

基于轻小型无人机城区 1 : 500 地形图测绘技术研究

韩友美, 艾 林, 刘东明, 闫 鹏, 许延昌

(江苏海洋大学 海洋技术与测绘学院, 江苏 连云港 222005)

摘 要:随着无人机测绘精度的逐步提高和倾斜摄影测量技术的发展,在三维模型的基础上进行大比例尺地形图测绘已成为可能。基于轻小型无人机大疆精灵 4 Pro 单镜头摄影测量系统,制定城区 1 : 500 地形图的整体技术流程,首先制作测区倾斜模型,讨论不同数量像控点对三维模型精度的影响,采用实测数据检验模型成果,在不低于 3 个控制点的情况下,所建模型的平面与高程点位中误差都可达到城区 1 : 500 地形图测制精度要求。最后尝试借助清华山维 EPS 地理信息工作站测图软件,在三维模型的基础上采集地物要素,完成试验区 1 : 500 地形图的测制工作。文中的研究成果可为城区 1 : 500 地形图的测制及更新提供借鉴。

关键词:轻小型无人机;大比例尺地形图;实景三维;倾斜摄影测量;模型精度

中图分类号:P231 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7949(2023)04-0051-08

Research on 1 : 500 topographic map measurement technology of urban area based on light and small UAV

HAN Youmei, AI Lin, LIU Dongming, YAN Peng, XU Yanchang

(College of Marine Technology and Mapping, Jiangsu Ocean University, Lian Yungang 222005, China)

Abstract: With the development of UAV oblique photogrammetry technology and UAV mapping precision, it has become possible to map large-scale topographic maps based on 3D model. This paper designs the overall technical process of measuring urban 1 : 500 topographic map with the help of light small UAV DJI Phantom 4 Pro single lens photogrammetry system. First, the oblique model was made for the test area, and then the influence of adding different number of image control points on the precision of 3D model results was discussed. The model results were tested with measured data. The results show that the errors in the plane point and elevation of the model meet the requirements of 1 : 500 topographic map measurement accuracy at least need three control points. Finally, this paper tries to collect the ground feature to complete the measurement and production of 1 : 500 topographic map of the test area with the help of Qinghua Sunway EPS mapping software. The research results in this paper can provide a reference for the measurement and update of the 1 : 500 urban topographic map of the area.

Key words: Light and small UAV; large scale topographic map; real-world 3D; oblique photogrammetry; model accuracy

地形图中大比例尺地形图的精度高,传统的测图方法为全野外数字测图,不但工作量大,而且劳动强度高^[1]。随着无人机技术的发展,运用无人机作为平台搭载高清相机与定位系统作为测绘工具

用以采集目标物顶部及侧面影像信息,结合像控技术,突破了传统航空摄影测量正射影像只能从垂直角度拍摄的局限^[2]。大比例尺地形图 1 : 500 地形图更新和新测任务量大,传统测量方式劳动强度高,难以满足地形图快速更新的需求。无人机摄影测量作为新时代测绘技术手段,时至今日已趋近成熟^[3],无人机具有灵活方便价格低等优点,操作方便,配合航拍软件采集数据可以节省大量的外业工

收稿日期:2022-06-16

基金项目:江苏省海洋科技创新资助项目(JSZRHYKJ202201);江苏省六大人才高峰项目(KTHY-045)

第一作者简介:韩友美(1981-),女,高级工程师,博士

通信作者简介:艾 林(1997-),女,硕士研究生。

作,降低外业人员的工作强度与危险系数^[4]。

针对倾斜摄影测量技术在大比例尺地形图测绘中的应用,已有学者对其进行了相关研究,商建伟^[5]基于倾斜摄影测量技术,利用直升机搭载航摄影仪对大区域地形进行了地形图测绘,但其数据采集平台价格相比较轻小型无人机更昂贵;赵小阳等^[6]采用了集成 RTK 模块的多旋翼无人机平台,具有高精度定位设备,再结合地面控制点,可以将平面和高程点位中误差控制在 5 cm 内,但没有对控制点个数进行讨论;万剑华等^[7]分析了通过合理布设像控点,验证了消费级无人机测图的精度,可满足大比例尺 DOM 和 DSM 的精度要求,但其研究区为山地公园,植物覆盖率达 50%;何敏等^[8]研究得到倾斜摄影技术可以满足丘陵山区 1:1 000 大比例尺测图的精度,且测图效率也能有所提高。

研究使用的无人机都是具有 RTK 模块的多旋翼无人机,其本身具有 cm 级定位精度,但仍然需要加入控制点才能保证地形图的精度。文中所采用的大疆精灵 4pro 本身不具备 RTK 模块,具有体型轻小,数据采集成本低的特点,旨在突出用一种低成本的无人机测制 1:500 地形图的可行性,通过加入控制点提高模型精度,验证了不具备 RTK 模块的无人机测图精度可满足大比例尺地形图的精度要求,并对加入不同数量控制点进行讨论。研究中设计了一整套基于轻小型无人机测制 1:500 地形图的方法,具有较强的实用价值,同时其三维实景模型成果也可为数字城市、智慧城市提供参照。

1 基于倾斜摄影测量实景模型测制 1:500 地形图的技术

1.1 整体技术流程设计

依据倾斜摄影测量测图原理和大比例尺制图技术分析,设计了基于大疆精灵 4 Pro 轻小型无人机摄影测量系统的 1:500 地形图测制方案,主要包括:航线规划、像控点与检查点的布设采集、野外航空摄影、空三计算、三维建模、精度检验,在获取满足精度要求的数据模型后,基于 EPS 平台对试验区进行 1:500 地形图的绘制。该技术的特点在于借助低成本轻小型无人机经过适量控制点的布设,为生产 1:500 大比例尺地形图提供一种可行的方案,另外该技术既能生成 1:500 地形图又能提供三维实景数据。可以为地形图补测和新建设的城区地形图补测提供技术手段。具体技术路线如图 1 所示。

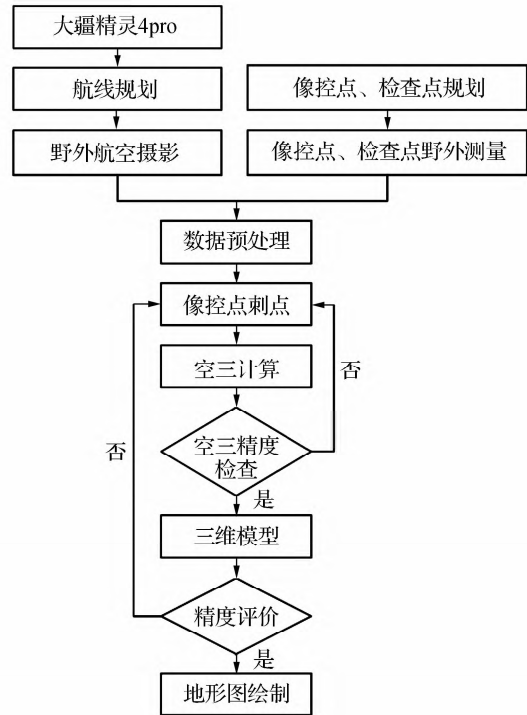


图 1 大比例尺地形图整体技术流程

1.2 外业数据采集

1.2.1 航线规划及相关参数的确认

大疆精灵 4 Pro 因其灵活、操作简单、价格便宜,以及摄像机微秒同步和无用户校准,特别适用于密集建成的城市和地形复杂的区域^[9],且具有飞行状态稳定、易调控和成本低等特点,成为很多倾斜摄影测量爱好者的入门首选。它是一款搭载了 GPS/GLONASS 双模卫星定位系统的四旋翼无人机。由于轻小型无人机荷载有限,该系统搭载的是单镜头相机,为了达到倾斜摄影测量的五镜头的测量效果,需要设置特殊的飞行方式,按照倾斜摄影测量的原理从 5 个不同视角分别获取试验区顶部及 4 个侧面的影像,控制飞行的软件采用大疆公司开发的配套软件 DJI GO 4 和 DJI GS 结合进行,可以进行飞行航线、航高、重叠度等参数的设置,实现了一键起飞和降落。通过图像实时传输可以检查飞行过程中影像的正确性,并确认周围环境是否存在安全威胁。

1)航高的计算。飞行高度决定了地面影像分辨率值(ground sample distance,GSD)的大小,即飞行高度越高,GSD 越大,一个像素所代表的地面距离越大,地面影像分辨率越低,则精度也越低。GSD 值可根据航空摄影测量 1:500 地形图的要求计算得出,大约为 4.23 cm/pixel。

将 GSD 值代入式(1)即可计算得到本次飞行的

理论高度。文中的实验区域位于江苏省连云港市,属于平原地区,测区北部地势平坦,南部建筑物密集,其中建筑物最高约 70 m。在保证飞行安全的基础上提高本次模型纹理清晰度和模型精度,再结合实验区域当地飞行高度不得超过 120 m 的相关规定,因此通过综合分析后将航高定为 80 m。

$$H = \frac{f}{a} \times \text{GSD}. \quad (1)$$

式中: H 为飞行高度; f 为镜头焦距; a 为像元大小;GSD 为地面影像分辨率。

2) 重叠度及其他参数的确定。重叠度表示相邻像片间的重叠程度,是影像连接点匹配的重要因素,重叠度越高,影像提取的连接点平差结构越强。根据相关技术要求规定,以及考虑到本测区建筑物存在密集区域,且航摄成果需用于三维建模,为满足本次实验的精度和达到预期的纹理效果,将航向重叠度设为 80%、旁向重叠度设为 75%。

采用单镜头实现 5 个方向的数据采集,在获取正射影像时相机为垂直于地面拍摄,即云台俯仰角为 0° ,获取倾斜影像时云台俯仰角为 45° ,以东面倾斜航线规划图为例(如图 2 所示),其中实线框所框选的范围为测区,折线为无人机的飞行航线,如图中用虚线框框选的区域所示,其他方向类似。所有参数确定后,可根据规划的航线依次进行 5 个方向的影像数据采集。

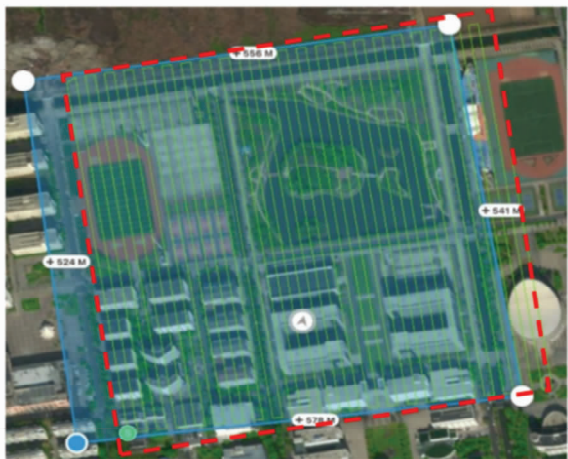


图 2 东面倾斜航线规划

1.2.2 像控点与检查点测量

像控点是传统航空摄影测量用于大比例尺地形图测制的必要环节。随着摄影测量技术的进步,像控点的使用数量也在不断的减少。由于受大疆精灵 4 Pro 定位水平的限制,其原有精度建立的三维模型难以达到大比例尺地形图测绘精度,因此必

须结合高精度的控制点参与空三解算,以提高模型精度,这也是本技术方案的关键点。理论上,加入精度越高、数量越多的控制点,则空三计算的结果越准确。但在实际应用中,像控点应在合理分布的情况下选择合适的数量,以满足生产精度的同时降低成本与提高作业效率^[10]。

文中采用 CORS(continuously operating reference stations)多基站网络 RTK 技术对像控点和检查点进行采集^[11-12],控制点的选取布设原则参照现行控制点规范进行。选点时根据实地情况判断是否需要做人工标记,在条件允许的情况下应选取斑马线、道路中线、地砖等在航拍影像中可清晰辨别的位置,且一段时间内不会产生变动的角点作为控制点并做标记。控制点测量采用的是 CGCS 2000 国家坐标系,经实地踏勘后,共规划 9 个控制点和 31 个检查点。如图 3 所示,正方形表示控制点,圆形表示检查点,并对它们进行了唯一命名。



图 3 控制点及检查点分布

2 测区实景三维模型的构建与精度分析

经过外业数据采集,以及对于模型中有遮挡无法构建不规则三角网(triangulated irregular network, TIN)的区域补测后,共获取 5 462 张影像,将其导入内业处理软件 Context Capture,自动识别照片位置姿态信息(position and orientation system, POS)。在对所有用于建模的影像进行预处理之后,先对影像进行像控点刺点,在带有像控点影像的基础上建立空三,空三精度满足之后进行三维建模并对模型进行精度分析。

2.1 空三解算及建模

倾斜影像数据的核心是对影像进行空中三角测量处理,空中三角测量原理是依据少量的控制点,在航摄影像上进行控制点加密,通过光束法区域网平差的方法解算出加密点坐标,做到空三加密,得到绝对定向所需的外方位元素与加密控制点,实现摄影坐标到大地坐标的转换^[13-14]。其实质是求解摄影测量坐标系和大地坐标系两个坐标空间的转换,最终根据摄影坐标求取目标大地坐标。

文中规划的像控点进行空三计算完成后得到的控制点空三精度报告如表 1 所示。在进行刺点时,KZ03 显示为粗差无法满足空三解算的标准,将其舍弃,最终有 8 个控制点参与了空三解算。

表 1 控制点空三精度报告

m

点号	水平误差	高程误差	点位误差
KZ09	0.008	-0.008	0.011
KZ08	0.002	0.006	0.007
KZ07	0.001	0.003	0.003
KZ06	0.007	0.001	0.007
KZ05	0.001	-0.004	0.005
KZ04	0.005	-0.001	0.005
KZ02	0.004	0.001	0.004
KZ01	0.003	0.000	0.003

空三精度满足要求后制作测区的实景三维模型,图 4 为 3 种不同形式展示的测区三维模型。其模型精度不但满足测绘要求,且模型真实精致,最终的实景三维模型效果可以为小区域地形进行实景展示。

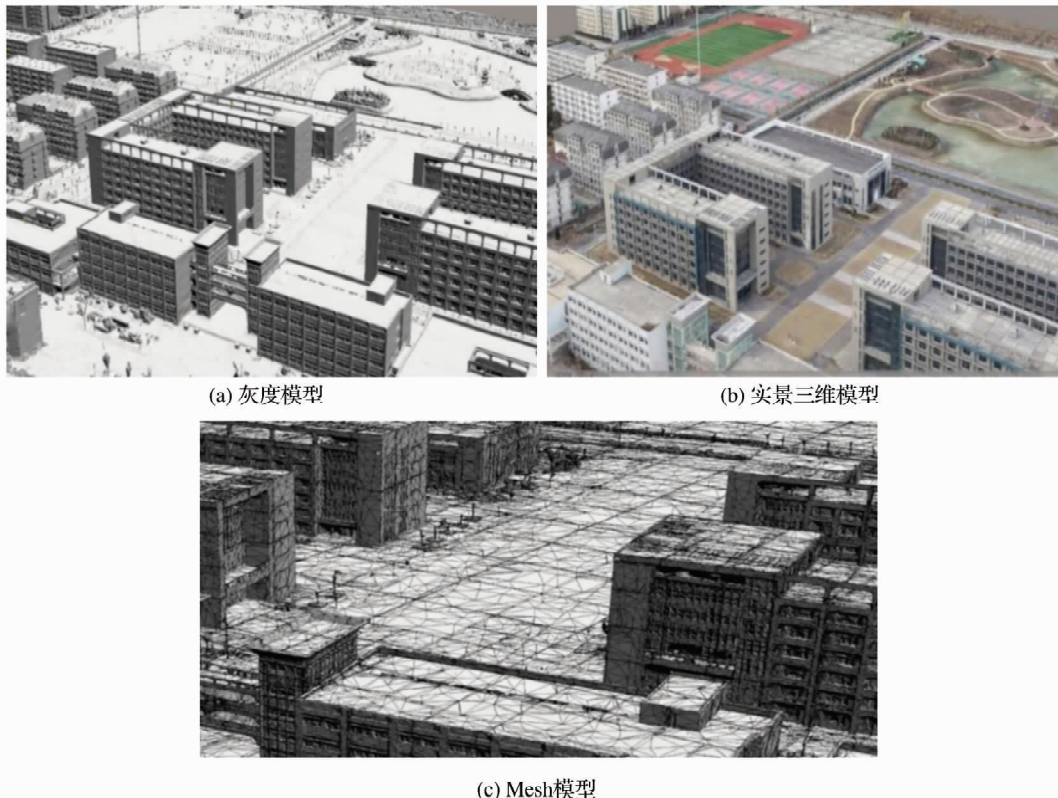


图 4 模型成果

2.2 控制点对模型精度的影响分析

像控制点的数量影响三维模型的精度,但并不是控制点数量越多精度越高,在控制点达到一定数量后,再增加控制点数量,模型精度并不会会有明显的提升^[15]。因此进行控制点数量对三维模型精度影响的研究,这是本技术方案的关键点。将 CORS 实测的检查点与三维模型上量取的点位坐标进行平面精度检验分析,本次实验分别对模型刺入 8 个、

6 个、4 个和 3 个控制点,讨论 4 种情况下控制点个数对三维模型精度的影响。如表 2 所示为 8 个控制点的平面误差统计表。

由表 2 可知,本次试验野外实测检查点共 31 个,对表 2 中的数据进行误差分析,可计算得到刺入 8 个控制点的模型平面中误差为±0.05 m,成果满足相关规范中 1:500 地形图平面精度小于±0.15 m 的要求。

表 2 检查点平面误差统计表

检查点点号	CORS 测量 X	CORS 测量 Y	检查点 X	检查点 Y	m_x	m_y	m_s
db01	* * * * 704. 59	* * * * 991. 17	* * * * 704. 58	* * * * 991. 14	-0. 01	-0. 03	0. 03
db02	* * * * 708. 21	* * * * 848. 35	* * * * 708. 20	* * * * 848. 38	-0. 01	0. 03	0. 03
db03	* * * * 848. 08	* * * * 934. 36	* * * * 848. 10	* * * * 934. 34	0. 02	-0. 02	0. 03
db04	* * * * 799. 08	* * * * 808. 78	* * * * 799. 12	* * * * 808. 81	0. 04	0. 03	0. 05
db05	* * * * 768. 01	* * * * 080. 47	* * * * 768. 00	* * * * 080. 43	-0. 01	-0. 04	0. 04
db06	* * * * 814. 92	* * * * 939. 85	* * * * 814. 92	* * * * 939. 84	0. 00	-0. 01	0. 01
db07	* * * * 608. 32	* * * * 988. 60	* * * * 608. 35	* * * * 988. 55	0. 03	-0. 05	0. 06
db08	* * * * 597. 00	* * * * 890. 00	* * * * 597. 03	* * * * 890. 03	0. 03	0. 03	0. 04
dn01	* * * * 324. 33	* * * * 881. 68	* * * * 324. 39	* * * * 881. 71	0. 06	0. 03	0. 07
dn02	* * * * 367. 24	* * * * 997. 95	* * * * 367. 26	* * * * 997. 90	0. 02	-0. 05	0. 05
dn03	* * * * 535. 39	* * * * 854. 19	* * * * 535. 35	* * * * 854. 18	-0. 04	-0. 01	0. 04
dn04	* * * * 587. 92	* * * * 954. 18	* * * * 587. 93	* * * * 954. 18	0. 01	0. 00	0. 01
dn05	* * * * 466. 25	* * * * 005. 15	* * * * 466. 22	* * * * 005. 12	-0. 03	-0. 03	0. 04
dn06	* * * * 584. 84	* * * * 023. 12	* * * * 584. 85	* * * * 023. 07	0. 01	-0. 05	0. 05
dn07	* * * * 592. 09	* * * * 086. 50	* * * * 592. 07	* * * * 086. 48	-0. 02	-0. 02	0. 03
dn08	* * * * 418. 15	* * * * 136. 15	* * * * 418. 20	* * * * 136. 06	0. 05	-0. 09	0. 10
dn09	* * * * 489. 51	* * * * 893. 16	* * * * 489. 53	* * * * 893. 12	0. 02	-0. 04	0. 04
dn10	* * * * 434. 73	* * * * 906. 00	* * * * 434. 74	* * * * 905. 98	0. 01	-0. 02	0. 02
xb01	* * * * 822. 85	* * * * 778. 20	* * * * 822. 84	* * * * 778. 20	-0. 01	0. 00	0. 01
xb02	* * * * 672. 28	* * * * 595. 65	* * * * 672. 25	* * * * 595. 69	-0. 03	0. 04	0. 05
xb03	* * * * 677. 92	* * * * 702. 00	* * * * 677. 92	* * * * 702. 01	0. 00	0. 01	0. 01
xb04	* * * * 704. 80	* * * * 825. 25	* * * * 704. 83	* * * * 825. 28	0. 03	0. 03	0. 04
xb05	* * * * 678. 52	* * * * 725. 68	* * * * 678. 51	* * * * 725. 66	-0. 01	-0. 02	0. 02
xb06	* * * * 625. 20	* * * * 710. 79	* * * * 625. 16	* * * * 710. 76	-0. 04	-0. 03	0. 05
xb07	* * * * 584. 92	* * * * 813. 77	* * * * 584. 94	* * * * 813. 79	0. 02	0. 02	0. 03
xn01	* * * * 489. 54	* * * * 611. 27	* * * * 489. 50	* * * * 611. 46	-0. 04	0. 19	0. 19
xn02	* * * * 368. 31	* * * * 657. 21	* * * * 368. 25	* * * * 657. 23	-0. 06	0. 02	0. 06
xn03	* * * * 336. 22	* * * * 738. 24	* * * * 336. 15	* * * * 738. 26	-0. 07	0. 02	0. 07
xn04	* * * * 290. 61	* * * * 745. 11	* * * * 290. 59	* * * * 745. 08	-0. 02	-0. 03	0. 04
xn05	* * * * 319. 72	* * * * 784. 57	* * * * 319. 67	* * * * 784. 41	-0. 05	-0. 16	0. 17
xn06	* * * * 391. 67	* * * * 779. 59	* * * * 391. 60	* * * * 779. 53	-0. 07	-0. 06	0. 09

采用 CORS 实测和三维模型中同名点进行高程精度对比分析,其精度分析结果见表 3。

由表 3 可知,本次利用 31 个检查点进行高程精度评价,其中高程误差最大的点为 xn05,高程误差最大值为 0. 11 m,高程中误差为±0. 06 m,小于规范中要求的 0. 17 m,因此,模型满足绘制 1 : 500 地形图的高程精度要求。

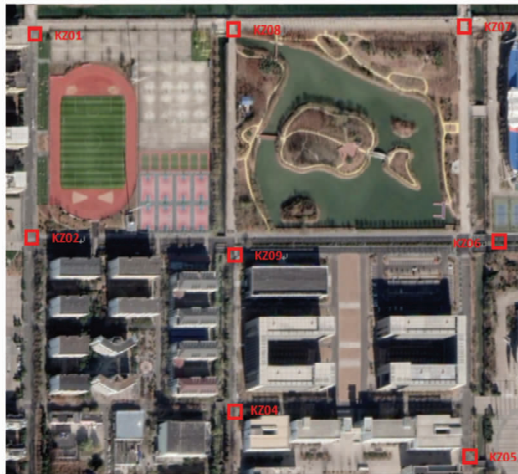
分别对不同数量控制点下的影像进行三维建模后,对三维模型点位坐标精度进行比较分析。如图 5 所示,分别为 8 个、6 个、4 个和 3 个控制点的点位分布图。如表 4 所示为 31 个检查点在不同个数

控制点情况下的误差统计表。

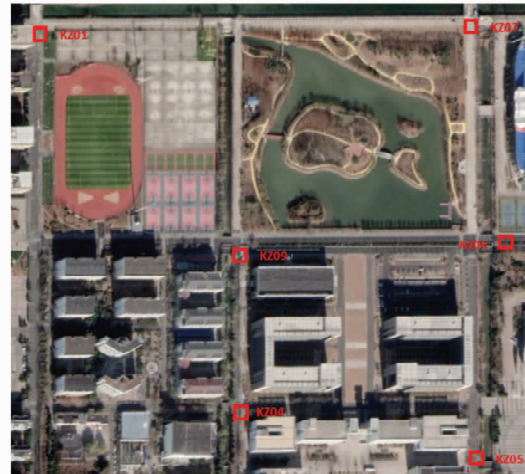
由于控制点的数量、分布、精度及刺点精度都对模型的精度有影响,8 个控制点时由于 KZ08 控制点的刺点精度相对更低,由表 4 可以看出由 8 个控制点减少到 6 个和 4 个控制点的情况下,8 个控制点 y 方向上整体的中误差较大,因此模型点位中误差精度由原来的 0. 05 m 反而提高到了 0. 03 m。6 个和 4 个控制点之间的精度变化不明显,点位中误差都为 0. 03 m,当控制点减少到 3 个控制点时,点位精度降低到 0. 05 m,由于实验区域属于平原地区,高程变化不明显,所以高程中误差没有明显的

表 3 检查点高程误差统计表

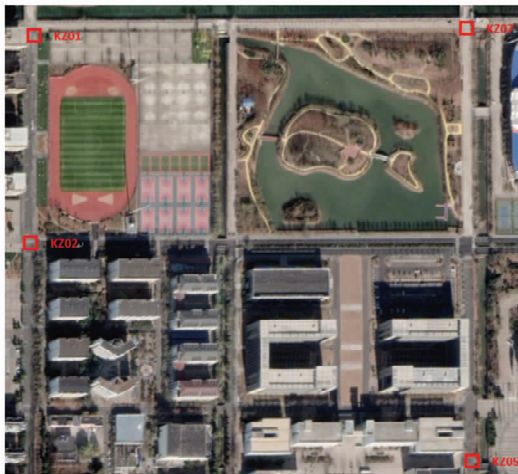
检查点点号	CORS 测量高程	检查点高程	m_H	检查点点号	CORS 测量高程	检查点高程	m_H
db01	8.44	8.51	0.07	dn09	30.69	30.69	0.00
db02	6.82	6.86	0.04	dn10	30.69	30.68	-0.01
db03	6.51	6.45	-0.06	xb01	6.39	6.43	0.04
db04	6.32	6.29	-0.03	xb02	6.37	6.32	-0.05
db05	6.41	6.48	0.07	xb03	6.34	6.43	0.09
db06	7.07	7.12	0.05	xb04	6.21	6.26	0.05
db07	6.32	6.37	0.05	xb05	6.28	6.32	0.04
db08	6.24	6.28	0.04	xb06	6.35	6.43	0.08
dn01	6.12	6.12	0.00	xb07	6.21	6.26	0.05
dn02	6.25	6.26	0.01	xn01	6.23	6.26	0.03
dn03	6.28	6.35	0.07	xn02	6.18	6.08	-0.10
dn04	6.25	6.31	0.06	xn03	6.13	6.03	-0.10
dn05	6.53	6.54	0.01	xn04	6.01	5.98	-0.03
dn06	6.15	6.22	0.07	xn05	6.17	6.06	-0.11
dn07	6.21	6.30	0.09	xn06	6.13	6.10	-0.03
dn08	6.16	6.22	0.06				



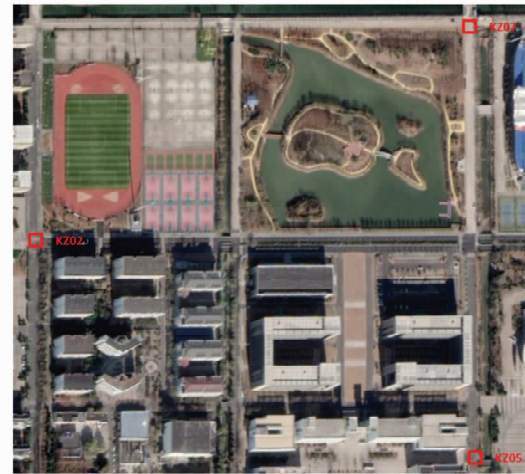
(a) 8个控制点的点位分布



(b) 6个控制点的点位分布



(c) 4个控制点的点位分布



(d) 3个控制点的点位分布

图 5 不同数量控制点点位分布

表4 检查点坐标中误差统计表

控制点个数	m			
	X方向中 误差 m_x	Y方向中 误差 m_y	平面中误差 m_s	高程中误差 m_H
8个控制点	0.03	0.06	0.05	0.06
6个控制点	0.03	0.03	0.03	0.07
4个控制点	0.03	0.03	0.03	0.07
3个控制点	0.05	0.05	0.05	0.07

变化。但上述刺入的控制点个数的精度均满足测制1:500地形图的精度要求,因此在保证模型精度又节省成本的前提下建议布设4个控制点。

3 基于倾斜三维模型的地形图绘制

经过精度验证后的倾斜摄影数据处理完成后,就可以在倾斜模型的基础上进行大比例尺地形图绘制。具体地形图绘制整体流程如图6所示。首先从Context Capture软件中将三维模型的OSGB格式导出,在EPS平台的三维测图中新建工程后,利用EPS平台三维测图模块中的OSGB数据转换,将OSGB格式数据转换为DSM格式数据,再将DSM导入EPS平台进行地形图绘制工作,最后根据地物不同使用不同地物的编码对实验区域进行地形图绘制工作。在EPS平台中对地物进行绘制完全是根据三维模型进行绘制的,不需要借助其他工具,可以清楚地辨别地物类别,降低了地形图绘制的难度且提高了出图效率。



图6 地形图绘制流程

在EPS平台中将所有地物绘制完毕后,根据1:500地形图的图幅要求进行整饰出图,实验成果为4幅1:500地形图,如图7所示为部分地形图。利用EPS平台二维影像与三维模型联动,进行地形图绘制,与立体测图和传统测图相比节省了大部分的外业测图工作量,对作业员要求也相对更低。但是这种测制地形图的方式对三维模型的精度要求更高,对于屋檐、树木茂盛等容易造成遮挡的区域,

模型精度低,不易识别与采集。文中由于使用的是轻小型无人机,荷载有限,续航能力差,因此只适合进行小区域航测。

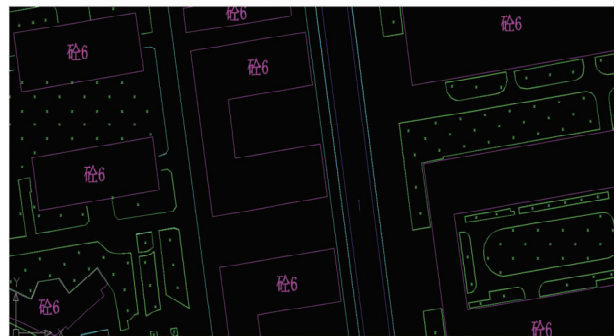


图7 试验区局部地形图

4 结束语

文中设计了一种适用于小区域城区、利用轻小型无人机测制1:500地形图的完整技术方案,并对分别布设8个、6个、4个和3个控制点的三维模型精度进行比较评估,发现均满足平坦地区摄影测量精度要求,但鉴于工作量和模型精度的变化规律,建议在保证模型精度的前提下至少选择4个控制点进行控制,该成果可用于1:500地形图的绘制。

在高精度三维模型的基础上,文中利用EPS测图软件完成了试验区0.3 km²范围内的1:500地形图,验证在有像控点条件下,轻小型无人机大疆精灵4 Pro测制1:500地形图的可行性和可靠性。同时不同个数控制点的精度对比也可为今后相关工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] RONG S L. Research on the mapping of large-scale topographic maps based on low-altitude drone aerial photography system [J/OL]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 70(5). <https://doi.org/10.1113/jt.v70.3523>.
- [2] 李德仁,肖雄武,郭丙轩,等. 倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(6): 711-721.
- [3] ANGUIANO-MORALES M, CORRAL-MARTINEZ L F, TRUJILLO-SCHIAFFINO G, et al. Topographic investigation from a low altitude unmanned aerial vehicle [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110(9): 63-72.
- [4] 叶震,许强,刘谦,等. 无人机倾斜摄影测量在边坡岩体结构面调查中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学

- 版),2020,45(11):1739-1746.
- [5] 商建伟. 基于倾斜摄影实景三维模型的大比例尺地形图测绘分析研究[J]. 测绘通报,2020(增刊1):195-197.
- [6] 赵小阳,孙松梅. 无人机倾斜摄影支持下的1:500高精度三维测图方案及应用[J]. 测绘通报,2019(7):87-91.
- [7] 万剑华,王朝,刘善伟,等. 消费级无人机的大比例尺测图能力分析[J]. 测绘通报,2018(6):104-108.
- [8] 何敏,熊先才,李晓俊,等. 倾斜摄影技术在丘陵山区大比例尺测图中的应用[J]. 测绘通报,2021(2):93-97,107.
- [9] 郭庆华,胡天宇,刘瑾,等. 轻小型无人机遥感及其行业应用进展[J]. 地理科学进展,2021,40(9):1550-1569.
- [10] 张灯军,郭军. 无人机在1:1000地形图成果质量检查中的应用与精度分析[J]. 测绘工程,2019,28(4):64-67.
- [11] 邸健,杨国东,张旭晴. 改进组合差分定位算法在无人机上的应用[J]. 测绘工程,2021,30(4):44-52,58.
- [12] 任天宇. 基于GAMIT/GLOBK的基准站坐标解算策略分析[D]. 山东青岛:山东科技大学,2018.
- [13] 丁育萱,邹进贵,朱晓康. 1:500无人机大比例尺测图关键技术及应用研究[J]. 测绘通报,2018(增刊1):154-157.
- [14] 丁波. 消费级无人机倾斜摄影空中三角测量及三维模型精度分析[D]. 北京:北京建筑大学,2020.
- [15] 赵培华. 基于消费级单镜头无人机倾斜摄影三维建模精度对比研究[D]. 济南:山东建筑大学,2020.
- [责任编辑:李铭娜]

(上接第36页)

- [12] 贾艳艳,唐晓岚,唐芳林,等. 长江中下游流域人类活动强度及其对湿地景观格局影响研究[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(4):950-963.
- [13] 汤萃文,张海风,陈银萍,等. 祁连山南坡植被景观格局及其破碎化[J]. 生态学杂志,2009,28(11):2305-2310.
- [14] 周淑琴,荆耀栋,张青峰,等. 毛乌素沙地南缘植被景观格局演变与空间分布特征[J]. 生态学报,2013,33(12):3774-3782.
- [15] 裴志方,杨武年,吴彬,等. 2000—2016年宁夏植被覆盖景观格局遥感动态分析[J]. 水土保持研究,2018,25(1):215-219.
- [16] O'NEILL R V, RIITTERS K H, WICKHAM J D, et al. Landscape pattern metrics and regional assessment[J]. Ecosystem Health,1999,5(4):225-233.
- [17] 常中兵,秦奋,韩志刚,等. 基于RS和GIS的河南省生态环境质量动态评价[J]. 水土保持通报,2017,37(4):132-137.
- [18] RAMÍREZ-CUESTA J M, MINACAPILLI M, MOTISI A, et al. Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000-2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure[J]. Science of The Total Environment,2021,799:149346.
- [19] 龙鑫,李静,柳钦火,等. 植被指数合成算法综述[J]. 遥感技术与应用,2013,28(6):969-977.
- [20] 邬建国. 景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [21] 王计平,杨磊,卫伟,等. 黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响:斑块类型水平[J]. 生态学报,2011,31(19):5739-5748.
- [22] 杨磊,张梅,罗明良,等. 基于MODIS NDVI的川中丘陵区植被覆盖度景观格局变化[J]. 生态学杂志,2013,32(1):171-177.
- [23] 颜明,贺莉,王随继,等. 基于NDVI的1982—2012年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J]. 中国水土保持科学,2018,16(3):86-94.
- [24] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报,2013,33(24):7798-7806.
- [25] 董玉红,刘世梁,安南南,等. 基于景观指数和空间自相关的吉林大安市景观格局动态研究[J]. 自然资源学报,2015,30(11):1860-1871.
- [26] 付刚,肖能文,乔梦萍,等. 北京市近二十年景观破碎化格局的时空变化[J]. 生态学报,2017,37(8):2551-2562.
- [27] 吕金霞,蒋卫国,王文杰,等. 基于移动窗口法雄安新区湿地景观演变及其与人为干扰间的关系[J]. 国土资源遥感,2019,31(2):140-148.
- [责任编辑:赵晓明]