

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

席思远^{1,2}, 苗培培², 王乐², 郝利峰²

(1. 河北工程大学矿业与测绘工程学院, 河北邯郸 056038; 2. 北京飞马航遥科技有限公司, 北京 100192)

摘要: 针对异形古建筑三维重建与数字存档工作中, 单一平台影像数据三维重建技术手段存在的模型质量差、模型完整度低和模型缺失等问题, 本文以北京孔庙和国子监为研究对象, 提出了空地多源影像融合研究方案。首先制定数据采集方案, 获取多源影像, 并基于异源影像数据分别进行三维重建, 总结各自的优点和不足。在此基础上, 探索倾斜影像与近景影像联合空三的方法, 克服倾斜影像与近景影像在数据精度、尺度和基准等方面的差异, 对多源影像进行有效融合, 解决了倾斜影像三维模型结构失真、拉花、漏洞等问题, 提高模型精细程度, 实现古建筑三维信息有效挖掘、数字化和可视化, 在实践中取得了良好的效果。

关键词: 异形古建筑; 空地多源影像; 融合; 精细化三维重建

Research on refined Special-shaped Ancient Architecture 3D Reconstruction of Space-Ground Multi-Source Images Integration

XI Siyuan¹, MIAO Peipei², WANG Le², HAO Lifeng²

(1.School of Mining and Geomatics Engineering,Hebei University of Engineering,Handan 056038,China; 2.Beijing Feima Hangyao Technology Co.,Ltd.,Beijing 100192, China)

Abstract: In the 3D reconstruction and digital archiving of Special-shaped ancient buildings,the 3D reconstruction technology of single platform image data has the problems of poor model quality, low model integrity and model missing.This paper takes Confucius Temple and Guozijian in Beijing as the objects,propose the integration scheme based on space-ground multi-source images.Firstly,a data acquisition scheme is developed to obtain multi-source images,then conducts 3D reconstruction based on different single images sources respectively, summarizes their advantages and disadvantages. On this basis, explores the method of aerial triangulation calculation combined with oblique images and close-range images,overcomes the differences in data accuracy, scale and datum between them,realizes the effective integration of multi-source images, solves the problem of structure distortion, drawing and loophole in oblique images 3D model, improve the precision of the model,realize the effective mining, digitization and visualization of 3D information of ancient buildings,obtain a good result in practice.

Key words: Special-shaped ancient architecture; Space-Ground multi source data; Integration; 3D Reconstruction

古建筑承载着悠久文化积淀, 一旦损毁, 古建筑本身及其承载的历史文化信息将不复存在^[1]。因此, 国家一直在积极地引导文化遗产保护, 文化

遗产的数字化保护手段成为人们关注的焦点之一, 发展古建筑数字化保护已成为共识。古建筑数字化的传统测绘工作模式是使用全站仪、测距仪、皮尺

等设备,采集建筑关键位置的三维坐标及距离等几何信息,结合相机拍摄的照片,通过3ds MAX等三维建模软件对古建筑进行数字化还原。该方法处理过程复杂,对人力物力的要求高,效率极低,且模型精度很难满足当前古建筑数字存档精度要求。古建筑数字化新型测绘技术是通过空地多维度平台搭载传感器主动获取地形、地物的精确位置、几何特征、纹理特征的一种方法^[3],可获取多平台影像数据和点云数据成果,具备一采多用和融合利用的特点,其可突破传统测绘在古建筑保护测绘中的局限性,具有无损、快捷灵活、精度高等优势,满足数据成果的全域、全息和全空间要求,为古建筑保护与数字化展示等领域提供新的技术手段。

无人机搭载高分辨率传感器进行倾斜摄影并快速生成实景三维模型的技术,已经成为获取大面积建筑物三维地理信息数据的重要手段。LIAO^[4]等、ZHU^[5]等相关研究表明,倾斜摄影模型可以从多个角度观察地物,更加真实地反应地物实际情况。ZHOU^[6]等认为倾斜摄影建模具有全要素、全纹理的全息表达能力,能真实反应地物、地形的外观、位置、高度等信息,但个别建筑物或遮挡区域易存在扭曲、变形和拉花的现象。

近景摄影测量相对于无人机倾斜摄影测量是一种更便捷的建筑物近地面影像数据获取方式,建筑模型具有更加真实的细节和清晰的纹理。国内外学者们针对近景摄影测量三维模型重建做了大量的研究,LI^[13]等在建筑物轮廓提取方面进行了优化,提高了街景立面三维建模的精度,但仍存在一定局限性,如无法采集较高建筑物纹理信息和建筑屋顶影像信息等。

上述单一影像数据源建模技术手段运用在古

建筑三维建模方面都存在着或多或少的缺陷,无法满足异形古建筑三维重建要求。因此,本文以北京孔庙和国子监为研究对象,针对多平台测绘技术手段采集的多源影像数据融合建模问题展开研究,充分挖掘各数据特点,总结多源数据采集方法,探索结合倾斜摄影测量和近景摄影测量手段,构建异形古建筑精细化三维重建的技术方案。

1 试验准备工作

1.1 试点概况

北京孔庙和国子监博物馆始建于元代,位于北京东城区安定门内国子监街,合于“左庙右学”的古制,分别是皇帝祭祀孔子的场所和中央最高学府。两组建筑群均采用沿中线而建、左右对称的中国传统建筑方式,形成了一套完整、宏伟、壮丽的古代建筑群。

北京孔庙又名“先师庙”,为中国古代元、明、清三朝祭祀孔子的场所。庙坐北朝南,为三进院落,古建筑面积约有7400平方米,中轴线上的建筑从南向北依次为先师门、大成门、大成殿、崇圣门及崇圣祠。

国子监与孔庙相邻,是元、明、清三代国家设立的最高学府(太学)和管理教育的行政机构。整体建筑坐北朝南,为三进院落,占地面积超过27000平方米。中轴线上依次排列着集贤门、太学门、琉璃牌坊、辟雍殿、彝伦堂、敬一亭。

北京孔庙和国子监内建筑高耸突出,结构复杂,以规模宏大、气象雄伟为主要特点;院内古树名木参天,枝繁叶茂,植被覆盖率极高。



图1 孔庙与国子监概况

1.2 平台设备选择

1.2.1 无人机平台

在低空无人机倾斜摄影中，多旋翼无人机是目前最主流的、首选的飞行平台。其具备起降方便、速度可控、控制灵活等优点，适合城市复杂环境下进行低空高分辨率数据采集。因此，本试验选用国内市场主流四旋翼无人机代表——D2000智能航测系统，表1是其主要参数。

表1 D2000无人机平台参数

型号	D2000
类型数量	四旋翼
续航时间	74min (单架次海平面悬停)
抗风等级	6

1.2.2 倾斜摄影系统

目前，在国内倾斜五目相机市场上，占比最大的部分是基于APS-C改装而成的倾斜摄影相机，这种相机成熟可靠、改装难度小、解析度高能、成像清晰稳定。普遍搭配常规25mm和35mm（下视和斜视）短焦距镜头，可适用于大多数三维场景数据获取。但城市高楼密集，若要获取高分辨率影像，该焦距组合须降低航高，这将导致作业效率有所降低，且飞行安全无法得到保障。鉴于此次试验区位于北京市中心，为保障飞行安全并满足高分辨率数据（1cm分辨率）获取要求，推荐搭配长镜头的全画幅倾斜摄影相机。本文选用D-OP4000全画幅相机获取倾斜影像数据，其主要参数见表2。

表2 D-OP4000载荷参数

型号	D-OP4000
相机数量	5
传感器尺寸	35.7mm×23.8mm
有效像素轴距	3亿像素 (6100万像素×5)
镜头参数	下视40mm, 斜视56mm
倾斜角度	45°

1.2.3 近景摄影测量系统

无人机倾斜摄影具有一定的局限性，在树木、房檐遮挡区域存在摄影盲区，导致三维模型拉花、缺失、破损，因而采用近景摄影补拍，协同倾斜影像建模，提高遮挡区域的建模效果。本文采用D1000智能航测系统和影像RTK采集近景影像数据，两种技术手段获取的补拍影像均带有位置/姿态信息，有助于空地多源影像的融合空三。

1.3 试验思路

面向异形古建筑的空地多源数据融合精细化三维重建试验总体思路如下：

(1) 分别对试验区进行倾斜和近景数据的获取，并基于融合输出精细模型的目的提出优化采集方案，并基于单一数据源进行三维模型重建，分析其建模方式的优缺点。

(2) 探索倾斜影像数据与近景影像数据融合的有效方法，构建多源影像融合精细三维模型。

(3) 对比分析倾斜影像三维模型和多源影像精细三维模型效果和精度，分析原因。

(4) 总结空地多源影像数据采集方法和融合手段，为实际作业提供指导。

1.4 试验结果评价方法

本文主要从模型精度和模型效果两个方面进行评价。由于本试验并未布设像控点，不进行绝对精度评定，仅进行模型几何精度的评价。

1.4.1 模型几何精度评定

几何精度是指三维模型几何形状与实际地物几何形状的相符程度，包括距离精度和高度精度。本文利用全站仪对古建筑及其周围地物进行实地测量，作为检核数据。

1.4.2 模型效果评定

模型效果暂无明确的国家标准，根据行业项目常见要求，主要从模型平整度、完整性、纹理三个方面评价模型效果。

2 数据采集与三维重建

2.1 倾斜影像采集与三维重建

常规倾斜影像航线规划一般采用效率最优化的方式，即航线和测区区域多边形的最长边平行，尽量减少总航线条数，避免航线转弯导致的冗余飞行。针对异形古建筑的建模难度，本文提出一种优化的航线规划方式，即航线与测区主要建筑的走向呈45度夹角的航线飞行方式（简称倾斜航线），以最大程度获取古建筑侧面纹理信息，减少模型拉花和空洞现象。如图2所示，测区形状为实线长方形，常规航线采用南北向180°飞行（黑色实线），而本试验采用倾斜航线北偏东45°飞行（黑色虚线）。航线相对航高100m，斜视影像对应的地面

分辨率为1cm，航向重叠为80%，旁向重叠度为80%，航速7m/s。

以“辟雍殿”为例，分别基于常规航线和倾斜航线获取的影像进行三维模型重建。图3(a)为常规航线三维模型，图3(b)为倾斜航线三维模型。经对比可看出，两个模型顶部结构完整、纹理清晰，但倾斜航线遮挡区域有所减少，其三维模型侧面漏洞数量和面积均少于常规航线三维模型，模型效果也相对更好。因此针对异形古建筑，可采用倾斜航线获取更多遮挡区和建筑侧面纹理，以提高三维模型效果。

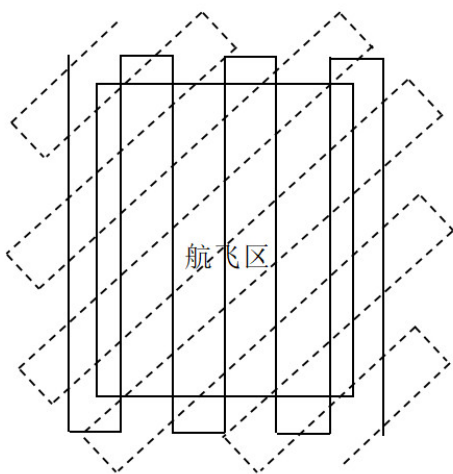


图2 倾斜摄影航线

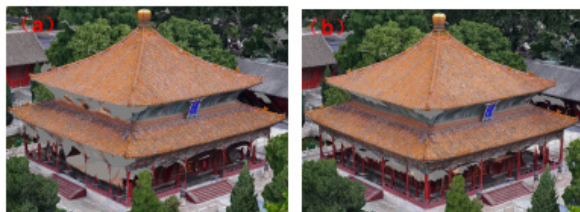


图3 “辟雍殿”常规航线和倾斜航线三维模型

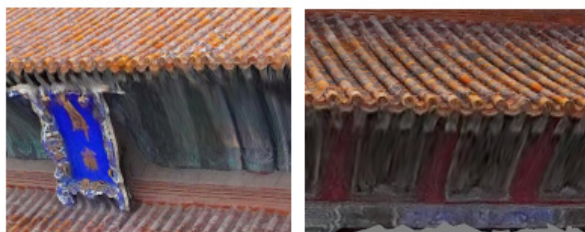


图4 “辟雍殿”遮挡区域模型效果

测区另一处建筑“琉璃牌坊”也存在此类问题。如图5所示，顶部琉璃瓦完整，但树下和门洞内因遮挡导致结构粘连和漏洞。



图5 “琉璃牌坊”倾斜三维模型效果

2.2 近景影像采集与三维重建

针对倾斜摄影手段在古建筑三维建模存在的问题，可采用近景摄影技术进行融合补充。相对空旷区域，可采用无人机近景摄影进行立面飞行，快速获取建筑物立面信息，而对于无法飞行的遮挡区域，则可采用影像RTK方式手动灵活拍摄，两者可相互补充，保障全方位影像数据的获取。

2.2.1 无人机近景影像采集与三维重建

为保障影像融合的效果，无人机近景摄影应尽可能保持与倾斜影像相近的光照条件下进行补拍影像的获取。如图6所示，利用D1000围绕建筑物四周建获取立面影像，航向重叠度80%，旁向重叠度60%，分辨率9mm，航线最大高度与古建筑顶部齐平，既保证立面航线数据与倾斜航线数据有足够的重叠区域，方便多源影像融合空三，又避免拍摄远端无效数据引入噪声。

四个方向立面影像联合空三并生产三维模型，效果见图7。古建筑顶部和侧面模型比较完整，但是建筑底部纹理不均，存在破洞。

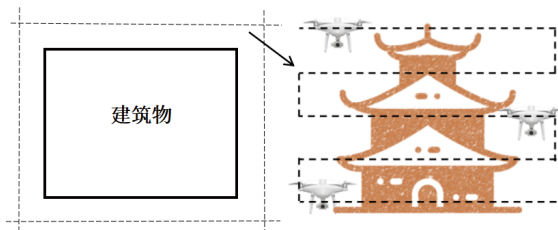


图6 近景摄影立面航线

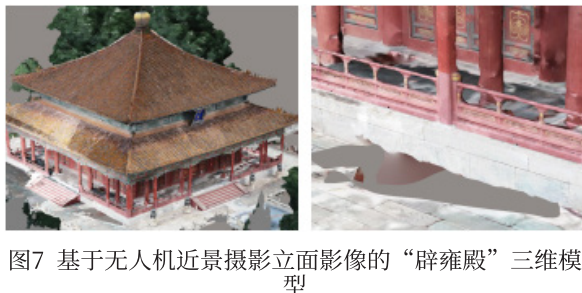


图7 基于无人机近景摄影立面影像的“辟雍殿”三维模型

2.2.2 地面近景影像采集与三维重建

为保证补拍影像与倾斜影像的有效融合，影

像RTK拍摄应保证影像分辨率与倾斜影像分辨率相近, 根据公式(1)计算拍照时影像RTK与古建筑的距离, f 和 a 分别是是影像RTK的焦距和像元大小, GSD 为地面分辨率, 确定拍摄距离为10.3m; 按同一个方向等间距逆时针或顺时针拍照, 相邻两个拍照点正对目标物拍摄时保证至少有60%重叠, 每个拍照点至少拍摄3张照片, 每张照片夹角小于 15° , 图8中圆点表示地面拍照点位, 在建筑物转角位置要加密拍照点; 另应选择与倾斜影像相似光照条件下进行地面补拍, 保证融合时影像色彩一致。

$$S = \frac{f \cdot GSD}{a} \quad (1)$$

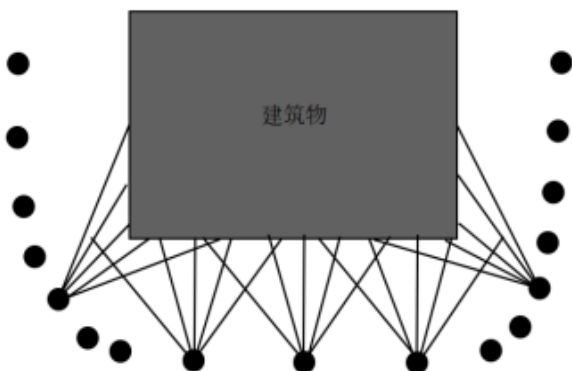


图8 影像RTK拍摄示意图

基于地面近景影像生产三维模型, 古建筑中下层模型效果尚可, 但顶部模型严重缺失, 甚至无法重建。



图9 基于地面近景影像的“琉璃牌坊”三维模型

3 空地多源影像融合策略

多源影像存在数据精度、尺度和基准差异, 简单粗暴的融合一起处理可能会达不到预期效果, 需采取一定的处理策略。本文先利用倾斜影像和近景摄影数据分别进行空三计算, 然后将近景影像与倾斜影像进行联合空三平差。若空三结果丢片情况严重, 则遵循以倾斜摄影源数据作为基准, 其他数

据源与之对齐的原则, 采取人工干预连接点的方法, 实现多源影像数据有效融合并进行模型三维重建, 融合策略见图10。

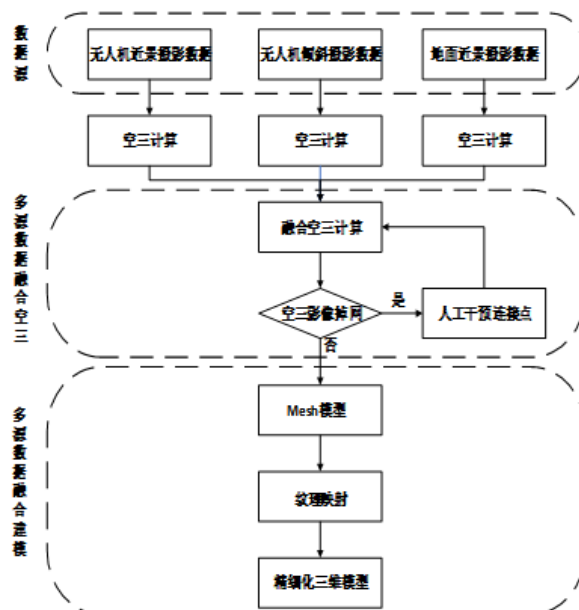


图10 多源异构数据融合策略

3.1 单源影像空三计算

单源影像空三计算是指, 利用摄影测量软件分别对倾斜影像、近景立面影像和地面补拍影像单独进行空中三角测量, 恢复影像位置和姿态。单源影像空三计算结果均正常, 无大面积影像丢失、掉网情况, 图11(a)、11(b)、11(c)分别是倾斜影像、近景立面影像和地面补拍影像参与空三计算情况, 绿色代表参与了空三计算。

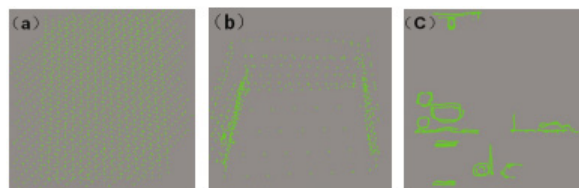


图11 单源影像空三

3.2 多源影像融合平差

3.2.1 公共点配准

合并上述空三结果, 进行自动融合空三。由于数据基准差异、影像重叠度不足和拍摄视角不一致等原因, 空三计算大量丢片(黑色点为空三计算近景影像掉网, 未参与空三融合计算), 因此需要人工干预采集公共点进行配准。

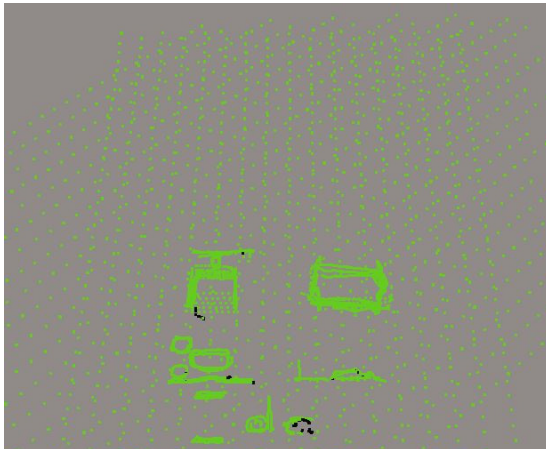


图12 多源影像自动融合空三

从倾斜模型选取特征点作为近景影像的参考基准点并人工刺点标注，将近景影像基准转换至倾斜影像基准下。特征点数量一般在5-8个左右，一个特征点约标注5-10张。由于近景影像已经具有较准确的外方位元素，当一个特征点在近景影像中标记2张后，其他影像可自动预测特征点位置。图13中，黑色圆点为特征点对应近景影像的像点（标记点）。

3.2.2 多源影像融合空三与模型重建

将人工干预后的近景影像空三结果与倾斜影像空三结果合并。尽管通过公共点的使用，两数据源的基准已经统一，但仍然可能存在局部配准不到

位的情况，因此合并后再次进行融合平差，提高多源影像公共连接点数量，达到最佳配准效果并进行精细三维模型重建。

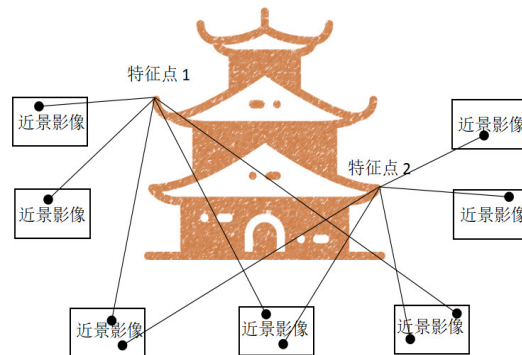


图13 近景影像标注特征点

4 试验结果及其分析

4.1 三维模型效果对比分析

图14是倾斜影像与无人机近景影像融合的“辟雍殿”精细模型效果。与倾斜影像单独建模（图3、图4）对比，精细模型主体结构完整，平整度好，纹理清晰，基本不存在模型空洞，由于近景影像补充了摄影盲区影像，檐廊下部结构和纹理贴图正常；与无人机近景立面影像单独建模（图7）对比，精细模型底部纹理清晰，无漏洞。



图14 “辟雍殿”倾斜影像与无人机近景影像融合模型效果

图15是倾斜影像与地面近景影像融合的“琉璃牌坊”精细模型效果。与倾斜影像单独建模（图5）对比，精细模型琉璃瓦下部和门洞无拉花、漏

洞，纹理贴图正确。与地面近景影像单独建模（图9）对比，精细模型顶部琉璃瓦重建完整，纹路清晰。

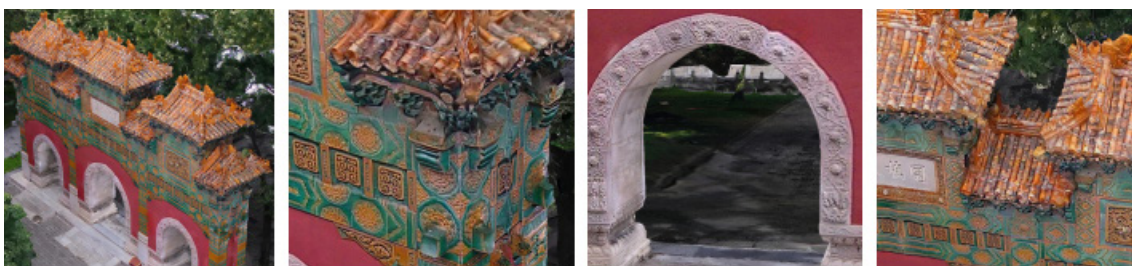


图15 “琉璃牌坊”倾斜影像模型和地面近景影像融合模型效

4.2 三维模型精度对比分析

利用全站仪获得的20个几何距离值作为真值,从三维模型上获取对应同名特征点之间的距离作为测量值,计算真值与测量值之间的误差,作为三维模型相对距离精度。实测几何距离涉及房檐、树下等区域,这些区域的倾斜模型结构缺失、拉花较严重,影响模型距离测量准确度,而精细三维模型很少存在上述问题。经统计,20个测量值的误差如图16,计算得出精细三维模型相对距离中误差为2.58cm,而倾斜模型相对距离中误差4.36cm,且精细三维模型几何距离差值离散程度较低,波动程度和整体方差较小,因此融合精细建模精度更高,更稳定可靠。

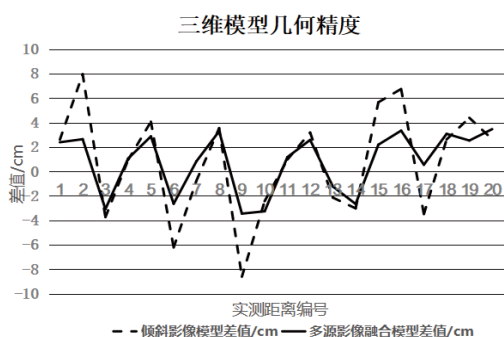


图16 三维模型相对精度对比

4.3 试验结论与分析

(1) 倾斜影像能对建筑物进行多方位的拍摄,同时采集建筑物顶部及侧面数据信息,对建筑周围的整体场景把握较全面,但由于其技术本身的局限性,该技术无法获取摄影盲区细节信息,构建的三维模型易出现模型底部粘连、失真等。

(2) 近景摄影测量手段从超低空、地面拍摄角度获取建筑物立面和底部影像,可作为倾斜影像遮挡区域纹理信息的有力补充。

(3) 本文提出的影像采集规则和多源影像融合策略,可实现近景影像与倾斜影像的高度融合。多源影像数据融合精细化三维重建模型结构平整度更好,几乎不存在漏洞、拉花和粘连现象,古建筑檐下和底部纹理更清晰,相对精度更高、更稳定。

5 总结

无人机倾斜摄影、近景摄影测量等新型测绘技术因其无损、快捷、高精度等特点,已成为实景三维重建、数字孪生、古文物保护等领域的主要手

段。本文针对异形古建筑的三维精细建模,首先分别介绍了单一平台(倾斜、近景)数据源进行三维重建技术的方案,并根据异形古建筑房檐长,结构复杂等特点提出了优化方案。其中倾斜技术方案进行了航线设计的优化,即按照与建筑走向呈45度夹角航线飞行可更有效的获取建筑侧面信息,使得古建筑顶部和侧面模型比较完整。而作为倾斜补充方案的近景摄影技术,则提出遵循高重叠度、相近分辨率和多角度的原则,实现多个视角的数据获取,对于建筑物周边具备飞行条件的区域采用四边立面飞行,使得高耸建筑的每层都能被清晰拍摄;而对于不具备飞行条件的区域,如牌坊门洞下,则提出地面影像RTK手段,灵活穿越进行数据获取。

然后总结了单一影像源构建三维模型的特点以及存在的问题,在此基础上提出了空地多源影像融合策略。针对多源影像融合平差不兼容的问题提出独立空三、公共点配准及融合后再平差的技术方案,最终实现了多源影像系统的高精度融合,输出了更准确、更精细的三维模型。其结构更完整,细节展现更丰富,极大改善了常规倾斜摄影方法构建模型存在的漏洞、拉花等缺点,为古建筑数字化和测绘存档工提供可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈款,张小可,涂峻伦等.融合无人机和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(26):30-32.
- [2] 顾建祥,董震,郭王.面上上海城市数字化转型的新型测绘[J].测绘通报,2021(7):131-134.
- [3] 魏子新.关于上海新型基础测绘体系建设试点的实践和思考[J].中国测绘,2020(6):48-51.
- [4] 廖玉佳,胡勇,叶涛.基于低空无人机倾斜摄影的三维模型构建[J].北京测绘,2018,32(5):504-507.
- [5] 诸杰,盛一楠.无人机倾斜摄影测量技术在城市三维建模及三维数据更新中的应用[J].测绘通报,2017(增刊1):130-135.
- [6] 周悌慧,陈海鹏,陈宇鹏.倾斜摄影实景三维模型的质量分析检查[J].测绘通报,2021(S1):33-36.
- [7] 郑渊茂,何原荣,余建伟.激光点云的多功能风洞施工量测与分析[J].测绘科学,2017,42(11):171-176.
- [8] 孔令慧,陆德中,叶飞.三维激光扫描技术在历史建筑立面测绘中的应用[J].测绘通报,2022(8):165-168.
- [9] 经皓然,徐敬海.异形建筑的无人机点云与地面三维激光扫描点云配准[J].测绘通报,2022(6):32-39.

- [10] 谭仁春,李鹏鹏,文琳.无人机倾斜摄影的城市三维建模方法优化[J].测绘通报,2016(S2):193-196.
- [11] 徐胜华,朱庆.摄影测量三维重建中多源信息融合方法探讨[J].地理与地理信息科学,2005,21(6):33-36.
- [12] 李畅,李熙,李彩林,等.广义点摄影测量在建筑物立面轮廓重构中的应用[J].武汉大学学报·信息科学版,2011,36(12):1451-1455.
- [13] 李畅,张剑清,邹松柏,等.自动识别街道立面凹凸边界[J].计算机工程与应用,2009,45(15):6-8.
- [14] 张小红,马立华,陈丰田,等.基于多源数据融合的高精细实景三维建模技术[J].测绘工程,2019,28(4):68-71.
- [15] 张文春,范洪祥,刘永吉,等.三维激光点云联合无人机影像的古建筑重建[J].测绘通报,2019,11:130-133.