂空雕花、曲面屋顶的古建筑，人工测量需搭建脚手架或借助登高设备，不仅操作难度大，还可能对建筑本体造成潜在损伤。单一视角摄影无法捕捉建筑立面与顶面的衔接部位，如斗拱与梁架的咬合关系、翼角起翘的弧度变化等，导致关键结构信息缺失。对于建筑群中相邻建筑的空间布局与尺度关联，传统测量方式易因累积误差造成数据偏差，难以精准还原整体格局。建模精度与细节还原不足，传统建模技术生成的模型在几何精度上存在明显局限，难以满足古建筑保护与修复的专业需求。基于 CAD 软件的手动建模依赖操作人员的经验判断，对构件尺寸的标注易出现主观偏差，尤其是对曲率变化复杂的构件，如弧形梁、曲面瓦顶等，难以实现毫米级精度还原。

（2）建模效率与成本失衡

传统技术的建模流程繁琐，从数据采集到模型生成需经过多环节手动处理，整体效率低下。人工测量需逐点记录坐标信息，对大型古建筑而言，单座建筑的数据采集可能耗时数周，若涉及建筑群则周期更长。建模过程中，需对海量数据进行手

动筛选、拼接与修正，如将离散的测量点转化为三维网格模型，需反复校验尺寸与形态，耗费大量人力成本。对于存在残损或变形的古建筑，传统技术难以通过数据融合实现破损部位的合理推演，需依赖人工推测补全，不仅增加建模难度，还可能因主观判断导致模型与史实不符。传统建模技术对古建筑的复杂场景适应性较差，难以应对特殊环境下的建模需求。在地形复杂的山地古建筑群中，传统测量设备易受地形遮挡影响，无法获取完整的地形数据与建筑基底信息，导致模型与实际地貌脱节。对于具有高度艺术价值的装饰构件，如藻井、壁画、石雕等，传统扫描技术因分辨率限制，无法捕捉纹样的细微笔触与层次感，削弱了模型的考古研究价值。

（3）对不可达区域的建模能力缺失

古建筑中存在大量人员难以抵达的区域，如高塔顶部、深廊内部、水下建筑遗存等，传统技术对此类区域的建模几乎无能为力。对于塔刹、脊兽等高空构件，传统方法只能通过远距离观测大致估算尺寸，无法获取精确的形态数据，导致模型在关键部位出现失真。部分古建筑因年代久远存在结构不稳定情况，为避免安全风险，人工测量无法深入内部空间，如密室、夹层等，使得这些区域的结构特征成为建模盲区，影响模型的完整性与真实性。此外，传统技术生成的模型文件格式兼容性差，难以直接用于虚拟漫游、结构力学分析等现代应用场景，需经过多次格式转换与数据简化，过程中易造成信息丢失。

2 无人机倾斜摄影测量技术的建模优化机制

（1）多视角影像采集系统的全方位覆盖能力

无人机倾斜摄影测量技术搭载多镜头同步成像系统，通常包含 1 个垂直镜头与 4-6 个倾斜镜头，可从 0° 至 60° 的多角度同步获取古建筑影像数据。垂直镜头聚焦建筑顶面细节，如屋顶瓦垄的排列、脊饰的形态等；倾斜镜头则分别覆盖东、南、西、北四个立面，捕捉墙面浮雕、门窗雕花、柱础纹样等垂直面信息。这种多视角协同采集模式，能够完整记录古建筑从基座到檐角的立体空间特征，尤其对飞檐翘角、斗拱叠涩等传统

技术难以覆盖的复杂构件,通过倾斜镜头的斜向拍摄可清晰呈现其三维形态与结构逻辑。针对古建筑群体的布局建模,系统通过无人机自主航线规划实现区域性覆盖。预设航线结合GPS与IMU(惯性测量单元)定位,确保影像采集的连续性与重叠度,相邻影像的重叠率可达70%以上,为后续数据拼接提供充足的匹配特征点。对于地形起伏较大的山地古建筑群,无人机可通过高程自适应调整功能,保持镜头与建筑表面的相对距离稳定,避免因地形落差导致的影像比例失衡,确保群体中各建筑尺度的一致性。

(2) 空三加密与三维重建算法的精准建模支撑

影像数据采集完成后,通过空三加密技术实现海量影像的空间定位与联合平差。该过程利用影像中大量的同名点(如建筑构件的边角、纹样的特征点)进行多视匹配,结合无人机搭载的POS(定位定向系统)初始数据,解算出每张影像的外方位元素,构建统一的三维控制网。这种加密处理可消除单张影像的畸变误差,将分散的影像数据整合到统一的坐标系统中,为后续建模提供精确的空间基准。三维重建阶段采用密集匹配与网格生成算法,将二维影像转化为三维点云。密集匹配技术通过计算影像间的视差信息,在空三加密成果基础上生成数百万甚至数千万个三维点,形成覆盖古建筑表面的点云模型,其点间距可达到厘米级,足以还原木雕纹样的细微凹凸。网格生成算法则将离散点云转化为连续的多边形网格,自动修复点云数据中的漏洞(如构件遮挡形成的阴影区域),并通过纹理映射技术将原始影像的色彩与细节贴附到网格表面,使模型既具备精确的几何形态,又呈现真实的纹理质感。

(3) 自适应精度控制机制的细节优化能力

技术系统通过多级精度控制策略保障建模质量。在数据采集环节,根据古建筑的保护等级与建模需求,可灵活调整无人机飞行高度与镜头分辨率。对具有重要艺术价值的局部构件(如藻井、壁画),采用低空环绕拍摄模式,将影像分辨率提升至毫米级,确保纹样的笔触、色彩过渡等细节得以完整保留;对建筑整体形态建模则采用中高空航线,在保证整体精度的同时提高采集效率。模型生成过程中,通过多尺度几何校验实现精度优化。针对斗拱、榫卯等精密连接部位,算法自动识别其结构特征,强化局部点云的密度与匹配精度,确保构件间的咬合关系、尺寸比例与实物一致;对墙面、地面等大面积区域,则通过平滑处理减少冗余数据,在保证整体形态准确的前提下提高模型运算效率。这种自适应的精度分配机制,既满足了关键部位的精细建模需求,又避免了数据量过大导致的处理压力。

(4) 复杂场景与不可达区域的适应性建模方案

针对古建筑常见的遮挡问题(如树木掩映、构件重叠),技术通过多时段采集与数据融合实现优化。在植被茂密的古建

筑周边,选择落叶季节或利用无人机的避障功能绕开遮挡物进行补拍,结合不同时段的影像数据消除植被遮挡影响;对建筑内部的深廊、夹层等光线昏暗区域,通过增强型传感器与曝光参数自适应调整,确保影像的清晰度与对比度,为后续建模提供有效数据。对于人员无法抵达的高空区域(如塔刹、崖壁建筑),无人机可通过超视距遥控与变焦拍摄实现精准采集。搭载长焦倾斜镜头的无人机可在安全距离外对高塔顶部的脊兽、宝顶进行特写拍摄,结合近景影像的尺度关联,实现高空构件与建筑本体的精准拼接。对于水下古建筑遗存,通过防水无人机搭载水下摄影设备,配合水上与水下影像的联合校准,构建兼顾水面以上与水下部分的完整模型,突破传统技术的空间限制。

3 无人机倾斜摄影测量技术在古建筑三维建模中的应用效果

(1) 模型完整性与细节还原度的突破性提升

该技术生成的三维模型能够完整呈现古建筑的整体风貌与局部细节,突破了传统技术在复杂结构覆盖上的局限。对于单体建筑,从基座的石雕纹样到屋顶的脊兽造型,从立面的门窗雕花到内部的梁架结构,均能通过多视角影像融合实现无死角还原。飞檐翘角的曲线弧度、斗拱的层级嵌套关系等传统技术难以捕捉的复杂构件,在模型中呈现出清晰的空间形态与结构逻辑,使古建筑的营造技艺特征得到直观体现。对于古建筑群体,模型不仅精准还原单座建筑的形态,更能完整呈现建筑间的布局关系、庭院尺度与地形关联。山地古建筑群中建筑与山体的契合方式、平地建筑群的轴线对称布局等,通过三维模型可清晰解读其空间规划理念。即使是被植被部分遮挡的建筑构件或隐蔽空间(如廊柱背面、屋檐下方),也能通过多时段数据融合实现完整呈现,避免了传统建模中常见的信息缺失问题。

(2) 几何精度与纹理真实性的双重保障

模型的几何精度满足古建筑保护与研究的专业需求,构件尺寸与空间关系的测量误差控制在极小范围。通过对比实测数据可知,模型中柱径、梁长、斗拱间距等关键尺寸参数与实物偏差微小,足以支撑古建筑修复方案的精准设计。对于曲率变化复杂的构件,如弧形屋面、曲面墙体等,模型能够精准还原其形态特征,为研究古建筑的力学结构与美学设计提供可靠数据。纹理映射技术使模型表面呈现出与实物高度一致的视觉效果,木材的纹理、彩绘的色彩层次、砖石的质感等细节均得到真实再现。阳光照射下的阴影变化、不同材质的反光特性等光影效果,通过原始影像的直接映射得以保留,使模型既具备精确的几何属性,又拥有强烈的视觉真实感。这种纹理真实性为古建筑装饰艺术研究、彩绘修复配色参考等提供了直观依据。

(3) 建模效率与成本控制的优化平衡

相比传统技术，该技术大幅缩短了古建筑三维建模的周期，尤其适用于大规模、复杂场景的建模需求。单座中小型古建筑的建模从数据采集到模型生成可在短时间内完成，大型建筑群的批量建模也能通过无人机自主作业与并行数据处理实现高效推进，避免了传统人工测量中冗长的现场作业与数据处理过程。在成本控制方面，技术通过减少人工投入与设备依赖实现优化。无人机平台的单次作业成本远低于传统测量设备的租赁与维护费用，且无需搭建脚手架等辅助设施，降低了现场作业的人力与物资消耗。对于偏远地区或地形复杂的古建筑，无人机的便携性与适应性减少了交通与场地准备成本，使更多濒危古建筑得以纳入数字化保护范围。

（4）应用场景的多元化拓展

在古建筑保护领域，模型为修复方案设计提供了精确的三维数据支撑。修复人员可通过模型对残损构件进行虚拟测量与复制设计，如依据模型中斗拱的完整部分还原缺失构件的形态，或通过结构尺寸分析制定加固方案，减少对古建筑本体的二次干预。对于已损毁的古建筑，结合历史资料与残垣断壁的建模数据，可实现虚拟重建，为修复工程提供科学依据。在学

术研究层面，模型为古建筑形制分析、营造技艺研究提供了新工具。研究者可通过模型进行多维度剖切与测量，分析建筑的空间比例关系、构件受力特征等，如对不同朝代斗拱形制的对比研究，可通过模型直接提取尺寸参数与结构特征，提升研究的客观性与精准度。在展示与传播领域，模型为数字化展示提供了高质量内容载体。通过虚拟现实（VR）、增强现实（AR）技术，公众可沉浸式体验古建筑的内部空间与细节特征，如“走进”虚拟的大殿观赏藻井彩绘，或通过移动端应用查看构件的分解演示。这种展示方式突破了时间与空间限制，使古建筑文化遗产的传播范围得到极大拓展。

4 结语

无人机倾斜摄影测量技术有效弥补了传统古建筑三维建模技术的不足，通过多视角数据采集与精准建模算法，显著提升了模型的完整性、精度与效率。其在古建筑数字化保护中的应用，为文化遗产的记录、研究与展示提供了全新手段。推广该技术，对推动古建筑保护从传统模式向数字化、精准化转型具有重要意义，为文化遗产的永续传承提供有力技术支撑。

参考文献：

- [1] 陈明.无人机倾斜摄影在古建筑三维建模中的技术应用[J].测绘通报,2024,53(6):89-92.
- [2] 王丽娜.古建筑数字化保护中三维建模精度提升研究[J].建筑科学,2023,39(8):124-127.
- [3] 刘强.倾斜摄影测量技术在传统建筑群建模中的实践[J].地理空间信息,2022,20(11):76-79.
- [4] 赵静.无人机技术在文物建筑三维重建中的应用效果分析[J].文物保护与考古科学,2021,33(5):67-71.
- [5] 孙凯.基于倾斜摄影的古建筑模型纹理映射优化研究[J].工程勘察,2020,48(9):56-60.