

基于无人机倾斜摄影的三维全景模型构建对比分析

王金虎^{1,2,3,4*}, 许俊辉^{1,2}, 史嘉奇^{1,2}, 王宇豪^{1,2}

¹南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京

²中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京

³中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京

⁴南京信大安全应急管理研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年8月12日; 录用日期: 2022年10月28日; 发布日期: 2022年11月7日

摘要

本文通过三维全景模型构建的对比来验证不同机型以及软件的优缺点, 以南京信息工程大学和东南大学成贤学院作为研究区域, 基于无人机倾斜摄影技术, 选取PHANTOM4RTK和MAVIC2Pro进行飞行作业。对几款常见的建模软件进行对比分析后选取context capture和Dji Terra处理遥感影像进行三维建模。进行实景三维建模的对比分析后达到了预期的效果, 得出不同机型、软件、飞行高度各自的优缺点。为今后进行智慧校园实景三维建模提供了参考。

关键词

无人机, 三维, 倾斜摄影

Comparative Analysis of Three-Dimensional Panoramic Model Construction Based on UAV Oblique Photography

Jinhu Wang^{1,2,3,4*}, Junhui Xu^{1,2}, Jiaqi Shi^{1,2}, Yuhao Wang^{1,2}

¹Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu

²Key Open Laboratory of Aerosol and Cloud Precipitation, China Meteorological Administration, Nanjing Jiangsu

³Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Chinese Academy of Sciences, Beijing

⁴Nanjing Xinda Institute of Safety and Emergency Management, Nanjing Jiangsu

*通讯作者。

文章引用: 王金虎, 许俊辉, 史嘉奇, 王宇豪. 基于无人机倾斜摄影的三维全景模型构建对比分析[J]. 建模与仿真, 2022, 11(6): 1434-1444. DOI: 10.12677/mos.2022.116135

Received: Aug. 12th, 2022; accepted: Oct. 28th, 2022; published: Nov. 7th, 2022

Abstract

In this paper, the advantages and disadvantages of different models and software are verified through the comparison of 3D panoramic model construction, with Nanjing University of Information Science and Technology and Chengxian College of Southeast University as the research area, based on UAV tilt photography technology, PINTOM4RTK and MAVIC2Pro are selected for flight operations. After comparative analysis of several common modeling software, content capture and Dji Terra processed remote sensing images were selected for 3D modeling. After the comparative analysis of the real-life 3D modeling, the expected effect was achieved, and the advantages and disadvantages of different models, software and flight altitude were obtained. It provides a reference for the future 3D modeling of smart campus real scenes.

Keywords

Unmanned Air Vehicle, Three-Dimensional, Oblique Photography

Copyright © 2022 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

倾斜摄影技术方面的基础理论研究在我国直至 2010 年才正式成为测绘地理信息与测绘遥感两个领域新的热点[1]。全自动精细化的实景三维模型技术构建正成为当今遥感技术和三维计算机视觉领域所研究的热点之一[2]。利用无人机和倾斜的摄影及测量等技术实时获取实时影像，可以同时提高三维模型设计的图像真实度、精度以及三维建模计算效率，具有设计作业安全高效、成本低省等方面众多明显优势[3]。倾斜摄影可以有效提升模型的生产效率，缩短作业完成时间，把无人机原本承担大量重复性的外业工作任务转变为内业工作，降低操作者外业劳动强度[4]。目前国内学者对倾斜摄影的技术在各行业的应用进行了广泛的研究，但是对不同机型和软件对于建模效果以及成本控制的研究还较少。本文通过三维全景模型构建的对比来验证不同机型以及软件的优缺点，可以在以后的任务中选择适合的机型、软件、飞行高度来减少任务量，节省成本，具有相当的现实意义。对南京信息工程大学采用 PHANTOM4RTK 和 MAVIC2Pro 分别进行数据采集，得到数据组 A 和数据组 B。对 A 组影像资料用 DJI Terra 和 context capture 分别进行处理，产出模型 production1 和 production2，对产出的模型进行对比，以此探讨两种软件各有的优势。通过对比两种无人机作业过程中遇到的具体情况，以此探讨两款无人机各自的优势。对数据组 B 用 context capture 进行处理，产出模型 production3，通过对比最终产出模型 production2 和 production3 的效果，分析不同镜头所采集的影像资料对于最终产出模型效果的影像；对东南大学成贤学院用 MAVIC2Pro 进行数据采集，使用不同的航高，得到数据组 C，对数据组 C 用 context capture 进行处理，产出模型 production4，通过对比最终产出模型 production3 和 production4 的效果，以此分析不同航高的作业对于模型质量的影像。最终的产出模型会为实景三维模型的构建过程提供一个参考。

2. 无人机倾斜摄影技术

倾斜摄影技术作为一项先进的航空测量技术，最够最大程度地增加拍摄区域面积，通过数字影像、摄影测量技术与无人机技术相结合的方式，实现航空测量。无人机设备挂载相机，采集地面的垂直影像和倾斜的影像，再由软件进行处理，将拍摄的物体与空间上的点进行组合，借助地面像控点、空间 GPS 信息，获取具有倾斜角度的相片数据资料。

2.1. 布设像控点

像控点是无人机倾斜成像摄影以及业内影像信息解析采集和三维建模计算的理论基础，用于自动纠正无人机上因定位传感器受限或因电磁传感器干扰等而产生的目标位置偏移、坐标精度要求过低以及无人机因使用气压计可能产生的高层差值变化过大等问题[5]。像控点的布设及位置要求应相对均匀有效的分布于在航摄区域航向和与旁向航线方向重叠的区域范围内，像控点选点要求一般应是选择点在观测场地比较平坦、相对观测位置基本固定的和易于快速而准确地进行摄影测量、记录目标影像是比较清晰且是最易于判刺的两个地方，像控点一般是有标靶式像控点和油漆式像控点，油漆式的目标像控点主要分为喷漆式目标和涂漆式[8]。

2.2. 航摄参数设计

航摄的参数和设计方法的主要技术指标包括地面分辨率、航行高度范围、拍照模式、云台角度和像素片重叠度系数等。

2.2.1. 地面分辨率

地面分辨率(GSD)是指每毫米所能辨别的黑白相隔的线对数(线对/毫米)，通常以像元的大小来表示，一般像元越小，地面分辨率越高，信息量越大[6]。GSD 应注意首先必须根据航所摄成图的全国总幅比例尺、地形特点分布等实际自然条件而进行分析确定，通常以表 1 作为参考。

Table 1. Ground resolution takes the value reference

表 1. 地面分辨率取值参考

成图比例尺	地面分辨率(cm)
1:500	≤5
1:1000	8~10
1:2000	15~20

2.2.2. 航行高度

航行高度由相机参数和地面分辨率决定，计算公式如下所示：

$$H = \frac{f \times GSD}{\alpha}$$

其中 H 是航行高度，单位为 m； f 是镜头焦距，单位为 mm [7]； GSD 是地面分辨率，单位为 m； α 是像元尺寸，单位为 mm [7]。

如果想要提高模型的精度，可以适当降低无人机的航行高度，但如果航行高度过低会导致像片数量过多，增加外业像控和内业建模的工作量，并且航高过低会增大安全风险[7]。《低空数字航空摄影规范》规定：摄影分区内地形高差不应大于 1/6 航高，因此综合考虑建模精度、工作量、规范和安全等因素，在满足各项技术精度指标的前提下确定相对适宜的航高[8]。

2.2.3. 重叠度

航向重叠度是指一条航线上两张相邻像片的重复率，一般取 60%~80%；旁向重叠度是指两条相邻航线上像片之间的重复率，一般取 30%~75% [8]。重叠度计算公式如下所示：

$$p_x = p'_x + (1 - p'_x) \Delta h / H, q_y = q'_y + (1 - q'_y) \Delta h / H,$$

式中 p_x, q_y 是像片上的航向重叠度和旁向重叠度(%) [8]； p'_x, q'_y 是航摄像片的航向和旁向标准重叠度(%) [8]； Δh 是相对于摄影基准面的高差，单位为 m； H 是摄影航高，单位为 m [8]。由此可知，重叠度由相较于基准面的高差 Δh 决定， Δh 为 0 时，重叠度与标准值相同，因此在设计像片重叠度时要考虑高差因素，一般适当增加重叠度以满足精度要求 [8]。

2.3. 航线规划

使用大疆的 DJI Pilot 软件进行航线规划。设置的飞行高度要高于拍摄区域中最高建筑物 25% 以避免发生撞击。通过高级设置可设置采集相片的重叠率。为了提高模型质量采用的重叠率为航向重叠率 80%、旁向重叠率为 70%。确定重叠度、航高后计算航线距离，航线距离即为相邻两航带间隔。在航线规划完毕后，需要对场地进行勘察，选择行人较少，空旷的场地作为起降场地。

3. 实景三维建模技术

在无人机对研究区域进行数据采集后，可对采集的影像数据进行预处理。首先，检查照片质量，结合影像的 POS 数据、布设的像控点等信息进行空中三角测量 [9]，然后通过图像几何畸变校正、图像增强、影像拼接等处理，生产三维模型。处理遥感影像的三维建模过程如图 1 所示。

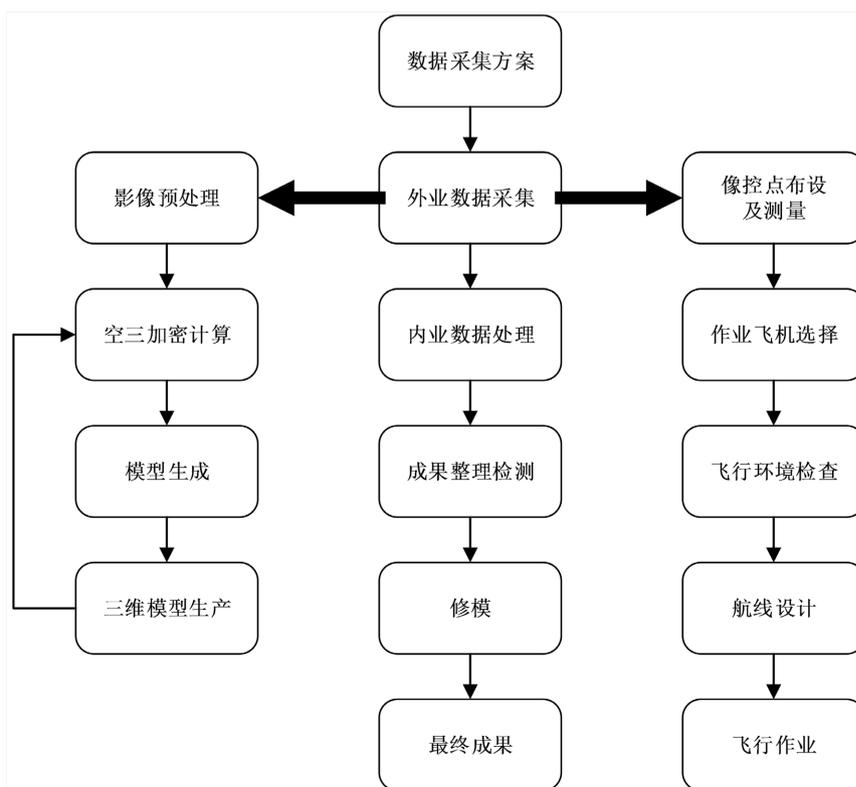


Figure 1. 3D modeling process for remote sensing imagery

图 1. 遥感影像三维建模流程

目前, Context Capture、PhotoScan、DJI Terra 以及 Pix4Dmapper 为业界主流的倾斜摄影建模平台, 通过建模速度、模型精度、工作量等方面对四款软件进行对比, 如表 2 所示, 综合各项参数后选择 Context Capture 和 DJI Terra 作为校园实景三维模型建模平台。

Table 2. Comprehensive comparison of modeling software

表 2. 建模软件综合对比

软件名称	Context Capture	Photoscan	Pix4Dmapper	DJI Terra
建模速度	快	中	中	最快
模型精细度	高	中	中	中
输出格式种类	多	少	少	少
工作量	中	多	多	少
难易度	高	低	中	低
软件价格	中	低	高	高

4. 校园实景三维建模应用

4.1. 作业前准备

- 1) 现场勘察: 查看并熟悉现场周围地形, 记录周围较高的建筑物及地形以及可能危及飞行的地形地貌。
- 2) 像控点布设:
 - ① 在条件允许的情况下可以在飞行前布设, 条件不允许的情况下可以在飞行结束后布设;
 - ② 1 个加密区需要布置 4 个像控点(建议 1 平方公里最少布置 5 个点);
 - ③ 采用周边布点法, 控制点应能均匀分布控制整个加密区;
 - ④ 像控点应该布置在地势变化不大的较平坦地面;
- 3) 航测区域划定
 - ① 在 DJI PLIOT 中现场设置航测区域;
 - ② 在划定区域时应尽量设置为形状规则的区域;
 - ③ 避开河道、远离高压线;
- 4) 飞行参数设置
 - ① 设置拍照模式, 在基础设置中选择拍照模式为等距间隔拍照;
 - ② 设置飞行高度, 在基础设置中设置飞行高度;
 - ③ 设置图像的重叠率, 在 DJI PLIOT 中的高级设置中设置图象的重叠率;
 - ④ 设置云台俯仰角度, 在 DJI PLIOT 中的高级设置中设置云台俯角为 -60° ;

4.2. 获取校园遥感影像

对南京信息工程大学使用大疆 PHANTOM4RTK 无人机和大疆 MAVIC2Pro 无人机作为航摄设备, PHANTOM4RTK 无人机飞行器参数见表 3, 大疆 MAVIC2Pro 无人机飞行器参数见表 4。使用 PHANTOM4RTK 无人机作业时, 影像采集区域面积 1394729 平方米, 划分为八个航摄区域。根据 PHANTOM4RTK 航摄设备精度要求, 将航向重叠度设置为 80%, 旁向重叠度设置为 70%。影像采集区域最高建筑 110 米。航线长度 229 公里。飞行高度设定为 120 米, 飞行总架次 52 次。使用 MAVIC2Pro 无人机作业时, 分为两个区域。航向重叠度设置为 80%, 旁向重叠度设置为 70%。航线长度 174 公里。

飞行高度设定为 120 米，飞行总架次 24 架次。

对东南大学成贤学院使用大疆 MAVIC2Pro 无人机作为航摄设备。使用 MAVIC2Pro 无人机作业时，无需划分区域。航向重叠度设置为 80%，旁向重叠度设置为 70%。航线长度 83 公里。飞行高度设定为 158 米，飞行架次 12 架次。

选择晴朗、无风、少云的天气进行航摄任务，在上午 10 点至下午 2 点这个时间段进行飞行作业。在无人机遥感控制器中划分测区，选择作业相机，输入上述参数，设定云台斜射角度为 60 度，拍照模式选择等距间隔拍照，起飞速度，航线速度均调至最高，无人机自动生成最优航摄路线、摄影间隔等，在到达拍摄地点后，先注意观察周围环境，选择空旷无人、视野开阔的起降地点。开始航摄任务，在无人机执行任务时监测无人机状态，确保航摄设备正常工作，在无人机进行飞行作业的过程中，注意光线的变化。如果拍摄时相片过曝，会导致后期处理失败的情况出现。南京信息工程大学作业任务结束后检查影像质量，PHANTOM4RTK 共获得 13,859 幅有效影像，MAVIC2Pro 共获 8233 幅有效影像。东南大学成贤学院作业任务结束后检查影像质量，MAVIC2Pro 共获 2842 幅有效影像。

Table 3. Aircraft parameters

表 3. 飞行器参数

	PHANTOM4RTK	MAVIC2Pro
机身重量	1391 g	907 g
飞机轴距	350 mm	354 mm
飞行速度	50 km/h	72 km/h
飞行高度		≤500 m
影像传感器		1 英寸 CMOS; 2000 万像素
ISO 范围		100~12,800 (手动)
飞行时间	30 min	31 min
工作环境温度	0°C~40°C	-10°C~40°C
镜头	FOV 84° 等效焦距: 35 mm	FOV: 77° 等效焦距: 28 mm
照片最大分辨率		5472 × 3648
照片格式		JPEG
抗风		5 级风

Table 4. Image information

表 4. 影像信息

影像组	影像数量	相机	传感器尺寸	焦距	35 mm 等效焦距
PHANTOM4RTK	13,859	DJI FC6310R	12.8333 mm	8.22031 mm	23.0596 mm
MAVIC2Pro	8233	Hasselblad	13.2 mm	10.4877 mm	28.6028 mm

4.3. 校园实景三维建模

4.3.1. 数据处理

无人机飞行作业完成后检查照片的质量并删除废片。确认照片质量合格、POS 信息无误、相机文件

及数据点完整后, 打包导入(导入路径中不可以有中文字符)。利用 DJI Terra 的重建功能, 添加飞行器拍摄的照片进行建图, 点击重建按钮, 进入重建界面, 点击添加照片, 选中飞行器所采集到的照片并添加, 照片添加完成之后, 软件左侧地图将显示每张照片对应的位置点。模型格式选择 OSGB 格式。在参数设置完后点击开始重建。

打开 ContextCapture Center Master 软件前先打开 ContextCapture Center Engine, 该软件可运算位置信息, 替空三软件建模提供运算好的位置信息。打开 ContextCapture CenterMaster, 新建一个工程, 输入工程路径及名称(不能中文字符)导入数据, 可看到位置信息、相机参数等, 导入完成后检查是否有丢失、破损等如图*所示。在 3D 视图中可看到无人机的飞行轨迹以及每张照片对应的位置, 每一个蓝色的点对应一个飞机拍摄时所在的位置, 如图 2 所示。

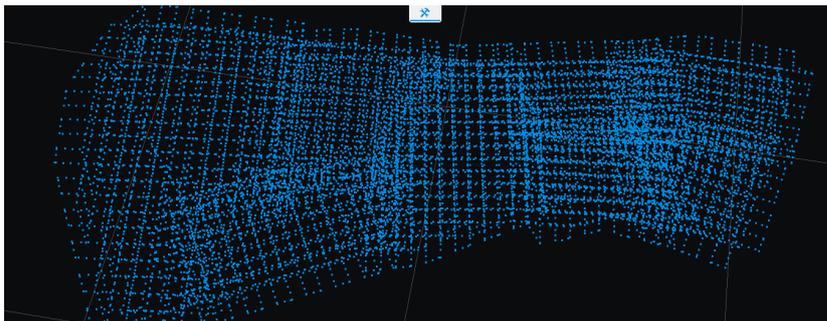


Figure 2. Flight trajectory
图 2. 飞行轨迹

4.3.2. 空三计算

航测相片测绘的地形图, 需要一定数量的控制点的坐标, 这些控制点如果采用常规的方式, 将耗费大量的人力、财力、时间。

空三计算能够用少量的控制点, 快速分析出定向和地面点问题, 影像自动识别和快速进行拼接, 快速检查影像质量和快速处理数据。将像素点在空间上进行定位, 可进一步加密、填充并建立数字化的信息库。

导出空中三角测量计算质量报告如表 5 所示。

Table 5. Project summary
表 5. 项目摘要

名称	参数
项目	YU2PRO-NXD
影像数	8233
地面覆盖范围	3.269 平方公里
平均地面分辨率	31.92188 mm/像素
比例	1:96
相机型号	Hasselblad L1D-20c
处理日期	2022/4/4 13:49
处理时间	6 小时 32 分钟

4.3.3. 三维模型重建

将图进行分割切块，导入的航空摄影区块将被规则二维网格分割为数个部分。对目标区域进行重建。首先选择 WGS-84 空间坐标系，然后根据电脑的配置进行切块，一般选择平面规则切块，如图 3 所示。导入 KML 文件可把多余的区域删除，也可以利用 ContextCapture Center 软件右侧，进行删减区域，缩短处理时间并提高处理效率。

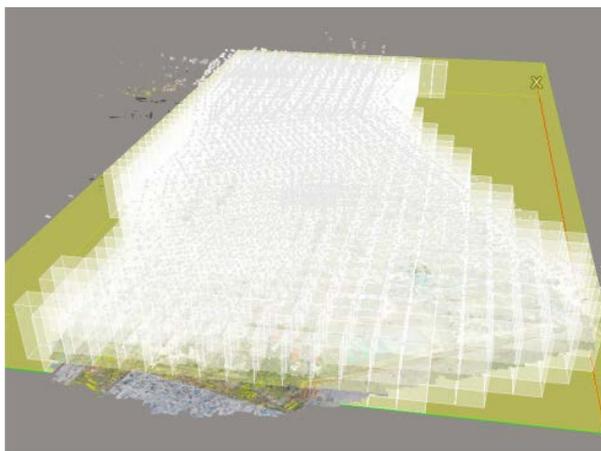


Figure 3. Model chunks

图 3. 模型切块

切块完成之后，点击概要，可进行模型命名。命名完成后选择需要处理的格式，选择 S3C 格式，方便预览。使用 WGS84 坐标系，选择输出路径提交重建，等待完成即可。重建项目完成后，要先确认重建项目质量有无问题，用 ContextCapture Viewer 软件打开重建项目存储位置的以 “.3mx” 为后缀的文件。

4.3.4. 成果对比

DJI Terra 重建的南京信息工程大学实景三维模型可通过 LocaSpaceViewer 向校内师生和社会人士展示，如图 4 所示。

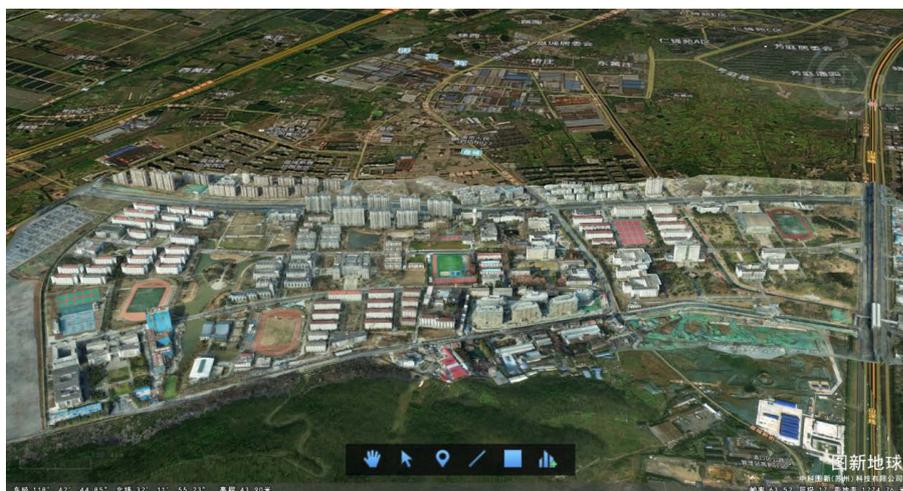


Figure 4. A model of Nanjing University of Information Science and Technology produced by DJI Terra

图 4. DJI Terra 产出的南京信息工程大学模型

Context Capture 重建的南京信息工程大学和东南大学成贤学院的实景三维模型通过 Context Capture Viewer 展示, 分别如图 5 和图 6 所示。



Figure 5. Model of Nanjing university of information science & technology
图 5. 南京信息工程大学模型



Figure 6. Model of Chengxian college of southeast university
图 6. 东南大学成贤学院模型

5. 模型质量分析

成果完成之后, 我们主要采用人机交互的检查方式对各个模型各个模块三维建模成果进行质量检查, 一般对平面精度、高程精度和重投影均方差精度进行检查[10]。

根据质量报告得知, Production2 的平均地面分辨率为 29.8316 mm/像素, 平均重投影误差(RMS)为 0.5 像素, 重投影误差(RMS)为 0.56 像素, 连接点最高分辨率为 0.0153 米/像素, 最低分辨率为 0.057 米/像素, 中位分辨率等于 0.0307 米/像素, 与光线的距离的(RMS)为 0.1102 米。Production3 平均地面分辨率为 32.3805 mm/像素, 平均重投影误差(RMS)为 1.17 像素, 重投影误差(RMS)为 1.26 像素, 连接点最高分辨率为 0.0129 米/像素, 最低分辨率为 0.0521 米/像素, 中位分辨率等于 0.0316 米/像素, 与光线的距离的(RMS)为 0.1455 米。由此可见, Production2 的分辨率要高于 Production3 的分辨率, 并且 Production2 的重投影误差要小于 Production3 的重投影误差。所以 PHANTOM4RTK 采集的影像所建成的模型质量要高于 MAVIC2Pro 采集的影像所建成的模型。报告中的详细数据如表 6 所示。

Table 6. Parameter comparison**表 6.** 参数对比

	中位投影误差 [像素]	最小重投影误差 RMS[像素]	最大重投影误差 RMS[像素]	最小位置不确定 性[米]	最大位置不确定 性[米]
Production2	0.4	0.01	1.9	0.0041	0.9394
Production3	0.96	0.01	2.98	0.0062	1.1448

6. 模型精度验证

为了保证模型的可靠性，对三维模型结果进行精度验证。以各方向及平面的中误差作为精度评价指标，公式为：

$$M_x = \sqrt{\frac{\sum(\Delta x)^2}{n}} \quad (1)$$

$$M_y = \sqrt{\frac{\sum(\Delta y)^2}{n}} \quad (2)$$

$$M_z = \sqrt{\frac{\sum(\Delta z)^2}{n}} \quad (3)$$

$$M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (4)$$

式(1)~(4)中， M_x ， M_y ， M_z ， M 分别为X,Y,Z方向的中误差和平面的中误差； n 为检算值数目。

通过影像位置的不确定性计算出影像位置与实测坐标之间的差值 Δx ， Δy ， Δz ，进而进行结果精度的分析与研究，以Production2为例。影像位置与实测坐标之间的差值见表7。

Table 7. The difference between the image location and the measured coordinates**表 7.** 影像位置与实测坐标之间的差值

名称	Δx	Δy	Δz	平面
最小值	0.0024	0.0019	0.0011	0.0253
平均值	0.0045	0.0043	0.0032	0.0750
最大值	0.0123	0.0097	0.0072	0.5335

将表7中的数据代入式(1)~(4)，计算可得

$$M_x = 0.0077 \text{ m}, M_y = 0.0062 \text{ m}, M_z = 0.0147 \text{ m}, M = 0.0098 \text{ m}.$$

通过以上分析可知，X方向的最大误差为0.0123 m，中误差为0.0077 m；Y方向的最大误差为0.0097 m，中误差为0.00662 m；Z方向的最大误差为0.0072 m，中误差为0.0147 m；平面最大误差为0.5335 m，最小误差为0.0253 m，中误差为0.0098 m。通过无人机倾斜摄影技术搭建目标区域的三维模型精度较高，达到了《城市三维建模技术规范》(CJJ/T157-2010)的相关标准。

7. 结束语

通过无人机倾斜摄影技术、三维建模技术，以南京信息工程大学和东南大学成贤学院为试验区，进行实景三维建模试验，结果表明：

1) 基于无人机倾斜摄影测量技术,借助 Context Capture 软件构造的三维模型与真实的建筑物有着高度的一致性,其精度符合规范要求,验证了无人机倾斜摄影测量技术构建三维模型的可行性。

2) 三维模型的误差达到了《城市三维建模技术规范》(CJJ/T157-2010)的相关标准,验证了在构建三维模型中的可靠性。

3) PHANTOM4RTK 所采集的影像资料建模精度更高,出现的瑕疵更少,并且 PHANTOM4RTK 在开启 RTK 之后可以免相控,对于高差较大的采集区域可以通过导入 DEM 文件使用仿地飞行功能,在功能方面更加齐全,相比之下缺点也明显,数传图传信号较弱,对于大面积的区域进行影像采集需要划分成多个区域,整套设备的体积较大,便携性不如 MAVIC2Pro。

4) MAVIC2Pro 所采集的影像资料建模色彩更鲜艳,还原度较高,但是建筑表面以及地面车辆等出现的扭曲现象明显更多,数传图传信号较好,对于大面积的区域进行影像采集不需要划分太多区域,整套设备的体积较小,便携性更好。

5) 对比不同航高的数据采集和建模效果,120 米航高的精度要高于 158 米航高的精度,但是 120 米航高的作业的任务工作量要更大。

6) 对比两种软件可知 DJI Terra 建模速度较快,操作简单,成功率高,其效果良好,而 Context Capture 建模纹理更加清晰,输出格式种类更多,都可以应用于智慧化城市建设等方面,最后实现一套优质的数字化三维城市模型。

基金项目

国家自然科学基金项目(41905026);江苏省自然科学基金资助项目(BK20170945);南京信息工程大学人才启动基金资助项目(2016r028);江苏省 333 工程高层次人才培养资助(第三层次);中国博士后科学基金第 63 批面上资助(2018M631554)。

参考文献

- [1] 李安福,曾政祥,吴晓明. 浅析国内倾斜摄影技术的发展[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(9): 57-59+62.
- [2] 席敏哲. 基于无人机倾斜影像的精细化三维模型构建及智慧园区应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [3] 周吕,李青逊,权菲,等. 基于无人机倾斜摄影测量三维建模及精度评价[J]. 水力发电, 2020, 46(4): 41-45, 50.
- [4] 乔天荣,马培果,许连峰,等. 基于无人机倾斜摄影测量的关键技术及应用分析[J]. 矿产勘查, 2020, 11(12): 2698-2704.
- [5] 占森方,李元松,陶文华,等. 无人机倾斜摄影技术在智慧校园实景三维建模中的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(36): 28-30+34.
- [6] 张小宇,张建利. 低空 UAV 航测地面分辨率影响因素分析[J]. 北京测绘, 2018, 32(10): 1121-1124.
- [7] 杨润书,马燕燕,殷海舟. 低空无人机航摄系统地面分辨率与航高的关系研究[J]. 地矿测绘, 2013, 29(3): 1-2+8.
- [8] 国家测绘局. 低空数字航空摄影测量外业规范(CH/Z 3004-2010) [S]. 北京: 测绘出版社, 2010.
- [9] 周晓敏,孟晓林,张雪萍,等. 倾斜摄影测量的城市真三维模型构建方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(9): 159-163.
- [10] 王京,郭瑞隆,马明义. 基于无人机倾斜摄影测量的三维重建及精度分析[J]. 测绘标准化, 2017(3): 32-33.