

控制点布设对冰川区无人机摄影测量精度的影响

刘宇硕¹, 秦翔¹, 郭万钦², 高思如³, 陈记祖¹, 王利辉¹, 李延召¹,
晋子振¹

1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室

祁连山冰冻圈与生态环境综合观测研究站, 兰州 730000;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

3. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000

摘要: 冰川监测是冰冻圈科学研究中的一项重要基础内容, 获取高质量冰川DEM和DOM数据是研究的基础。随着无人机技术的兴起, 给冰川监测提供了全新的技术手段, 然而冰川区开展无人机摄影测量时, 地面控制点的布设与测量成为能否获取高精度数据产品的关键, 而山地冰川往往伴随着地形复杂, 行走困难, 野外实地测量难以全面实施等不利因素。本研究中以位于祁连山西段大雪山地区的老虎沟12号冰川末端部分为研究区域, 设计实施了多种控制点布设方案, 使用低空微型无人机飞行3个架次, 获取研究区航摄影像。通过对比控制点在不同分布情况及数量情况下, DEM和DOM数据检查点的精度, 评价不同控制点布设方案的可行性。对比结果显示, 在航飞过程中使用单格网模式即可获得高精度的影像数据; 实施地面控制作业时, 使用5—7个控制点均匀分布在测量区即可获得较高精度的图像数据; 当冰川区不能满足均匀布设控制点时, 可沿冰川主流线布设足够数量的控制点, 所得图像精度也可以满足冰川学研究要求; 若只能在冰川中下部或者中上部布设控制点, 则控制点应覆盖冰面起伏较大的区域。

关键词: 遥感, 无人机, 摄影测量, 数字高程模型, 正摄影像, 老虎沟12号冰川

引用格式: 刘宇硕, 秦翔, 郭万钦, 高思如, 陈记祖, 王利辉, 李延召, 晋子振. 2020. 控制点布设对冰川区无人机摄影测量精度的影响. 遥感学报, 24(2): 161-172

Liu Y S, Qin X, Guo W Q, Gao S R, Chen J Z, Wang L H, Li Y Z and Jin Z Z. 2020. Influence of the use of photogrammetric measurement precision on low-altitude micro-UAVs in the glacier region. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(2): 161-172[DOI:10.11834/jrs.20208263]

1 引言

冰冻圈是气候变化影响最敏感的圈层(秦大河和丁永建, 2009), 冰川作为冰冻圈中最重要的组成部分, 是地球上由降雪和其他固态降水积累、演化形成的处于流动状态的冰体(秦大河等, 2016), 存储着世界约75%的淡水资源(Haerberli等, 2000; 施雅风, 2005), 对我国西北干旱区而言是最为重要的淡水资源(李忠勤等, 2010; 谢自楚和刘潮海, 2010), 同时冰川不仅是气候变化的重要驱动因素, 又是反映气候变化的记录器和预警器(Oerlemans, 1994; 刘时银等, 2015)。

在全球气候变暖的背景下, 全球范围内的冰川几乎都在持续退缩, 某些地区冰川甚至消失(Hodge等, 1998; Kang等, 2010; Yao等, 2012), 这将对气候变化、水资源、生态环境、地貌演化、全球水循环和能量平衡等方面产生显著影响(Jansson等, 2003; 李治国等, 2008; Sorg等, 2012)。因此, 现代冰川观测是研究冰川变化的基础, 是认识冰川对气候的响应和预测冰川未来变化的基础(秦大河等, 2017)。

传统冰川监测以实地测量为主, 该方法具有真实度高, 可靠性强的特点, 被广泛应用, 但是实地测量需要耗费大量人力物力, 同时山地冰川

收稿日期: 2018-07-06; 预印本: 2019-05-17

基金项目: 国家科技基础性工作专项(编号:2013FY111400); 甘肃省自然科学基金(编号:18JR4RA002); 国家自然科学基金(编号:41601073); 中国科学院A类战略性先导科技专项(编号:XDA20020102); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(编号:SKLCS-ZZ-2019)

第一作者简介: 刘宇硕, 1984年生, 男, 工程师, 研究方向为冰川变化与运动。E-mail: yushuo_liu@lzb.ac.cn

由于其地形复杂, 恶劣天气等不利因素, 往往难以开展全面的监测工作(刘时银, 2012; 吴丹丹, 2016)。随着科学技术的不断发展, 遥感技术成为新颖有效的冰川监测方法, 但是往往伴随着一些制约因素, 给监测研究带来不便(陈建明等, 1996; 李德仁和李明, 2014)。

无人机技术最早起源于20世纪20年代, 起初用于军事领域, 经过近百年来发展, 无人机应用已经进入众多领域。近年来随着无人机技术的发展, 无人机摄影测量技术已成为国土资源调查、危险区观测、灾害评估、突发事件实时监测以及救援指挥等重要的技术手段(Xu等, 2003; Rango等, 2006; 雷添杰等, 2011; 陆博迪等, 2011; 李德仁和李明, 2014)。Przybilla (1979) 和Wester-Ebbinghaus (1980) 分别在固定翼和直升机模型上携带相机进行测试, 可认为是最早将无人机技术应用到民用领域的先驱。在现有研究成果中, 基于无人机的冰川学研究只占环境监测中的一小部分, 并且多数工作都是在极地冰川展开, 而针对山地冰川开展的无人机监测很缺乏(Whitehead等, 2014a, 2014b; Bhardwaj等, 2016)。国内利用无人机在冰川监测方面的应用研究相当匮乏, 仅在冰川灾害监测有少量应用(李均力等, 2016)。常规监测手段往往存在难以开展、周期长、分辨率低以及成本大等严重问题, 而冰川变化研究要求宏观性、综合性、快速性和动态性(王祎婷等, 2010), 无人机摄影测量的发展为冰川动态监测研究提供了有效的技术手段。无人机以其特有的优点可以有效的弥补实地测量及遥感影像的不足(王斌, 2009; 王家杰, 2016)。

无人机摄影测量技术具有成本低、体积小、机动灵活、成像分辨率高和较好的时效性等优点, 以及可在人员难以到达的环境恶劣、地形复杂的区域工作, 弥补了传统冰川监测手段的不足, 在实施全面连续的冰川监测工作中, 具有明显的优势。利用重复航飞的无人机数据, 可以提取冰川表面高程变化及流速, 得出厘米级精度的定性及定量的结果(Rossini等, 2018)。但是无人机测量系统由于体积小、重量轻等因素, 会受到一定的干扰(王伟等, 2014; 唐晏, 2014), 需要在航拍前对其进行检校等操作, 减少不稳定因素(贾建华等, 2011; 周晓敏等, 2012)。在无人机航空

摄影测量中, 地面控制点的布设与测量成为能否获取高精度数据产品的关键(张纯斌等, 2018), 而山地冰川往往伴随着地形复杂, 行走困难, 野外实地测量难以全面实施等不利因素, 因此本研究针对以上问题, 选取位于祁连山西段大雪山地区的老虎沟12号冰川末端部分, 设计实施了多种控制点布设方案, 对比分析各个方案的精度优劣, 从而提出了合理可行的冰川区无人机摄影测量控制点布设方案。

2 数据获取与处理

2.1 研究区概况

老虎沟12号冰川(冰川编号: 5Y448D0012)位于青藏高原北缘, 祁连山西段大雪山地区, 是祁连山最大的山谷冰川。冰川由东、西两支冰体汇合而成, 属于极大陆性复式山谷冰川。该条冰川长9.8 km, 面积21.03 km²(Liu等, 2018), 冰川最高处海拔5483 m, 末端海拔4260 m, 积累区朝向南, 消融区朝向西南(王宗太, 1981)。1958年—1977年间冰川多年物质平衡线高差为4830 m(康兴成和丁良福, 1981)。东、西两支冰川汇合处海拔4550 m, 西支冰体裂隙发育较多, 表面形态较东支冰体复杂。研究区内主要受西风环流影响, 冬季气温长期处于0℃以下, 降水主要集中于4—9月(丁良福和康兴成, 1985)。1958年6月中下旬, 中国科学院高山冰雪研究队在祁连山区首次开展了大规模冰川考察, 同年10月, 选址祁连山西段大雪山地区老虎沟, 以12号冰川为主要观测对象, 建立了中国第一个高山冰川观测站——大雪山冰川观测站(又名野马山站), 开展冰川、气象、水文等基础性观测(施雅风, 1958; 施雅风等, 1985), 因而老虎沟12号冰川也成为中国第一条开展定位监测的冰川, 是中国现代冰川研究的发祥地(王宗太, 1981)。该冰川形态特殊、冰体巨大, 冰川消融区发育较多冰塔林, 行走困难, 目前开展的监测工作多以获取单点的监测数据为主。

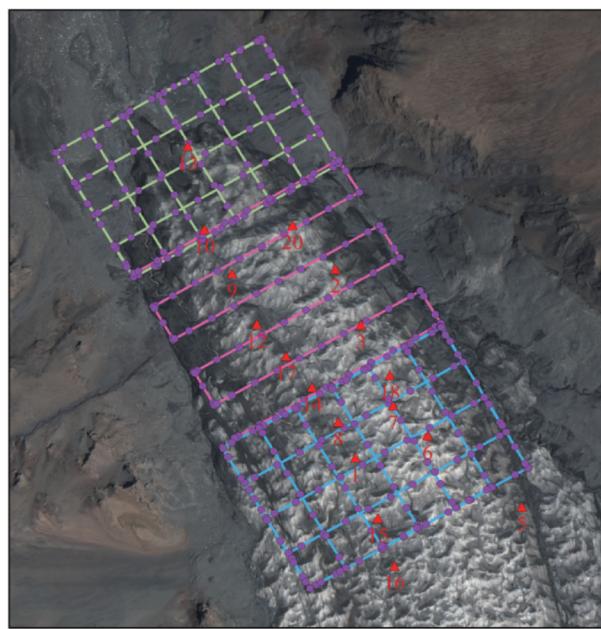
2.2 控制测量及航飞拍摄

本研究使用深圳市大疆创新科技有限公司(DJI) Phantom 4 Pro (P4P) 无人机1台, 该型无人机重量1388 g, 配备有效像素2000万1英寸CMOS图像传感器, FOV 84°, 8.8 mm/24 mm

(等效35 mm)镜头,最大飞行时间约30 min,最大可承受风速10 m/s, GPS/GLONASS双模卫星定位(<https://www.dji.com/cn/phantom-4-pro/info#specs> [2018-07-06])。使用南方测绘S86 GNSS接收机2台,该型接收机在Real-time kinematic (RTK)工作模式下,定位精度为垂直方向:±2 cm+1 ppm;水平方向:±1 cm+1 ppm(余宏远等,2013)。航线规划软件使用pix4D Capture(Android版),该软件提供两种航线规划模式,分别是Grid Mission(单格网)和Double Grid Mission(双格网)模式。解算软件使用pix4D mapper(<https://pix4d.com> [2018-07-06]),得到高精度的Digital Elevation Model(DEM)及正摄影像(DOM)。影像成果使用QGIS(<http://www.qgis.org> [2018-07-06])软件成图。

综合考虑飞行时间、影像重叠以及航高等因素,于2017-8-24在老虎沟12号冰川冰舌区共计实施了3个架次飞行,影像覆盖面积0.3844 km²,飞行参数均在Pix4D Capture中设定。每条航线设置航高120 m,航向与旁向重叠度均为80%,相机俯仰角度为70°。高海拔山区气温较低,会造成锂电池放电速度加快,为保证飞行安全,每个架次飞行时间不超过14 min,以保证无人机能顺利返航。飞行时天气状况较稳定,近地表基本处于无风状态,最大程度减少了天气状况对于无人机姿态的影响,同时每个架次在起飞前保证锁定卫星数≥10颗。为比较单格网及双格网模式在冰川测绘中的差异,设置第1、3架次为双格网模式,第2架次为单格网模式(图1)。其中第1、3架次各包含航线12条,主航线角度为238°与148°交叉形成双格网,航向分布范围各为0.049 km²及0.059 km²,第2架次包含航线6条,主航线角度为238°,航线分布范围为0.064 km²。冰川是运动着的巨大冰体,布设的标志点会随着冰面的运动不断向冰川末端流动,周围非冰川区受到流水侵蚀、风化等的影响也会发生显著变化,而无人机拍摄范围有限,可拍摄到的稳定非冰川区较少。因此,为了消除由于冰川运动及地形改变等因素造成的地面控制测量误差,无人机航拍拍摄与地面控制测量同步实施。冰川表面控制点分布如图1所示,较为均匀的分布在冰川表面,共计17个,坐标采用WGS84

椭球体,UTM投影。



▲控制点 ●POS点 —第1架次航迹 —第2架次航迹 —第3架次航迹

图1 老虎沟12号冰川冰舌区无人机航线及控制点布设图

Fig. 1 Route and control point of UAV at tongue of the Laohugou Glacier No. 12

2.3 数据处理及精度评价

依照3次航飞的覆盖区域,将冰舌分为3个部分,以下部、中部和上部分别对应第1、2、3架次航线。航拍相片以及控制点测量成果导入到Pix4D Mapper软件中自动处理,处理过程中按照不同控制点布设方案设置控制点与检查点,共计试验了15种组合方案。控制点及检查点精度通过平均误差(E_{mean})与均方根误差(E_{RMS})来表示。二者通过式(1)和式(2)分别计算

$$E_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n (X'_i - X_i)}{n} \quad (1)$$

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X'_i - X_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, n 为测点数; X'_i 为影像匹配值; X_i 为GNSS RTK测量值。

使用17个地面点作为控制点进行图像匹配处理,得到120 m航高下,地面分辨率为3.1 cm的正摄影像及DEM影像,水平及垂直方向控制点精度均控制在1个像元以内,误差标准Q-Q图(图2),控制点误差分布符合正态分布。

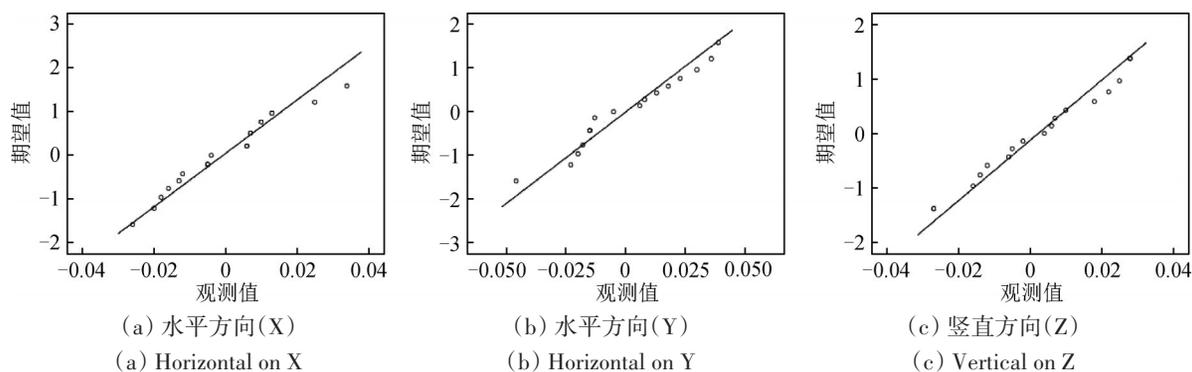


图2 控制点误差标准Q-Q图(X,Y为水平方向,Z为垂直方向,下同)

Fig. 2 Standard Q-Q plot of error of control point(X, Y are horizontal, Z is vertical)

3 控制点布设方案及精度评价

3.1 单、双格网航拍模式对比

在Pix4D Capture软件中提供了Grid(单格网)及Double Grid(双格网)两种飞行模式,航拍过程中,第1、3架次使用双格网模式,第2架次使用单格网模式,双格网模式飞行时间是单格网模式飞行时间的一倍。老虎沟12号冰川冰舌由于消融及流水作用形成了巨大的空洞,末端留有一个出水口,随着近年来气温不断升高,冰川消融加剧,冰洞于2012年开始坍塌,2015年消融季期间冰洞全部坍塌,坍塌面积约2900.13 m²,因此冰川末端部分区域发育了十分陡峭的冰坎。经处理对比,两种航拍模式所获取的图像结果均有较好的连续性,地面分辨率均为3.1 cm,校准误差均小于1个像元,而双格网模式并未在精度上有明显提高(表1),但是由于其数据量是单格网模式的一倍,因此处理时间较单格网模式成倍增加。因此后续实验均以单格网航拍模式获取的数据作为基础。

表1 双格网及单格网模式数据处理精度对比

Table 1 Accuracy of grid mission and double grid mission

格网种类	误差/m	X	Y	Z
双格网	平均误差	-0.0006	0.0002	0.0023
	RMS误差	0.0159	0.0232	0.0178
单格网	平均误差	-0.0007	0.0002	0.0001
	RMS误差	0.0139	0.0231	0.0137

3.2 无控制点及控制点均匀分布情况下检查点误差分析

当冰川表面不设置控制点时,垂直误差接近200 m,水平方向的精度完全取决于与机载GNSS系统的精度,如果机载设备受到干扰或者卫星信号不稳定的情况下,解算精度还会进一步下降。一般来讲冰川区多处于高寒高海拔的无人地带,GNSS信号受到干扰的可能行比较小,而受山体遮蔽等的影响,信号质量可能出现降低的情况,但是垂直方向的误差过大,生成的DEM数据在冰川表面高程变化监测研究中不具有使用价值(表2),因此后续不再对其进行讨论。

表2 不同数量控制点均匀分布于冰川表面检查点误差

Table 2 Error of check point when using different number of control point in glacier surface evenly

GCP数量	控制点编号	误差/m	X	Y	Z
0		平均误差	-0.0711	0.7943	-195.484
		RMS误差	0.295	1.0969	195.4867
3	5, 13, 14	平均误差	-0.0243	-0.0414	-0.004
		RMS误差	0.0278	0.0676	0.076
5	2, 6, 13, 15, 17	平均误差	0.0011	0.005	0.002
		RMS误差	0.0185	0.0382	0.0263
7	1, 2, 5, 7, 12, 13, 16	平均误差	0.0056	0.0322	0.0038
		RMS误差	0.0163	0.0396	0.0188
10	2, 5, 6, 8, 9, 13, 15, 17, 18, 20	平均误差	-0.0003	-0.0044	-0.0022
		RMS误差	0.0247	0.0354	0.0142

控制点均匀布设于冰川表面是最为理想的情况, 本研究对比了4种方案中检查点的精度结果(表2)。3个控制点是Pix4D Mapper软件匹配校正的最低要求, 使用3个控制点进行图像校正后, 检查点均方根误差在X方向上接近1个像元, Y方向和Z方向均超过2个像元; 使用5个控制点及7个控制点进行图像校正后, 检查点均方根误差均有明显降低, X方向误差在半个像元左右, Y方向误差控制在一个像元左右, 垂直方向误差均在一个像元内, 但使用7个控制点的效果要优于5个控制点方案; 使用10个控制点进行匹配校正后, 水平方向均方根误差没有进一步降低, 垂直方向均方根误差要优于其他方案。4种方案检查点误差在Y方向上较为分散, 存在一点的偏态分布。当使用3个

控制点时, 检查点垂直方向误差也相对较为分散, 并且呈现出一定的偏态分布趋势, 其余3种方案检查点误差分布相对收敛(图3)。

一般来讲控制点及检查点误差除系统误差之外, 还会受到地形因素的影响, 研究区位于冰川末端消融区, 表面冰塔林十分发育, 表面形态复杂, 起伏剧烈。将坡度、高程及检查点到GNSS-RTK基准站之间的距离与检查点各个方向上的误差做回归统计分析, 结果显示: 当使用3个控制点时, 垂直方向误差受距离及高程的影响较大, $P < 0.05$, 差异性显著; 随着控制点数量的增加, 检查点各个方向误差受地形因素影响程度减弱, $P > 0.05$, 差异性不显著(表3)。

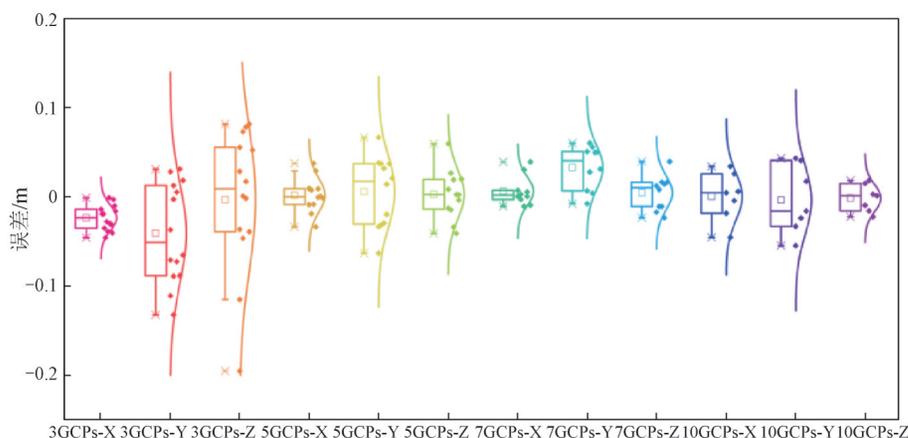


图3 检查点误差箱型图对比

Fig. 3 Box-plot of check point error

表3 地形因子与检查点各方向误差显著性统计

Table 3 Significance test of topographic factors and check point error

GCP数量	误差显著性因子	X误差	Y误差	Z误差
3	坡度	0.474	0.278	0.853
	距离	0.568	0.543	0.005
	高程	0.403	0.468	0.013
5	坡度	0.206	0.165	0.973
	距离	0.279	0.256	0.116
	高程	0.513	0.433	0.18
7	坡度	0.316	0.147	0.432
	距离	0.767	0.713	0.273
	高程	0.962	0.916	0.196
10	坡度	0.215	0.139	0.706
	距离	0.553	0.38	0.658
	高程	0.677	0.477	0.628

3.3 控制点不能均匀分布情况下检查点误差分析

在冰川区实施无人机摄影测量时, 往往由于复杂的地表状况, 不允许布设大量的控制点, 或控制点不能均匀分布在测区内。

本研究中依据冰舌不同位置设计了9种控制点布设方案, 以检查点平均误差和RMS误差为指标, 评估方案精度及可行性。若只设置3个控制点进行匹配校正, 检查点均方根误差在各个方向上误差都较大, 均超过1个像元, 其中控制点分布在冰舌下部时, 垂直方向均方根误差最大; 分别使用5、7个控制点, 分布在冰川中上部和中下部进行匹配校正, 检查点均方根误差有所降低; 沿冰川主流线布设10个控制点时, Y方向均方根误差接近两个像元, X方向及垂直方向均方根误差在一个像元左右(表4)。控制点不能均匀分布于测量区域时,

检查点的误差多呈现偏态分布，较为离散，当控制点覆盖地形起伏较大区域时，误差得到一定的控制（图4）。

地面标志点水平坐标及高程经归一化处理，用以展示控制点及检查点相对位置，各个方向上的误差线显示：使用3个控制点匹配校正后的检查点误差在水平方向均出现较大误差，距离控制点越远，误差越大；使用5个控制点分布于冰舌中上部时，冰舌最底部的检查点在X方向出现了较大的误差，当控制点分布于冰舌中下部时，冰舌中上部水平方向均出现了较大的误差；使用7个控制点分布于冰舌中上部时，冰舌中下部检查点误差较大，尤其在Y方向，当控制点分布于冰舌下部时，位于冰舌中上部的检查点水平方向误差较大；使用10个控制点沿冰川主流线方向分布时，检查点误差较小，只有最上部一个距离较远的检查点误差较大（图5）。总体上如果控制点集中在冰舌的下部或者中下部，检查点的误差较大，如果控制点集中在冰舌的上部或者中上部，检查点的误差相对较小，这可能与冰舌末端高程变化较为剧烈有关。

表4 不同数量控制点分布于不同区域时检查点误差
Table 4 Check point error with different number of control point at different part of glacier tongue

GCP 数量	分布位置	误差/m	X	Y	Z
3	冰舌上部	平均误差	-0.0069	0.1458	0.0193
		RMS 误差	0.0357	0.1888	0.044
	冰舌中部	平均误差	0.0192	0.0187	0.0036
		RMS 误差	0.0592	0.0481	0.0478
	冰舌下部	平均误差	-0.0121	-0.0658	-0.1001
		RMS 误差	0.0209	0.081	0.1243
5	冰舌中上部	平均误差	-0.0201	-0.0198	0.0436
		RMS 误差	0.0307	0.0359	0.0835
	冰舌中下部	平均误差	-0.0298	-0.0503	-0.0054
		RMS 误差	0.0364	0.0635	0.0311
7	冰舌中上部	平均误差	-0.0062	0.0936	0.0604
		RMS 误差	0.029	0.1099	0.0856
	冰舌中下部	平均误差	-0.0231	-0.0573	-0.0434
		RMS 误差	0.0254	0.0723	0.0742
10	冰舌主流线	平均误差	-0.0263	-0.0054	0.0208
		RMS 误差	0.0351	0.0528	0.0377

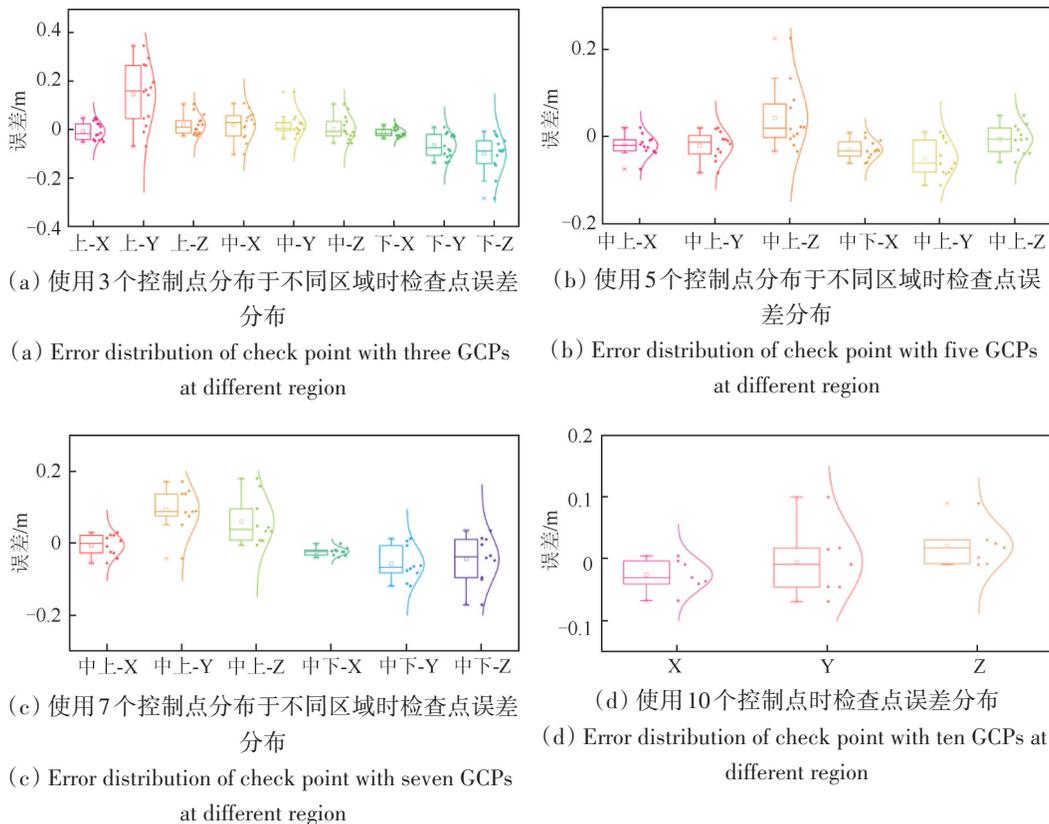


图4 不同数量控制点分布于不同区域时,检查点误差分布

Fig. 4 Error distribution of check point with different number of GCPs at different part of glacier tongue

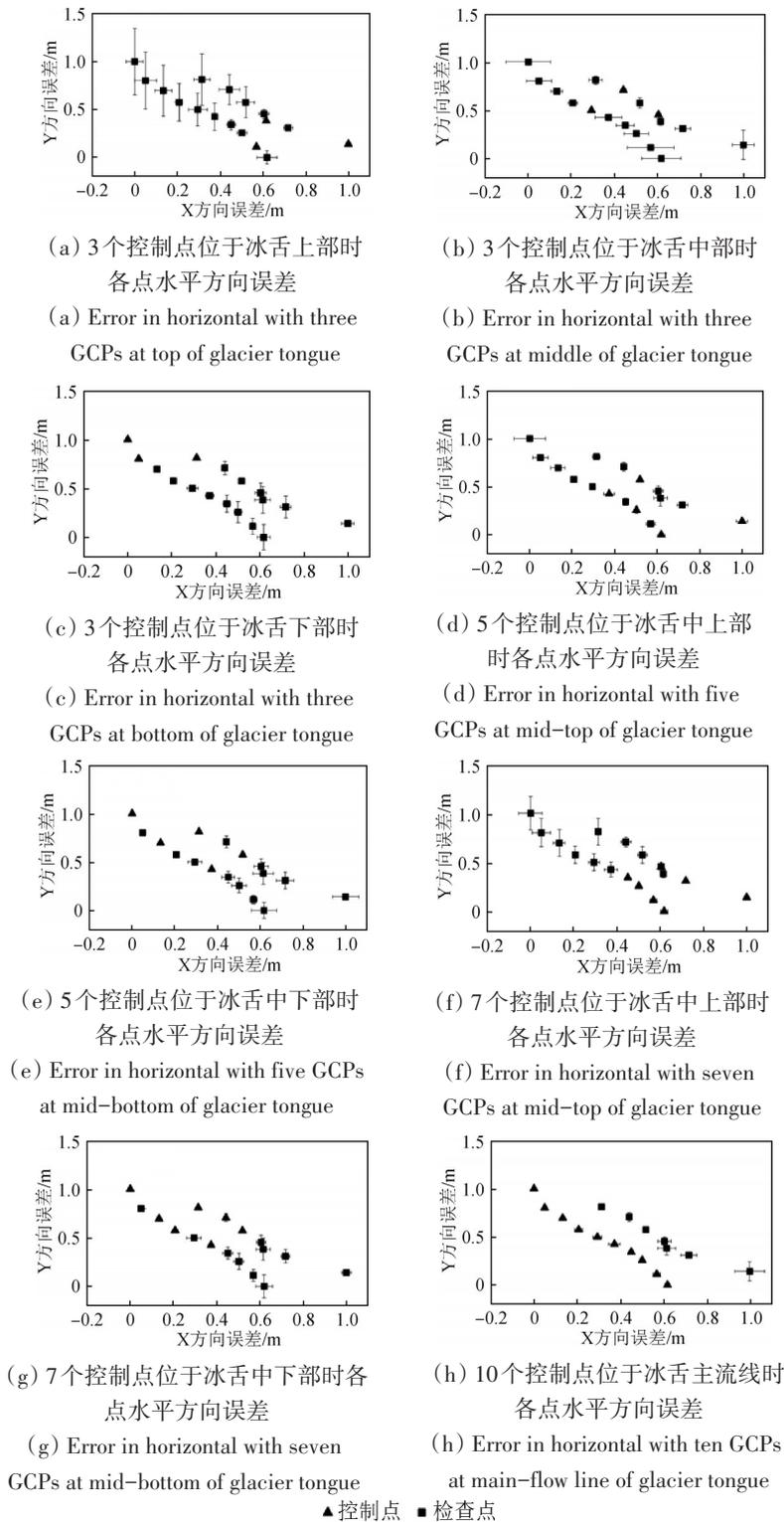


图5 不同数量控制点不同分布区域时各点水平方向误差
Fig. 5 Error in horizontal with different number of GCPs at different part of glacier tongue

高程精度方面, 使用3个控制点匹配校正时, 检查点误差均出现增大的趋势; 使用5个控制点进行匹配校正时, 当控制点分布于冰舌中上部时, 冰舌末端的检查点出现了较大的误差, 当控制点分布于冰舌中下部时, 冰舌中上部的检查点误差较小。使用7个控制点进行匹配校正, 当控制点分布于冰舌中上部和中下部时, 检查点高程误差都

较大。当使用10个点控制点沿冰舌主流线布设进行匹配校正时, 检查点高程误差较小(图6)。老虎沟12号冰川冰舌区发育有大量的冰塔林, 表面形态复杂, 冰川末端区域表面高程变化剧烈因此控制点分布于冰川末端区域时, 所得结果在水平和垂直方向误差较大, 若控制点分布区域覆盖变化较为剧烈的区域, 结果精度有较大提升。

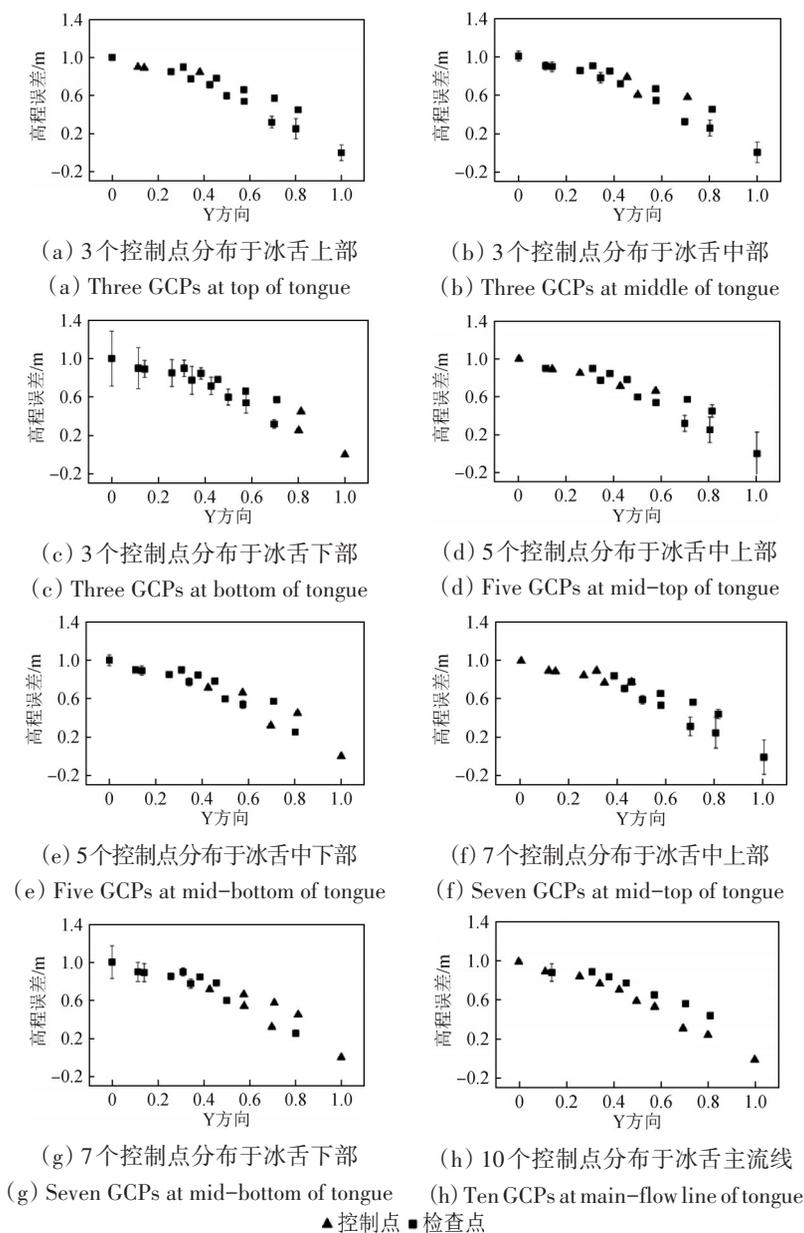


图6 不同数量控制点分布于不同区域时各点垂直方向误差

Fig. 6 Error in vertical with different number at different part of glacier tongue

3.4 方案验证

随着全球气候变暖加剧, 老虎沟12号冰川也出现了退缩加剧的现象, 近50多年来, 冰川后退

累计超过300 m, 冰川中下部区域冰体减薄最为明显(Liu等, 2018)。对于冰川消融区的全面监测显得越来越重要, 由于传统监测手段的限制, 冰塔林区监测不能全面开展, 人员无法抵达区域占

比越来越大,紧靠有限的单点观测已不能全面研究冰川消融状况。无人机测绘技术能够突破地形限制,对冰塔林区域开展全面的观测,为冰川全面精细化监测提供良好的技术手段。为了验证控制点布设方案在较大范围下的适用性,于2018-07-21对老虎沟12号冰川消融区再次实施了无人机摄影测量,于冰川表面新布设13个标志点,其中均匀选择6个点作为控制点,其余点作为检查点,累计飞行12个架次,共计影像覆盖面积为2.9 km²(图7),生成分辨率为5 cm的DEM及DOM影像,检查点各方向精度均控制在1个像元以内。

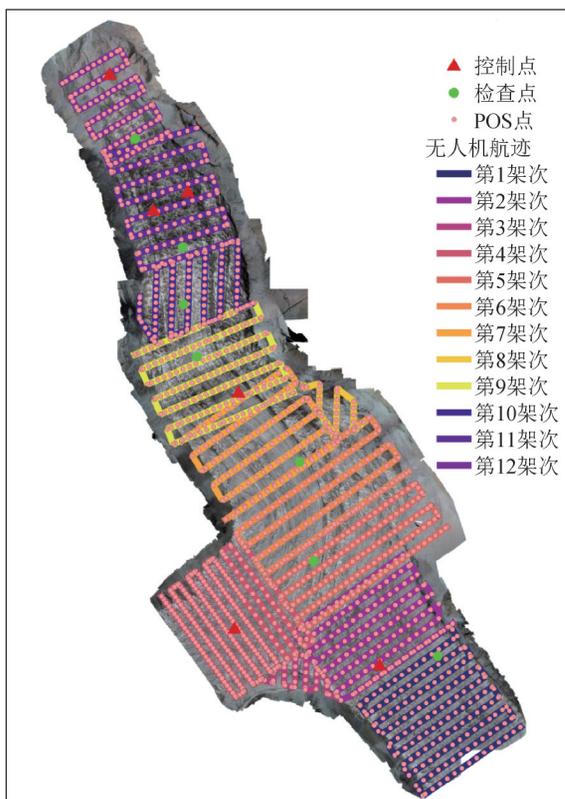


图7 老虎沟12号冰川消融区无人机正摄影像及控制、检查点分布

Fig 7 DOM by UAV and distribution of control point at ablation area of the Laohugou Glacier No. 12

4 结论

冰川区往往伴随着陡峭的地形和复杂表面形态,对观测造成巨大的不利条件。航空摄影测量中控制点的布设及测量有着较高的要求,但是在冰川区作业往往不能满足控制点布设要求。本研究中以老虎沟12号冰川冰舌区作为研究对象,使用低空轻型无人机实施航拍作业,按照冰舌不同区域进行控制点布设方案试验,对15种航飞及控

制点布设方案对比分析后,得出主要结论如下:

(1) 利用无人机进行冰川监测,能够获取空间连续的高精度DEM和DOM数据,很大程度上提高了冰川监测的效率,降低作业强度;

(2) 航飞过程中,使用双格网模式没有提高DEM和DOM的精度,反而成倍的增加飞行时间和数据处理时间,因此在冰川区实施无人机测量作业,使用单格网模式完全能够满足精度要求;

(3) 不设立地面控制点的情况下,水平及竖直精度完全取决于无人机搭载的GNSS系统精度,在本研究中水平精度降低到米级,而高程精度会出现近200 m误差,所生成的DEM数据无法用于冰川表面高程变化监测;

(4) 控制点能够均匀分布在整个测量区域是最为理想的状态,冰川表面较为复杂时,控制点数量较少时精度会下降,误差主要受地形因素影响,使用5个及以上数量控制点可有效提高DEM和DOM图像校准精度,考虑到冰川区控制点布设的难度,5—7个控制点是较为合理的方案;

(5) 若冰舌表面不能满足均匀分布的情况下,控制点的布设应尽量覆盖变化剧烈的区域,若沿冰舌主流线布设足够数量的控制点也能获取较高精度的影像结果。

参考文献(References)

- Bhardwaj A, Sam L, Akanksha, Martín-Torres F J and Kumar R. 2016. UAVs as remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 175: 196-204 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.029]
- Chen J M, Liu C H and Jin M X. 1996. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi river. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18(4): 331-336 (陈建明, 刘潮海, 金明燮. 1996. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用. *冰川冻土*, 18(4): 331-336)
- Ding L F and Kang X C. 1985. Climate Conditions for the Development of Glacier and Their Effect on the Characteristics of Glaciers in Qilian Mountains. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences No. 5*. Beijing: Science Press: 9-15 (丁良福, 康兴成. 1985. 祁连山冰川发育的气候条件及其对冰川特征的影响. *中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第5号)*. 北京: 科学出版社: 9-15)
- Haerberli W, Cihlar J and Barry R G. 2000. Glacier monitoring within the global climate observing system. *Annals of Glaciology*, 31: 241-246 [DOI: 10.3189/172756400781820192]

- Hodge S M, Trabant D C, Krimmel R M, Heinrichs T A, March R S and Josberger E G. 1998. Climate variations and changes in mass of three glaciers in Western North America. *Journal of Climate*, 11(9): 2161-2179 [DOI: 10.1175/1520-0442(1998)011<2161:CVACIM>2.0.CO;2]
- Jansson P, Hock R and Schneider T. 2003. The concept of glacier storage: a review. *Journal of Hydrology*, 282(1/4): 116-129 [DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00258-0]
- Jia J H, Zhang M, Liu P and Hu R M. 2011. DEM for high-resolution and low altitude images of UAV. *Science of Surveying and Mapping*, 36(4): 201-202, 138 (贾建华, 张敏, 刘潘, 胡荣明. 2011. 高分辨率无人机低空影像DEM的建立及其精度研究. *测绘科学*, 36(4): 201-202, 138) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2011.04.082]
- Kang S C, Xu Y W, You Q L, Flügel W A, Pepin N and Yao T D. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau. *Environmental Research Letters*, 5(1): 015101 [DOI: 10.1088/1748-9326/5/1/015101]
- Kang X C and Ding L F. 1981. Relation of mass balance, ELA and climate in Tianshan Mountain and Qilian Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 3(1): 53-56 (康兴成, 丁良福. 1981. 天山和祁连山的冰川物质平衡、雪线位置与天气气候的关系. *冰川冻土*, 3(1): 53-56)
- Lei T J, Li C C and He X Y. 2011. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue. *Journal of Natural Disasters*, 20(1): 178-183 (雷添杰, 李长春, 何孝莹. 2011. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用. *自然灾害学报*, 20(1): 178-183)
- Li D R and Li M. 2014. Research advance and application prospect of unmanned aerial vehicle remote sensing system. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 39(5): 505-513, 540 (李德仁, 李明. 2014. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景. *武汉大学学报(信息科学版)*, 39(5): 505-513, 540) [DOI: 10.13203/j.whugis.20140045]
- Li J L, Chen X, Bao A M, Shen Z F and Ji S P. 2016. Glacier hazard emergency monitoring of the Jiubie Peak in Kongur Mountains using unmanned aerial vehicle photogrammetry. *Arid Land Geography*, 39(2): 378-386 (李均力, 陈曦, 包安明, 沈占锋, 季顺平. 2016. 公格尔九别峰冰川跃动无人机灾害监测与评估. *干旱区地理*, 39(2): 378-386)
- Li Z G, Yao T D and Tian L D. 2008. Progress in the research on the impact of glacial change on water resources. *Journal of Natural Resources*, 23(1): 1-8 (李治国, 姚檀栋, 田立德. 2008. 国内外冰川变化对水资源影响研究进展. *自然资源学报*, 23(1): 1-8) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2008.01.001]
- Li Z Q, Li K M and Wang L. 2010. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, north western China. *Quaternary Sciences*, 30(1): 96-106 (李忠勤, 李开明, 王林. 2010. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究. *第四纪研究*, 30(1): 96-106)
- Liu S Y. 2012. *Field Observations in Glaciological Research*. Beijing: Science Press: 1-7 (刘时银. 2012. *冰川观测与研究方法*. 北京: 科学出版社: 1-7)
- Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, Xu J L, Shangguan D H, Wei J F, Bao W J and Wu L Z. 2015. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 70(1): 3-16 (刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利, 上官冬辉, 魏俊锋, 鲍伟佳, 吴立宗. 2015. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 70(1): 3-16) [DOI: 10.11821/dlxb201501001]
- Liu Y S, Qin X, Chen J Z, Li Z L, Wang J, Du W T and Guo W Q. 2018. Variations of Laohugou glacier No. 12 in the western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2015. *Journal of Mountain Science*, 15(1): 25-32 [DOI: 10.1007/s11629-017-4492-y]
- Lu B D, Meng D W, Lu M, Zhao J Y, Xie Z M and Yang J J. 2011. Application and exploration of unmanned aerial vehicle in major natural disasters. *Journal of Catastrophology*, 26(4): 122-126 (陆博迪, 孟迪文, 陆鸣, 赵京轶, 谢周敏, 杨建军. 2011. 无人机在重大自然灾害中的应用与探讨. *灾害学*, 26(4): 122-126) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2011.04.024]
- Oerlemans J. 1994. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 264(5156): 243-245 [DOI: 10.1126/science.264.5156.243]
- Przybilla H and Wester-Ebbinghaus W. 1979. Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. *Bildmessung und Luftbildwesen*, 47: 137-142
- Qin D H and Ding Y J. 2009. Cryospheric changes and their impacts: present, trends and key issues. *Advances in Climate Change Research*, 5(4): 187-195 (秦大河, 丁永建. 2009. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题. *气候变化研究进展*, 5(4): 187-195) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1719.2009.04.001]
- Qin D H, Yao T D, Ding Y J and Ren J W. 2016. *Glossary of Cryospheric Science*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 5-6 (秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 任贾文. 2016. *冰冻圈科学辞典*. 2版. 北京: 气象出版社: 5-6)
- Qin D H, Yao T D, Ding Y J and Ren J W. 2017. *Introduction of Cryosphere Science*. Beijing: Science Press: 454-455 (秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 任贾文. 2017. *冰冻圈科学概论*. 北京: 科学出版社: 454-455)
- Rango A, Laliberte A, Steele C, Herrick J E, Bestelmeyer B, Schmutge T, Roanhorse A and Jenkins V. 2006. Research article: using unmanned aerial vehicles for rangelands: current applications and future potentials. *Environmental Practice*, 8(3): 159-168 [DOI: 10.1017/S1466046606060224]
- Rossini M, Di Mauro B, Garzonio R, Baccolo G, Cavallini G, Matavelli M, De Amicis M and Colombo R. 2018. Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, 304: 159-172 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.12.039]
- Shi Y F. 1958. Preliminary study on the use of ice and snow in Qilian Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 9(18): 574-575 (施雅风. 1958. 祁连山冰雪利用研究初步开展. *科学通报*, 9(18): 574-575) [DOI: 10.1360/csb1958-3-18-574]
- Shi Y F. 2005. *Concise Glacier Inventory of China*. Shanghai: Shanghai Popular Science Press: 177-188 (施雅风. 2005. *简明中国冰川目录*. 上海: 上海科学普及出版社: 177-188)

- Shi Y F, Xie Z C, Zhang X S and Huang M H. 1985. Twenty five years of glaciology in China: retrospect and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 40(4): 367-376 (施雅风, 谢自楚, 张祥松, 黄茂桓. 1985. 二十五年来中国冰川学的回顾与展望. *地理学报*, 40(4): 367-376) [DOI: 10.11821/xb198504007]
- Sorg A, Bolch T, Stoffel M, Solomina O and Beniston M. 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2(10): 725-731 [DOI: 10.1038/nclimate1592]
- Tang Y. 2014. Research on the Vegetation Identification Method Based on UAV Image Acquisition. Chengdu: Chengdu University of Technology (唐晏. 2014. 基于无人机采集图像的植被识别方法研究. 成都: 成都理工大学)
- Wang B. 2009. Study on the Soil Moisture Predictive Model Based on the Image Shot by Unmanned Aerial Vehicle. Qingdao: China University of Petroleum (王斌. 2009. 基于无人机采集图像的土壤湿度预测模型研究. 青岛: 中国石油大学)
- Wang J J. 2016. Research on Low-altitude Aerial Photographical Systems Based on Unmanned Aerial Vehicle. Harbin: Harbin Institute of Technology (王家杰. 2016. 无人机低空摄影测量系统研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学)
- Wang W, Ma H, Xu J Q and Sun C Y. 2014. Research on standardized design method of airframe for multi-rotor UAV. *Machinery Design and Manufacture*, (5): 147-150 (王伟, 马浩, 徐金琦, 孙长银. 2014. 多旋翼无人机标准化机体设计方法研究. *机械设计与制造*, (5): 147-150) [DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2014.05.046]
- Wang Y T, Chen X W, Bo Y C and Li X L. 2010. Monitoring glacier volume change based on multi-source DEM and multi-temporal remote sensing images—a case study in the mount Naimona'nyi region on the Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(1): 126-132 (王祎婷, 陈秀万, 柏延臣, 黎新亮. 2010. 多源DEM和多时相遥感影像监测冰川体积变化——以青藏高原那木纳尼峰地区为例. *冰川冻土*, 32(1): 126-132)
- Wang Z T. 1981. Glacier Inventory of China I: Qilian Moutains. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glacier and Permafrost, Chinese Academy of Sciences (王宗太. 1981. 中国冰川目录I: 祁连山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所)
- Wester-Ebbinghaus W. 1980. Aerial photography by radio controlled model helicopter. *The Photogrammetric Record*, 10(55): 85-92 [DOI: 10.1111/j.1477-9730.1980.tb00006.x]
- Whitehead K and Hugenholtz C H. 2014 a. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3): 69-85 [DOI: 10.1139/juvs-2014-0006]
- Whitehead K, Hugenholtz C H, Myshak S, Brown O, LeClai A, Tamminga A, Barchyn T E, Moorman B and Eaton B. 2014 b. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 2(3): 86-102 [DOI: 10.1139/juvs-2014-0007]
- Wu D D. 2016. Remote Sensing Analysis of the Dynamic Change of Glacier on the Tibet Plateau. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (吴丹丹. 2016. 青藏高原地区冰川动态变化遥感研究. 北京: 中国地质大学(北京))
- Xie Z C and Liu C H. 2010. Introduction of Glaciology. Shanghai: Shanghai Popular Science Press: 17-18 (谢自楚, 刘潮海. 2010. 冰川学导论. 上海: 上海科学普及出版社: 17-18)
- Xu Y, Jiang F K, Newbern S, Huang A, Ho C M and Tai Y C. 2003. Flexible shear-stress sensor skin and its application to unmanned aerial vehicles. *Sensors and Actuators A: Physical*, 105(3): 321-329 [DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00230-9]
- Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B and Joswiak D. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663-667 [DOI: 10.1038/nclimate1580]
- Yu H Y, Wei H Y and Zhu J. 2013. Operation and used of the GPS-RTK——Taking Nan Fang Ling Rui S86 as an example. *Journal of Hexi University*, 29(2): 61-64 (余宏远, 魏宏源, 朱军. 2013. 浅谈GPS-RTK操作及应用——以南方灵锐S86为例. *河西学院学报*, 29(2): 61-64) [DOI: 10.13874/j.cnki.62-1171/g4.2013.02.010]
- Zhang C B, Yang S T, Zhao C S, Lou H Z, Zhang Y C, Bai J, Wang Z W, Guan Y B and Zhang Y. 2018. Topographic data accuracy verification of small consumer UAV. *Journal of Remote Seasing*, 22(1): 185-195 (张纯斌, 杨胜天, 赵长森, 娄和震, 张亦驰, 白娟, 王志伟, 管亚兵, 张远. 2018. 小型消费级无人机地形数据精度验证. *遥感学报*, 22(1): 185-195) [DOI: 10.11834/jrs.20186483]
- Zhou X M, Zhao L B and Zhang X L. 2012. Discussion on technique and method of low level UAV image processing. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 35(2): 182-184 (周晓敏, 赵力彬, 张新利. 2012. 低空无人机影像处理技术及方法探讨. *测绘与空间地理信息*, 35(2): 182-184) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2012.02.055]

Influence of the use of photogrammetric measurement precision on low-altitude micro-UAVs in the glacier region

LIU Yushuo¹, QIN Xiang¹, GUO Wanqin², GAO Siru³, CHEN Jizu¹, WANG Lihui¹, LI Yanzhao¹, JIN Zizhen¹

1. Qilian Observation and research Station of Cryosphere and Ecologic Environment State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: In the global warming background, glaciers around the world remarkably shrunk. Glacier monitoring is an important part of cryosphere science. High-quality DEM and DOM were the primary data in glacier research. In recent years, the rapid development of the technicality of UAV provided a new platform for observing glacier. The control point was usually unevenly distributed on glacier surface because of complex and inaccessible surface conditions. Thus, this study set 17 control points on the lower part of the Laohugou Glacier No. 12. Aerial photography images were acquired by low-altitude micro-UAV covered ice tongue. Pix4D Capture was used as route planning software, and all images and control points were processed by Pix4D Mapper software. In processing, different numbers and distribution modes were used, and the accuracy of every DEM and DOM were checked. Pix4D Capture has two route planning modes, namely, single grid and double grid. The two route planning modes have the same accuracy. In ice tongue, five control points are evenly distributed, and high precision image data could be obtained. If enough control points are distributed along with the main flow line of the glacier, then the image precision is acceptable. If the control points are mainly distributed at the mid-upper or mid-lower parts of the glacier, then control point should cover the fluctuation region of the ice surface.

Key words: remote sensing, UAVs, photogrammetry, DEM, DOM, the Laohugou Glacier No. 12

Supported by National Foundational Scientific and Technological Work Programs of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2013FY111400); the Major Program of the Natural Science Foundation of Gansu province, China (No. 18JR4RA002); the National Natural Science Foundation of China (No. 41601073); the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No. XDA20020102); the Project from the State Key Laboratory of Cryospheric Sciences (No. SKLCS-ZZ-2019)