

doi: 10.12052/gdutxb.200116

无人机测图的像控点布设优化及精度提升措施

孟 瑞¹, 廖开怀¹, 吴希文¹, 徐永明²

(1. 广东工业大学 建筑与城市规划学院, 广东 广州 510090; 2. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300251)

摘要: 为探讨区域网法像控点在平原地区的优化布设方案, 利用高精度定位定向系统(Position and Orientation System, POS)数据辅助设计4种对比方案。研究表明: 各布设方案空三加密的平面精度相近, 高程精度差异明显, POS数据可显著提升高程精度; 本文所提基线间隔为10、航带间隔为4的区域网法像控点优化布设方案精度最优, 其平面和高程方向可分别满足1:500及1:2000比例尺测图要求。

关键词: 无人机; 摄影测量; 空三加密; 像控点布设; 精度分析

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2021)02-0048-05

Optimization and Accuracy Improvement of Image Control Point Layout for UAV Mapping

Meng Rui¹, Liao Kai-huai¹, Alex Hay-Man Ng¹, Xu Yong-ming²

(1. School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China;

2. China Railway Design Group Co., Ltd., Tianjin 300251, China)

Abstract: Four schemes of image control points are investigated under the assistance of high-precision POS data to explore the optimal layout of image control points in the plain terrain that meets the standard tolerance requirements. The results show plane accuracies in the aerial triangulation of the four schemes are similar, but elevation accuracies are significantly different. POS data-assisted solution can significantly improve the elevation accuracy. Through a comparative analysis, it is found that image control points with the number of 10 baseline intervals and 4 airline intervals is the best optimal layout, when its plane accuracy can meet the requirements of 1:500 scale mapping and elevation accuracy can meet the requirements of 1:2000 scale mapping.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); oblique photography; aerial triangulation; the layout of image control point; accuracy analysis

当前, 高分辨率无人机影像在大比例尺测图中应用广泛^[1-2], 像控点的布设方式是影响无人机地形图测绘效率及精度的关键因素^[3-4]。传统无人机大比例尺测图需要大量野外像控点, 探讨像控点的优化布设方案可使测图工作更加高效, 成图精度更高^[5-6]。平原地区承载大量经济、工程建设, 对测绘地理信息产品需求更多, 已有研究多针对某一具体工程应用中像控点布设方式进行分析^[7-8], 未深入研究平原地区像控点分布与成图精度间的关系以及精度提升措施。另外, 无人机航片高精度定位定向系统(position

and orientation system, POS)数据对空三加密成果以及测图成果精度有显著影响^[9-10], 目前对其尚缺乏研究分析和实践验证。

鉴此, 本文梳理无人机数字摄影测量工作流程并分析其关键技术, 结合无人机大比例尺测图实践设计四组基于区域网法的像控点布设方案, 其中含有高精度POS辅助的对比方案, 基于Pix4Dmapper平台处理各方案航片数据, 探讨满足规范精度的平原地区像控点优化布设方式并总结无人机测图的精度提升措施, 为提高野外像控测量工作效率及平原地

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971196, 41601170); 广东省本科高校教学质量与教学改革工程特色城乡规划学专业项目(粤教高函[2018]179号); 广州市科技创新计划项目(201804010258)

作者简介: 孟瑞(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感与无人机影像处理, E-mail: 2111910025@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 廖开怀(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为城市地理与空间规划, E-mail: kaihuai121@126.com

区无人机大比例尺测图精度提供科学参考。

1 已有像控点布设方法分析

无人机测图关键技术包括航线设计、像控点布设、影像预处理、影像匹配、空中三角测量解算及3D成果产品的制作等^[11]。上述关键技术应用在无人机低空数字摄影测量作业流程及影像处理阶段(见图1),对成果的质量有重要影响。其中,像控点布设的数量及分布方式会直接影响成图精度且是当前研究热点。内业影像数据处理多基于光束法区域网空中三角测量平差进行^[12],在保证测图精度的同时对像控点数量的要求大大降低,但已有摄影测量像控点布点方式要求布设像控点较多^[13]。因此,深入分析已有像控点布设方式及其关键技术,以期保证精度的同时优化像控点布点方式并减少外业工作量。

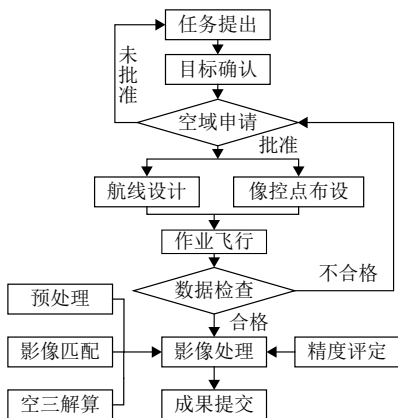


图1 无人机作业及影像处理流程
Fig.1 Technique process of operation of UAV and image processing

无人机测图控制测量包括像控点的外业控制测量及像控点的内业刺点,内业刺点主要是人机交互的过程,外业布点要求相对较高。外业像控点要求布设在成像清晰且上空开阔的区域、避免航片的边缘,另外像控点应尽量被多张航片拍摄,以便控制多航片。外业像控点布设方法有全野外法和非全野外法^[14],全野外法布点工作量大、效率较低,目前主要采用非全野外法布设像控点,其包括航线网法和区域网法^[15]。非全野外像控点布设方法需要少量的像控点,基于解析空中三角测量进行区域网平差,进而获取加密点的坐标。

1.1 航带网法像控点布设

航带网法像控点依据航线分段布设,通过限制相邻像控点间的基线间隔或距离,从而保证加密点精度。当前像控点外业测量平面精度高于高程方向,

所以对平面和高程像控点提出不同的限制要求,CH/Z 3003-2010规范中航向基线间隔计算公式^[16]见式(1),平面像控点旁向航线间隔要求1:1 000及更大比例尺测图时航线间隔不超过5,比例尺小于1:1 000时航线间隔为不超过6。

$$\begin{cases} m_s = \pm 0.28 \times K m_q \sqrt{n^3 + 2n + 46} \\ m_h = \pm 0.088 \times \frac{H}{b} m_q \sqrt{n^3 + 23n + 100} \end{cases} \quad (1)$$

式中, m_s 、 m_h 分别为加密点平面、高程中误差,其单位分别为mm、m; K 为航片放大倍数; H 为相对航高,m; b 为基线长,mm; m_q 为视差量测中误差,mm; n 为航线方向相邻平面控制点的间隔基线数。

具体的航带网法包括五点法、六点法和八点法^[17]。六点法在每条航线的首尾两端及中央的旁向重叠范围内,各布设一对平高点,如图2(a)所示;八点法在航带网内,布设八个平高点,如图2(b)所示;五点法在航带网中央的像主点上方或下方只需布设一个平高点,如图2(c)所示。

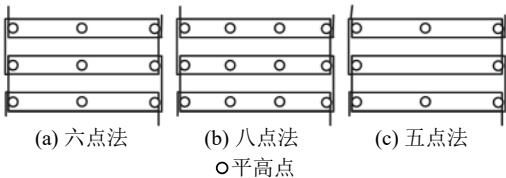


图2 3种航带网法布点方案
Fig.2 Three layout schemes based on aerial strip network method (including 6, 8 and 5 points method)

1.2 区域网法像控点布设

区域网法在区域网周边布设平高点,区域内部增加高程点。3种典型布点方案分别是周边布设平高点加内部布设高程点方法、周边间隔布设平高点与高程点且关键部位布设双平高点、周边密集布设平高点,示意图分别见图3(a)、(b)及(c)。其中,基于光束法区域网平差时,一般按照图3(b)间隔布设平高点与高程点,特殊情况为提高像控点可靠性,可在关键位置布设双点;应用RTK(Real-time Kinematic)联测像控点时,可按图3(c)密集布设平高点。

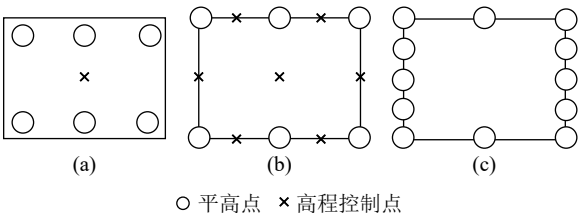


图3 区域网法3种典型布点方案
Fig.3 Three layout schemes based on area grid method

2 像控点布设优化方案及应用实例

2.1 研究区概况及航摄参数

研究区位于河北省辛集市境内,面积约为1 km²,距辛集火车站约5 km,地理坐标大致为东经115°14′08″~115°14′22″,北纬37°51′43″~37°51′51″,东西两侧邻近省道,交通便利。属平原地形,地势平坦,域内多为农村居民房屋。属温带季风气候,四季分明,夏秋两季相对湿度大,冬春两季相对湿度小。研究区地貌地物及位置如图4所示。



图4 研究区地貌地物及位置

Fig.4 Landforms and locations in the study area

航拍采用南方无人机搭载SONY-QX100非量测型数码相机获取航测遥感图像,相机分辨率为5 472×3 648像素,有效像素2 020万,具有光学防抖功能,伸缩式镜头、30 mm焦距,CCD尺寸为36×54 mm,共飞行16条航线,每条航带平均基线数为15条,完成高重叠度航拍,获取航片282张。研究区详细航摄技术参数见表1。

表1 航摄技术参数

Table 1 Technical parameters of aerial photography

航摄相机	相对 航高/m	焦距/ mm	地面 分辨率/cm	像幅尺寸/ 像素	航向 重叠度/%	旁向 重叠度/%
SONY-QX100	154	30	3.19	3 648×5 472	75	50

2.2 像控点优化布点方案

本测区若依据航带网法布设像控点,约需布设24个像控点,工作量较大。为此,本实验基于光束法区域网布点方案进行优化,设置4种不同数量及分布的像控点布设方案并考虑POS数据对测图的影响,比较空三加密点精度以及检查点精度,进而得出满足大比例尺测图要求且成图精度最高的像控点优化布设方案。

本次航测实测像控点数量为31个,在内业处理中设计4种布设方案进行刺点并参与空三加密平差处理,进而由Pix4Dmapper生成区域网光束法空中三角测量平差报告、制作测区数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)、数字正射影像图(Digital

Orthophoto Map, DOM),最终计算所刺像控点的点位误差,并将22个野外检查点与空三测量平差成果进行对比,计算其点位精度,实现对各方案的精度对比。4种布点方案见图5,其详细的参数见表2。像控点标志为红色“L”型实地喷涂布设,并在“L”型标志外角处打入钢钉,在图中表示为黄色三角点位。

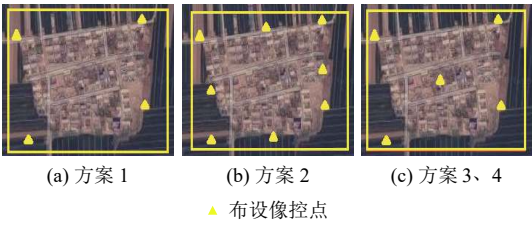


图5 4种布点方案

Fig.5 Four layout schemes of image control point

表2 实验布点方案参数

Table 2 Parameters of the experimental layout scheme

方案	POS	像控点数量	基线间隔数	航带间隔数	检查点数量
1	有	4	10	8	22
2	有	8	5	4	22
3	有	5	10	4	22
4	无	5	10	4	22

由表2可知,方案1布设像控点数量最少,方案2布设像控点数量最多,方案3与方案4主要对比POS数据对空三加密计算和成图精度的影响。结合图5可知,方案1与方案3主要对比在控制点数目基本一致条件下,其空间分布对成图精度的影响。

3 像控点布设方案精度对比及精度提升措施

3.1 像控点布设方案精度对比分析

基于Pix4Dmapper分别解算2.2节4种布设方案,生成区域网光束法空中三角测量平差报告,统计每种方案像控点的点位中误差及X、Y、Z三方向的平均误差,见表3。由表3可知,经空中三角测量平差后,方案2的平面点位中误差最小,方案1精度最低,但4种方案平面点位中误差整体差别不大,精度约为10~11 mm。高程方向方案3精度最高,方案4精度最低,4种方案在高程方向精度差异明显。

进一步地,基于野外检查点测量坐标与空三加密成果计算检查点平面点位精度与高程方向精度,从而评估最优布点方案。检查点精度计算公式如式(2)所示,各方案检查点精度统计结果见表4。

表3 各方案像控点精度
Table 3 Accuracy of image control points in each scheme

方案编号	X方向精度		Y方向精度		Z方向精度		平面点位中误差
	中误差	平均误差	中误差	平均误差	中误差	平均误差	
1	7.14	0.19	9.23	0.15	32.47	2.27	11.67
2	6.57	0.13	7.14	0.08	20.60	3.14	9.70
3	6.89	0.17	8.53	0.12	18.04	2.31	10.97
4	8.25	0.21	7.45	0.10	63.72	7.11	11.12

表4 检查点精度统计
Table 4 Precision statistics of checkpoints

方案编号	检查点数/个	平面精度			高程精度		
		最小中误差/m	最大中误差/m	检查点中误差/m	最小中误差/m	最大中误差/m	检查点中误差/m
1	22	0.036	0.372	0.281	0.028	0.583	0.371
2		0.029	0.397	0.274	0.031	0.642	0.386
3		0.043	0.361	0.260	0.029	0.437	0.359
4		0.054	0.389	0.275	0.065	0.621	0.479

$$\begin{cases} \sigma_X = \sqrt{\sum (X - X')^2 / (n - 1)} \\ \sigma_Y = \sqrt{\sum (Y - Y')^2 / (n - 1)} \\ M_S = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \\ M_Z = \sqrt{\sum (Z - Z')^2 / (n - 1)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_X 、 σ_Y 、 M_Z 分别为X、Y、Z方向的单位权中误差, mm; M_S 为平面点位中误差, mm; X、Y、Z 分别为检查点3个方向GPS-RTK测量坐标, mm, X'、Y'、Z' 分别为检查点3个方向空三解算坐标, mm。

《CH/Z 3003-2010低空数字航空摄影测量内业规范》规定数字线划图(B)类、数字正射影像图(B)类制作时, 内业加密点对附近野外控制点的平面位置中误差、高程中误差不应大于表5规定。

表5 平面点位精度、高程精度规定
Table 5 Precision of plane point and elevation point

成图比例尺	平地平面点位中误差	平地高程中误差
1 : 500	0.4	0.35
1 : 1 000	0.8	0.35
1 : 2 000	1.75	1.0

由表4并结合表5规范要求可知, 4种方案的平面方向都可满足1 : 500比例尺成图精度, 高程方向可达1 : 2 000比例尺成图精度。

由2.2节表2布点方案及表4可知, 方案1比方案2少布设50%的像控点, 但空三加密点及成图精度基本一致。因此在地势平坦的平原地区, 可按照基线间隔为10布设野外像控点, 保证精度的同时可有效节约成本, 提高工作效率, 方案1优于方案2。方案1

和方案3对比, 其像控点数量基本一致, 但方案3通过在研究区中心区域添加像控点的方式减小了航带间隔数, 使像控点分布更加合理, 方案3的平面点位精度和高程精度均较方案1有所提高, 方案3优于方案1。方案3、4的布点方案相同, 但方案4未采用航片POS数据, 其高程精度明显降低, 对比发现在无人机航测过程中获取每张航片的高精度POS数据可以显著提高成果高程精度, 方案3优于方案4。

综上所述, 本文所提布设方案3精度最优, 因此针对平原地区, 可采取基线间隔数为10、航带间隔数为4的像控点优化布设方案。实验证明该方案可满足平面1 : 500比例尺及高程1 : 2 000比例尺测图的精度要求, 该方案在保证精度的同时可提高工作效率、降低工作量。

3.2 测区DSM、DOM及精度提升措施

根据2.2节所述布点方案3, 利用Pix4Dmapper软件解算高精度空三加密成果, 经特征点匹配可生成三维点云并制作研究区数字表面模型DSM, 进一步联合空三加密成果和DSM可生成研究区的数字正射影像图DOM, 见图6。

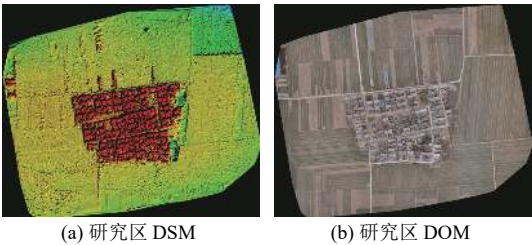


图6 研究区DSM及DOM
Fig.6 DSM and DOM in the study area

无人机大比例尺测图误差来源主要是外业像控点测量误差、影像匹配误差、内业像控点刺点误差、POS数据误差、飞行误差及内业立体量测误差。为此,提出如下精度提升措施:

(1) 选择气象条件较好的时段进行无人机航测保证成图精度,减弱飞行误差并提高影像匹配准确度;航摄完成后,现场检查飞行质量与影像质量。

(2) 采用GPS实时动态载波相位差分测量像控点坐标,提高像控点测量精度。

(3) 像控点布设保证上空开阔,点位标志设置清晰醒目,便于内业刺点识别。

(4) 飞行前检定相机参数,采用云台稳固安装在无人机上,提高影像拍摄稳定性,采用较为全面的畸变参数可最大限度地提升航测成果精度。

(5) 无人机航片后处理软件众多,如Context Capture及Pix4Dmapper等,其中空三加密平差算法是各软件关键部分,应选取高精度后处理软件提高空中三角测量解算精度。

4 结论

像控点布设是无人机低空数字摄影测量工作的关键技术,对像控点布设方法进行分析并结合研究区测图实践,设计基于区域网法布点方案的4种像控点优化布设方案,根据空三加密成果、野外检核点及测图成果产品,对比其精度和像控点数量,得出结论如下:

(1) 空三加密平差计算后四种方案的平面点位中误差接近,精度为10~11 mm;高程方向精度差异明显,未采用航片高精度POS数据的方案4精度最低,说明POS数据辅助解算可显著提升高程方向精度。

(2) 平原地区,各方案平面精度均达到1:500比例尺测图要求,高程精度达到1:2000比例尺测图要求;精度分析证明基于区域网法布点方案进行优化,当基线间隔数为10、航带间隔数为4时布设方案最佳。

(3) 指出无人机大比例尺测图误差来源,进一步从气象条件、外业检查、像控点控制测量、影像匹配、相机检定及空三解算等方面提出精度提升措施。

本文分析平原地区基于区域网法的像控点布设优化方案,得到满足规范要求的最佳方案。该方案有利于减少无人机航测野外像控工作量,提高航测效率,为大比例尺地形图测绘提供精度保障,为无人机航测多元化、产业化发展提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 李德仁,李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 505-513.
LI D R, LI M. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University., 2014, 39(5): 505-513.
- [2] 余俊鹏,何灿荣. GPS-RTK辅助近景摄影测量光束法平差及精度分析[J]. 广东工业大学学报, 2017, 34(6): 73-77.
YU J P, HE C R. An accuracy analysis of GPS-RTK assisted close-range photogrammetric bundle adjustment [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2017, 34(6): 73-77.
- [3] 刘俊楠,刘海砚,陈晓慧,等. 测绘领域研究热点可视化分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 43-51.
LIU J N, LIU H Y, CHEN X H, et al. Visual analysis of hot-spots in the field of surveying and mapping [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 43-51.
- [4] 雷添杰,李长春,何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178-183.
LEI T J, LI C C, HE X Y. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178-183.
- [5] 许桃园. 遥感在自然资源工作中的应用浅析[J]. 测绘通报, 2019(S1): 90-92.
XU T Y. Application of remote sensing in natural resources work [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S1): 90-92.
- [6] 姜三,许志海,张峰,等. 面向无人机倾斜影像的高效SfM重建方案[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(8): 1153-1161.
JIANG S, XU Z H, ZHANG F, et al. Solution for efficient SfM reconstruction of oblique UAV images [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(8): 1153-1161.
- [7] 赵业隆,吉长东,杜全叶. 电力线巡检的无人机数字正射影像制作[J]. 测绘科学, 2018, 43(9): 146-152.
ZHAO Y L, JI C D, DU Q Y. Digital orthophoto map making based on UAV electric power line inspection [J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(9): 146-152.
- [8] 史经,谢伟秋. 无人机航测技术在农村土地承包经营权确权调查底图制作中的应用[J]. 测绘通报, 2017(9): 92-95.
SHI J, XIE W Q. Application of unmanned aerial vehicle aerial survey technology in base map making for survey of rural land contract management right [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(9): 92-95.
- [9] 贾智乐. 飞马F200无人机在大型水利工程及BIM建设中的应用[J]. 测绘通报, 2019(9): 159-162.
JIA Z L. Application on large-scale water conservancy projects and BIM construction by FEIMA F200 UAV [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(9): 159-162.