

基于全信息摄影测量方法的复杂建筑三维重建

王正洋, 贾勇帅, 李梦博

长江水利委员会水文局汉江水文水资源勘测局, 湖北 襄阳

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月10日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

针对被摄对象受遮挡导致的影像信息不全、不同数据集的影像融合空三易失败等问题, 本文给出了一种全信息影像采集与数据处理方法。该方法对影像采集和多源影像空三解算的关键技术进行优化, 给出了空中多视倾斜影像加地面多层多角度的全信息影像采集方法和分步整体联合空三的平差解算方法。以某复杂建筑为研究对象, 利用Phantom 4 RTK无人机采集全信息影像数据, 综合使用ContextCapture和MicMac软件及编程语言进行实景三维重建。结果表明: 与传统建模方法相比, 该方法在位置精度、点云偏差、白膜结构和纹理细节几个方面都表现优越, 解决了复杂建筑模型数字化、真实再现等关键难题, 为智慧水利复杂建筑物建模提供支持。

关键词

全信息影像, 三维建模, 倾斜摄影测量, Phantom 4 RTK, 复杂建筑

Three-Dimensional Reconstruction of Complex Construction Based on Full Information Photogrammetry

Zhengyang Wang, Yongshuai Jia, Mengbo Li

Hanjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Xiangyang Hubei

Received: October 20, 2025; accepted: November 10, 2025; published: December 26, 2025

Abstract

In response to issues such as incomplete image information due to subject obscuration, and the aerial triangulation failure of merging imagery from different datasets, this paper proposes a comprehensive method for image acquisition and data processing. This method optimizes key techniques in image

作者简介: 王正洋, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事河道测绘工作, 研究方向为大地测量学与测量工程, Email: 302768508@qq.com

文章引用: 王正洋, 贾勇帅, 李梦博. 基于全信息摄影测量方法的复杂建筑三维重建[J]. 水资源研究, 2025, 14(6): 640-648.
DOI: 10.12677/jwrr.2025.146069

acquisition and multi-source image aerial triangulation, and gives the full information image acquisition method of aerial multi-view oblique image plus ground-based multi-layer, multi-angle close-range image, adjustment solution method of stepwise integrated aerial triangulation. To validate the effectiveness of this method, this paper conducted a study focusing on a complex ancient building. The full-information image data was collected using a Phantom 4 RTK drone, and a combination of ContextCapture, MicMac software, and programming languages were employed for real-time three-dimensional reconstruction. The results demonstrate the superiority of the method compared to traditional modeling approaches in terms of positional accuracy, point cloud deviation, white film structure, and preserving textural nuances. This method effectively addresses key challenges in digitizing and realistically reproducing complex construction, making it highly significant for modelling complex construction in smart water resources.

Keywords

Full Information Image, Three-Dimensional Modelling, Oblique Photogrammetry, Phantom 4 RTK, Complex Construction

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. 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

随着智慧水利建设的推进, 三维重建技术在水利设施建筑的建模方面应用得到了广泛应用, 但仍然有一些问题亟待解决: 1) 当前多源数据采集方法没有形成一个完整的体系, 无人机最优路径规划和精准数据采集是复杂建筑物三维重建的关键问题[1]-[3]; 2) 在后期内业处理时, 由于多源数据的坐标系、分辨率和 CMOS 像点尺寸等方面存在较大差异, 所以在空三解算及影像匹配当中, 存在空三解算的失败以及匹配点不足的问题[4]-[6]。

针对上述问题, 本文对多源数据采集和多源影像空三解算两项关键技术进行了优化, 给出了一种全信息摄影测量方法(Full Information Photogrammetry, FIP)。给出的主要创新: 1) 基于空中多视倾斜影像加地面多层、多角度的全信息影像采集方法进行数据采集, 该方法能够获取更加全面和详细的全信息影像且具有通用性; 2) 基于分步整体联合空三的多源影像空三解算方法, 该方法既能保证空三解算的速度与可靠度, 又能提高复杂建筑物的三维建模的质量。

2. 研究区概况

本次研究以某复杂建筑物为研究对象, 研究区域如图 1 所示, 其建筑结构十分复杂(斗拱、屋檐、雕塑结构多), 涵盖了复杂建筑在三维建模中的多项难点。本文以 Phantom 4 RTK 无人机为主要影像获取工具, 联合使用了 ContextCapture 和 MicMac 软件及编程语言开展数据处理, 验证本文提出方法的有效性, 为复杂建筑物建模提供技术参考。

3. 全信息影像采集方法

3.1. 空中多视倾斜影像采集方法

在进行影像采集前需要根据测量区域的现场环境及目标地物特征, 设定飞行的高度, 航向重叠度和旁向重叠度。

1) 计算预设航高

地面分辨率代表了影像上的地形地物分辨能力,地面分辨率数值越大,地物分辨能力越低[7]。首先要根据要采集影像的地面分辨率,利用公式(1)求出合适的航高。

$$H_0 = f \times GSD / a \tag{1}$$

其中, H_0 是摄影航高; f 是镜头焦距; GSD 是地面分辨率; a 代表的是像元尺寸。

2) 计算航向预设重叠度及旁向预设重叠度

$$P_0 = 1 - \frac{H_x(1 - P_x)}{H_0} \tag{2}$$

$$P_1 = 1 - \frac{H_x(1 - P_y)}{H_0} \tag{3}$$

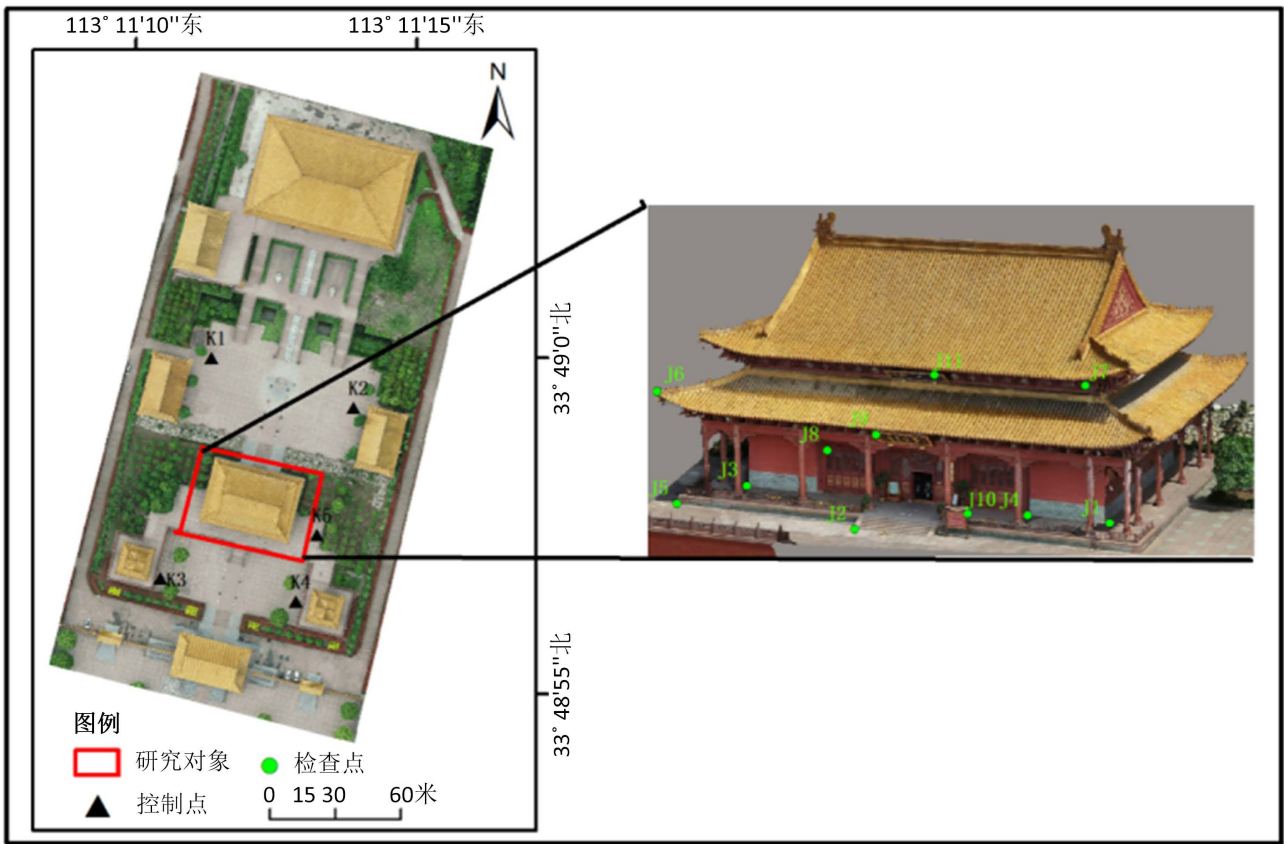


图 1. 研究区概况

3.2. 地面多层、多角度近景影像采集方法

研究建筑具有较宽的屋檐,无人机倾斜摄影技术无法拍到斗拱、牌匾等檐下建筑纹理(如图 2(a)蓝色区域 A、B 为拍摄死角,建模效果对应图 2(b)的 A、B 部分),难以满足该建筑三维模型的应用需求。

为了解决拍摄死角影像的获取问题,本文给出了一种地面多层多角度的近景影像采集方法,具体采集方法如图 3 所示。该方法采用双层拍摄方式,内层数据获取采用多层交向摄影测量方式,外层采用定点单角度拍照方式。

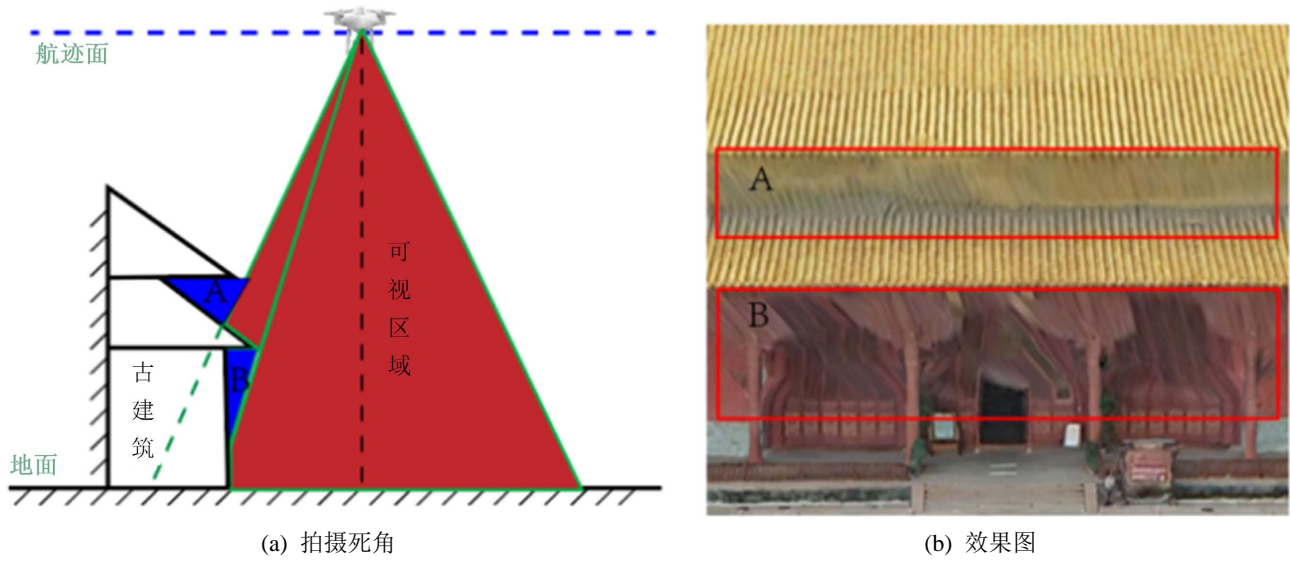


图 2. 无人机倾斜摄影测量拍摄死角

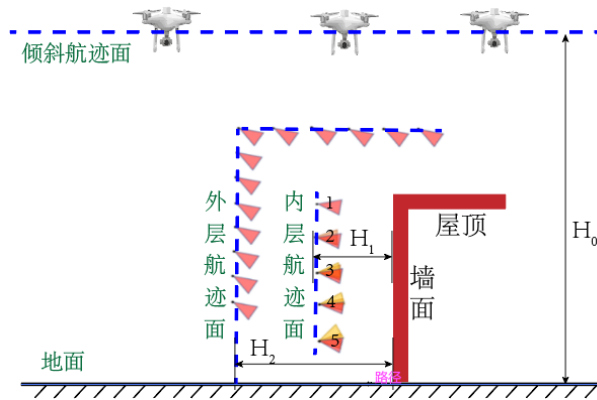


图 3. 地面多层、多角度近景影像采集方法

步骤 1: 确定近景内层影像的航迹点位置。首先, 本文把建筑的立面近似为一个平面, 而近景影像的航迹面也是一个平面。由公式(2)可知, 当 $H_x = H_0$ 时, $P_x = P_0$, 故近景内层预设重叠度即为实际重叠度。所以, 只需按照《低空数字航空摄影规范》设计出航向重叠度与旁向重叠度即可满足精度要求。然后, 分别利用公式(4)和公式(5)计算出近景内层影像的摄影基线长(同一航带相邻两航点间的拍摄距离)和相邻两航带的采集间隔。最后, 根据建筑的长、宽及高规划出合适的采集区域。最后, 根据采集区域的面积、摄影基线长、航带间隔和起点拍摄位置, 计算出采集近景内层影像采集的航迹点位置。

求解摄影基线长:

$$B_x = \frac{(1 - q_x) \times H_1 \times L_x}{f} \quad (4)$$

求解航线间隔:

$$B_y = \frac{(1 - q_y) \times H_1 \times L_y}{f} \quad (5)$$

其中, q_x 为近景预设航向重叠度, q_y 为预设旁向重叠度, B_x 是测区实地摄影基线的长度; B_y 是实地上航线间隔

的宽度； L_x 是像幅长度； L_y 是像幅宽度； H_1 是内层拍摄点到建筑距离； f 是镜头的焦距。

步骤 2：近景内层多角度影像采集。根据步骤 1 计算出的航迹点位置，开始采集近景内层影像数据。近景影像内层数据采用多层交向摄影测量方法，分多层多角度采集数据(如图 3 所示)，采集近景影像内层的云台倾角分为仰角、平角和俯角三个角度。其中，平角和俯角的采集角度不变，分别为 0° 和 -15° ，俯角每层都有，平角从第 2 层开始采集，仰角从 0° 到 15° 按每次 5° 的增量，从第 1 层到第 5 层依次递增，第 6 层到第 n 层都采用 -15° 、 0° 和 15° 三个角度采集数据。

步骤 3：确定近景外层影像航迹点位置。不同数据集中的影像分辨率差距太大会导致影像无法匹配等问题[8]，Bentley ContextCapture 官方给出的不同数据集的影像分辨率差距应保证在 5 倍以内。当近景影像与倾斜影像分辨率差别在 5 倍以内时，由公式(1)地面分辨率与拍摄距离的关系可知，近景影像的外层采集距离(H_2)应为倾斜航高 H_0 的 1/5 倍到 5 倍之间，同时也应该在近景内层影像的采集距离 H_1 的 1/5 倍到 5 倍之间。而 $H_0 > H_1$ 。因此，应将近景影像的外层采集距离(H_2)的范围设置在 $1/5H_0 \sim 5H_1$ 之间。再由步骤 1 中的公式计算出近景外层影像采集的航迹点位置。

步骤 4：近景外层影像采集。根据步骤 3 计算出的航迹点位置，将无人机云台角度都设为 -30° 采集数据。采集近景影像的外层影像目的是对近景内层影像和倾斜影像起到一个承接作用，使更好地融合到一起建模。

利用空中多视倾斜影像 + 地面多层、多角度同源近景影像，能够满足多源数据融合三维精细建模在影像重叠度、影像比例尺及全信息影像等方面数据质量要求。

3.3. 质量评价方法

为了证明本文给出的三维建模方法的优越性，从主观和客观两个方面进行三维实景模型质量评价。主观评价从模型的白膜结构和纹理细节两个方面来进行分析，并和其他方法生成的模型比较，验证本文所用方法的先进性。客观评价从模型最容易出现问题的长宽变化、检查点的位置精度和点云偏差三个方面进行分析。其中，位置精度通过对比实测检查点坐标和模型上对应位置的坐标的差别，来获取检查点 Z 方向的误差($RMSE_Z$)、 XY 平面误差($RMSE_{XY}$)及整体误差 $RMSE_{XYZ}$ ，公式见(6)~(8)。其中 n 是每个检查点的测量次数， (X_i, Y_i, Z_i) 是 GNSS 测量的检查点第 i 次测量的地理坐标， (x_i, y_i, z_i) 为所生成模型上对应位置的坐标。

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - Z_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2 + (y_i - Y_i)^2 + (z_i - Z_i)^2}{n}} \quad (8)$$

4. 实验与结果分析

4.1. 全信息影像采集

试验于 2025 年 6 月 3 日完成，拍摄时间为当日正午时分，天气晴朗，无风，能见度较高，研究区卫星信号较好，电磁干扰较小，便于无人机实验。

4.1.1. 空中多视倾斜影像采集

依据《低空数字航空摄影规范》要求，最高点航向实际重叠度最小不应小于 53%；旁向实际重叠度最小不应小于 8%。本次实验预设航高为 60 m，建筑最高点的相对航高为 38 m。根据本文推导公式(2)和公式(3)，计算得到预设航向重叠度不应小于 70.23%，旁向重叠度不应小于 41.73%。参照以往航测经验，本文将航向预设重叠度设计为 80%，旁向预设重叠度为 70%。

4.1.2. 地面多层、多角度近景影像采集

对于近景全信息影像的获取，主要是低空操作 Phantom 4 RTK 无人机，采用多层多角度拍照的方法，由远至近拍两层。近景内层预设航向重叠度为 80%，预设旁向重叠度为 60%，近景内层影像的采集距离 H_1 为 10 m，根据公式(5)计算得航线间隔的宽度为 4 m。建筑高 22 m，故共需采集 5 层影像数据。即内层数据从上到下分为 5 层拍摄，第 1 层：将无人机云台角度设置为 -15° 一个角度定点拍摄。第 2 层：将云台角度设置为 -15° 和 0° 两个角度定点拍摄。第 3 层：将云台角度设置为 -15° 、 0° 和 5° 三个角度定点拍摄。第 4 层：将云台角度设置为 -15° 、 0° 和 10° 三个角度定点拍摄。第 5 层：将云台角度设置为 -15° 、 0° 和 15° 三个角度定点拍摄。相对航高 H_0 为 60 m，由 H_2 满足 $1/5H_0 \leq H_2 \leq 5H_1$ 条件可推出 $12\text{ m} \leq H_2 \leq 50\text{ m}$ 。本次实验将 H_2 设为 26 m。近景全信息外层像片采用定点单角度拍摄方法，将 Phantom 4 RTK 云台角度都设置为 -30° 定点拍照。

4.2. 结果分析

4.2.1. 客观定量分析

从模型最容易出现出问题部位轮廓的长宽变化、检查点的位置精度和点云偏差三个方面进行定量分析，证明本文提出三维建模方法的先进性。

1) 轮廓长度变化

使用全站仪对建筑物表面的窗户、说明栏、牌匾等特征纹理(如图 4 所示)进行了对边测量和悬高测量，通过和模型上相应的位置长度对比，来说明基于 FIP 构建模型的优势，全站仪测量与模型对比结果见表 1。结果显示：基于 FIP 构建模型表面特征纹理的最大误差为 0.023 m。根据《三维地理信息模型数据产品规范》(CHT9015-2012)，本次对该建筑的模型构建方案能够满足 I 类建筑物要素模型制作要求。



图 4. 建筑物各特征位置

表 1. 全站仪与模型结果较差

数据类型	全站仪实测结果/m	模型测量结果/m	误差/m
窗户 A 长度	4.236	4.221	0.015
窗户 A 宽度	3.074	3.097	-0.023
说明栏 B 长度	1.586	1.595	-0.009
说明栏 B 宽度	1.189	1.177	0.012
牌匾 C 长度	5.231	5.208	0.023
牌匾 C 宽度	1.845	1.859	-0.014
牌匾 D 长度	4.937	4.920	0.017
牌匾 D 宽度	1.790	1.810	-0.020

2) 检查点位置精度

根据待研究对象的特点, 本文选用 5 个控制点和 11 个检查点, 如图 1 所示。每个检查点测 5 组数据, 求其中误差与传统倾斜摄影测量(Oblique Photogrammetry, OP)比较, 从检查点位置精度来验证本文提出方法的优势, 两种方法的结果见图 5 所示。结果表明: 从图 5 中, 可以明显地看出, 相比于 OP, FIP 模型在 RMSEZ 和 RMSEXY 方面都有明显的改善, 检查点误差最大点的位置均处于建筑屋檐下有遮挡的位置。

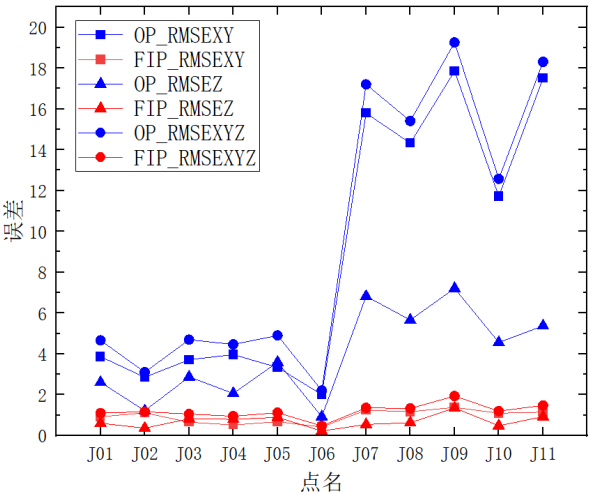


图 5. 不同方案位置精度对比

3) 点云偏差精度

本文以 OP 模型密集匹配得到的点云为参考, 从点云偏差的角度分析 FIP 方法的可行性, 不同模型的点云偏差分布结果如图 6 所示。研究结果显示, 利用 OP 模型密集匹配的点云数量为 536,424, 其中偏差绝对值在 0.35 mm 以内的点云所占百分比总和为 43.94%。FIP 模型密集匹配算法得到的点云数量为 599,113, 其中偏差绝对值小于 0.35 mm 的点云所占百分比总和的 59.37%。结果表明, FIP 模型密集匹配不仅能够匹配出数量更多的同名像点, 也提高了密集匹配点正确率。

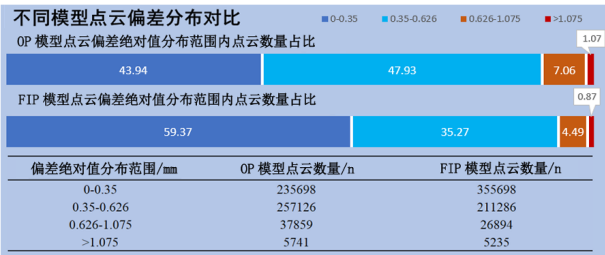


图 6. 不同模型点云偏差分布对比

4.2.2. 纹理、白膜细节分析

为了进一步评价三维实景模型质量, 本文对窗户、门、屋檐棱部纹理以及立面字体等重点区域在纹理细节、白膜等方面通过与 OP 建模方法的对比, 证明 FIP 建模方法的优越性, 不同方法的模型整体图见图 7 所示, 不同方法的模型细节图见表 2 所示。结果显示: 1) 在白膜结构方面, 用本文提出的方法构建的模型能更好地突出建筑的结构信息, 与传统 OP 方法所建的模型形成了鲜明对比。2) OP 方法经过纹理贴图后的三维模型侧面信息存在获取不完整且拉花严重等现象, 而本文提到的方法获取的建筑模型经过纹理贴图后的三维模型侧面信息更好,

纹理细节分辨率更高，没有屋檐下结构缺失的情况，且模型的色调均匀，更能真实地反映建筑的信息，同时，能清楚地看到说明栏中的文字。

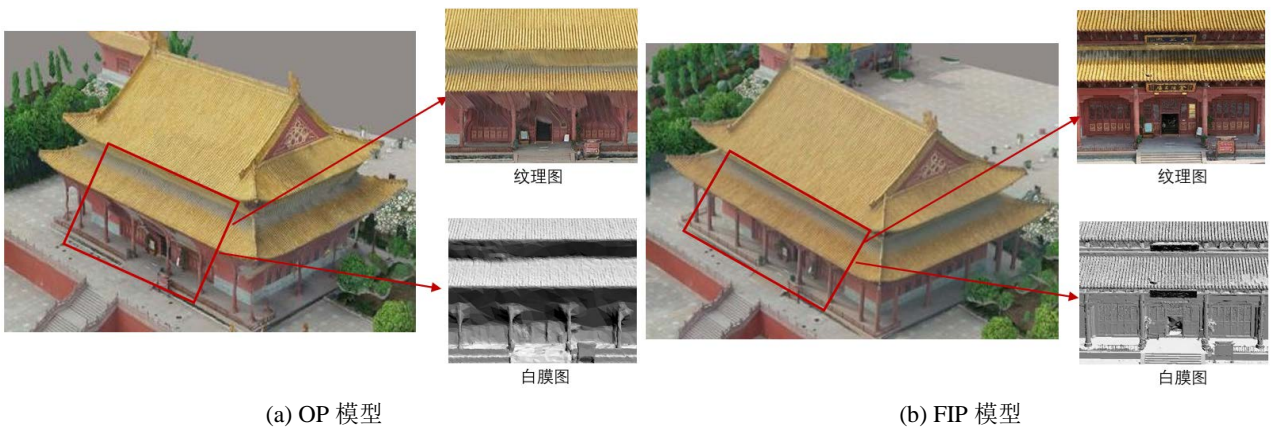


图 7. 模型整体图对比

表 2. 模型细节图对比

部位	不同方法的纹理细节图		不同方法的白膜效果图	
	OP 纹理效果	FIP 模型纹理效果	OP 模型白膜效果	FIP 模型白膜效果
屋檐				
说明栏				
牌匾				
门窗				

从主、客两方面对本文方法进行评价,在位置精度、点云偏差、白膜结构和纹理细节几个方面都表现优越性。

5. 结论

本文以全信息影像为出发点,探讨了复杂建筑实景三维重建的技术路径。从全信息影像采集、分步整体联合空三两个方面研究,分析验证了 FIP 的可行性和有效性,得出以下结论:1) 利用空中多视倾斜影像 + 地面多层、多角度的全信息影像采集方法摄取建筑物全信息影像,解决了本文研究建筑类因自身遮挡导致侧面纹理信息缺失的问题,为复杂建筑精细三维重建提供了必要条件。2) 利用分步整体联合空三的平差解算方法进一步保证不同数据集的影像空三能够成功融合,保证了数据处理的稳定性。基于 FIP 构建的三维模型精度高、纹理细节好,能真实地记录复杂建筑真实的纹理、结构和损坏程度等特征,解决了复杂建筑模型数字化、真实再现等关键技术难题,为智慧水利复杂建筑物建模提供支持。

参考文献

- [1] WANG, Y.-M., YU, S.-Y., REN, S., et al. Close-range industrial photogrammetry and application: Review and outlook. Proceedings of the SPIE, 2020, 11568: 115680O.
- [2] HU, C., PENG, D., LV, F., et al. Application of Terrestrial Laser Scanner in engineering survey. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 783(1): 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/783/1/012084>
- [3] 石明旺, 张均, 刘学思. 手持三维激光扫描仪在规划竣工测量中的应用[J]. 测绘通报, 2022(S2): 122-125.
- [4] HUANG, C., ZHANG, H. and ZHAO, J. High-efficiency determination of coastline by combination of tidal level and coastal zone DEM from UAV tilt photogrammetry. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2189. <https://doi.org/10.3390/rs12142189>
- [5] CHEN, X., PAN, S. and CHEN, G. 3D model construction and accuracy analysis based on UAV tilt photogrammetry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1087(1): 012047. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1087/1/012047>
- [6] YAO, J., NA, J., MA, R., et al. The key technology of oblique photogrammetry of assembled buildings by UAV. Advances in Multimedia, 2022, 2022: 6267403. <https://doi.org/10.1155/2022/6267403>
- [7] 杨璐宏, 吴玮, 王芮. 基于空地影像联合的精细化三维重建研究[J]. 测绘通报, 2021(S1): 144-148.
- [8] 孙保燕, 周鑫, 覃禹程, 等. 空地多数据互辅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.