

无人机遥感控制点布设优化方案 及其模型精度分析研究

毕瑞¹, 甘淑^{*1,2}, 李绕波¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 云南省高原山地空间信息测绘技术应用工程研究中心, 昆明 650093)

摘要: 以云南省昆明市五华区昆明理工大学莲华校区为例, 利用无人机进行倾斜摄影测量, 设计四种不同控制点布设方案, 结合 Smart3D 实现三维模型构建, 并对三维模型精度进行分析, 提出控制点布设优化方案。通过空三精度、模型特征点坐标值和长度值精度分析得到: 选取四周均匀中间加密的控制点布设方案能较好地建模; 空三平面精度为 0.0008m、高程精度为 0.0004m; 控制区域内检查点平面精度为 0.0484m、高程精度为 0.0384m, 控制区域外检查点平面精度为 0.1003m、高程精度为 0.0494m; 控制区域内检查边精度为 0.0205m, 控制区域外检查边精度为 0.0689m。

关键词: 无人机; 优化方案; 控制点布设; 三维模型构建; 精度分析

中图分类号: P231

文献标识码: A

Research on location of control points for UAV remote sensing and model accuracy analysis

Bi Rui¹, Gan Shu^{*1,2}, Li Raobo¹

(1. *School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;*
2. *Research Center of Applied Engineering of Spatial Information Surveying and Mapping Technology of Plateau Mountain in Yunnan Province, Kunming 650093, China*)

Abstract: Taking Lotus Campus of Kunming University of Science and Technology in Wuhua District, Kunming City, Yunnan Province as an example, four different control points' layouts are designed for aerial vehicle oblique photogrammetry, and 3D model construction is realized by combining Smart3D, and the accuracy of 3D model is analyzed, and the optimized control point layout is proposed accordingly. Through the precision analysis of aerial triangulation, the coordinate value of characteristic points and the length value, it can be concluded that the control points' layout scheme with uniform and intermediate densifying is better. The plane accuracy is 0.0008m and the elevation accuracy is 0.0004m. The plane accuracy of checkpoints in the control area is 0.0484m, the elevation accuracy is 0.0384m, the plane accuracy of checkpoints outside the control area is 0.1003m, and the elevation accuracy is 0.0494m. The inspection side length accuracy in the control area is 0.0205m, while the inspection side length accuracy outside the control area is 0.0689m.

Key words: UAV; optimization; placement of control points; 3D model construction; precision analysis

收稿日期: 2020-03-23; 修订日期: 2020-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41861054, 41561083)。

作者简介: 毕瑞 (1996-), 男 (彝族), 云南昆明人, 硕士。

* 通讯作者: 甘淑 (1964-), 女, 云南腾冲人, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: 1193887560@qq.com.

0 引言

无人机倾斜摄影测量技术具有低空作业、成本低、机动性强、多维获取高精度影像数据等特点^[1,2]。随着摄影测量技术的发展和相关技术的不断成熟,低空无人机倾斜摄影测量应用越来越广泛,例如在地质灾害监测、三维模型构建、农作物产值估算等方面^[3-8]。

就目前的发展而言,航测精度的要求越来越高,控制点的布设方案和控制点数量对航测精度产生了重要的影响^[9]。周旺辉等利用低空无人机摄影测量技术获取住宅区正射影像数据,通过进行空中三角测量和DOM模型的精度分析,得到一套最佳的控制点布设方案^[10];黄皓中等利用无人机遥感,获取矿区影像数据,利用不同控制点数目生成多幅DEM数据,分析控制点对影像精度的影响,提出满足小区域的控制点布设方案^[9];朱进等通过获取丘陵地区无人机影像数据,通过6种无人机控制点布设方案的空三精度对比实验,提出四角均匀、内部加控的最佳布控方案^[11];李万能等通过对山区、丘陵及沿海、平原等研究区的控制点布设的深入研究,提出按网状均匀分布控制点,平原地区点位距离350~400m,山地点位距离200~300m,能满足1:2000地形图的精度要求^[12]。

本文以云南省昆明市五华区昆明理工大学莲华校区为例,在不同控制点布设方案下实现校区三维模型构建,通过空三精度分析、模型特征点坐标值和长度值定量分析,探讨不同控制点布设方案下模型的精度,以此得到小范围区域的最优高精度控制点布设方案和最佳三维模型。

1 实验数据采集

1.1 实验区

实验区选取云南省昆明市五华区昆明理工大学莲华校区,其地理位置为 $102^{\circ}70'31''E \sim 102^{\circ}70'54''E$, $25^{\circ}06'38''N \sim 25^{\circ}06'87''N$,整体呈条带状分布,地形起伏平坦。测区长约0.564km,宽约为0.180km,测区面积约为 0.102km^2 。实验区建筑群多、内部道路规整,植被、草地、池塘等均有分布。实验区视野开阔,周边遮挡物较少,卫星信号稳定,有利于无人机低空飞行和数据获取。研究区位置如图1所示。

1.2 无人机飞行摄影数据采集

采用大疆 Phantom 3-Advanced 四旋固定翼无人机获取影像数据,无人机基本参数如表1所示。无人机飞行高度为60m,为了尽可能减少外界条件所

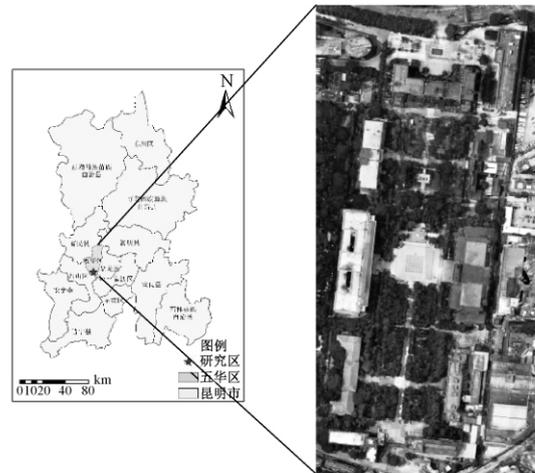


图1 研究区

Fig.1 Research area

带来的误差,航向重叠度和旁向重叠度均设置为80%,以保证影像数据重叠度的完整。

表1 无人机参数信息

Table 1 UAV parameter information

无人机型号	Phantom 3-Advanced
相机型号	FC300X
影像传感器	CMOS 1/2.3 英寸
相机像素	1200万 (4000* 3000)
最大光圈	F/2.8
定位信息	GPS/GLONASS 双模式定位系统
视场角 (FOV)	94°
最快飞行速度	16m/s
飞行时间	约 23min
工作环境温度	0°C ~ 40°C

由于采用低空飞行,受传感器视场角的限制,需要进行多条航线的设置^[14]。无人机搭载单镜头,为了进行三维模型的构建,需调整镜头位置,获取实验区5个方向(正视、前视、后视、左视、右视)的数据。利用Altizure飞行控制软件设置航线、飞行高度、重叠度等参数。具体飞行参数和航线布设如表2、图2所示。获取不同视角的倾斜影像数据如图3所示。

表2 飞行参数

Table 2 Flight parameters

航高	飞行角度	镜头倾角	影像数量	架次	航线数量	重叠度
60m	正视	90°	461	2	29	80%
	前视	45°	584	2	38	
	后视		537	2	38	
	左视		546	2	13	
	右视		570	2	13	

1.3 地面控制点布设及点位测量

选取控制点之前,利用无人机获取一组正射影

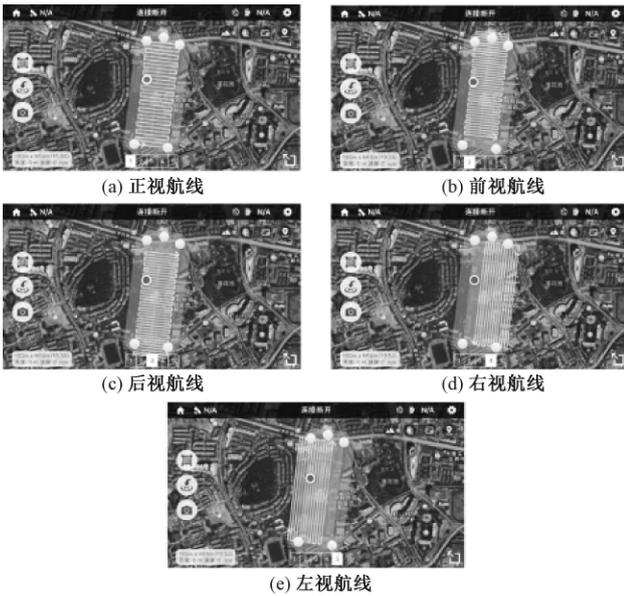


图2 无人机航线
Fig.2 UAV route

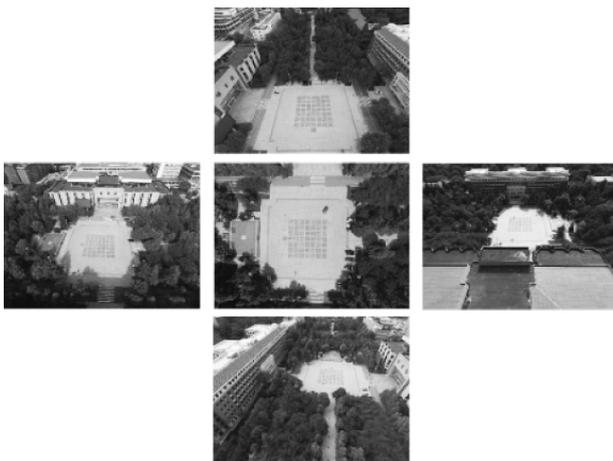


图3 不同视角下的倾斜影像
Fig.3 Oblique images from different angles

像数据。根据正射影像图 (DOM) 上实际地形情况与控制点布设的原则, 初步预选控制点的位置, 再根据预选位置对实地进行控制点的选取^[12]。利用实时动态定位 (Real-Time Kinematic, RTK) 获取控制点坐标系为 CGCS2000 的坐标信息。为了方便刺点和对模型精度的分析, 选取视野开阔、具有明显地物特征的点位, 共实测 38 个地面点位 (平面精度 $\pm 10\text{mm}$ 、高程精度 $\pm 15\text{mm}$), 可作为控制点和检查点。点位分布情况如图 4 所示。

2 实验研究技术方法

2.1 研究技术路线

本实验利用 Smart3D Capture 专业无人机遥感影



图4 点位分布情况
Fig.4 Distribution of points

像处理软件对数据进行处理。分别从控制点布设对空三精度的影响和不同布设方案下模型精度的角度入手, 对倾斜摄影测量数据的成果精度进行分析: ①不同控制点布设方式下, 空三精度的分析; ②根据控制点和检查点的三维坐标值的变化量、模型测量值与实测值之间的变化量, 计算各轴向中误差, 统计不同布设方案下模型量测值与实测值之间的变化量。具体技术路线如图 5 所示。

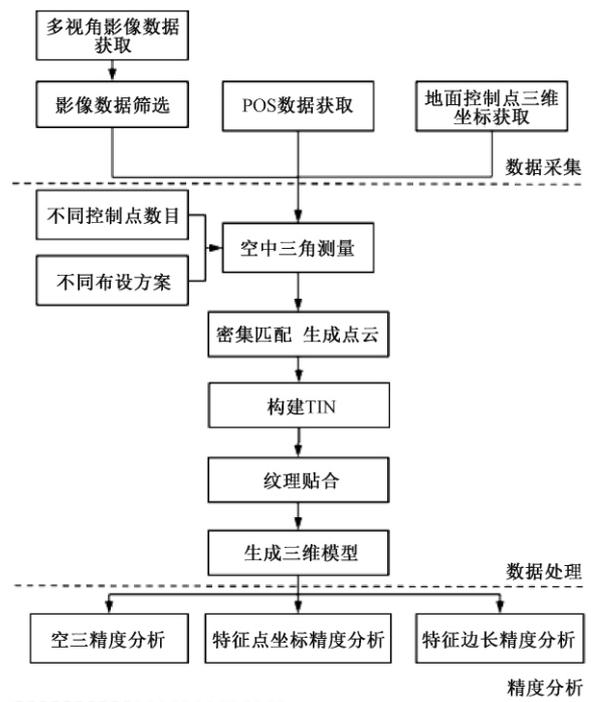


图5 技术路线
Fig.5 Technical route

2.2 面向建模处理的控制点布设优化方案设计

为了探讨不同控制点布设方案对模型精度的影响, 基于采集的 38 个地面控制点, 设计 4 种不同的控制点布设方案, 从空三精度分析、检查点中误差和特征边中误差精度比较, 针对实验区提出最优布设方案。传统的布设方式主要包括: 航线网布设、区域网布设和针对特殊地形的特殊布设方式^[10-14]。

针对低空无人机倾斜影像数据的特点，结合实验区规则性几何形态及其中的建筑物分布基本状

况，提出了 4 种不同的控制点布设方案，具体布设方案如图 6 所示。

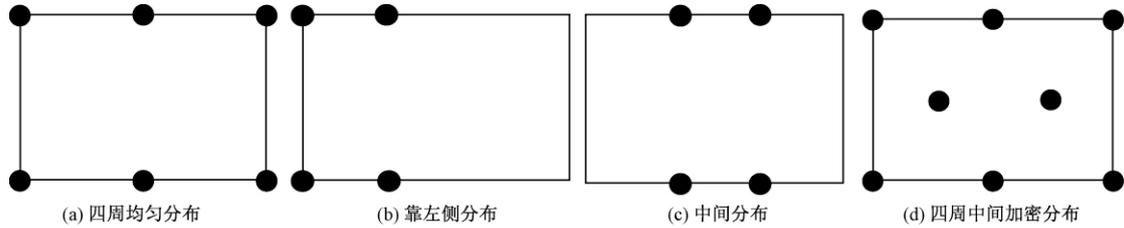


图 6 无人机四种控制点布设方式

Fig. 6 Four ways to set up control points of UAV

不同控制点布设方案 (如图 7 所示): ①采用均匀布设的方式 (方案 (a)), 尽可能覆盖整个测区, 控制点 7 个, 检查点 31 个; ②采用靠左侧布设的方式 (方案 (b)), 整个测区不能完全覆盖, 控制 8 个, 检查点 30 个; ③采用中间布设的方式

(方案 (c)), 覆盖测区中部区域, 边缘区域覆盖较少, 控制 8 个, 检查点 30 个; ④采用四周均匀、中间加密的布设方式 (方案 (d)), 整体覆盖整个测区, 控制点 12 个, 检查点 26 个。

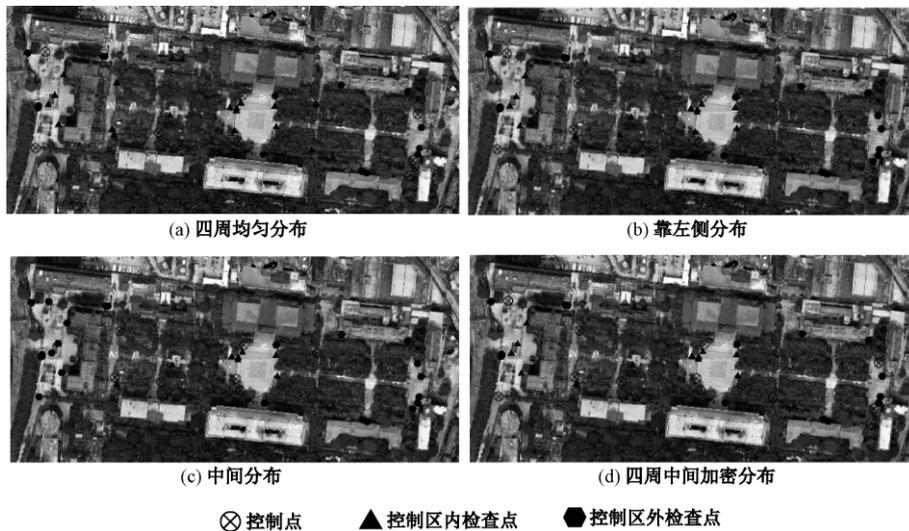


图 7 不同控制点布设方案

Fig. 7 Different control point layout schemes

3 不同控制点布设方案下建模精度分析

3.1 不同控制点布设方案下的特征点位精度对比分析

首先, 根据建立的模型, 从模型上选取 25 个与实测地面点对应的特征点, 结合已有的 13 个控制点组合成为共同检查点, 将检查点分为控制区内的检查点和控制区外的检查点, 根据模型坐标值与实测值之间的差值进行精度分析; 其次, 从模型上获取长度量测值与实测值之间进行精度分析; 最后, 通过中误差来探讨控制点布设对模型精度的影响。不同控制点设方案下空三和检查点精度如表 3、图 8~11 所示。

采用方案 (a), 空三平面精度为 0.0011m、高

程中误差为 0.0006m、三维中误差为 0.0012m; 控制区内检查点平面中误差为 0.0701m、高程中误差为 0.0435m、三维中误差为 0.0825m; 控制区外检查点平面中误差为 0.1618m、高程中误差为 0.0735m、三维中误差为 0.1777m。

采用方案 (b), 空三平面精度为 0.0010m、高程中误差为 0.0006m、三维中误差为 0.0012m; 控制区内检查点平面中误差为 0.0659m、高程中误差为 0.0496m、三维中误差为 0.0825m; 控制区外检查点平面中误差为 0.1763m、高程中误差为 0.0894m、三维中误差为 0.2372m。

采用方案 (c), 空三平面精度为 0.0023m、高程中误差为 0.0006m、三维中误差为 0.0024m; 控制区内检查点平面中误差为 0.0702m、高程中误差

表 3 不同控制点布设方案对空三和检查点中误差的精度分析

Table 3 The precision analysis of the error in areal triangle and check points in different control point layout schemes

检查项目	布设方案	精度分析 (m)				
		平面精度			高程和三维精度	
		σ_x	σ_y	σ_{xy}	σ_z	σ_{xyz}
空三精度	方案 (a)	0.0008	0.0006	0.0011	0.0006	0.0012
	方案 (b)	0.0007	0.0007	0.0010	0.0005	0.0011
	方案 (c)	0.0009	0.0022	0.0023	0.0006	0.0024
	方案 (d)	0.0006	0.0005	0.0008	0.0004	0.0009
控制区内检查	方案 (a)	0.0497	0.0494	0.0701	0.0435	0.0825
	方案 (b)	0.0463	0.0470	0.0659	0.0496	0.0825
	方案 (c)	0.0523	0.0468	0.0702	0.0554	0.0894
	方案 (d)	0.0298	0.0381	0.0484	0.0384	0.0618
控制区外检查	方案 (a)	0.1353	0.0887	0.1618	0.0735	0.1777
	方案 (b)	0.1303	0.1188	0.1763	0.0894	0.2372
	方案 (c)	0.1589	0.1228	0.2008	0.1263	0.2372
	方案 (d)	0.0770	0.0642	0.1003	0.0494	0.1118

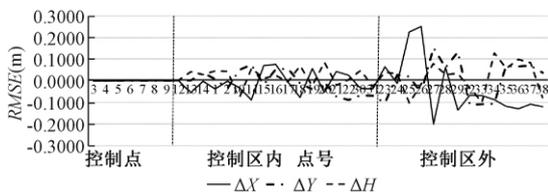


图 8 方案 (a) 检查点精度分析

Fig. 8 Program (a) check points' precision analysis

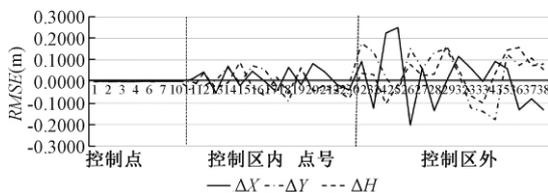


图 9 方案 (b) 检查点精度分析

Fig. 9 Program (b) check points' precision analysis

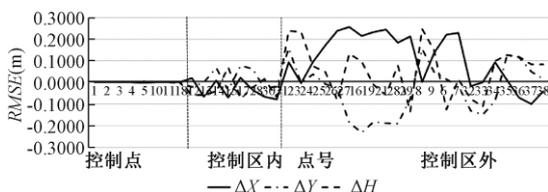


图 10 方案 (c) 检查点精度分析

Fig. 10 Program (c) check points' precision analysis

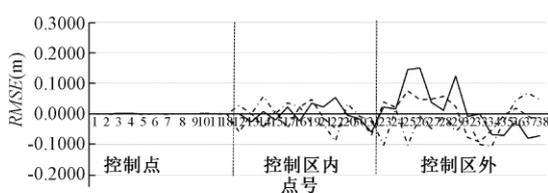


图 11 方案 (d) 检查点精度分析

Fig. 11 Program (d) check points' precision analysis

为 0.0554m、三维中误差为 0.0618m; 控制区外检

查点平面中误差为 0.2008m、高程中误差为 0.1263m、三维中误差为 0.2372m。

采用方案 (d)，空三平面精度为 0.0008m、高程中误差为 0.0004m、三维中误差为 0.0009m; 控制区内检查点平面中误差为 0.0484m、高程中误差为 0.0384m、三维中误差为 0.0894m; 控制区外检查点平面中误差为 0.1003m、高程中误差为 0.0494m、三维中误差为 0.1118m。

由不同布设方案下检查点的精度对比分析得到: ①当检查点离控制区越近, 误差越小, 离控制区越远, 误差越大; ②垂直方向的中误差优于平面中误差; ③当四周中间加密布设控制点时, 空三精度、检查区域内、检查区域外检查点中误差精度较高, 空三平面中误差为 0.0008m、高程中误差为 0.0004m, 控制区域内检查点平面中误差为 0.0484m、高程中误差为 0.0384m, 控制区域外检查点平面中误差为 0.1003m, 高程中误差为 0.0494m, 均优于其他布设方案。

3.2 不同控制点布设方案下的特征边长精度对比分析

对于三维模型精度评定, 模型的几何长度值也是一个关键的评定指标^[16]。基于三维模型 (如图 12 所示), 整体模型分辨率可以达到 0.013 ~ 0.062m。利用 Acute3D Viewer 获取不同布设方案下 22 条具有代表性的边长值 (建筑物、道路、花坛边、楼梯边长度等), 并利用全站仪获取对应的 22 条边长的实际量测值 (测量精度 ±2mm)。通过模型值与实际量测值进行对比分析, 整理得到检查边对比分析, 结果如表 4、图 13 ~ 16 所示。

采用方案 (a)，控制区内检查边误差最大值为



图 12 三维模型成果

Fig. 12 Three-dimensional model results

表 4 检查边中误差精度分析

Table 4 Check the margin error accuracy analysis

检查区域	布设方案	检查边中误差 (m)
控制区内检查	方案 (a)	0.0467
	方案 (b)	0.0471
	方案 (c)	0.0190
	方案 (d)	0.0205
控制区外检查	方案 (a)	0.1100
	方案 (b)	0.0985
	方案 (c)	0.1098
	方案 (d)	0.0689

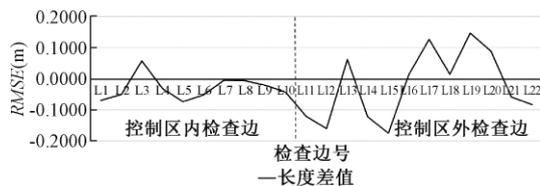


图 13 方案 (a) 检查边精度分析

Fig. 13 Program (a) check edges' precision analysis

0.0575m、误差最小值为-0.0729m；控制区外检查边误差最大值为0.1466m、误差最小值为-0.1742m。

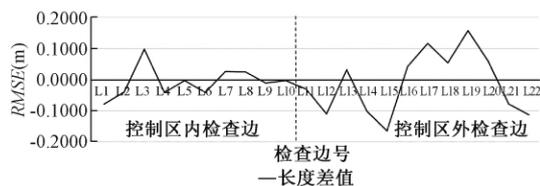


图 14 方案 (b) 检查边精度分析

Fig. 14 Program (b) check edges' precision analysis

采用方案 (b)，控制区内检查边误差最大值为0.0975m、误差最小值为-0.0788m；控制区外检查边误差最大值为0.1566m、误差最小值为-0.1642m。

采用方案 (c)，控制区内检查边误差最大值为0.0255m、误差最小值为-0.0288m；控制区外检查边误差最大值为0.1661m、误差最小值为-0.1902m。

采用方案 (d)，控制区内检查边误差最大值为0.0275m、误差最小值为-0.0399m；控制区外检查

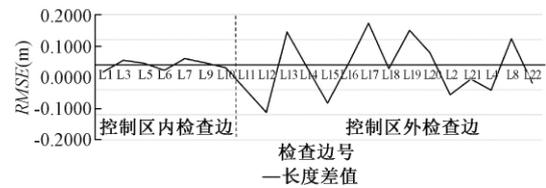


图 15 方案 (c) 检查边精度分析

Fig. 15 Program (c) check edges' precision analysis

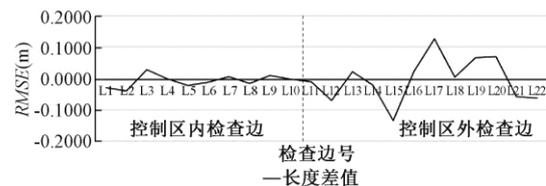


图 16 方案 (d) 检查边精度分析

Fig. 16 Program (d) check edges' precision analysis

边误差最大值为0.1261m、误差最小值为-0.1342m。

通过检查边模型值与实测值之间的精度分析得到：①位于控制区域内的检查边精度较高，距离控制区越远，精度越低；②当控制点为四周中间加密布设时，整体精度较高，控制区域内检查边中误差为0.0205m、误差最大值为0.0275m、误差最小值为-0.0399m；控制区域外检查边中误差为0.0689m、误差最大值为0.1261m、误差最小值为-0.1342m，整体优于其他布设方案。

4 结论

本次实验利用低空无人机 (Phantom 3-Advanced) 获取影像数据，结合不同控制点布设方案，实现三维模型的构建，结合 RTK 和全站仪进行实际测量，对不同控制点布设方案下的三维模型进行空三精度、检查点和检查边的对比分析。通过实验对比分析，得出如下结论：

(1) 对于该试验区，随着控制点数目的增加，空三解算精度逐步提高，当控制点的数目大于等于 8 个时，整体精度趋于稳定，随着控制点数目的增加，解算精度不再有显著提高，布设较多控制点无疑会增加工作量；

(2) 不同布设方案下，检查点和检查边越靠近控制点布设区域，精度越高，距离控制区域越远、处于模型边缘区域时，精度逐渐降低；

(3) 本文针对实验区，设计了 4 种不同的控制点布设方案，探讨不同布设方案下三维模型的精度。对比分析得到：对于低空、小范围区域，采用四周中间加密布设控制点的方案，模型的整体精度较高，模型内部和边缘区域精度较高，有利于模型构建。

本文仅针对城市低空、小范围区域进行精度分

析,影像数据过于单一,并未考虑其他地形情况下不同控制点布设方案对模型精度的影响,未能得出一套广泛适用于不同地形下的最优控制点布设方案。对于模型精度中存在的误差并没有考虑飞行器自身带来的误差以及镜头分辨率的影响,但对于城市低空、小范围三维模型构建来说,具有一定的研究意义。

参 考 文 献

- [1] 康玉霄,桑文刚,李娜等. 无人机低空摄影测量数据处理及应用 [J]. 测绘通报, 2017, (S1): 62~65.
Kang Yuxiao, Sang Wengang, Li Na et al. Unmanned aerial vehicle low-altitude photogrammetry data processing and application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (S1): 62~65. (in Chinese)
- [2] 毕凯,李英成,丁晓波等. 轻小型无人机航摄技术现状及发展趋势 [J]. 测绘通报, 2015, (3): 27~31, 48.
Bi Kai, Li Yingchen, Ding Xiaobo et al. Aerial photogrammetric technology of light small UAV: Status and trend of development [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015, (3): 27~31, 48. (in Chinese)
- [3] 任娟. 基于无人机遥感与 GIS 技术的泥石流灾害监测 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Ren Juan. Debris flow hazard assessment based on UAV remote sensing and GIS [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [4] 熊强,王双亭,王晓宇等. 基于 Smart3D 的倾斜摄影测量模拟系统三维建模 [J]. 测绘工程, 2018, 27 (7): 55~59.
Xiong Qiang, Wang Shuangting, Wang Xiaoyu et al. 3D modeling of oblique photogrammetry simulation system by Smart3D [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27 (7): 55~59. (in Chinese)
- [5] 张宏鸣,谭紫薇,韩文霆等. 基于无人机遥感的玉米株高提取方法 [J]. 农业机械学报, 2019, (5): 241~250.
Zhang Hongming, Tan Ziwei, Han Wenting et al. Method for extracting maize height based on UAV remote sensing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, (5): 241~250. (in Chinese)
- [6] 谭金石,黄书华,黄正忠. 基于无人机遥感的海岛礁监测技术研究 [J]. 测绘地理信息, 2018, 43 (6): 55~57.
Tan Jinshi, Huang Shuhua, Huang Zhengzhong. Research on island reef monitoring technology based on UAV remote sensing [J]. Journal of Geomatics, 2018, 43 (6): 55~57. (in Chinese)
- [7] 谢巧雅,余坤勇,邓洋波等. 杉木人工林冠层高度无人机遥感估测 [J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36 (2): 335~342.
Xie Qiaoya, Yu Kunyong, Deng Yangbo et al. Height measurement of Cunninghamia lanceolata plantations based on UAV remote sensing [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36 (2): 335~342. (in Chinese)
- [8] 邹雨甜,毛凯楠,任红容. 无人机影像在滑坡地质灾害调查中的应用 [J]. 科学技术创新, 2018, (25): 16~17.
Zou Yutian, Mao Kainan, Ren Hongrong. Application of UAV image in geological hazard investigation of landslide [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018, (25): 16~17. (in Chinese)
- [9] 黄皓中,陈建平,向杰等. 控制点布设对无人机遥感精度的影响 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18 (13): 310~313.
Huang Haozhong, Chen Jianping, Xiang Jie et al. The influence of control points distribution on UAV remote sensing accuracy [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18 (13): 310~313. (in Chinese)
- [10] 周旺辉,蔡东健,甄宗坤. 控制点布设对低空小型无人机高分影像精度的影响 [J]. 测绘通报, 2017, (S1): 69~74.
Zhou Wanghui, Cai Dongjian, Zhen Zongkun. Influence of control points' layout on accuracy of high resolution images acquired by low-altitude UAV [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (S1): 69~74. (in Chinese)
- [11] 朱进,丁亚洲,陈攀杰等. 控制点布设对无人机影像空三精度的影响 [J]. 测绘科学, 2016, 41 (5): 116~120.
Zhu Jin, Ding Yazhou, Chen Panjie et al. Influence of control points' layout on areo-triangulation accuracy for UAV images [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41 (5): 116~120. (in Chinese)
- [12] 李万能,唐庆忠,陈黎. 无人机航摄像控点数量对空三解算精度的影响 [J]. 测绘通报, 2017, (S1): 84~89, 99.
Li Wanneng, Tang Qingzhong, Chen Li. The effect on control point number of UAV to the calculation accuracy of aerial triangulation [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017, (S1): 84~89, 99. (in Chinese)
- [13] 柏宏强,夏永华,李泽邦等. 高海拔山区像控点分布对测量精度的影响分析 [J]. 软件, 2018, 39 (9): 144~148.
Bai Hongqiang, Xia Yonghua, Li Zebang et al. Analysis of influence of image control point distribution on measurement accuracy in high altitude mountain areas [J]. Computer Engineering & Software, 2018, 39 (9): 144~148. (in Chinese)
- [14] Patricio Martínez-Carricondo, Francisco Agüera-Vega, Fernando Carvajal-Ramírez et al. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points [J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2018, 72.
- [15] 张纯斌,杨胜天,赵长森等. 小型消费级无人机地形数据精度验证 [J]. 遥感学报, 2018, 22 (1): 185~195.
Zhang Chunbin, Yang Shengtian, Zhao Changsen et al. Topographic data accuracy verification of small consumer UAV [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22 (1): 185~195. (in Chinese)
- [16] 郑盼. 基于 Smart3D 软件的无人机倾斜摄影三维建模及精度评价 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Zheng Pan. 3D modeling and accuracy evaluation of UAV inclination photogrammetry based on Smart3D software [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018. (in Chinese)