

无人机地形建模误差空间分布影响因素研究

卢旺达^{1,2}, 王 春^{2,3}, 代 文^{1,4}, 钱 伟¹,
李 敏³, 位 宏⁵, 杨 昕⁵

(1.南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,江苏 南京 211800)

(2.实景地理环境安徽省重点实验室,安徽 滁州 239000)

(3.滁州学院地理信息与旅游学院,安徽 滁州 239000)

(4.南京信息工程大学地理科学学院,江苏 南京 211800)

(5.南京师范大学地理科学学院,江苏 南京 210023)

[摘要] 无人机发展迅速,已经在地球科学领域得到了广泛应用.前人以中误差(root mean square error, RMSE)为精度评价指标对影响无人机摄影测量精度的各类因素进行了大量研究.但是,基于无人机摄影测量的地形建模误差往往空间上变化分布,中误差无法反映误差的空间分布特征.因此,本文从误差空间分布的视角出发,通过计算误差空间分布图、误差的莫兰指数、样区整体的平均误差和标准误差,分析了相机倾角、航高和控制点数量对地形建模高程误差的大小及空间分布的影响.在黄土高原两个小流域的实验结果表明:(1)在无控制测量的情况下,误差受相机倾角的影响较大,采用较大角度的倾斜摄影不仅可以降低整体误差,还能改善误差的空间分布,减少误差的空间自相关性.(2)航高方面,尽管航高(60~160 m)变高会增大误差,但是航高对误差的空间分布影响不大.(3)在有控制测量的情况下,控制点的使用不仅降低了整体误差也优化了误差空间分布.在整体误差方面,使用少量的控制点即能达到一个稳定的精度水平.但此时,误差的空间分布还可以继续优化,要使样区的误差空间分布达到稳定的水平,需要相对较多的控制点.本研究为使用消费级无人机进行地形建模提供了有益的参考,在实际应用中可根据本文的结论优化航线设计方案和控制点布设.

[关键词] 消费级无人机,地形建模,图像采集策略,误差空间分布,控制点数量

[中图分类号] P231 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)02-0044-10

Study on the Influencing Factors of Spatial Distribution of Errors in UAV-Based Terrain Modeling

Lu Wangda^{1,2}, Wang Chun^{2,3}, Dai Wen^{1,4}, Qian Wei¹, Li Min³, Wei Hong⁵, Yang Xin⁵

(1.School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, China)

(2.Anhui Province Key Laboratory of Physical Geographical Environment, Chuzhou 239000, China)

(3.School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China)

(4.School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 211800, China)

(5.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the rapid development of UAVs, it has been widely used in the field of geoscience. A large number of previous studies have analyzed the various factors that affect the accuracy of UAV photogrammetry with RMSE as the accuracy evaluation index. However, terrain modeling errors based on UAV photogrammetry are often distributed in space, and RMSE cannot reflect the spatial distribution characteristics of errors. Thus, from the perspective of the spatial distribution of errors, this paper analyzes the influence of camera angle, flight height and the number of ground control points on the elevation error and spatial distribution of terrain modeling by calculating spatial distribution of errors,

收稿日期:2022-07-24.

基金项目:国家自然科学基金项目(42171402、41930102)、安徽高校省级自然科学研究重大项目(KJ2021ZD0130)、江苏省高等学校自然科学研究项目(22KJB170016)、实景地理环境智能科技滁州市“113”产业创新团队、实景地理环境安徽省重点实验室开放课题(2022PGE013)、南京信息工程大学科研启动经费(2022-019).

通讯作者:代文,博士,讲师,研究方向:数字地形分析与实景三维建模. E-mail:wen.dai@nuist.edu.cn

Moran's Index of error, mean error and standard deviation error. Two small watershed areas on the Loess Plateau are selected as the study area. The experimental results show that: (1) Without ground control points, the error is greatly affected by the camera angle. Using higher oblique camera angles (higher than 10°) can not only reduce the overall error, but also improve the spatial distribution of errors and reduce the spatial autocorrelation of the error. (2) In the terms of flight height, although the increase of flight height (60–160 m) will increase the error, flight height has little effect on the spatial distribution of errors. (3) When there are GCPs, the use of GCPs reduces the overall error and optimizes the spatial distribution of errors. In the terms of overall error, a stable accuracy level can be achieved by using only a small number of GCPs. However, at this time, the spatial distribution of errors can continue to be optimized. More GCPs are required to make the spatial distribution of errors reach a stable level. This study provides a useful reference for terrain modeling using consumer UAV. In practical application, the measurement scheme and control points layout can be optimized according to the conclusions of this paper.

Key words: consumer UAV, terrain modeling, image collection strategies, spatial distribution of errors, GCPs

无人机具有灵活性高、成本低、操作性强、易转场等优点^[1],在地形建模^[2]、生态环境监测^[3-5]、植被信息提取^[6]、灾害应急^[7]等领域得到了广泛的应用。但是,消费级无人机一般搭载单镜头非量测相机,镜头畸变较大,相对于量测相机,其地形建模误差较大且分布不均匀^[8-9]。

前人对消费级无人机的地形建模精度进行了诸多研究。在众多影响因素中,航线设计和控制测量是影响建模精度的重要可控因素^[10]。其中,相机倾角、重叠率、航高等是航线设计的主要考虑因素。数据采集过程中,航高直接决定了地面分辨率,进而也影响了地形建模精度。Smith 等^[11]对已有研究总结发现,建模精度和航高的比值通常在 1:640~1:2 100 之间,具体比值与相机姿态和地面控制测量有关。在相机姿态方面,倾斜摄影可以提高无人机地形建模精度^[12-13]。对于消费级无人机,可通过“井”字型网格飞行或设置不同朝向的相机进行多次航线飞行实现类似于五镜头相机的倾斜摄影^[14]。研究表明,采用更高的重叠率和更高的相机倾角 ($20^\circ \sim 35^\circ$) 可以有效提高消费级无人机地形建模的整体精度^[12]。

在控制测量方面,控制点精度、数量和空间分布都是影响误差空间分布的重要因素。控制点精度主要受测量仪器影响,而控制点数量和空间分布可以在实际作业中灵活布设。在控制点分布方面,学者们已经逐渐形成共识,即控制点按边缘加中心的方式分布最佳^[15-17]。控制点数量越多,精度越高,但控制点达到一定数量后精度不再提高^[18]。

航线设计和控制测量的研究为优化无人机地形建模精度提供了理论和方法的支撑。但是,已有研究往往采用中误差作为精度评定指标对各类影响因素进行分析^[19-21]。然而,无人机地形建模的误差在空间上并不完全相同^[8,22]。虽然中误差能够代表研究区的整体精度,但是却无法反映误差的空间分布情况。无人机地形建模中,误差空间分布多被用于分析两期地形变化^[23-24]。而对于同期数据,James 等^[18]发现使用不同的控制点得到的 DEM 的误差在空间上变化分布。除此之外,还有学者研究了控制点空间分布对误差空间分布的影响,发现使用边缘分布方案时,高误差值集中在中间区域,低误差值分布在边缘,而使用均匀分布时,误差值整体较低且分布均匀^[25]。已有研究从误差空间分布视角对无人机地形建模影响因素分析时,主要针对控制测量因素,缺乏对其他影响因素的考虑。因此,本文针对无人机的航线设计和地面控制,设计不同相机倾角、航高和控制点数量,分析多个影响因素对误差空间分布的影响,提出消费级无人机地形建模的优化方法。

1 研究方法

1.1 研究区域

研究样区为黄土高原上两个小流域区域,分别位于陕西省榆林市绥德县刘家坪村(T1样区,经度为 $110^\circ 17' 3.2''\text{E}$,纬度为 $37^\circ 33' 48.8''\text{N}$)和王茂庄村(T2样区,经度为 $110^\circ 21' 45.7''\text{E}$,纬度为 $37^\circ 35' 12.8''\text{N}$)。T1样区面积大约 $5.1 \times 10^4 \text{ m}^2$,最大高差约 $1.0 \times 10^2 \text{ m}$,区域内植被稀少,内含冲沟、切沟形态,如图 1(a、c)所示,其中(c)为 T1 样区地形图。T2样区面积大约 $3.6 \times 10^4 \text{ m}^2$,最大高差约 $0.8 \times 10^2 \text{ m}$,区域内植被稀少,坡面修筑了梯田,如图 1(b、d)所示,其中(d)为 T2 样区地形图。两个区域地形起伏较大,有利于探索不同影响因素对地形建模的影响。

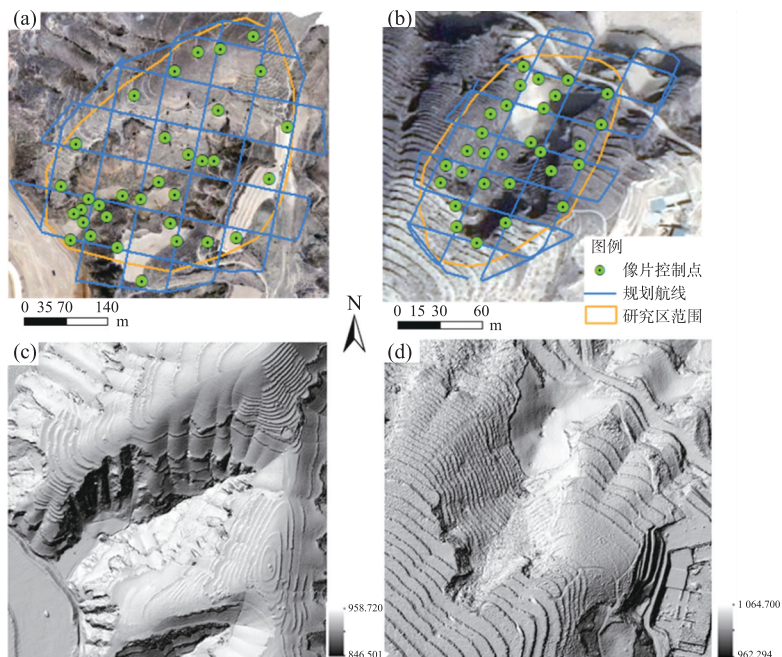


图 1 研究样区 T1(a)、T2(b)及对应地形图(c、d)

Fig. 1 The study area T1(a), T2(b) and topographic map(c、d)

1.2 无人机数据采集

1.2.1 影像数据采集

本次实验采用的无人机型号为大疆精灵 4 专业版(DJI-Phantom 4 Pro),为四旋翼消费级无人机.该无人机搭载索尼 Exmor R,2 000 万像素相机、1 英寸 CMOS 传感器,其视场角为 84°,等效焦距 35 mm.数据采集时间为 2021 年 3 月,样区中植被尚未长出,有利于开展无人机摄影测量地形建模.实验通过地面无线电遥控设备预先设置飞行航线、重叠度、相机倾角、航高等参数来控制无人机的姿态与航迹,以保证无人机稳定、精确地获取影像数据.

为探究相机倾角因素对摄影测量精度的影响,在保持飞行高度和重叠率固定不变的条件下进行不同相机倾角的实验.由于消费级无人机为单镜头,航线设计为“井”字形航线.航向重叠率和旁向重叠率均固定为 80%.考虑到相机倾角变大之后,飞行范围需要更大才能拍完整个研究区,相机倾角设置为 0°~40°(其中 0°表示垂直于地面的垂直摄影).由于样区起伏较大,每次起飞点选择在半山腰处,航高分别设置为 100 m 和 70 m,地面分辨率分别为 2.7 cm 和 1.9 cm,2 个样区合计飞行 14 架次,具体实验方案如表 1 所示.

除了相机倾角外,航高也是影响精度的重要因素.航高直接影响地面分辨率,间接影响高程测算精度.本研究主要关注大比例的地形建模精度.根据《低空数字航空摄影规范》(CH/Z 3005—2010)^[26]的要求,1:500 比例尺航摄地面分辨率应小于 5 cm,因此,此实验飞行高度设计在 60~160 m,地面分辨率为 1.6~4.4 cm.航高实验中同样保证相机倾角和重叠率固定不变,2 个样区合计飞行 12 架次,具体实验方案如表 2 所示.

表 1 无人机摄影测量相机倾角实验

Table 1 Experiment of camera angle of UAV photogrammetry

样区	相机倾角/(°)	航高/m	飞行架次	地面分辨率/cm
T1	0,5,10,20,30,35,40	100	7	2.7
T2	0,5,10,20,30,35,40	70	7	1.9

表 2 无人机摄影测量航高实验

Table 2 Experiment of flight height of UAV photogrammetry

样区	航高/m	相机倾角/(°)	飞行架次	地面分辨率/cm
T1	60,80,100,120,140,160	0	6	1.6~4.4
T2	60,80,100,120,140,160	15	6	1.6~4.4

1.2.2 地面控制测量

野外控制测量采用 GNSS-RTK 的方式. GNSS 接收机型号为拓普康 Hiper SR,控制点标靶大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$. 在 200 m 的航高内,标靶中心清晰可见. 为了保证控制点在平面上和高程上都均匀分布,在每个样区的山脊线、沟沿线和沟底布设了控制点. T1、T2 样区分别布设了 33、31 个像控点(图 1).

1.3 数据处理

无人机影像数据处理主要使用 Agisoft 公司开发的三维建模软件 Agisoft PhotoScan. 技术路线如图 2(a)所示,主要处理流程包括初步处理、空中三角测量、密集点云匹配、点云编辑与误差空间分布图生成.

为了验证不同航线设计方案在有像控和无像控两种情况下对地形建模精度的影响,数据处理分为无像控和有像控 2 组. 无像控时,为了将建模结果与参考数据进行对比和精度分析,本研究使用了 2 个控制点对空三模型进行地理配准(模型平移、旋转和缩放),但是这 2 个控制点不参与光束平差优化过程. 有像控时,还需要考虑控制点数量和控制点的空间分布这两个因素的影响. 对于控制点的空间分布,已有研究表明边缘加中心布设的方式在常用的 3 种方案(边缘布设、边缘加中心布设、中心布设)中表现最佳^[16](图 2(b)),因此,本研究在 2 个样区的边缘和中心均布设了大量控制点. 对于控制点的数量,本研究通过不断增加选取的控制点对样区进行了多次建模,从而研究控制点数量对建模结果的影响. 例如, T1 样区最开始选取 2 个控制点参与光束平差优化过程,然后不断增加选取控制点的数量,直到选取 30 个控制点参与光束平差优化过程. 在每次选取一定数量的控制点参与光束平差优化过程时,均采用边缘加中心的选点方式.

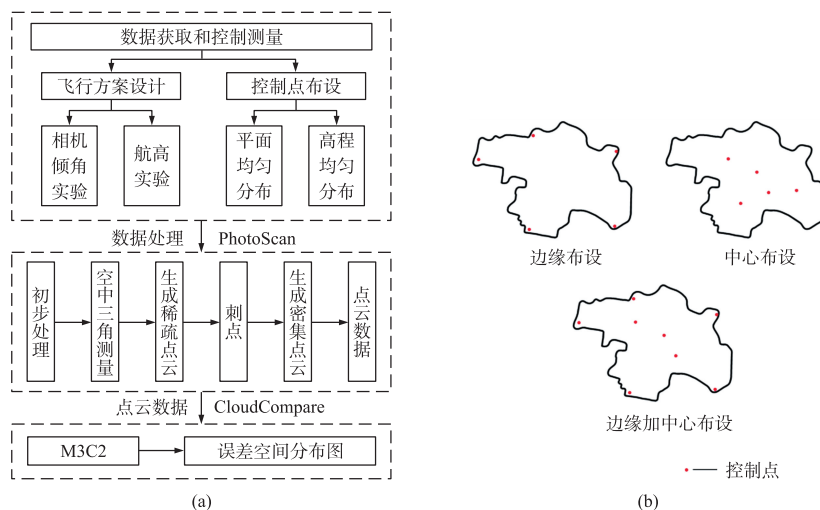


图 2 误差空间分布图生成流程图(a)、控制点布设方式示意图(b)

Fig. 2 Workflow of generating spatial distribution maps of errors (a) and distribution of GCPs (b)

1.4 精度评价

由于 2 个样区的控制点布设密度大,因此使用全部控制点参与摄影测量过程生成的密集点云数据具有较高的精度. 本研究以全部控制点生成的点云作为参考数据对 1.2 节中不同采集策略下生成的点云进行精度评价. 本研究主要关注地形高程上的误差. 首先,使用 CloudCompare 软件中的 M3C2 工具^[8]在 Z 方向对实验结果和参考数据进行作差,得到每一个点位的高程误差;然后,通过点云转栅格得到误差的空间分布图;最后,通过平均误差(ME)和标准误差(STD)来对样区整体的误差水平进行评估. 平均误差反映了样区整体的系统误差,平均误差较大则说明整个样区出现了系统误差,平均误差等于 0 则说明没有系统误差. 标准误差反映了随机误差的水平,标准误差越小则随机误差越小. 平均误差的计算公式如式(1)所示,标准误差的计算公式如式(2)所示.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - ME)^2}{n}}, \quad (2)$$

式中: n 代表整体数量; x_i 代表每一个误差测量值.

此外,为了量化误差空间分布的自相关性,本研究计算了不同实验方案下误差分布的莫兰指数,计算公式如式(3)所示.莫兰指数反映了误差的空间聚集特征,莫兰指数的值在 $-1\sim 1$ 之间.其值越接近于 1 ,则误差在空间上越聚集分布;其值越接近于 -1 ,则误差在空间上越接近于离散分布;其值为 0 ,则说明为随机分布.

$$I=\frac{n}{S_o}\cdot\frac{\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nw_{ij}z_iz_j}{\sum_{i=1}^nz_i^2},\tag{3}$$

式中: n 代表整体数量; w_{ij} 为要素 i 和 j 之间的空间权重; z_i 为要素 i 的误差值与其平均值的偏差; S_o 为所有空间权重的聚合($S_o=\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^nw_{ij}$).

2 结果与讨论

2.1 相机倾角对误差空间分布的影响

使用不同相机倾角的误差空间分布变化如图 3 所示,其中(a)、(b)分别为 T1、T2 样区误差空间分布图,(c)、(d)分别为 T1、T2 样区标准误差和平均误差折线图. T1 和 T2 样区的误差呈现出相同的空间分布模式. 当相机倾角为 0° 时,误差的分布呈现明显的空间聚类特征,正误差集中分布于沟谷区域,负误差集中于山脊区域. 当相机倾角大于等于 10° 后,误差空间分布较为均匀. 两个样区平均误差在相机倾角为 0° 时最大;当相机倾角大于 10° 后,平均误差接近于 0 ,说明整体上没有系统误差. 标准误差的变化趋势与平

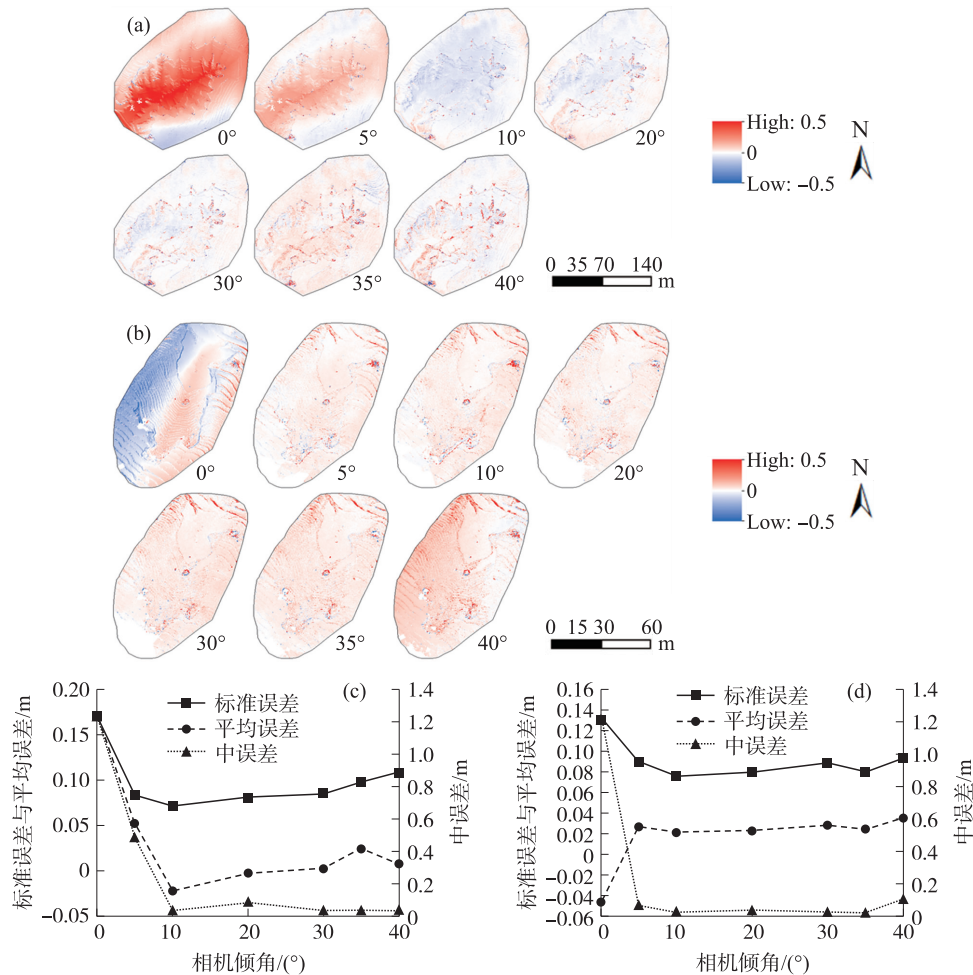


图 3 T1 样区(a、c)、T2 样区(b、d)相机倾角的误差空间分布图与精度折线图

Fig. 3 Spatial distribution maps of errors and precision value of camera angle for research area T1(a, c) and T2(b, d)

均误差相同,说明使用倾斜摄影不仅减少了系统误差,也降低了随机误差。

本实验中显示出的系统误差,可能与消费级非量测相机的自校准和镜头畸变校正不稳定有关。使用较大倾角的相机时,光束平差中地面点同名射线的交会角增大,有利于提高平差解算的稳定性。同时,PhotoScan在光束平差过程也考虑了相机镜头畸变参数,稳定的光束平差过程将优化相机镜头畸变参数。此外,倾斜角度更大的倾斜图像可以捕捉陡峭的斜坡,并匹配更多的连接点,这也加强了整个光束平差过程。本文还计算了检查点的中误差。检查点中误差代表了模型的整体精度,误差空间分布图是每一个点位的误差在空间上的可视化结果,二者概念具有很大区别,无法直接对比。但是,误差空间分布图的标准误差也代表了样区的整体精度,可以和中误差对比。通过对比控制点的中误差和误差空间分布图的标准误差,发现二者的整体趋势基本一致。

相机倾角误差的莫兰指数变化如图4所示。2个样区的莫兰指数值均为正数(P 均小于0.01, Z 均大于1.96),这表明误差的空间分布具有一定的空间正相关关系,即误差在空间上呈现为聚集性,这与图3的分析结果一致。但是,随着相机倾角的增加,莫兰指数迅速下降。相机倾角大于 10° 之后,莫兰指数逐渐稳定并趋近于0,说明此时误差近似于空间随机分布。综合图3和图4可以发现,使用较大倾角(大于 20°)的倾斜摄影不仅降低了整体测量误差,还改善了误差的空间分布。

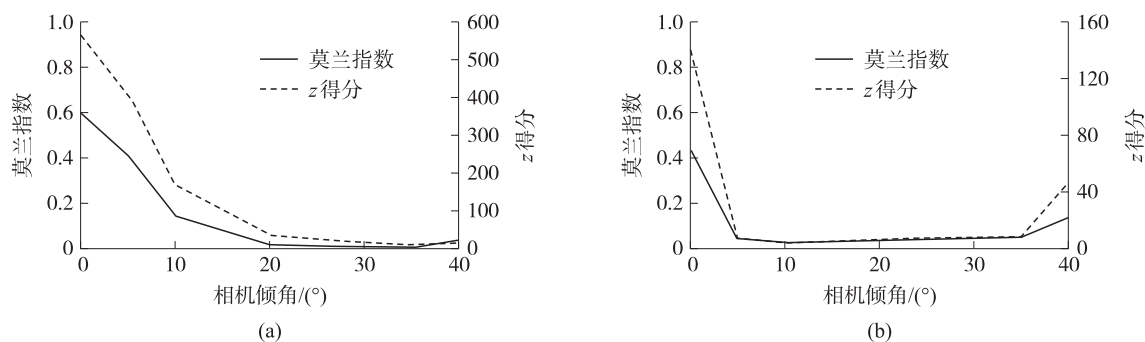


图4 T1样区(a)、T2样区(b)相机倾角误差的莫兰指数图

Fig. 4 Moran's I of camera angle error for research area T1 (a) and T2 (b)

2.2 航高对误差空间分布的影响

使用不同航高的误差空间分布变化如图5所示。T1样区中不同航高的误差水平均较大且航高变化对平均误差和标准误差没有显著的影响,而T2样区误差比T1样区低1个数量级且标准误差、平均误差与航高呈正相关关系。T1样区的误差数量级较大(0.5 m左右),远高于T2样区。这一结果验证了2.1节中的结论,即较大角度的倾斜摄影在地形复杂区降低了高程误差,并使误差空间分布更均匀。

T1样区的实验结果与预期结果差距较大。理论上随着航高增加,地面分辨率降低,高程误差也将随之增加。然而,T1样区由于采用垂直摄影,其误差数量级较大。本实验中的航高变化范围仅为60~160 m,在这一航高范围内的高程误差变化的数量级(厘米级)很可能远低于垂直摄影本身误差的数量级(分米级),导致本实验结果体现不出航高引起的误差变化。T2样区中,航高与平均误差、标准误差呈显著的正相关关系。T2样区采用了相机倾角为 15° 的倾斜摄影,其误差本身的数量级较小(厘米级),所以能体现航高引起的误差变化(厘米级)。T2样区的结果支持了T1样区的分析结论,也就是垂直摄影的误差数量级本身较大,掩盖了航高变化引起的误差变化。

此外,从图5还可以发现航高的变化(60~160 m)并不影响误差的空间分布。尽管航高在变化,由于2个样区的相机倾角没变,其误差的空间分布均表现为同一种模式。不同航高误差的莫兰指数计算结果也支持了这一结论(图6)。T1样区不同航高下误差的莫兰指数均很高,说明误差聚类分布。T2样区均很低,误差近似于随机分布。

2.3 控制点数量对误差空间分布的影响

使用不同控制点数量的误差空间分布变化如图7所示。地面控制点定义外部坐标系的绝对方向和比例,并为光束平差提供约束。T1样区与T2样区整体趋势相近,随着控制点数量的增加,误差的数量级变小,且其空间分布也越近似于随机分布(图7(a、b))。样区整体的标准误差、平均误差与控制点数量呈负

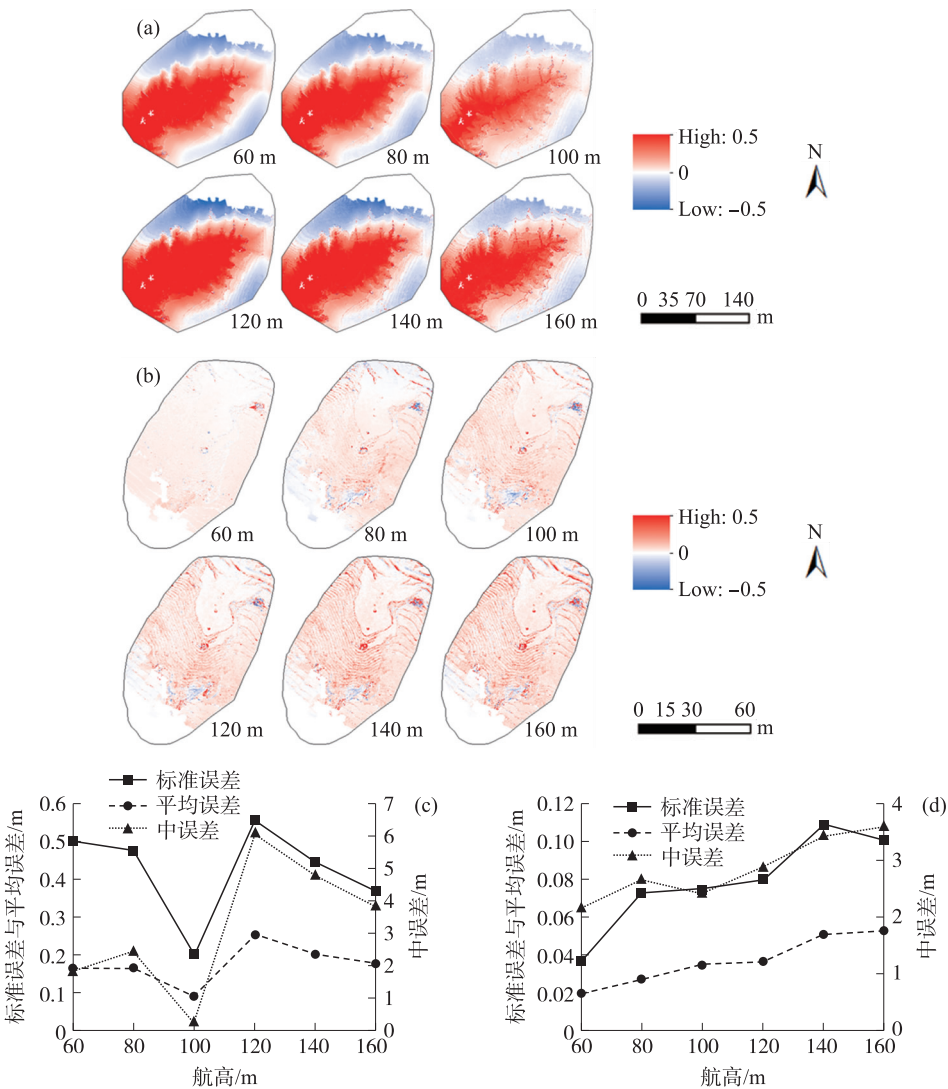


图 5 T1 样区(a、c)、T2 样区(b、d)航高的误差空间分布图与精度折线图

Fig. 5 Spatial distribution maps of errors and precision value of flight height for research area T1(a,c) and T2(b,d)

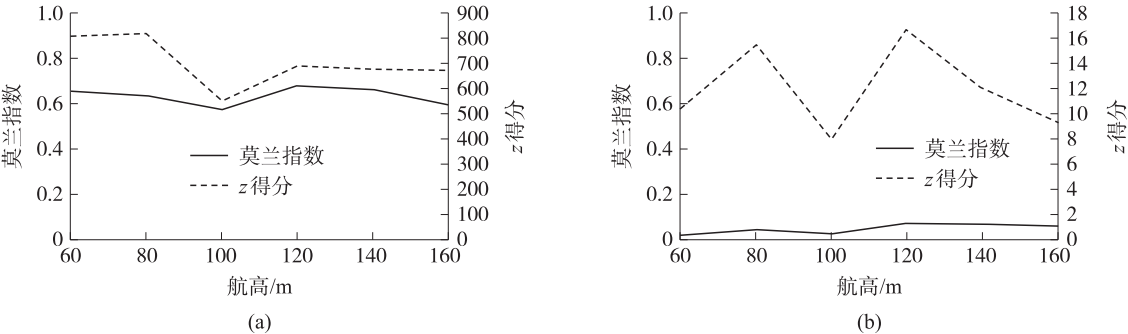


图 6 T1 样区(a)、T2 样区(b)航高误差的莫兰指数图

Fig. 6 Moran's I of flight height error for research area T1(a) and T2(b)

相关关系(图 7(c、d)). 当控制点达到一定数量时(本组实验中为 5 个控制点),标准误差与平均误差值趋于稳定,误差空间分布变化也较小. 由此可见,少量控制点可以迅速提高样区的整体精度,但在到达一定数量后,控制点对误差的大小和空间分布的影响均较小.

为了讨论控制点数量对误差空间分布自相关的影响,本研究计算了不同数量控制点下误差的莫兰指数(图 8). 当控制点数量较少时,莫兰指数值均大于 0.1(P 均小于 0.01, Z 均大于 1.96),说明误差的空间分布具有空间正相关关系,即误差在空间上出现了高值聚类 and 低值聚类分布. 然而,莫兰指数与控制点数

量整体上呈负相关关系. 控制点数量越多,莫兰指数越接近于 0. 在控制点数量超过一定数量(T1 样区为 15 个,T2 样区为 12 个)之后,莫兰指数几乎不再变化. 这一控制点数量与平均误差和标准误差稳定时的控制点数量不同. 平均误差和标准误差在控制点数量为 5 时已经稳定(图 7),而此时误差的空间分布(莫兰指数)还可以进一步优化. 这说明少量的控制点可以迅速提高样区的整体精度且达到一定的稳定水平,但要使样区的误差空间分布达到稳定水平,则需要更多的控制点.

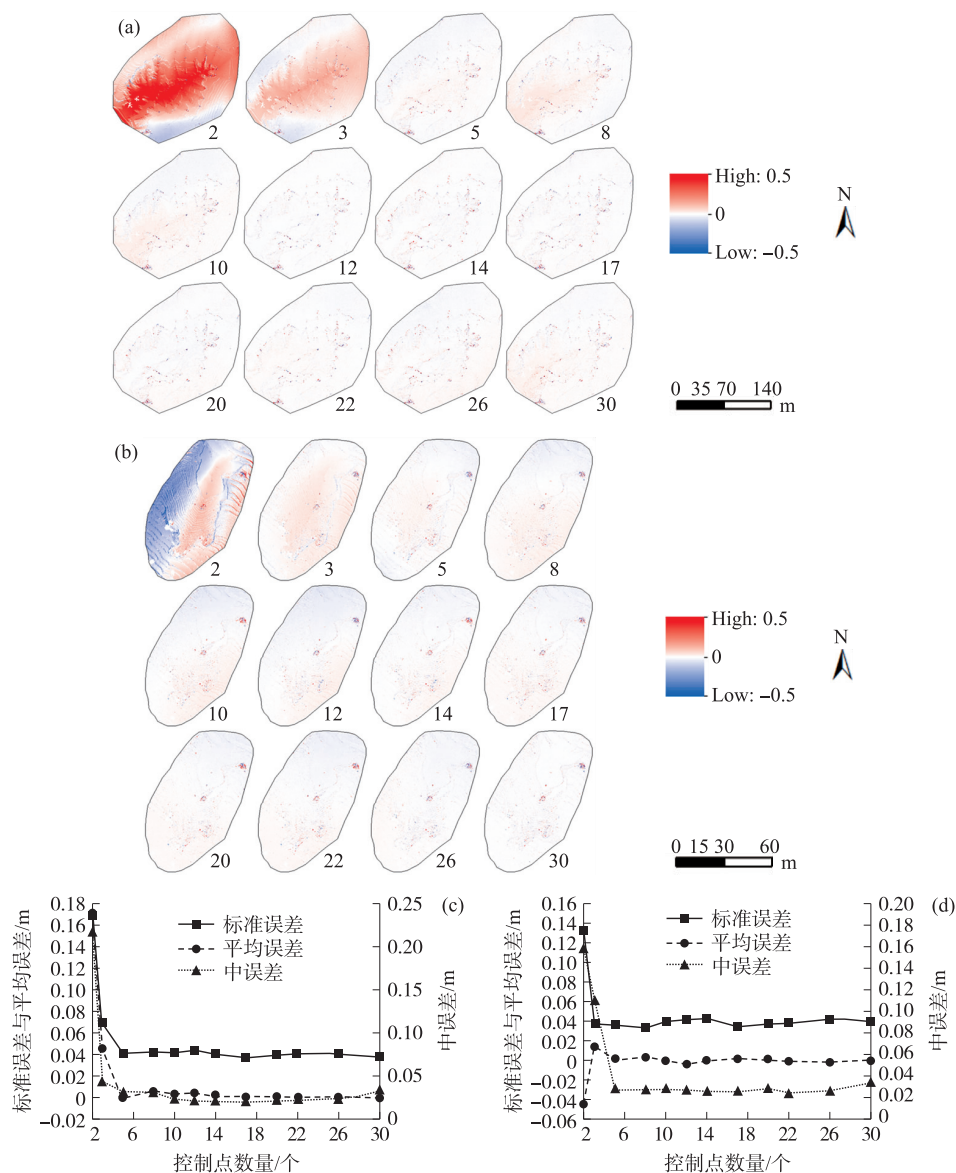


图 7 T1 样区(a、c)、T2 样区(b、d)控制点数量的误差空间分布图与精度折线图

Fig. 7 Spatial distribution maps of errors and precision value of GCPs for research area T1 (a, c) and T2 (b, d)

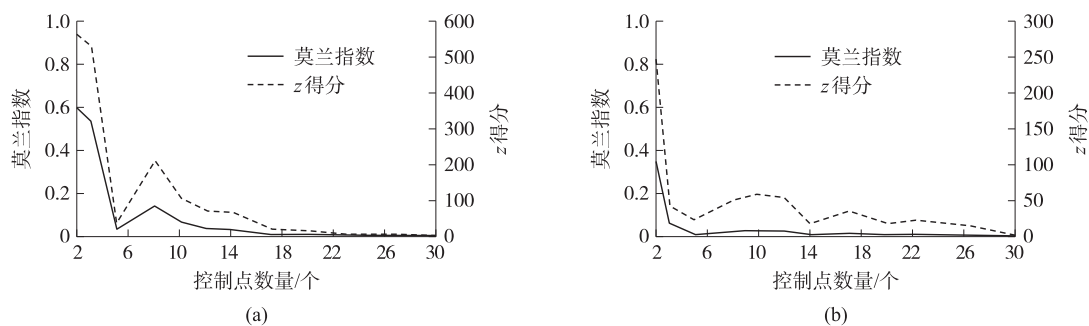


图 8 T1 样区(a)、T2 样区(b)控制点数量误差的莫兰指数图

Fig. 8 Moran's I of GCPs error for research area T1 (a) and T2 (b)

3 结论

本文通过设计不同飞行方案及控制测量方案,探索无人机地形建模在误差空间分布上的变化,并在黄土高原两个小流域进行了实验.首先,以全部控制点生成的点云作为参考数据,通过M3C2工具,与不同方案下生成的点云作差,得到Z方向的误差空间分布;然后,通过点云转栅格方法得到误差空间分布图;最后,以标准误差和平均误差评价误差空间分布图精度,并通过莫兰指数分析其空间自相关程度.实验结果表明:(1)在无控制测量情况下,采用较大的相机倾角(大于 10°),能够改善无人机地形建模误差的空间分布.(2)采用不同的航高(60~160 m),对误差的空间分布几乎没有太大的影响.(3)在有控制测量情况下,控制点数量的增加能够快速改善误差的空间分布,当控制点数量达到一定程度后趋于稳定,但是,整体误差趋于稳定所需要的控制点数量与前者并不相同.相对于整体精度稳定,要使样区的误差空间分布达到稳定的水平,需要更多的控制点.

使用较大的相机倾角,光束平差中地面点同名射线的交会角增大,有利于提高平差解算的稳定性,减少系统误差.同时,使用倾斜摄影可以拍到垂直摄影拍不到的一些地形陡峭区域,增加特征匹配点的解算数量,这也加强了摄影测量的光束平差过程.因此,在复杂地形区建议使用较大倾角的倾斜摄影,可以有效提高精度.控制点方面,虽有研究提出少量的控制点可以快速提高测量精度,但是,本研究显示,要优化摄影测量误差的空间分布,需要较多的地面控制点.使用误差空间分布图来进行精度评价为优化摄影测量过程提供了新的视角.在样区整体误差(RMSE)相同的情况下,误差空间分布可能具有极大的差异.若误差空间分布图出现了空间自相关,说明摄影测量模型可能出现了系统误差.因此,本文强调在摄影测量精度评价时更应关注误差的空间分布.

本文分析了无人机地形建模的主要可控影响因素.除此之外,无人机地形建模还会受到样区地形变化特征(下垫面)的影响.不同样区中,地形变化的混合情况不同,这将在一定程度上影响误差的空间分布.在后续研究中,将针对不同地形变化进行深入分析,研究不同地形误差空间分布变化特点.

[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.
- [2] SHAHBAZI M, MENARD P, SOHN G, et al. Unmanned aerial image dataset: ready for 3D reconstruction[J]. Data in brief, 2019, 25: 103962.
- [3] CANDIAGO S, REMONDINO F, DE GIGLIO M, et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images[J]. Remote sensing, 2015, 7(4): 4026-4047.
- [4] LAPORTE-FAURET Q, MARIEU V, CASTELLE B, et al. Low-cost UAV for high-resolution and large-scale coastal dune change monitoring using photogrammetry[J]. Journal of marine science and engineering, 2019, 7(3): 63.
- [5] MANFREDA S, MCCABE M, MILLER P, et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring[J]. Remote sensing, 2018, 10(4): 641.
- [6] CAO L, LIU H, FU X, et al. Comparison of UAV LiDAR and digital aerial photogrammetry point clouds for estimating forest structural attributes in subtropical planted forests[J]. Forests, 2019, 10(2): 145.
- [7] ROSSI P, MANCINI F, DUBBINI M, et al. Combining nadir and oblique UAV imagery to reconstruct quarry topography: methodology and feasibility analysis[J]. European journal of remote sensing, 2017, 50(1): 211-221.
- [8] JAMES M R, ROBSON S, SMITH M W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys[J]. Earth surface processes and landforms, 2017, 42(12): 1769-1788.
- [9] 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.
- [10] JAMES M R, CHANDLER J H, ELTNER A, et al. Guidelines on the use of structure-from-motion photogrammetry in geomorphic research[J]. Earth surface processes and landforms, 2019, 44(10): 2081-2084.
- [11] SMITH M W, VERICAT D. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from structure-from-motion photogrammetry[J]. Earth surface processes and landforms, 2015, 40(12): 1656-1671.

- [12] NESBIT P, HUGENHOLTZ C. Enhancing UAV-SfM 3D model accuracy in high-relief landscapes by incorporating oblique images[J]. Remote sensing, 2019, 11(3): 239.
- [13] 杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 13-15.
- [14] ŠTRONER M, URBAN R, SEIDL J, et al. Photogrammetry using UAV-mounted GNSS RTK: georeferencing strategies without GCPs[J]. Remote sensing, 2021, 13(7): 1336.
- [15] HAN X, THOMASSON J A, XIANG Y, et al. Multifunctional ground control points with a wireless network for communication with a UAV[J]. Sensors (Basel Switzerland), 2019, 19(13): 2852.
- [16] 张光祖, 王春, 徐燕, 等. 像控点布设对无人机小范围非规则区域实景建模精度的影响[J]. 全球定位系统, 2020, 45(2): 60-67.
- [17] 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.
- [18] JAMES M R, ROBSON S, D'OLEIRE-OLTMANN S, et al. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: ground control quality, quantity and bundle adjustment[J]. Geomorphology, 2017, 280: 51-66.
- [19] AGUERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMIREZ F, MARTINEZ-CARRICONDO P. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry[J]. Journal of surveying engineering, 2017, 143(2): 04016025.
- [20] GRAU J, LIANG K, OGILVIE J, et al. Improved accuracy of riparian zone mapping using near ground unmanned aerial vehicle and photogrammetry method[J]. Remote sensing, 2021, 13(10): 1997.
- [21] JIMÉNEZ-JIMÉNEZ S I, OJEDA-BUSTAMANTE W, MARCIAL-PABLO M, et al. Digital terrain models generated with low-cost UAV photogrammetry: methodology and accuracy[J]. ISPRS international journal of geo-information, 2021, 10(5): 285.
- [22] 代文, 汤国安, 胡光辉, 等. 基于无人机摄影测量的地形变化检测方法与小流域输沙模型研究[J]. 地理科学进展, 2021, 40(9): 1570-1580.
- [23] EKER R, AYDIN A, HUBL J. Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide: Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study[J]. Environmental monitoring and assessment, 2018, 190(1): 28.
- [24] GOMEZ-GUTIERREZ A, GONCALVES G R. Surveying coastal cliffs using two UAV platforms (multirotor and fixed-wing) and three different approaches for the estimation of volumetric changes[J]. International journal of remote sensing, 2020, 41(21): 8143-8175.
- [25] MARTINEZ-CARRICONDO P, AGUERA-VEGA F, CARVAJAL-RAMIREZ F, et al. Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2018, 72: 1-10.
- [26] 国家测绘局. 低空数字航空摄影规范 (CH/Z 3005—2010) [S]. 北京: 测绘出版社, 2010.

[责任编辑: 丁 蓉]