

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201910037

# 轻小型无人机遥感在高山峡谷区山地灾害应急监测中的应用\*

赵鹏辉<sup>1</sup>, 李俊杰<sup>1,2</sup>, 叶唐进<sup>1</sup>, 薄 雾<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 西藏大学工学院, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:**高山峡谷区频发的山地灾害易堵塞河道形成堰塞湖,对下游城镇和重要基础设施影响极为严重。复杂的地形地貌环境中无法找到合适起降场地、航线规划不准、操作复杂等因素极大地限制了专业级无人机遥感系统在该区域的应用。针对高山峡谷区山地灾害发生后观测数据获取困难局面,探索将轻小型无人机应用于灾害应急监测。以藏东南深切峡谷地区102滑坡群2#滑坡、古乡沟泥石流为例,介绍了轻小型无人机遥感数据快速采集流程。基于航测影像数据对灾害现场进行三维模型快速重建,并将建模结果与三维激光点云模型对比,验证方法的可行性和准确性。结果表明:应急条件下基于轻小型无人机的山地灾害三维模型精度在分米级,平面方向精度高于高程方向,最大误差率低于9.7%。作为一种数据快速获取方法,可将其应用到山地灾害应急监测领域。

**关键词:**轻小型无人机; 滑坡; 泥石流; 应急监测; 三维模型

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0448-07

## Application of Micro-UAV Remote Sensing in Emergency Mountain Hazards Monitoring of Alpine Valley Region

ZHAO Penghui<sup>1</sup>, LI Junjie<sup>1,2</sup>, YE Tangjin<sup>1</sup>, BO Wu<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Technology, Tibet University, Lasa 850000, China)

**Abstract:** Frequent mountainous natural disasters in alpine mountainous and ravine regions can easily block rivers to form dammed lakes. These disasters threaten the safety of downstream towns and infrastructures. The use of the professional unmanned aerial vehicle (UAV) remote-sensing systems is limited in such regions because of a lack of suitable landing sites, inaccuracies in route planning, and the complicated nature of operational processes. To tackle these challenges in obtaining observational data after landslides in alpine areas, a light and small UAV is proposed for disaster monitoring applications. The performance of the micro-UAV was explored in a flight recording data from the No. 2 landslide of the 102 landslide group and debris flow in Guxiang valley in southeast Tibet. The feasibility and accuracy of this method were evaluated by a comparison between the micro-UAV measurements and the

\* 收稿日期:2019-10-23;修回日期:2019-12-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401600,2017YFC0404906)、国家自然科学基金项目(51779035,51769033)资助

作者简介:赵鹏辉(1992—),男,博士研究生。主要从事山地灾害机器视觉监控系统研究。E-mail:zhao\_ph@yeah.net

modeling results from the three-dimensional laser point cloud. The results show that the three-dimensional model based on the micro-UAV data is accurate to the level of decimeters. The proposed method is more accurate in the plane direction than in elevation, and the maximum measurement error is less than 9.7%. These results show that as a method to quickly obtain data of a disaster, the proposed UAV method can be applied to the field of monitoring alpine emergencies.

**Keywords:** micro-UAV; landslide; debris flow; emergency monitoring; three-dimensions model

## 引言

高山峡谷区地形地貌复杂、山高坡陡,在河流下切侵蚀、地质构造活动、寒冻风化等因素作用下岩层破碎,为滑坡和泥石流的形成及其堵塞河道形成堰塞湖提供了条件。由于下垫面作用,高山峡谷区又常常成为局部暴雨最为活跃的地区<sup>[1]</sup>。在此背景下,长江、黄河、雅鲁藏布江等大江大河的上游支流、支沟中,山地灾害极为发育。以川藏公路为例,然乌至鲁朗 272 km 范围内,发育地质灾害 178 处,直接危害长度 72.5 km,占沿帕隆藏布江路段的 26.65%<sup>[2]</sup>。川藏公路帕隆藏布江沿线频繁发生的山地灾害及其次生灾害往往导致交通中断,并严重威胁着当地群众的生命财产安全。山地灾害发生后迅速准确获取到的灾情信息是救灾指挥机构实施正确决策的重要依据,而灾害现场往往通讯、交通中断,专业测量人员与装备难以及时到达。因此研究能够为灾情分析、救灾预案选择提供重要决策支撑的山地灾害数据快速获取方法意义重大。

近年来,无人机遥感系统发展迅速,以其独有的使用成本低、影像实时传输、高危地区作业方便等特点逐步成为一项空间数据获取的重要手段,目前已成功应用到生态环境保护<sup>[3]</sup>、土地利用调查<sup>[4]</sup>、水资源开发<sup>[5]</sup>等诸多研究领域。然而,专业级无人机遥感系统在高山峡谷区山地灾害调查中的应用依然存在诸多问题。固定翼无人机遥感系统滞空时间长、飞行姿态稳定,具备大范围带状测区地表数据快速获取能力,但对大面积空旷起降场地的要求以及较大的飞行转弯半径使其难以在地形地貌复杂的高山峡谷区发挥作用。专业级多旋翼无人机相对于固定翼无人机对起降场地要求较低,但基于 Google Earth 数字表面模型(Digital surface model, DSM)获取的初步规划航线通常与实际地形存在较大偏差<sup>[6]</sup>,在数据采集过程中需额外配备监控人员远距离跟踪观察飞行器周边环境中的飞行隐

患,因此在该区域难以近距离获取单体灾害高分辨率空间数据。轻小型无人机相较于专业级测绘无人机遥感系统操作更为简便、机动性更强、成本更低,在应急监测中响应速度更快。目前,利用轻小型无人机遥感系统对高山峡谷区单体山地灾害建立数字三维模型,提取灾害数据的研究较少,因此本文以位于藏东南地区帕隆藏布江流域高山峡谷区域的 102 滑坡群 2<sup>#</sup> 滑坡和古乡沟泥石流为例,研究基于轻小型无人机遥感系统的高山峡谷区山地灾害现场三维重建模型精度与可行性,为未来轻小型无人机遥感系统在同类型区域灾害应急监测中的应用提供实践参考。

## 1 基于航测影像的三维重建

轻小型无人机受限于飞行平台载重性能,通常搭载单镜头相机,且画幅较小。为得到高质量三维模型,需按《低空数字航空摄影规范》<sup>[7]</sup>规划影像采集航线(航向重叠度一般应为 60%~80%,最小不应小于 53%;旁向重叠度一般应为 15%~60%,最小不应低于 8%)。基于航测影像的三维模型重建算法可直接从具有一定重复率的二维影像中重建三维模型,关键步骤为特征点提取、同名像点匹配。

### 1.1 基于 SIFT 的特征点提取

用于灾害现场三维模型重建的无人机航测影像数据量庞大,拍摄过程中光线变化、成像噪声和镜头畸变等因素将导致基于几何、纹理特征的传统特征点提取算法难以有效发挥作用。尺度不变特征变换(Scale-invariant feature transform, SIFT)是一种具有高鲁棒性的局部影像特征的侦测方法,能够在高斯差分(Difference of Gaussians, DOG)尺度空间中快速寻找极值点并提取出其位置、尺度、旋转不变量,从而得到每幅图像的特征点。高斯差分算子公式为:

$$DOG = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left( \frac{1}{\sigma_1} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{1}{\sigma_2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_2^2}\right) \right) \quad (1)$$

式中,  $x, y$  为图像中点的位置;  $\sigma_1, \sigma_2$  为上下层高斯空间中的尺度因子。

## 1.2 多视像点匹配

多幅图像的 SIFT 特征向量提取后, 需以特征向量的欧氏距离作为多幅影像中特征点相似性的判定度量标准进行特征匹配, 进而找到具有较高可靠性的匹配点对。以基准图像的某个特征点为基准, 通过平衡二叉树(K-dimensional Tree)数据结构遍历观测图像, 找到距离基准点欧式距离最近的两个特征点。

$$d(R_i, S_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - s_{ij})^2} \quad (2)$$

式中,  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$  为基准图像中的特征点描述子;  $S_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in})$ ;  $d(R_i, S_i)$  为特征点间的欧氏距离。

为观测图像中的特征点描述子认定配对的特征点描述子, 需满足最邻近和次邻近特征点特征向量的欧氏距离之比小于设定阈值。公式定义如下

$$\frac{d(R_i, S_u)}{d(R_i, S_v)} < T \quad (3)$$

式中,  $S_u$  为观测图中距离  $R_i$  最近的点;  $S_v$  为观测图中距离  $R_i$  次近的点;  $T$  为阈值, 通常设置为 0.8。

## 2 技术路线及主要设备

### 2.1 技术路线

本研究中轻小型无人机遥感在高山峡谷山地灾害应急监测中的应用, 技术路线如图 1 所示, 具体流程为: 一、确定测区范围; 二、测区范围内预设像控点, 利用 RTK 测量其三维坐标; 三、利用轻小型无人机系统获取灾害现场低空航测影像; 四、重构灾害现场无人机三维模型; 五、利用地面式三维

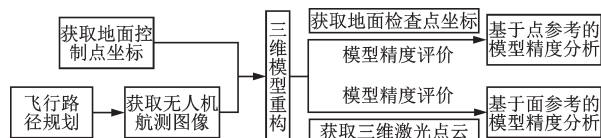


图 1 技术路线

Fig.1 Technological roadmap

激光扫描仪获取灾害现场高精度点云数据, 并将其作为测量真值; 六、对三维模型重建结果进行精度评价。

### 2.2 主要设备

轻小型无人机系统结构简单, 主要由飞行平台、云台、相机组成。考虑到高海拔地区空气稀薄、气候环境复杂、地形高差悬殊等环境因素, 本研究选择具备全天候飞行能力(IP43 防护等级)的轻小型四旋翼大疆 M210 飞行平台, 并换装高原桨实现更好的高山峡谷区机动性能。飞行平台搭载 Zenmuse X5S 云台, 配置 MFT 15 mm/1.7 ASPH 相机镜头。RTK 测量系统 GNSS 接收机选用中海达 iRTK5, 用于快速获取像控点高精度三维坐标。由于山地灾害现场危险性较大, 无法近距离实施接触式测量, 故选用地面式三维激光扫描仪获取测区高精度三维点云数据作为对照。主要设备参数见表 1。

表 1 数据采集主要设备参数

Table 1 Parameters of main equipment for data acquisition

设备	品牌	型号	主要参数
飞行平台	大疆	M210	类型: 四轴飞行器; 最大起飞重量: 6 140 g; 悬停精度: 垂直 ± 0.1 m, 水平 ± 0.3 m
云台	大疆	ZENMUSE X5S	可控转动范围: 俯仰 -130° ~ +40°, 平移 ± 320°, 横滚 ± 20°
相机	大疆	DJI MFT 15 mm	传感器: CMOS, 4/3 英寸; 有效像素数: 2 080 万; FOV: 72°; 图像分辨率: 5 280 × 3 956
RTK	中海达	iRTK5	RTK 定位精度: 平面 ± (8 + 1 × 10 <sup>-6</sup> D) mm, 高程 ± (15 + 1 × 10 <sup>-6</sup> D) mm; 静态定位精度: 平面 ± (2.5 + 0.5 × 10 <sup>-6</sup> D) mm, 高程 ± (5 + 0.5 × 10 <sup>-6</sup> D) mm; (D 为被测点间距离)
三维激光扫描仪	中海达	HS500i	测距精度: 5 mm; 最大测距: 500 m; 扫描视场角: 垂直 -40° ~ +60°, 水平 360°

### 3 测区现场数据采集

#### 3.1 典型灾害点选择及影像数据采集

波密县地处藏东南地区帕隆藏布江峡谷,山地灾害集中且规模巨大,号称“地质灾害博物馆”,滑坡、泥石流、崩塌、滚石、溜沙坡等地质灾害极其活跃<sup>[8]</sup>。本文主要研究对于群众生命财产安全和重要基础设施安全威胁较大的滑坡、泥石流两类山地灾害的轻小型无人机应急监测方案,选取102滑坡群2<sup>#</sup>滑坡和古乡沟泥石流作为研究对象。

##### 3.1.1 102滑坡群2<sup>#</sup>滑坡

102滑坡群位于波密县城西约80公里,国道318线K4023—K4026地段,帕隆藏布江右岸,于1991年6月由古冰碛物和松散冲洪积物所构成的古滑坡体复活形成<sup>[9]</sup>。滑坡群由6个滑坡体组成,其中以2<sup>#</sup>滑坡规模最大、危害最严重。2<sup>#</sup>滑坡长360 m,宽400 m,平均厚35 m,坡角30°~40°,总体积约510万m<sup>3</sup>,滑坡前缘最低海拔2 120 m,后缘最高海拔2 500 m,相对高差约400 m(图2)。



图2 102滑坡群2<sup>#</sup>滑坡航测影像

Fig.2 Aerial image of the No. 2 landslide of 102 landslide group

帕隆藏布江峡谷通道狭窄、气流复杂、地形高差悬殊,按照预设航线自动飞行风险较高,因此本次数据采集在保证航测影像重叠率的前提下由团队成员在手动模式下近距离控制飞行动作,共采集影像460张。

##### 3.1.2 古乡沟泥石流

古乡沟泥石流位于波密县古乡村西,国道318线K3981—K3984地段,属帕隆藏布江右岸一级支流。自1953年暴发特大泥石流以来,在夏秋季连续高温或多雨的气候条件下会频繁暴发泥石流,其频次从几次至百余次不等<sup>[10]</sup>。古乡沟流域面积

25.2 km<sup>2</sup>,主沟长8.7 km,主沟床纵比降374‰,山坡平均坡度36.7°,地形相对高差3768 m<sup>[11]</sup>。堆积扇纵向坡度5°~6°,扇体总淤方量约4.6×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>(图3)。



图3 古乡沟泥石流堆积体航测影像

Fig.3 Aerial image of the debris flow fan in Guxiang valley

古乡沟泥石流堆积扇位置河谷地势相对开阔,适于按照预设水平航线自动飞行,设置航向重叠率70%,旁向重叠率65%,重点关注位置采用手动飞行模式加密补拍图片,共采集影像610张。

#### 3.2 像控点的布设与坐标数据采集

像控点测量是无人机遥感的一个重要环节,合理的像控点布设方案应该既有利于提高三维模型的精度,又能最大限度地降低外业工作量<sup>[12]</sup>。受限于山地灾害现场环境,不能完全套用传统的像控点布设方式,本研究基本采用“周边均匀布设,加少量内部控制点,<sup>[13]</sup>的区域网布点方案。像控点的坐标及高程按GPS—RTK平滑采集方式测定,测量精度为平面方向优于±8 mm,高程方向优于±15 mm,满足试验分析所需的精度要求。

#### 3.3 三维激光点云数据采集

地面式三维激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanning, TLS)与传统地形测量仪器相比,具有高精度、数字化、自动化等特点,能在非接触条件下快速、精确地获取被测对象表面的三维坐标数据<sup>[14-15]</sup>。而测站选择困难、点云数据后处理复杂、设备价格高昂等因素限制了该技术在山地灾害应急监测领域的广泛使用。为验证本方法的可行性和精确性,使用地面式三维激光扫描仪获取102滑坡群2<sup>#</sup>滑坡和古乡沟泥石流局部高密度点云数据作为对照组。图4为现场获取的三维激光点云。

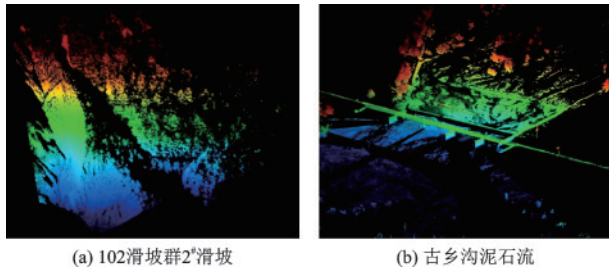


图4 三维激光点云  
Fig.4 Point cloud of three-dimensional laser scanning

## 4 三维模型重建及精度评价

无人机航测影像处理软件 PIX4Dmapper 集快速、自动和高精度为一体,提供数据输入输出接口,能够在完成大数据量专业精度处理的基础上快速生成数字正射影像图 (Digital Orthophoto Map, DOM)、数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM)、数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、三维模型等多种计算成果<sup>[16,17]</sup>,与现有其余无人机数据处理软件相比,能更好地适应本研究中轻小型无人机航测影像(非倾斜)数据处理。内业处理使用搭载 NVIDIA Quadro P5000 显卡的 DELL Precision 7 920 台式工作站,模型计算由 PIX4Dmapper 软件 4.4.12 版本完成,快速建模时间约 2 小时。



图5 基于无人机航测影像的三维模型  
Fig.5 Three-dimensional model based on UVA aerial survey image

在三维建模过程中,无人机定位误差、像控点三维坐标测量误差、相机拍摄误差等因素都会对重建精度产生影响。本文主要采用基于点参考的空中三角测量结果精度分析和基于面参考的三维模型精度分析两种方式评价模型精度。

### 4.1 基于点参考的模型精度分析

空中三角测量结果的精度决定了后续三维模型重建质量。在完成空三加密联合平差处理后,对模型中像控点周边预设检查点误差进行分析。检查点误差为由外方位元素与其相对应的像点坐标解算的特征点坐标值与外业测量坐标值的差值。检查点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的误差绝对值如表 2 所示,利用各方向平均绝对误差和平面、高程两个方向的均方根误差评价空中三角测量结果精度。102 滑坡群 2# 滑坡 6 个预设检查点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的平均绝对误差分别为 0.220、0.214、0.293 m,平面坐标均方根误差为 0.224,高程坐标均方根误差为 0.297。古乡沟泥石流 6 个检查点在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的平均绝对误差分别为 0.173、0.181、0.227 m,平面坐标均方根误差为 0.178 m,高程坐标均方根误差为 0.231 m。误差分析结果表明,空中三角测量结果精度为分米级,平面方向精度略高于高程方向,采取水平航线自动飞行、采集图像数据的古乡沟泥石流测区空中三角测量结果精度高于受地形限制采取手动模式下控制飞行、采集图像数据的 102 滑坡群 2# 滑坡测区。

表 2 检查点绝对误差

Table 2 Statistics of absolute errors of the checkpoints

单位:m

点号	102滑坡群 2#滑坡			古乡沟泥石流		
	$d_x$	$d_y$	$d_z$	$d_x$	$d_y$	$d_z$
1#	0.206	0.298	0.322	0.143	0.189	0.221
2#	0.212	0.207	0.239	0.184	0.154	0.172
3#	0.301	0.189	0.370	0.201	0.159	0.243
4#	0.286	0.155	0.238	0.173	0.192	0.294
5#	0.141	0.264	0.321	0.166	0.184	0.188
6#	0.176	0.172	0.267	0.172	0.209	0.245

### 4.2 基于面参考的模型精度分析

在完成灾害现场无人机三维模型重建后,对比模型与地面式激光扫描仪获取的点云数据,通过点到点的距离评价三维模型精度。分别在平面方向、高程方向各选取无人机三维模型与三维激光点云中均清晰可见的 10 组地形特征点并记录其空间相对坐标,比较两种类型点云中对应特征点间欧式距离,数据对比结果见表 3、表 4。102 滑坡群 2# 滑坡三维模型在平面方向、高程方向的平均绝对误差率分

表3 102滑坡群2#滑坡点云数据对比

Table 3 Comparison of point cloud data of the No.2 landslide of 102 landslide group

特征点组	平面方向				高程方向			
	UAV/m	TLS/m	差值/m	误差率/%	UAV/m	TLS/m	差值/m	误差率/%
1#	5.220	5.509	0.289	5.25	1.160	1.267	0.107	8.45
2#	6.650	7.034	0.384	5.46	2.842	2.617	0.225	8.60
3#	6.760	6.886	0.126	1.83	3.631	3.801	0.170	4.47
4#	8.390	8.280	0.110	1.33	4.408	4.696	0.288	6.13
5#	9.570	9.791	0.221	2.26	5.103	5.194	0.091	1.75
6#	9.660	9.808	0.148	1.51	7.150	7.280	0.130	1.79
7#	10.730	11.322	0.592	5.23	10.632	10.906	0.274	2.51
8#	13.700	14.289	0.589	4.12	12.595	12.941	0.346	2.67
9#	14.800	15.201	0.401	2.64	13.183	13.680	0.497	3.63
10#	18.720	19.536	0.816	4.18	14.518	14.022	0.496	3.54

表4 古乡沟泥石流点云数据对比

Table 4 Comparison of point cloud data of debris flow in Guxiang valley

特征点组	平面方向				高程方向			
	UAV/m	TLS/m	差值/m	误差率/%	UAV/m	TLS/m	差值/m	误差率/%
1#	23.340	23.611	0.271	1.15	3.626	3.524	0.102	2.89
2#	24.980	25.164	0.184	0.73	4.135	4.044	0.091	2.25
3#	27.670	27.030	0.640	2.37	5.676	6.101	0.425	6.97
4#	51.080	51.807	0.727	1.40	5.903	5.395	0.508	9.42
5#	53.180	53.746	0.566	1.05	6.059	6.247	0.188	3.01
6#	62.930	62.462	0.468	0.75	6.610	6.698	0.088	1.31
7#	74.680	74.386	0.294	0.40	6.632	6.133	0.499	8.14
8#	77.670	76.864	0.806	1.05	6.718	6.214	0.504	8.11
9#	96.510	96.307	0.203	0.21	7.268	6.807	0.461	6.77
10#	109.920	108.880	1.040	0.96	7.443	6.789	0.654	9.63

别为3.38%和4.35%，古乡沟泥石流三维模型在平面方向、高程方向的平均绝对误差率分别为1.01%和5.85%。从两组数据结果对比可以看出，在高程方向三维模型误差率略高于平面方向，最大值均不超过9.7%。作为一种数据快速获取方法，可以为未来轻小型无人机遥感系统在同类型区域山地灾害应急监测中的应用提供实践参考。

## 5 结论

本研究将操作简便、成本低廉的轻小型无人机遥感系统应用于高山峡谷区山地灾害应急监测，选择藏东南地区102滑坡群2#滑坡和古乡沟泥石流作为试验场地，根据计算预设检查点误差分析基于点

参考的空中三角测量精度，对比无人机三维模型和三维激光点云数据分析基于面参考的三维模型精度得出以下结论：

(1) 利用轻小型无人机采集灾害现场航测影像加RTK采集像控点局部坐标方法建立的滑坡、泥石流三维模型，精度可达分米级。测量结果高程方向误差率高于水平方向，最大绝对误差率低于9.7%。

(2) 空中三角测量结果在平面方向精度略高于高程方向。采取水平航线自动飞行、采集图像数据，整体精度高于手动飞行模式。

(3) 该方法作为高山峡谷区山地灾害数据快速获取方法，在山地灾害应急监测领域具有较好的实际应用价值，但模型精度提升方法仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 崔鹏,邓宏艳,王成华.山地灾害[M].北京:高等教育出版社,2018:18-24.  
Cui P, Deng H Y, Wang Ch H. Mountain hazards [M]. Beijing: Higher Education Press, 2018: 18-24. (in Chinese)
- [2] 尚彦军,杨志法,袁广祥.雅鲁藏布江大拐弯北部川藏公路地质灾害发育与分布研究[M].北京:中国铁道出版社,2010:21-31.  
Shang Y J, Yang Zh F, Yuan G X. Geohazards development and distribution along Sichuan-Tibet highway in north of the grand canyon of Yarlu Tsangpo River [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 21-31. (in Chinese)
- [3] Danilov A S, Smirnov U D, Pashkevich M A. The system of the ecological monitoring of environment which is based on the usage of UAV [J]. Russian Journal of Ecology, 2015, 46(1):14-19.
- [4] Gaston K J. UAVs and machine learning revolutionising invasive grass and vegetation surveys in Remote Arid Lands [J]. Sensors, 2018, 18(2):605.
- [5] Bandini F, Jakobsen J, Olesen D, et al. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 237-250.
- [6] 李秀丽.基于Google地图数据的可视化无人机航线规划研究[J].测绘通报,2014(1):74-76.  
Li X L. Study of Visual UAV trajectory planing based on Google map data [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(1):74-76. (in Chinese)
- [7] 低空数字航空摄影规范:CH/Z3005—2010[S].北京:国家测绘地理信息局,2010.
- [8] 水利部成山地灾害与环境研究所中国科学院,西藏自治区交通科学研究所.川藏公路典型山地灾害研究[M].成都:成都科技大学出版社,1999:25-28.  
Institute of Mountain Hazards and Environment, The Chinese Academy of Sciences and Water Conservancy Ministry, Institute of The Traffic Science, Tibet Autonomous Region. A study of typical mountain hazards along Sichuan-Tibet highway [M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999: 25-28. (in Chinese)
- [9] 祝介旺,苏天明,张路青,等.川藏公路102滑坡失稳因素与治理方案研究[J].水文地质工程地质,2010, 37(3):43-47.  
Zhu J W, Su T M, Zhang L Q, et al. Studies of factors influencing the stability of No.102 landslide and controlling scheme at the Sichuan-Tibet highway [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 43-47. (in Chinese)
- [10] 刘建康,程尊兰.西藏古乡沟泥石流与气象条件的关系[J].科学技术与工程,2015,15(9):45-49.  
Liu J K, Cheng Z L. Meteorology conditions for frequent debris flows from Guxiang Valley in Tibet, China [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(9):45-49. (in Chinese)
- [11] 罗德富,毛济周,朱平一.川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M].成都:科学出版社,1995:179-187.  
Luo D F, Mao J Zh, Zhu P Y. Mountain disasters and prevention countermeasures in Sichuan-Tibet Highway South (Tibet) [M]. Chengdu: Science Press, 1995: 179-187. (in Chinese)
- [12] 吴迪军,张建军,李剑坤,等.带状区域无人机航测像控点布测方法研究[J].铁道勘察,2017,43(6):5-9.  
Wu D J, Zhang J J, Li J K, et al. Study on the method of UAV image control point distribution and surveying in zonal area [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(6):5-9. (in Chinese)
- [13] 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 J, Ding Y Zh, Chen P J, et al. Influence of control points layout on aero-triangulation accuracy for unmanned aerial vehicle [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(5):116-120. (in Chinese)
- [14] 何秉顺,赵进勇,王力,等.三维激光扫描技术在堰塞湖地形快速测量中的应用[J].防灾减灾工程学报,2008, 28(3):394-398.  
He B Sh, Zhao J Y, Wang L, et al. The application of landslide lake topographic measurement by LiDAR [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(3):394-398. (in Chinese)
- [15] Gonzalez-Aguilera D, Gomez-Lahoz J, Sanchez J. A new approach for structural monitoring of large dams with a three-dimensional laser scanner [J]. Sensors, 2008, 8(9):5866-5883.
- [16] Ruzgiene B, Berteska T, Gecyte S, et al. The surface modelling based on UAV photogrammetry and qualitative estimation[J]. Measurement, 2015, 73: 619-627.
- [17] 李忠强,王瀚宇,刘婷婷,等.基于Pix4Dmapper的无人机数据自动化处理技术探讨[J].海洋科学,2018, 42(1):39-44.  
Li Zh Q, Wang H Y, Liu T T, et al. Investigation of Pix4Dmapper automatic data-processing technology in unmanned aerial vehicles [J]. Marine Sciences, 2018, 42(1): 39-44. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)