

基于多源数据融合的历史建筑实景 三维重建研究

罗 杨¹, 王 涛^{1*}, 彭先友², 代金龙²

¹玉溪师范学院, 地理与国土工程学院, 云南 玉溪

²云南玉力空间信息咨询有限公司, 云南 玉溪

收稿日期: 2025年6月22日; 录用日期: 2025年7月15日; 发布日期: 2025年7月24日

摘 要

历史建筑是人类文明演进的载体, 然而, 伴随时代变迁, 这些珍贵遗产正日益遭受自然侵蚀与人为破坏, 因此, 亟需开展保护工作以传承历史文脉。近年来, 无人机技术与三维激光扫描技术的进步为精细化的古建筑实景三维重建提供了可能, 进而可实现对古建筑进行全面、立体化的数字化存档。本研究以通海县聚奎阁为例, 采用一种融合无人机倾斜摄影、近景摄影测量及地面近景摄影测量的创新方法, 完成了聚奎阁的实景三维重建。文中详细阐述了该技术的工作流程、面临的挑战, 并展示了三维模型成果及精度评估。

关键词

历史建筑, 无人机, 近景摄影测量, 三维重建

Research on Realistic 3D Reconstruction of Historical Buildings Based on Multi-Source Data Fusion

Yang Luo¹, Tao Wang^{1*}, Xianyou Peng², Jinlong Dai²

¹College of Geography and Land Engineering, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan

²Yunnan Yuli Spatial Information Consulting Co., Ltd., Yuxi Yunnan

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 15th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

Historical buildings serve as crucial repositories of human civilization's evolution. Nevertheless, the

*通讯作者。

文章引用: 罗杨, 王涛, 彭先友, 代金龙. 基于多源数据融合的历史建筑实景三维重建研究[J]. 测绘科学技术, 2025, 13(3): 187-194. DOI: 10.12677/gst.2025.133022

relentless passage of The Time exposes these invaluable heritages to escalating threats from both natural weathering and anthropogenic degradation, underscoring the exigent need for preservation efforts to safeguard historical continuity. In recent years, advances in unmanned aerial vehicle (UAV) technology and three-dimensional laser scanning have facilitated the creation of detailed, realistic three-dimensional reconstructions of ancient structures, enabling the establishment of comprehensive and holistic digital archives. As a case study, this research investigates the Jukui Pavilion in Tonghai County, employing an innovative, integrated methodology that combines UAV-based oblique photogrammetry, close-range photogrammetry, and terrestrial photogrammetry to generate a high-fidelity three-dimensional model of Jukui Pavilion. This paper details the technical workflow and associated challenges, and presents the resulting three-dimensional models along with a rigorous accuracy assessment.

Keywords

Historical Buildings, UAV, Close-Range Photogrammetry, 3D Reconstruction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

党中央和国务院高度重视历史文化遗产的保护工作，亦多次强调城市应保有其历史文化记忆，此乃至关重要。同时倡导以敬老护幼之心，尊重并善待城市中的既有建筑，并对历史文化街区进行妥善修复[1]。古建筑不仅是人类物质文明的结晶，更是精神文明的载体，堪称人类历史的见证与文化遗存。然受自然地理气候以及各类人为因素之影响，古建筑正逐渐衰败，消亡之虞日甚。故亟需开展古建筑保护工作，以赅续历史文脉[2]。

传统古建筑测绘方法主要依赖于人工手持测量工具或架设脚手架进行实地拍摄与测量，此等方式不仅作业风险高企、效率低下，且难于获取高处立面场景之数据。传统测绘仪器所采集的古建筑数据，多为点、线、面等几何信息。而无人机摄影测量技术则以影像数据为基础，藉由摄影测量学原理，实现古建筑的三维重建[3]。运用该技术重建的三维模型，不仅能提供精确的几何数据(如长度、高度、宽度等)，亦可获取纹理、细节、色彩等富含信息量的视觉元素。进一步结合三维建模软件(如 3D Max、SketchUp 等)，便可绘制古建筑之平面、立面、剖面等精细化图纸，从而使古建筑的测绘建档工作更臻完善[4]。

近年来，古建筑的三维数字化重建研究受到了广泛关注，学者们提出了多种方法以应对古建筑结构复杂、数据采集困难等问题。张旭等提出了一种融合激光点云、近景摄影及倾斜摄影测量技术的古建筑重建方法，通过基准统一、特征点提取等步骤实现精细重建，有效提高了模型的精度和结构细节[5]。席思远等针对异形古建筑的三维重建问题，提出了空地多源影像融合方案，克服了单一平台影像数据的局限性，显著提升了模型的完整度和精细度[6]。王广楠等则研究了基于消费级无人机影像的古建筑三维建模方法，提供了一种低成本、高效率的数字化展示流程，具有较高的应用价值[7]。孙保燕等针对大型牌式古建筑的重建难题，提出了空地多数据互补融合技术，结合倾斜摄影和三维激光扫描，实现了完整精细的三维模型重建[8]。阮競芸等利用多视角深度图配准算法设计了新的破损古建筑三维重建方法，通过标定摄像机坐标和提取建筑破损部分的点集，提升了重建效果和抗干扰能力[9]。刘秀伟等对中国古建筑三维数字化方法进行了综述，总结了现有技术的基础和应用场景，提出了未来发展方向[10]。李欣亮基于多源数据融合，对西安小雁塔进行了三维精细化重建分析，强调了三维可视化建模在古建筑保护中的重

要性[11]。李宁等探讨了异形仿古建筑的倾斜摄影建模及可视化方法,通过无人机倾斜摄影和多种建模软件的结合,提升了建模效率和可视化效果[12]。总体来看,这些研究在方法和技术上各有侧重,但共同目标都是提高古建筑三维重建的精度和效率,为古建筑的保护和数字化展示提供技术支持。然而,现有研究在数据融合、模型精细度和适用性等方面仍存在一定局限性,需进一步探索和优化。例如,配准算法的具体实现和权重分配策略的细节上仍存在不足。

本研究以通海县创建国家历史文化名城为契机,采用无人机近景摄影测量及地面近景摄影测量技术,对通海县聚奎阁进行影像数据采集。基于同名点数据,通过自动配准算法,实现点云之自动融合,进而重构高精度三维模型。本研究基于多源数据融合应用于三维重建领域,相较于现有研究,提出了一个综合性的多源数据融合框架,整合了无人机影像、地面摄影测量、激光雷达等多种数据源,而现有研究多集中在单一或少量数据源的组合。整体的技术流程如图1所示。

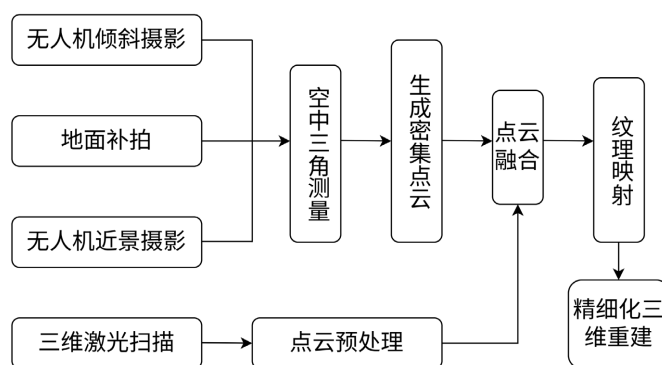


Figure 1. Technical process of 3D reconstruction of ancient buildings from multiple data sources

图1. 多源数据古建筑的三维重建技术流程

2. 数据采集

2.1. 建模对象

聚奎阁坐落于通海县城中心,地处东、南、西、北四街交汇之处,为攒尖顶式四方单体三重檐建筑。该阁占地面积 165.38 平方米,总高约 17.5 米,共设三层,由四十根通高木柱支撑,内层辅以四根中柱直抵阁顶。聚奎阁飞檐四翘,雕梁画栋,金碧辉煌,结构严谨,工艺精湛,充分体现了中国传统建筑中榫卯结构的科学性。自建阁以来,历经 135 载,通海县曾发生两次强烈地震(公元 1915 年、1970 年),县城内多数民居损毁坍塌,而聚奎阁却巍然屹立于城中,此现象充分印证了中国传统建筑结构的卓越抗震性能[13]。

2.2. 无人机数据采集

本研究采用大疆精灵 4 RTK 无人机进行倾斜摄影数据采集,该设备具备厘米级导航定位系统及高性能成像系统,且体积小、机动灵活,易于在建筑物间穿梭飞行。无人机数据采集分为高空航摄、近景摄影和地面采集三个阶段。由于聚奎阁地处古城繁华区域,人员密集,采用自动环绕飞行模式存在一定困难,因此,高空影像数据主要采用“五向飞行”模式,即采集一条正射影像数据及四个方向的倾斜影像数据,飞行高度设定为 100 米,航向重叠度 70%,旁向重叠度 60%,相机倾斜角 -45° 。近景影像数据采集则采用手动飞行模式,每个立面采集两条航线,照片重叠度参照高空航摄的“五向飞行”模式。立面采集航线设计如图2所示[14]-[16]。

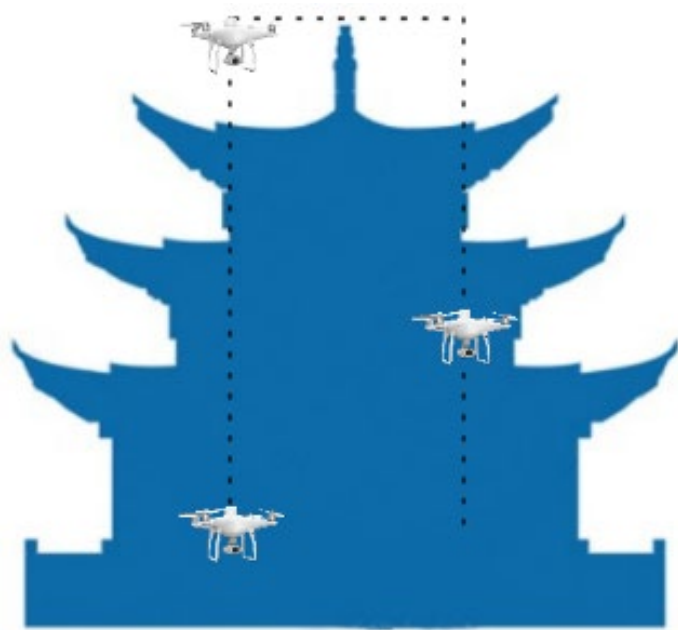


Figure 2. Close-range photography facade flight path
图 2. 近景摄影立面航线

地面影像采集工作采用手持大疆精灵 4 RTK 设备，主要用于捕捉古建筑的精细局部特征，以及无人机航拍摄影难以有效覆盖的区域。在影像拍摄过程中，务必保证相邻两个拍摄点之间影像的重叠度维持在 60%以上，以确保后续三维重建或纹理贴图的质量和精度。此外，为了保证每个拍摄点的信息完整性和视角多样性，要求每个拍摄点至少获取三张照片，且每张照片之间的拍摄角度差异应小于 15° ，具体拍摄方法可参考如图 3 所示的文献[17]。这样的拍摄策略旨在获取足够数量和质量的影像数据，为后续的古建筑数字化建模提供可靠的数据基础。

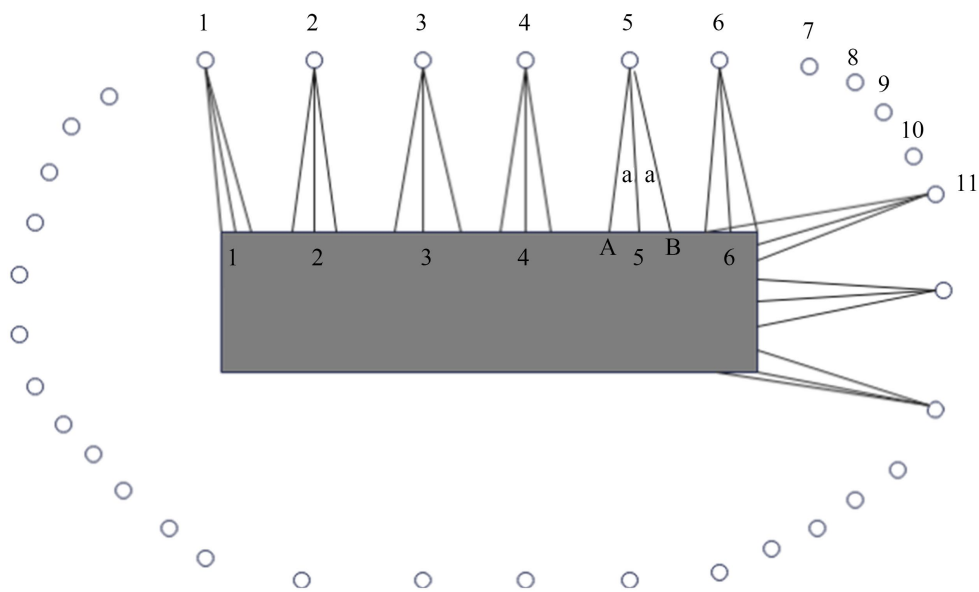


Figure 3. Schematic diagram of ground fixed-point photography
图 3. 地面定点拍照示意图

3. 数据处理

3.1. 影像空中三角测量解算

在本研究中,我们利用 ContextCapture 软件对包括无人机倾斜摄影影像和建筑物立面影像在内的多源影像数据进行了精密的空中三角测量解算。这一步骤至关重要,其核心目标是精确确定每一幅影像在空间中的位置与姿态信息(包括空间坐标和旋转角度)。这些精确的位置和姿态信息,将为后续进行高精度三维建模提供坚实可靠的基础数据支撑。空中三角测量解算的结果令人满意,充分表明本次研究所采用的影像数据质量良好,整体表现稳定。在整个影像数据集中,未观察到任何明显的的数据缺失或分层现象,这表明影像采集过程的完整性和质量控制措施的有效性。更令人鼓舞的是,影像的入网率高达 98%,这进一步验证了影像数据在空间连接上的高度一致性和可靠性,为后续的三维建模流程奠定了坚实的基础[18]。

3.2. 多源影像融合

在获取了上述空中三角测量解算结果后,我们紧接着进行了多源影像的融合处理。首先,对解算得到的多个区块进行合并,确保整体数据的一致性。然后,基于每张影像精确的位置信息,进行严格的配准计算,以消除不同影像之间的几何误差,保证建模的精度。由于本研究中所使用的影像数据全部由大疆精灵 4 RTK 设备采集,这使得所有照片在采集时都已处于同一坐标系下,极大地简化了配准过程。因此,在配准过程中,我们巧妙地利用倾斜模型选取的特征点作为参考点,进行人工刺点标注。具体而言,我们在每个建筑物墙面上选取 3 个容易识别且具有代表性的特征点,作为同名连接点,最终选择的特征点总数为 12 个。为了保证配准的精度,每个特征点会在 5~10 张照片上进行标注。值得一提的是,ContextCapture 软件具备智能化的特征点预测功能,在标注了 2~3 张包含该特征点的影像后,软件能够自动预测并提示包含该特征点的其他影像,极大地提高了标注效率和准确性。在完成所有特征点的标注之后,我们再次进行空中三角测量解算,通过迭代优化,力求达到最佳的配准效果[19] [20]。

3.3. 三维实景建模

在完成了上述多源影像融合的精确配准工作之后,我们就可以开始进行三维实景建模的关键步骤了。首先,我们依据经过 3.2 节处理后的、高精度空中三角测量解算结果,在 ContextCapture 软件中创建一个新的生产项目。随后,利用软件强大的算法和计算能力,生成基于真实影像的高密度彩色点云。这些点云数据忠实地记录了建模对象表面的三维几何信息和色彩信息,是构建高精度三维模型的关键。接下来,为了优化点云数据的质量,并提高后续建模的效率,我们对生成的点云进行优化处理,包括噪声滤除、点云精简等。在获得高质量的点云数据后,我们将其转换为三角网格,构建建模对象的 Mesh 模型。这个 Mesh 模型是由大量的三角形面片组成,能够精确地表达建模对象的表面形状。最后,ContextCapture 软件将根据彩色点云和 Mesh 模型,智能地将照片的纹理信息映射至模型表面,使得模型具有逼真的视觉效果。最终,通过以上一系列精细的处理步骤,我们成功地生成了具有高精度几何信息和逼真纹理的三维实景模型[21]。

4. 三维实景模型结果与分析

在对云南省玉溪市通海县境内的历史文化名胜聚奎阁进行全面的影像数据采集工作后,我们对所获取的原始数据进行了细致的检查与整理。最终,我们得到了以下高质量的影像资料:包括从高空利用倾斜摄影技术拍摄的影像共计 568 张,这些影像能够从多个角度捕捉聚奎阁的整体形态与周边环境;近景

影像 68 张,用于展现聚奎阁的建筑细节和纹理特征;以及地面影像 54 张,补充了地面视角的细节信息,进一步完善了数据采集的完整性。

为了能够更加真实、完整地还原聚奎阁的原始风貌,我们采用了先进的空地融合建模方法。这种方法将高空倾斜影像、近景影像和地面影像进行有机结合,充分利用各自的优势,弥补单一数据源的不足。在软件选择方面,我们选用了 Bentley 公司的 ContextCapture 软件。该软件具有强大的三维建模能力,能够根据输入的影像数据自动生成高精度的三维实景模型。

通过 ContextCapture 软件的处理,我们成功地创建了聚奎阁的三维实景模型,该模型不仅能够清晰地展现聚奎阁的整体外观,还能够精细地呈现其建筑细部结构。最终的建模成果以图 4 的形式进行展示,从图中可以清晰地观察到聚奎阁的飞檐、斗拱、雕梁画栋等细节,以及其所处的地理环境,从而为聚奎阁的保护、研究和文化传播提供了重要的技术支持。



Figure 4. Realistic 3D model: (a) A close-up view of Jukui Pavilion; (b) Chiwei decoration; (c) Treasure top of Jukui Pavilion

图 4. 实景三维模型: (a) 聚奎阁近景; (b) 鸱尾装饰; (c) 聚奎阁宝顶

为验证所构建三维模型的精度,本研究采用高精度全站仪对聚奎阁各立面进行了详细测量。具体而言,在聚奎阁各立面上选取不同部位的四个特征点,并利用全站仪获取其精确的三维坐标信息。同时,从已构建的三维模型中提取与实测点位对应的坐标信息。通过对比全站仪实测坐标与模型提取坐标,计算模型坐标与实测坐标间的误差,进而评估模型的精度。计算结果表明,模型坐标与实测坐标间的误差分布情况如图 5 所示,该图详细展示了各测量点位的误差大小及空间分布。上述误差数据将作为评估模型精度的重要依据。

通过对 16 个实测点位坐标与对应模型点位提取坐标进行对比计算,结果显示该模型平面中误差为 5.4 厘米,高程中误差为 5.3 厘米。综合评估表明,上述误差结果满足预期精度要求,验证了本次融合建模的整体质量良好。

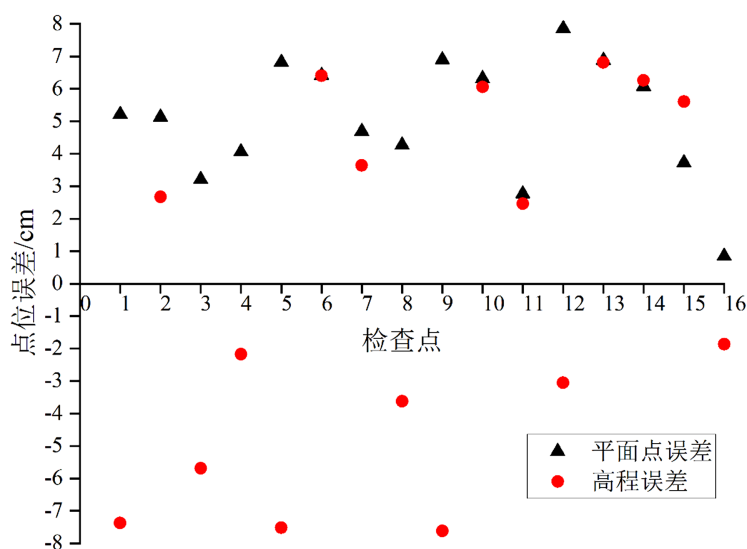


Figure 5. Model accuracy point position error

图 5. 模型精度点位误差

5. 总结

倾斜摄影测量和近景摄影测量技术凭借其各自的优势,已被广泛应用于实景三维重建、古建筑保护等诸多领域,成为不可或缺的重要手段。然而,在实际的建模应用中,仅仅依赖于单一的技术手段往往会暴露出一定的局限性,难以在效率和精度之间取得理想的平衡,无法同时满足高效建模和高精度还原的双重需求。

针对上述问题,本研究创新性地采用了多种三维重建技术相融合的方案,旨在克服单一技术的不足,实现更优的三维重建效果。我们以具有重要历史文化价值的聚奎阁为例,通过整合不同的三维重建技术,成功完成了对其进行高效且高精度的三维重建。最终得到的三维模型不仅在整体结构上更加完整,避免了传统方法可能出现的缺失或变形,而且在细节表现上也更为丰富和细腻,能够更真实地还原古建筑的原貌。

本次研究成果为古建筑的数字化保护与存档工作提供了全新的技术途径,也为更加生动形象的三维展示提供了坚实的数据基础。通过这种多技术融合的三维重建方法,可以有效地提升古建筑数字化保护的水平,使其能够以更加完整、精确的方式被保存和传承,并以更具吸引力的方式展现在世人面前。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目(202411390001)。

参考文献

- [1] 刘锂,段芃芃. 古建筑三维建模技术的研究与实现[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(8): 188-192.
- [2] 摄菲. 基于虚拟现实的古建筑建模技术的研究和应用[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [3] 沈吉宝. 空地融合精细化实景三维重建方法[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 114-117.
- [4] 王茹. 古建筑数字化及三维建模关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2010.
- [5] 张旭,李新锋,王胜骞,等. 一种融合多源数据的古建筑精细重建方法[J]. 工程勘察, 2023, 51(3): 68-72.
- [6] 席思远,纪任鑫,苗培培,等. 面向异形古建筑的空地多源影像融合精细化三维重建研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(4): 51-54.

-
- [7] 王广楠, 刘健辰, 张子浩. 基于消费级无人机影像的古建筑三维建模方法[J]. 北京测绘, 2022, 36(8): 1008-1012.
- [8] 孙保燕, 周鑫, 覃禹程, 等. 空地多数据互补融合技术在大型牌式古建筑重建的应用[J]. 测绘通报, 2022(1): 121-127, 132.
- [9] 阮競芸, 厉犇. 多视角深度图配准算法下破损古建筑三维重建[J]. 计算机仿真, 2021, 38(7): 157-160, 370.
- [10] 刘秀伟, 任镛, 孙晓敏, 等. 中国古建筑三维数字化方法综述[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(3): 592-603.
- [11] 李欣亮. 基于多源数据的古建筑三维精细化重建——以西安小雁塔为例[J]. 佛山陶瓷, 2024, 34(7): 101-103.
- [12] 李宁, 仇继圣, 付波霖, 等. 异形仿古建筑倾斜摄影建模及可视化方法[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(3): 679-685.
- [13] 聚奎阁[EB/OL]. 2025-06-09. <https://baike.baidu.com/item/%E8%81%9A%E5%A5%8E%E9%98%81/4308760>, 2025-06-16.
- [14] 古春晓. 无人机贴近摄影的古建筑精细三维建模[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
- [15] 何佳男. 贴近摄影测量及其关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- [16] 陈款, 张小可, 涂峻伦, 等. 融合无人机与相机影像的三维建模方法在古建筑保护中的应用[J]. 科技创新与应用, 2020, 10(26): 30-32.
- [17] 黎娟. 基于空地融合的精细化实景建模及可视化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2018.
- [18] 林月凤, 黄家涛, 梁庆业, 等. 基于无人机的古建筑三维重建技术研究[J]. 电脑知识与技术, 2020, 16(23): 209-211.
- [19] 娄紫璇. 空地多源影像三维重建关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2022.
- [20] 邱春霞, 张巧玲, 董乾坤, 等. 无人机倾斜影像三维建模中的空地融合研究[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(6): 67-71.
- [21] 吴晓雯, 张志华, 窦觉勇. 基于多视角影像的古建筑三维建模[J]. 地理空间信息, 2022, 20(10): 74-78.