

doi: 10.6046/zrzyyg.2022300

引用格式: 陈凯,王春,代文,等. 基于控制点蒙特卡罗检验的无人机地形建模精度影响因素研究[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):107-115. (Chen K, Wang C, Dai W, et al. Factors influencing the terrain modeling accuracy of UAV photogrammetry based on Monte Carlo tests of control points[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3):107-115.)

# 基于控制点蒙特卡罗检验的无人机地形建模精度影响因素研究

陈凯<sup>1,2</sup>, 王春<sup>1,2,3</sup>, 代文<sup>1</sup>, 盛业华<sup>4,5</sup>, 刘爱利<sup>1</sup>, 汤国安<sup>4,5</sup>

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 滁州 239000; 3. 实景地理环境安徽省重点实验室, 滁州 239000; 4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 5. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 针对消费级无人机相机单一、镜头畸变大, 地形建模精度受航线设计和控制测量的影响等问题, 设计了不同的数据采集方案和控制点蒙特卡罗检验, 分析了相机倾角、航高和控制点数量对地形建模精度的影响。在黄土高原3个典型小流域的实验结果表明: ①在进行无人机摄影测量数据处理时, 应先使用蒙特卡罗检验对控制点质量进行分析, 排除控制点误差再进行数据处理。②相机倾角方面, 在无地面控制点时, 采用较大角度的倾斜摄影不仅有利于提高样区整体精度, 还优化了误差的空间分布; 这与相机畸变模型的优化有关。在有地面控制点时, 相机倾角对高程精度的影响不大, 但是影响控制点饱和和数量; 相对于垂直摄影, 倾斜摄影需要略多的控制点才能达到最优精度。③航高方面, 在有地面控制点时, 使用倾斜摄影有利于降低高程精度对航高变化的敏感性。在有地面控制点时, 航高在60~160 m范围内对高程精度的影响不明显, 且航高变化不影响控制点饱和和数量。

**关键词:** 无人机摄影测量; 地形建模; 倾斜摄影; 蒙特卡罗; 航线设计; 控制点数量

**中图法分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0107-09

## 0 引言

消费级无人机由于操作简单、携带方便、性价比高优点, 已广泛应用于地球科学的各个领域<sup>[1-6]</sup>。其中, 地形建模是无人机遥感最基础和最广泛的应用之一<sup>[7-8]</sup>。相对于专业级无人机, 消费级无人机存在相机镜头畸变大、抗风能力弱和全球定位系统-惯性测量单元(global positioning system - inertial measurement unit, GPS - IMU)定位精度差等问题, 极大地影响了其地形建模效果。

影响消费级无人机地形建模精度的因素众多, 主要可分为航线设计因素、控制测量因素和平台性能因素3个方面<sup>[9]</sup>。平台性能因素(如相机性能和GPS - IMU定位精度等)在出厂时已经确定, 无法改变。在实际地形建模过程中, 航线设计和控制测量

相关因素是探究建模精度的重要可控因素。

航线设计方面, 重叠度、相机倾角和航高是重要的设计因素。一般来说, 重叠度越高越好<sup>[10]</sup>, 消费级无人机一般采用70%以上的重叠度。针对相机倾角, 由于消费级无人机通常仅搭载单镜头, 为提升作业效率, 常采用“井”字形格网飞行<sup>[11]</sup>。尽管前人研究表明倾斜摄影有利于提高精度, 但是其推荐使用的相机倾斜角度在10°~45°间不等<sup>[11-15]</sup>, 还缺乏统一的参考依据。另外, 相对航高越高, 地面分辨率越低, 地形建模的高程精度也越低<sup>[11]</sup>。但是, 精度指标均方根误差(root mean square error, RMSE)和相对航高之比在不同研究中其比值在1:640~1:2100之间不等<sup>[16-17]</sup>, 表明高程精度对航高的敏感性还受其他因素的影响。

控制测量方面, 控制点的精度、数量和空间分布是影响摄影测量成果精度的重要因素。控制点的精

收稿日期: 2022-07-27; 修订日期: 2023-03-01

基金项目: 安徽高校省级自然科学研究重大项目“乡村数字孪生全息实景地理环境关键技术与示范应用研究”(编号: KJ2021ZD0130)、安徽省高等学校科研计划项目“实景地理环境科研创新团队”(编号: 2022AH010066)、2018年度安徽省学术和技术带头人后备人选科研活动经费资助项目(编号: 2018HH191)、国家自然科学基金项目“面向地貌学本源的数字地形分析理论与方法研究”(编号: 41930102)和“黄土高原小流域人工造貌信息图谱研究”(编号: 42171402)共同资助。

第一作者: 陈凯(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为实景三维建模与数字地形分析。Email: 20211210002@nuist.edu.cn。

通信作者: 王春(1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向为实景三维建模与数字地形分析。Email: wangchun93@126.com。

度与测量手段(全站仪、静态全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)或 GNSS - 实时动态差分技术(real - time kinematic, RTK)等)有关,采用的测量手段确定之后其精度水平基本固定。关于控制点分布前人针对不同的测量情景已提出了各类布设方法,通常要尽可能均匀且中心加边缘分布<sup>[18-19]</sup>。控制点数量越多越有利于精度提高,但是当控制点达到一定数量时,其测量精度的提高也有限<sup>[20]</sup>,通常存在“最优”的控制点数量。但是,最优控制点数量受到哪些因素的影响还有待进一步探索。

针对上述问题,众多学者都只针对上述单一方向上进行研究,没有综合去考虑上述因素对于地形建模精度的影响。因此,针对上述问题,本文使用单镜头消费级无人机,通过设计不同摄影测量数据采集方案和控制点蒙特卡罗检验,综合探

究相机倾角、相对航高和控制点布设数量对地形建模高程精度的影响,提出消费级无人机摄影测量精度优化方法。

### 1 研究区概况

本研究在黄土高原选取了 3 个典型小流域,其中 T1 (E110°17'3.2", N37°33'48.8")、T2 (E110°21'45.7", N37°35'12.8")和 T3 (E109°15'6.2", N36°44'9.7")3 个样区作为无人机摄影测量实验样区(图 1)。T1 和 T2 样区分别位于陕西省绥德县刘家坪村和王茂庄村,T3 样区位于陕西省延安市安塞区寺峪岭村。3 个样区均是典型的水土流失区,区域内沟壑侵蚀剧烈、地形起伏大,最大高差达 200 余 m。同时,区域内植被稀疏,有利于开展无人机地形建模。

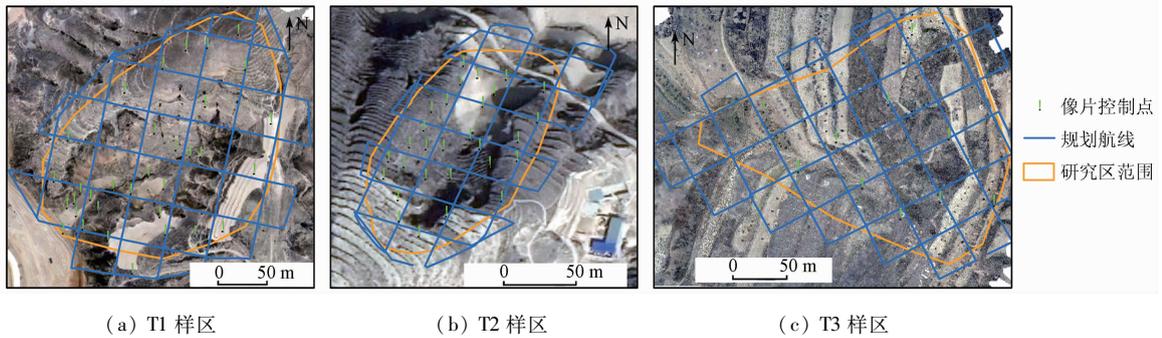


图 1 研究区航线设计与控制点分布

Fig. 1 Flight design and distribution of control points in the study area

## 2 研究方法

### 2.1 数据采集实验设计

技术路线如图 2 所示。

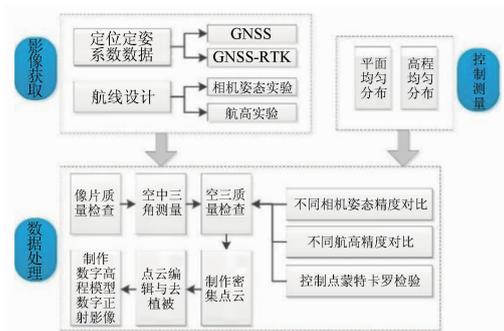


图 2 无人机摄影测量技术路线

Fig. 2 Flowchart of UAV photogrammetry technology

首先,设计了不同相机姿态实验和航高实验并进行无人机影像数据的采集;其次,针对不同航高和飞行姿态的航摄影像分别进行摄影测量内业数据

处理;同时,设计了控制点蒙特卡罗检验,对比分析不同摄影条件(姿态和航高)以及控制点数量、分布和精度对最终摄影测量结果的精度影响;最后,在对上述精度影响因素全面总结的基础上,提出消费级无人机地形建模的优化方案。

本次实验无人机型号为大疆精灵 4 Pro,搭载单镜头,相机 CMOS 尺寸为 25.4 mm,有效像素为 2 000 万。航线设计为“井”字形航线,航向重叠度和旁向重叠度均为 80%。相机倾斜角度设置为 0° ~ 50°(0°表示垂直摄影)。实验方案如表 1 所示。野外控制测量采用 GNSS - RTK 的方式。T1、T2 和 T3 这 3 个样区分别布设了 33、31 和 10 个地面控制点,其空间分布如图 1 所示。

表 1 无人机摄影测量相机倾角实验

Tab. 1 Camera angle experiment 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, 40, 50	100	7	2.7
T2	0, 5, 10, 20, 30, 40, 50	70	7	1.9
T3	0, 10, 20, 30, 40	80	5	2.2

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,间接影响高程精度。根据《低空数字航空摄影规范》<sup>[21]</sup>(CH/Z3005—2010)要求,1:500比例尺航摄地面分辨率应小于5 cm。本次航高实验在相同的样区内,保证相机倾角和重叠度固定不变的条件下进行不同飞行高度的实验,实验方案如表2所示。

表2 无人机摄影测量航高实验

Tab.2 UAV photogrammetry altitude experiment

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	7	1.6 ~ 4.4
T2	60, 80, 100, 120, 140, 160	15	6	1.6 ~ 4.4

## 2.2 数据处理与控制点蒙特卡罗检验

数据处理步骤包含航片质量检查、空中三角测量、密集点云匹配、点云分类与编辑和数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据生成。通过在Agisoft PhotoScan软件中完成对齐照片、标记照片和相机优化等功能<sup>[22]</sup>。空中三角测量的精度检验是摄影测量过程中最重要的环节之一。之后整个项目的精度基本上已经确定。本研究重点关注空中三角测量这一环节所获得的地面控制点实际精度,以此来评价不同摄影方案所获得地面点的高程精度以及复杂地形建模的应用潜力。后续的密集点云匹配、点云分类与编辑和DEM数据生成等已经是十分成熟的技术流程,此处不再赘述。

为了验证在无地面控制点条件下消费级无人机倾斜摄影在复杂地形建模的应用潜力,分为2组实验。第一组,数据处理中不使用任何控制点参加摄影测量的光束平差过程,仅用3个控制点对空中三角测量模型进行平移、旋转和缩放;第二组,使用一半的地面控制点参与光束平差过程优化模型精度,剩余一半的控制点作为检查点,检查模型精度。

本文将摄影测量精度达到稳定后控制点数量称为控制点饱和数。为了探索不同的相机倾角、不同航高是否影响控制点饱和数,此处使用蒙特卡罗方法<sup>[20, 22]</sup>设计了控制点检测实验。控制点蒙特卡罗检验在Agisoft PhotoScan软件中执行,通过Python脚本不断重复光束平差过程。该实验主要可分为2个步骤:①对于每一次实现,随机选择一定数量的地面控制点参与光束平差过程,剩余的点作为检查点评价模型精度;保持每次随机选择的控制点数量不变,重复上述过程50遍,每次实现过程中记录控制点和检查点的精度;②逐渐增加随机选择的控制点的数量并重复步骤①,分别以10%,20%,30%,

40%,50%,60%,70%,80%,90%的控制点数量实现步骤①中操作。

通过上述蒙特卡罗检验可以得到随着选择控制点数量的增加,控制点和检查点误差的变化情况。此外,还可以通过查看每一个地面控制点作为检查点或控制点时的平均误差,判断每个控制点的质量。若某个地面控制点不论是作为控制点还是检查点时,误差均很大,则说明该点很可能在测量过程中出现了较大误差(如电磁场干扰等),或者在刺点过程中出现了较大误差。

## 2.3 精度评价

精度评价采用RMSE指标进行评估。RMSE可分为平面RMSE和高程RMSE。在地形建模过程中,高程RMSE较平面RMSE更重要。因此,本文的精度评价主要指高程RMSE的评价,其公式为<sup>[23]</sup>:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2}, \quad (1)$$

式中: $X_i$ 为检查点(或控制点) $i$ 的Z坐标的测量值,即摄影测量的观测值; $\bar{X}_i$ 为对应检查点 $i$ 的Z坐标真实值,即控制测量的观测值; $n$ 为评价精度时检查点个数。

由于RMSE的分布不是均一的,而是在空间上变化的。在不同地形部位的检查点,误差的大小也不尽相同。因此,还需要判断检查点的误差是否存在一定的空间分布模式。具体做法为确定好控制点的数量后,利用随机函数从所有控制点中随机选择规定数量下的点重复50次做成误差箱型图,排除偶然误差与随机误差带来的影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 控制点质量分析

控制点蒙特卡罗实验后,计算整个蒙特卡罗迭代过程中地面控制点作为控制点或检查点的平均误差。以T1样区相机倾角为30°的实验为例,将每个地面控制点的平均误差可视化,如图3(a)所示。可以发现,其中第11和第14号点无论作为控制点还是检查点,其平均误差均很大,最高达0.8 m。第11和第14号点很可能在测量过程中或刺点过程中出现了较大误差。经检查发现,该2个点在数据处理时刺点位置不准确。经重新处理后,每个控制点的平均误差如图3(b)所示。此时所有点的平均误差均小于0.05 cm,处于合理范围内。后续所有的实验方案均进行控制点质量分析剔除控制点误差之后再进一步的分析。

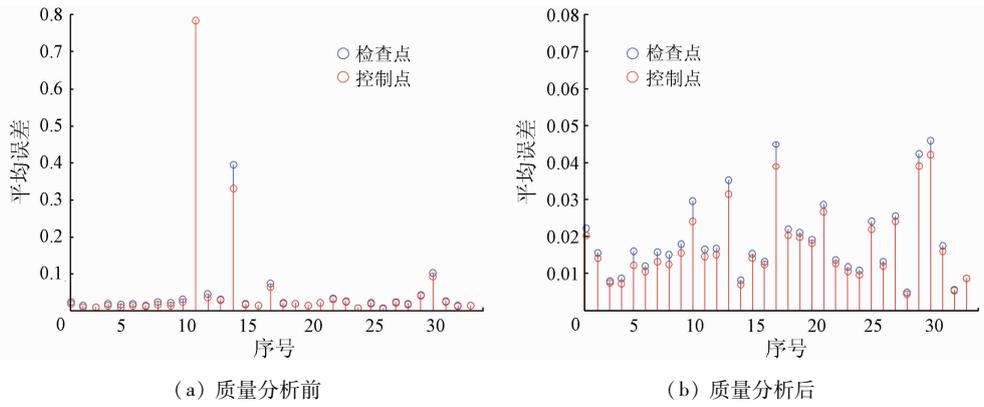


图3 控制点质量分析

Fig. 3 Quality analysis of control points

### 3.2 相机倾角对高程精度的影响

#### 3.2.1 高程 RMSE

不同相机倾角下检查点在有地面控制点和无地面控制点条件下的高程中误差 ( $RMSE_z$ ) 如图 4 所示。无地面控制点条件下, 倾角为  $0^\circ$  (垂直摄影) 时 3 个样区的高程中误差均较大; 随着相机倾角的增

加, 高程中误差减小; 倾角大于  $10^\circ$  后, 高程中误差变化不大。在有地面控制点的情况下, 相机倾角对高程中误差的影响不大 (图 4), 不论是垂直摄影, 还是倾斜摄影, 高程中误差均很小。这说明在有控制点时, 相机倾角对高程精度影响不大; 在无控制点时, 需要使用较大的相机倾角。

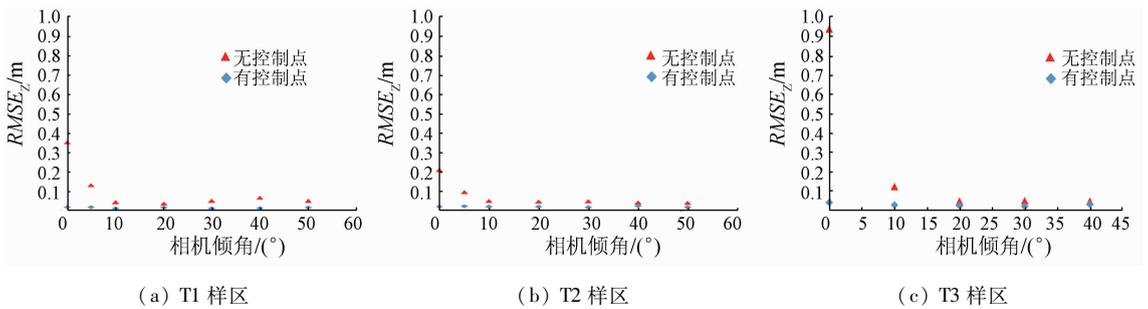


图4 相机倾角对  $RMSE_z$  的影响

Fig. 4 Effect of camera inclination on  $RMSE_z$

#### 3.2.2 误差空间分布

T1 和 T2 样区在无地面控制点下检查点误差的空间分布如表 3 所示。在 T1 和 T2 样区, 相机倾角为  $0^\circ$  时, 检查点误差出现了明显的空间聚集; T1 样

区东北方向和西南方向山脊线上出现了低值聚集, 沟谷中央出现了高值聚集; T2 样区东方向山脊线上出现了低值聚集, 沟谷中央出现了高值聚集。说明摄影测量模型可能出现了系统误差。使用倾斜相

表 3 不同相机倾角下检查点误差的空间分布情况

Tab. 3 Spatial distribution of check point error under different camera inclination

样区	相机倾角/ $^\circ$			
	0	10	30	40
T1				
T2				

↑ N

$RMSE_z/m$

- 低
- 较低
- 中
- 较高
- 高

机时,检查点误差的空间分布明显得到改善,其分布较为均匀,没有发现明显的空间聚集分布。这一结果表明,使用倾斜摄影,不仅提高了高程精度,同时还改善了误差的空间分布,一定程度上减少了系统误差。倾斜摄影对高程误差的改善可能与地形起伏和同名射线交会角有关。黄土小流域中沟壑侵蚀剧烈、地形起伏大、坡面坡度大,使用倾斜摄影时,相对于坡面区域可能更趋近于垂直摄影,此时地面控制点实际地面分辨率较均匀,误差也相对更均匀。另一方面,使用倾斜摄影时,部分同名射线的交会角变大,使加密点的解算更稳定。因此,当地形起伏度高时,使用倾斜摄影有利于提高测量精度。

### 3.2.3 镜头畸变校正

倾斜摄影对高程精度的改善可能与相机畸变参数有关。消费级无人机搭载的多为非量测相机,影像畸变大且校检结果不稳定。理想情况下,经过光束平差优化之后,相机的各项畸变参数之间应当互

不相关。实际应用中,各项相机畸变参数存在较强的相关性。T1 和 T2 样区中不同相机倾角下的相机畸变参数自相关系数如表 4 所示。根据相机畸变原理,径向畸变参数之间的相关是正常的,同理,焦距和主点偏移、主点偏移和切向畸变参数之间的相关性也无需关注。这里主要关注径向畸变参数和主点偏移、径向畸变参数和切向畸变参数之间的相关性。前人研究表明这几个参数之间的强相关会导致摄影测量模型的系统误差。从表 4 中可以发现,当相机倾角为 0°~5°时,径向畸变参数与主点偏移,和其与切向畸变参数之间相关性(红色虚线框)均较强。随着相机倾角的增加,相关性减弱。当相机倾角大于 20°时,这几项参数近乎不相关。这与垂直摄影使用全部控制点优化的相机畸变模型的相关系数分布十分相近。这一结果说明使用倾斜摄影优化了相机畸变模型,特别是倾角大于 20°时,可达到使用控制点优化相机畸变模型的效果。

表 4 不同相机倾角下相机参数自相关模型  
Tab.4 Autocorrelation model of camera parameters under different camera inclination

样区	相机倾角/(°)			
	0	5	10	20
T1	0 (使用全部控制点)	30	40	50
	0	5	10	20
	0 (使用全部控制点)	30	40	50
	0	5	10	20
	0 (使用全部控制点)	30	40	50
	0	5	10	20
	0 (使用全部控制点)	30	40	50
	0	5	10	20
	0 (使用全部控制点)	30	40	50
	0	5	10	20

注: F 为相机焦距; Cx 和 Cy 分别为主点偏移; K1, K2 和 K3 分别为径向畸变参数; P1 和 P2 分别为切向畸变参数。

### 3.2.4 控制点饱和和数量

在有地面控制点的情况下,相机倾角对高程 RMSE 的影响不大(图 4)。但其精度可能随控制点数量变化而变化。T1 样区的实验结果如表 5 第一列所示。控制点的误差随着参与光束平差的控制点数量增加而变高,数量达到一定程度之后精度保持

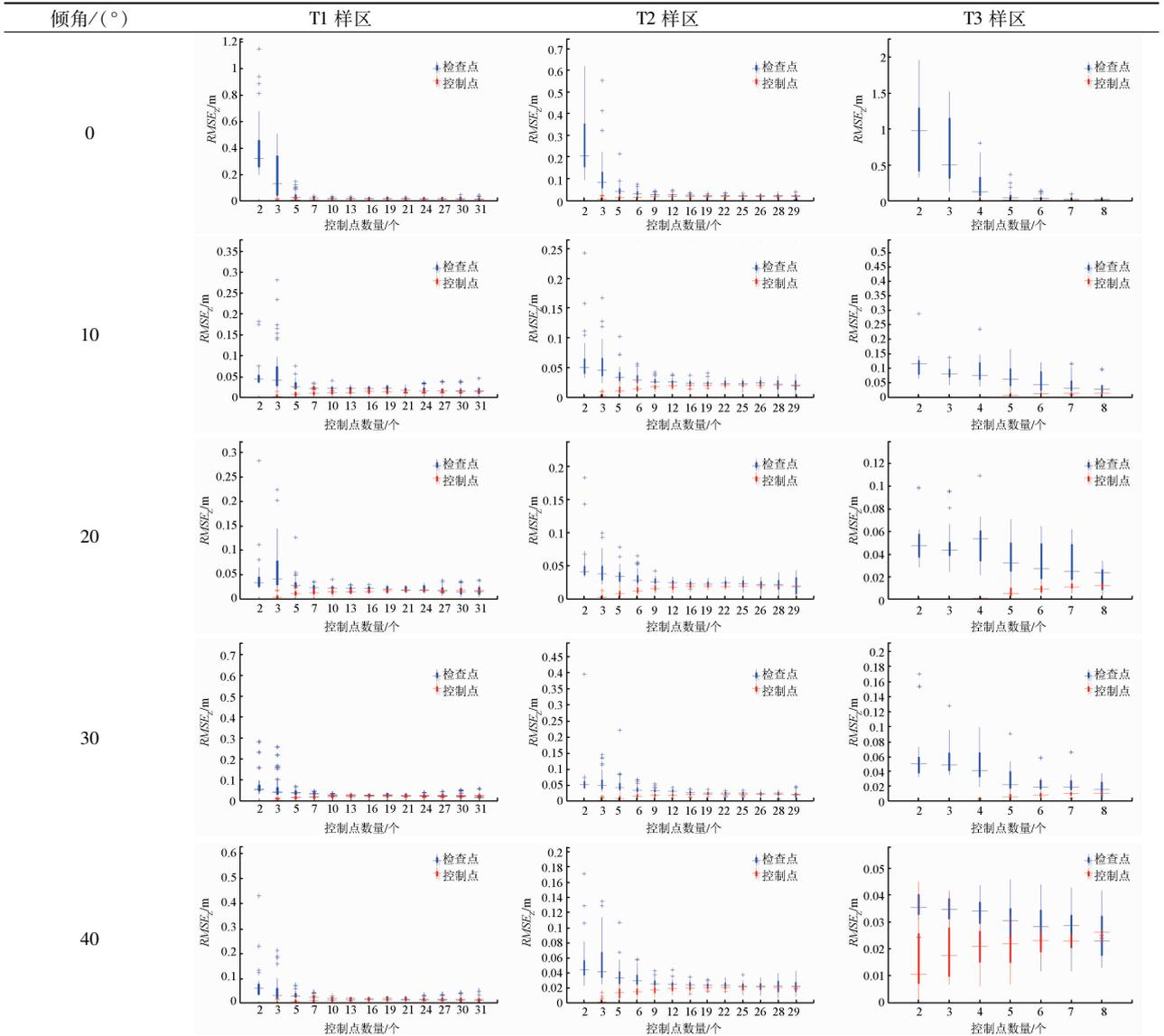
不变;检查点的误差随着参与光束平差的控制点数量增加而降低,数量达到一定程度之后精度保持不变。这说明控制点达到一定数量之后,对摄影测量精度的影响不大。相机倾角并不影响这一趋势。但是通过表 5 可以发现,相机倾角对控制点饱和和数有明显的影。使用垂直摄影(0°)时,高程误差在控

制点数量为 5 左右时达到了稳定。而使用倾斜相机时,高程误差在控制点数量为 7 时开始趋近于稳定。这说明使用倾斜相机略微提高了控制点饱和数。T2 和 T3 样区的控制点蒙特卡罗检验结果如表 5 第二列和第三列所示。可以发现这 2 个样区的控制点和检查点误差变化趋势和 T1 样区结果基本一致,但在这 2 个样区中相机倾角对控制点饱和数的影响更

明显。使用正射相机时,T2 和 T3 样区中控制点数量在 5 左右时达到了饱和;而使用倾斜相机时,T2 样区控制点数量在 9 左右时趋近于饱和,T3 样区控制点数量为 8 时才开始趋近于饱和。这一结果验证了 T1 样区的结论,使用倾斜相机提高了控制点饱和数。但是,控制点达到饱和时,倾斜摄影的最优精度高于垂直摄影的最优精度。

表 5 T1, T2, T3 样区不同相机倾角下控制点蒙特卡罗检验结果

Tab.5 Monte Carlo test results of control points under different camera inclination in T1, T2, T3 sample area



### 3.3 航高对高程精度的影响

#### 3.3.1 高程 RMSE

航高对高程 RMSE 的影响如图 5 所示。其中 T1 样区影像获取时采用的是垂直摄影,T2 样区采用的是倾角为 15°的倾斜摄影。可以发现,在无地面控制点时垂直摄影(T1)的高程 RMSE 均在分米级,且随航高的增加而增大;而采用倾斜摄影(T2)时,高程 RMSE 均为厘米级,且随航高的变化不大。这一方面验证了倾斜摄影有利于提高高程精度的结

论,另一方面说明采用倾斜摄影降低了高程误差对航高的敏感性。为满足《低空数字航空摄影规范》(CH/Z3005—2010)中 1:500 比例尺测图的要求,试验的飞行高度设计在 60 ~ 160 m,地面分辨率均优于 5 cm。理论上,高程精度也可优于 5 cm。一方面,由于倾斜摄影优化了相机畸变模型(表 4),降低了系统误差,使摄影测量模型能达到这个精度,所以 60 ~ 160 m 的航高范围内检查点高程误差变化不显著(图 5)。在这个精度级别,刺点误差和控制点测

量误差等可能比航高更重要。以控制点测量误差为例,本实验采用 GNSS-RTK 的测量方式,高程中误差在 3 cm 左右,在 60~160 m 的航高范围内高程误

差的变化可能小于 3 cm,导致难以通过检查点检测航高对误差的影响。另一方面,由于垂直摄影的相机畸变参数分离效果较差,自相关性较强,当航高变高时,将放大相机模型的畸变误差,导致高程误差对航高的变化更敏感。

### 3.3.2 控制点饱和数量

在有控制点参与光束平差校正的情况下,60~160 m 范围内,高程 RMSE 对航高的变化不敏感。为了讨论航高是否影响控制点饱和数量,在不同航高下进行了蒙特卡罗控制点检验,结果如图 6 所示。结果表明,航高从 60 m 变到 160 m,T1 样区(垂直摄影)的控制点饱和数一直在 5 左右,T2 样区(15° 倾斜摄影)一直在 9 左右。这说明航高基本上不影响控制点饱和数,也验证了倾斜摄影增加了控制点饱和数的结论。

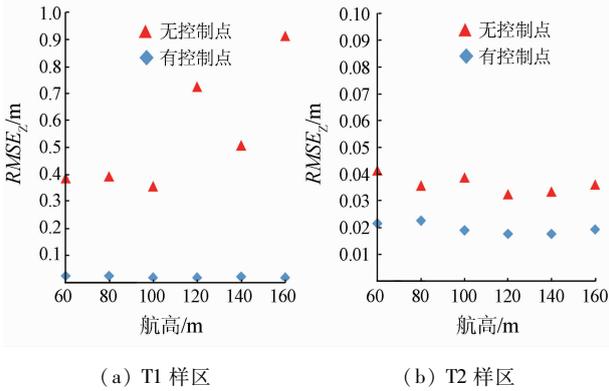


图 5 航高对  $RMSE_z$  的影响

Fig. 5 Effect of altitude on  $RMSE_z$

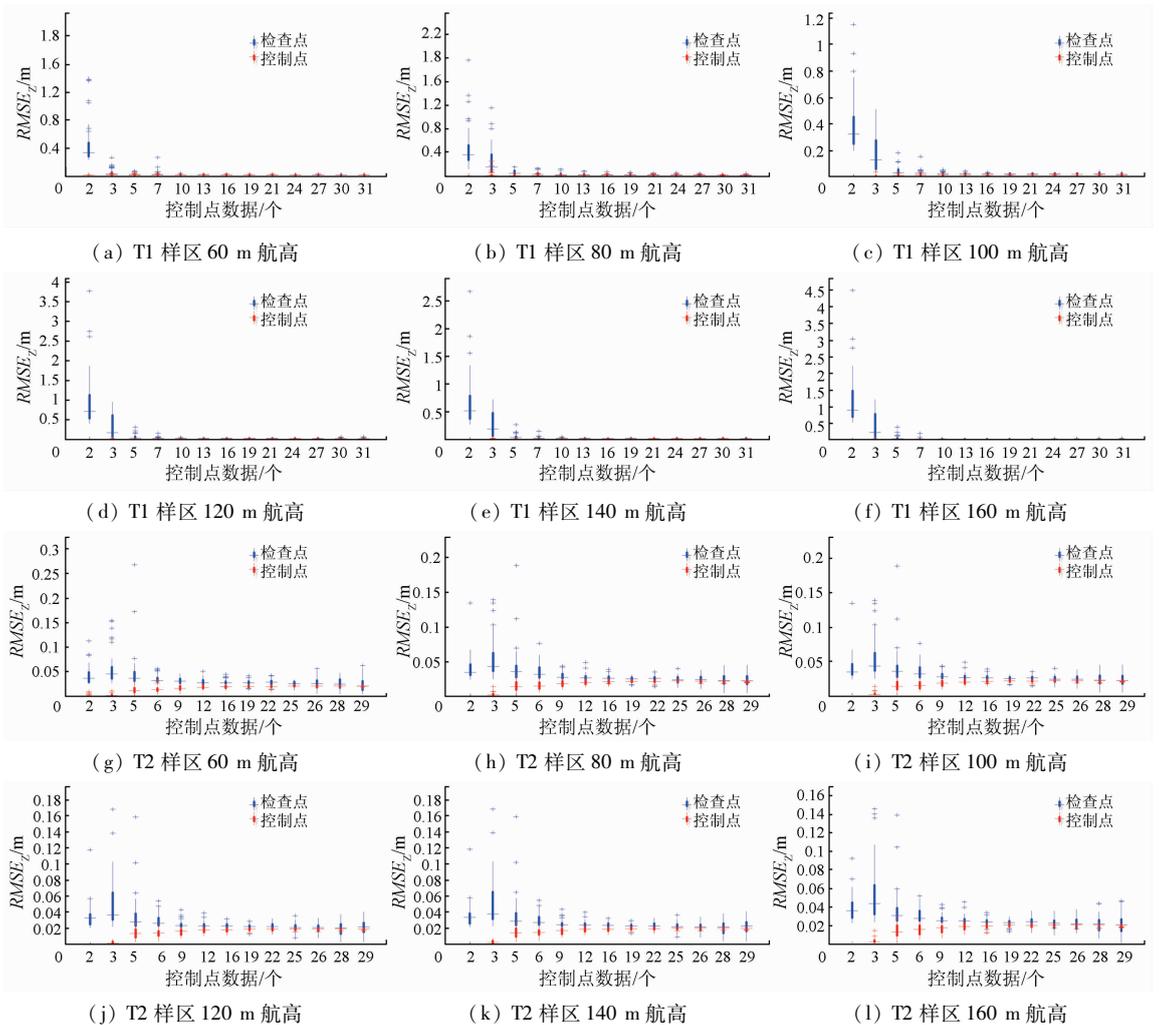


图 6 不同航高下控制点蒙特卡罗检验结果

Fig. 6 Monte Carlo test results of control points at different altitudes

## 4 结论

本研究设计了不同的摄影测量数据采集方案和

控制点蒙特卡罗检验,综合分析了相机倾角、航高和控制点数量对地形建模精度的影响,实验结果表明:

1) 在进行无人机摄影测量数据处理时,应先使用蒙特卡罗检验对控制点质量进行分析,排除控制

点误差再进行数据处理。

2) 在无控制点测量的情况下, 倾斜摄影有利于改善高程精度。倾斜摄影有利于降低相机畸变参数相关性, 减少系统误差, 特别是倾角大于  $20^\circ$  时, 可达到使用控制点优化相机畸变模型的相同效果。在有控制点的情况下, 相机倾角对高程精度的影响不大, 但是影响控制点饱和数量; 相对于垂直摄影, 倾斜摄影需要略多的控制点才能达到最优精度。

3) 在无控制点测量的情况下, 航高对高程精度的影响与相机倾角有关。使用倾斜摄影时, 有利于降低高程精度对航高变化的敏感性, 高程精度在  $60 \sim 160$  m 航高内的变化不明显。使用垂直摄影时, 高程精度明显随航高变高而降低。在有控制点的情况下, 高程精度在  $60 \sim 160$  m 航高内的变化不明显。同时航高不影响控制点饱和数量。

在使用消费级无人机进行地形建模时, 如因条件限制, 样区难以布设控制点时, 为了提高测量精度, 建议使用  $20^\circ \sim 40^\circ$  的“井”字形倾斜摄影方案; 同时应当在遥感影像或者其他资料中至少选取 3 个控制点, 将摄影测量模型平移、旋转和缩放到正确的位置。如有条件布设控制点时, 可以根据飞行方案合理优化控制点的布设数量。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 杨胜天, 王鹏飞, 王娟, 等. 结合无人机航空摄影测量的河道流量估算 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(6): 1284 - 1293.  
Yang S T, Wang P F, Wang J, et al. River flow estimation method based on UAV aerial photogrammetry [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(6): 1284 - 1293.
- [3] 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.  
Dai W, Tang G A, Hu G H, et al. Modelling sediment transport in space in a watershed based on topographic change detection by UAV survey [J]. *Progress in Geography*, 2021, 40 (9): 1570 - 1580.
- [4] 刘树超, 邵全琴, 杨帆, 等. 黄河源区放牧家畜数量及空间分布无人机遥感调查 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23(7): 1286 - 1295.  
Liu S C, Shao Q Q, Yang F, et al. Using UAVs remote sensing for population and distribution of grazing livestock in the source region of the Yellow River [J]. *Journal of Geo - Information Science*, 2021, 23(7): 1286 - 1295.
- [5] 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.
- [6] 刘见礼, 廖小罕, 倪文俭, 等. 顾及单木三维形态的无人机立体影像单木识别算法 [J]. *地球信息科学学报*, 2021, 23 (10): 1861 - 1872.  
Liu J L, Liao X H, Ni W J, et al. Individual tree recognition algorithm of UAV stereo imagery considering three - dimensional morphology of tree [J]. *Journal of Geo - Information Science*, 2021, 23 (10): 1861 - 1872.
- [7] Agüera - Vega F, Carvajal - Ramírez F, Martínez - Carricondo P, et al. Reconstruction of extreme topography from UAV structure from motion photogrammetry [J]. *Measurement*, 2018, 121: 127 - 138.
- [8] James M R, Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application [J]. *Journal of Geophysical Research (Earth Surface)*, 2012, 117 (B3): 3 - 17.
- [9] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学 (第 2 版) [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.  
Zhang Z X, Zhang J Q. *Digital photogrammetry (second edition)* [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.
- [10] 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.
- [11] Bemis S P, Mickelthwaite S, Turner D, et al. Ground - based and UAV - based photogrammetry: A multi - scale, high - resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology [J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 69: 163 - 178.
- [12] James M R, Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground - based image networks [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39 (10): 1413 - 1420.
- [13] Carbonneau P E, Dietrich J T. Cost - effective non - metric photogrammetry from consumer - grade sUAS: Implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(3): 473 - 486.
- [14] Carvajal - Ramírez F, Agüera - Vega F, Martínez - Carricondo P J. Effects of image orientation and ground control points distribution on unmanned aerial vehicle photogrammetry projects on a road cut slope [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2016, 10 (3): 034004.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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 C B, Yang S T, Zhao C S, et al. Topographic data accuracy verification of small consumer UAV [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 185 - 195.
- [18] Cabo C, Sanz - Ablanedo E, Roca - Pardinás J, et al. Influence of

the number and spatial distribution of ground control points in the accuracy of UAV - SfM DEMs; An approach based on generalized additive models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(12): 10618 - 10627.

[19] 桑文刚, 李娜, 韩峰, 等. 小区域消费级无人机倾斜摄影像控点布设及建模精度研究[J]. 测绘通报, 2019(10): 93 - 96.

Sang W G, Li N, Han F, et al. Research on the control point layout scheme for consumption - grade UAV oblique photogrammetry in small areas and modeling accuracy[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(10): 93 - 96.

[20] James M R, Robson S, D'oleire - Oltmanns 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.

[21] 国家测绘局. 低空数字航空摄影规范[M]. 北京: 中国测绘出版社, 2010: 15 - 16.

State Bureau of Surveying and Mapping. Specification for low altitude digital aerial photography [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2010: 15 - 16.

[22] Antoniazza G, Bakker M, Lane S N. Revisiting the morphological method in two dimensions to quantify bed - material transport in braided rivers[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(11): 2251 - 2267.

[23] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.

Surveying adjustment discipline group, School of Surveying and Mapping, Wuhan University. Error theory and basis of measurement adjustment [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014.

## Factors influencing the terrain modeling accuracy of UAV photogrammetry based on Monte Carlo tests of control points

CHEN Kai<sup>1,2</sup>, WANG Chun<sup>1,2,3</sup>, DAI Wen<sup>1</sup>, SHENG Yehua<sup>4,5</sup>, LIU Aili<sup>1</sup>, TANG Guoan<sup>4,5</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 3. Anhui Province

Key Laboratory of Physical Geographic Environment, Chuzhou 239000, China; 4. School of Geography, Nanjing

Normal University, Nanjing 210023, China; 5. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment,

Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Consumer - grade unmanned aerial vehicles (UAVs) each have a single camera and high lens distortion. The accuracy of terrain modeling using UAVs is influenced by route design and control surveys. By designing different data collection schemes and Monte Carlo tests, this study investigated the influence of the camera's tilt angle, flight height, and the number of ground control points (GCPs) on terrain modeling accuracy in three small river basins on the Loess Plateau. The results are as follows: ① Before the processing of UAV photogrammetry data, it is necessary to analyze the quality of GCPs through Monte Carlo tests to eliminate GCP errors. ② The effects of the tilt angles of cameras include: in the case of no available GCPs, tilt photogrammetry with tilt angles of cameras can both improve the overall accuracy of the sampling area and optimize the spatial distribution of errors, with these advantages related to the optimization of the camera distortion model; in the case of available GCPs, the camera tilt angle has minor influence on elevation accuracy but affects the saturation number of GCPs. Compared with vertical photogrammetry, tilt photogrammetry requires slightly more GCPs to achieve the optimal accuracy. ③ The effects of the flight height include: in the case of no available GCPs, tilt photogrammetry can reduce the sensitivity of elevation accuracy to flight height; in the case of available GCPs, flight heights of 60 ~ 160 m have no significant influence on elevation accuracy, and the change in flight height does not affect the saturation number of GCPs.

**Keywords:** UAV photogrammetry; terrain modeling; tilt photogrammetry; Monte Carlo test; route design; number of ground control points

(责任编辑: 陈理)