

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.08

无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害 隐患早期识别中的应用

贾虎军^{1,2}, 王立娟^{1,2}, 范冬丽^{1,2}

(1. 四川省安全科学技术研究院, 四川 成都 610045; 2. 四川安信科创科技
有限公司, 四川 成都 610045)

摘要:近年来,隐蔽性强、突发性高、破坏力大、灾害链长的重大地质灾害频繁发生。如何实现人工排查无法到达区域地质灾害隐患的早期识别,已是地质灾害防治领域必需解决的难题。本文基于无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术,获取地质灾害隐患点更加精准、精细的地形地貌勘测数据,采用定性与定量相结合方法开展地质灾害隐患早期识别。无人机载 LiDAR 技术能够“穿透”地表植被,获取真实地表数字高程模型(DEM),据此可计算出地质灾害的关键特征参数,如山体阴影、坡度、等高线、粗糙度以及曲率等微地貌因子。无人机载倾斜摄影技术能够快速获取地质灾害隐患点的三维模型和数字正射影像(DOM),使在三维实景场景模型中开展地质灾害隐患点识别和研判成为可能。通过建立数据综合应用策略,对地质灾害隐患点定性和定量分析,能够实现早期发现、有效识别。本文通过对九寨沟九道拐滑坡点的研究分析,结果表明无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别方面具有较大的应用价值。

关键词:无人机; LiDAR; 倾斜摄影; 地质灾害; 早期识别

中图分类号: P642

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)02-0060-06

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

JIA Hujun^{1,2}, WANG Lijuan^{1,2}, FAN Dongli^{1,2}

(1. Sichuan Academy of Safety Science and Technology, Chengdu, Sichuan 610045, China; 2. Sichuan Anxin Kechuang
Technology Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610045, China)

Abstract: In recent years, serious geological disasters occur frequently in China. These geological disasters are with obvious concealment, high emergency, great destructive power and long disaster chain. The key task of our work in the field of geological disaster prevention and control is the identification and judgement of the hidden dangers in early stage. If these serious geological hazards could be identified early, the prevent and control of them may be initiative. Now the key problem we faced is how to realize the accurate exploration of the hidden dangers in areas where manpower could not reach. The UAV platform has the advantages of strong mobility, good convenience and more load modules. The UAV can carry a variety of sensors which can give full play to various technical advantages and obtain survey data of serious geo-hazards. These data are more accurate. The UAV can carry lidar equipment to penetrate surface vegetation. Accurate three-dimensional laser-point cloud data and real surface data elevation model (DEM) could be obtained. DEM can derive many characteristic parameters of micro-geomorphic factors such as mountain shadow, slope, contour, roughness and curvature etc.. The UAV can also be equipped with tilting camera modules which can acquire both real 3D model and digital orthophoto map(DOM). This series of data can

收稿日期: 2020-06-27; 修订日期: 2020-09-25

基金项目: 高分专项省域产业化应用项目(87-Y40G06-9001-15/18); 四川省科技计划重点研发项目(2018GZ0051; 2019YFS0073)

第一作者: 贾虎军(1991-), 男, 甘肃天水人, 硕士, 工程师, 主要从事地震与地质灾害应急技术保障方面的研究。

E-mail: 809165097@qq.com

complement each other and be applied in combination. We can accurately extract the information of dangerous geological body and rock mass structure surface in different geomorphic environments. Based on these data, we can carry out qualitative and quantitative analysis. Therefore, we can further realize the serious geological hazards.

Keywords: UAV; LiDAR; oblique photography; geologic hazard; early recognition

0 引言

近年来,以“6·24”茂县叠溪镇新磨村山体高位滑坡、“8·28”纳雍县山体滑坡、金沙江白格滑坡—堰塞湖为代表的重大地质灾害频繁发生^[1],并呈现出隐蔽性强、突发性高、破坏力大、灾害链长等特点,传统的人工排查和群测群防已难早期发现、有效识别。而地质灾害隐患的早期识别工作是监测预警和精准防治的基础,在有效识别的工作基础之上才能通过地表地物或外部现象认识到其发育特征及成因机理,达到制定科学合理的防治措施^[2-3]的目的。因此,如何能够更早的辨识和研判潜在的、隐蔽的重大地质灾害隐患,已成为地质灾害领域的工作重点和难点^[4]。目前,著名地质灾害专家殷跃平、许强等提出了基于空天地一体化的普查、详查、核查“三查”体系。即利用合成孔径雷达干涉测量、高分辨率卫星遥感、无人机航测、激光雷达测量等多种高新技术,形成综合对地观测技术,开展地质灾害隐患早期观测与识别工作^[5]。该综合对地观测技术体系中的激光雷达测量(Light Detection and Ranging, LiDAR)是一种新兴的三维地形测量技术,可以测量地表高程微小变化和获取微地貌的精细结构^[6],已广泛应用于地质灾害调查中,其高精度特性推动了地质灾害早期识别向定量化发展^[7]。近几年发展起来的无人机具有机动性强、便捷性好、精度高等测量技术优势,并且可以同时搭载多种类型传感器。无人机搭载 LiDAR 模块,能够“穿透”植被获取地表更为精准的三维点云数据,生成数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),进而可获取地质灾害体的坡度、等高线、坡向、粗糙度等微地貌参数特征^[8]。无人机搭载倾斜摄影模块,采用基于运动结构重构方法的摄影测量技术^[9],可获取地质灾害隐患点的高分辨率实景三维模型、数字正射影像(Digital Orthophoto Map, DOM)等数据^[7],能够极大减少人工实地勘察的工作量^[10]。这一系列数据产品优势互补,综合应用可有效提取地质灾害体精细化的三维形态和岩体结构面等相关的微地貌结构信息,可为地质灾害边界的圈定提供科学依据,可在高位、隐蔽性地质灾害早期识别工作中发挥至关重要的作用。

1 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术介绍

将无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术相结合应用,可形成技术优势互补,有效提升数据获取效率和数据的丰富性、真实性,能够快速获取地质灾害隐患点高分辨率、高精度的地貌影像和真实地表地形数据^[11]。

1.1 无人机载 LiDAR 技术

LiDAR 技术是通过激光器发射的激光束获取与目标物之间的距离,使得大范围的三维地形地貌信息获取更加高效便捷^[12]。无人机载 LiDAR 是将小型化的 LiDAR 设备集成在无人机平台上,获取目标物的三维激光点云数据。

1.2 无人机倾斜摄影技术

无人机倾斜摄影技术是在无人机上搭载多台摄影传感器,分别从垂直、前方、后方、左侧、右侧五个不同的方向和角度同步采集影像数据^[11],获取高精度的多视影像信息,配合自动化的三维建模软件快速重构一定空间区域内的三维模型^[13],可以真实地表达地表物体的坐标、尺寸及外观等属性^[14]。

1.3 无人机平台介绍

本文采用的无人机平台为飞马 D200 无人机系统。飞马 D200 属于多旋翼无人机,可以减少起降场地限制。该系统是由飞行器、载荷模块、地面控制站、GNSS 基准站及无人机管理专业版软件组成。配合“无人机管家”中精准地形跟随飞行功能,可保证所获取数据分辨率一致。

本文采用搭载的倾斜模块为 D-OP300, LiDAR 模块为 D-LiDAR200。无人机系统和搭载模块详细参数如下:

(1)飞马 D200 无人机系统。续航时间 48 min,抗风能力 5 级,测控半径 5 km,实用升限海拔高度 4 500 m,工作温度-20 ~ 50 °C。配备高精度差分 GNSS 板卡,支持 PPK/RTK 及其融合作业模式,具备免像控和稀少像控的能力,见图 1(a)。

(2)D-OP300 倾斜摄影模块。模块具有 5 个相机,传感器尺寸 23.5 mm×15.6 mm,相机倾斜角度 45°,每个相机有效像素 2 400 万,镜头参数中间 25 mm、四周 4 个相机 35 mm,重量 1.45 kg,见图 1(b)。

(3) D-LiDAR200 模块参数。激光器 RIEGL mini VUX-1UAV, 测量距离 250 m, 回波数量 5(Max.), 回波强度 16 bit, 视场角—水平 360°, 分辨率—水平 0.05°~0.5°, 见图 1(c)。



图 1 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影模块

Fig. 1 UAV LiDAR and tilt camera module

2 工作流程

采用无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术获取地质灾害隐患点三维空间数据, 主要分为无人机外业飞行和内业数据处理两大部分。无人机外业飞行主要包括测区踏勘、检查点布设、倾斜摄影飞行、数字地表模型 (Digital Surface Model, DSM) 快速处理、LiDAR 变高飞行等。内业数据处理主要包括点云数据预处理和 DOM、DEM、实景三维模型数据生产等。工作流程如图 2 所示。

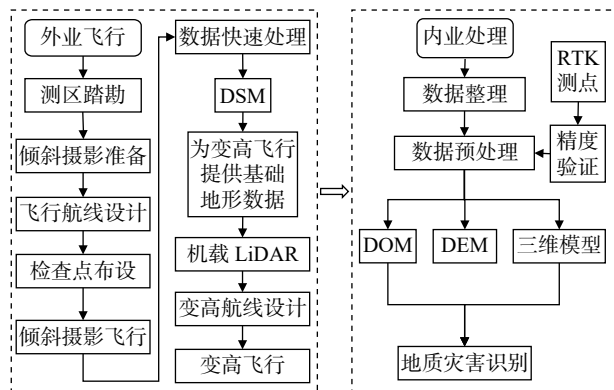


图 2 工作流程图

Fig. 2 Work flow chart

2.1 外业数据获取

(1) 倾斜摄影数据获取。由于高位、隐蔽性地质灾害隐患点一般具有高海拔、大落差等特点, 在满足勘测精度要求和保证飞行安全的条件下, 无人机倾斜摄影飞行可采用统一高度航线规划。无人机倾斜摄影航线飞行完毕后, 完成地质灾害隐患点区域正射影像快拼工作, 快速生成 DSM。

(2) LiDAR 数据获取。无人机倾斜摄影快速生成的 DSM, 可作为准确的高程信息, 用于 LiDAR 数据获取的精准地形跟随航线设计。无人机保持对地固定高度进行飞行作业, 可确保点云密度的一致性, 也可确保安全作业^[15]。

2.2 内业数据处理

(1) 倾斜摄影数据处理。通过多视影像密集匹配模型确定每张影像外方位元素^[16], 再由空三计算和点云加密算法将稀疏点云生成密集点云, 然后将密集点云进行网格化和纹理映射, 并利用像控点数据, 生成具有真实坐标的精细化实景三维模型和 DOM 数据^[14]。

(2) LiDAR 数据处理。将无人机的机载 POS 数据、GNSS 地面基站数据和 LiDAR 数据初步整理, 并经轨迹解算、点云解算、航带平差、去除噪声等数据预处理, 输出标准点云数据。将 DOM 影像纹理赋色给点云数据, 可生成彩色 LiDAR 点云数据。

(3) 数据质量评估。经内业数据处理后生成的数据主要有 LiDAR 点云数据、DOM、DEM、实景三维模型等。数据精度检查主要包括: 点云数据密度和分类精度检查, 点云数据平面和高程精度检查, DOM 数据平面精度检查等。

3 地质灾害早期识别应用实例

3.1 研究区概况

本文研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟县漳扎镇九道拐, 海拔高度范围 2 435~3 415 m, 面积约 6.2 km²。研究区植被茂密、地势陡峭、高差较大, 见图 3(a)。

3.2 无人机数据获取

3.2.1 倾斜摄影数据获取

本次实验无人机倾斜摄影航线设计地面分辨率为 12 cm, 航高为 800 m, 航向重叠度为 75%, 旁向重叠度为 70%。航摄完成后在现场对 POS 数据和航摄影像进行检查和整理, 确保 POS 信息无遗漏, 影像清晰, 共获得有效原始影像 1 850 张。无人机航摄中采用连接 CORS 网络的 RTK/PPK 作业模式, 可免除像控点布设。

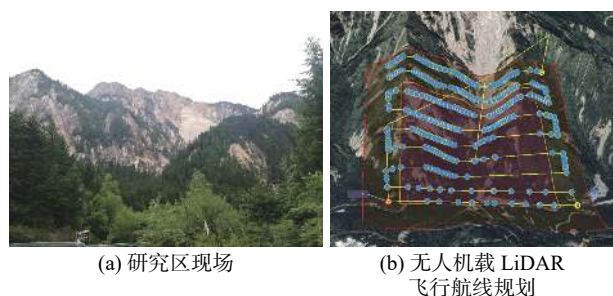


图 3 无人机载 LiDAR 航线规划
Fig. 3 UAV LiDAR route planning

3.2.2 LiDAR 数据获取

本次实验 LiDAR 数据获取方式采用精准地形跟随飞行的作业模式,飞行航线设计见图 3(b)。图 3(b)中,红线区域为 LiDAR 数据获取有效范围,黄色线为无人机飞行路线,蓝色点位为无人机地形跟随飞行变高点。航线对地表保持固定飞行高度(150 m),确保激光对植被的穿透能力及均匀的地面分辨率,数据采集按照 1:1 000 比例尺进行。

为了进一步分析 LiDAR 技术的植被“穿透”能力,提取了研究区部分区域的 LiDAR 点云数据,并生成了图 4(a)中红色框内的点云数据剖面见图 4(b)。通过分析图 4,可以看出 LiDAR 技术在植被稀疏地区到达地面的点云数据较多,而在植被高覆盖区到达地面的点云数据相对较少。

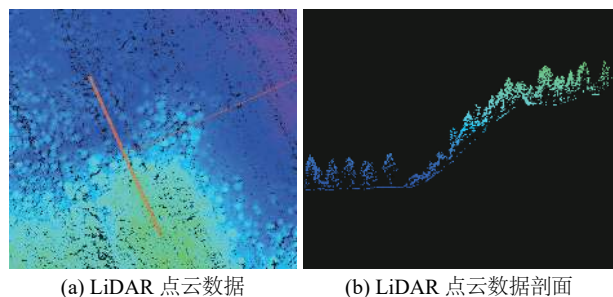


图 4 LiDAR 数据穿透植被能力分析
Fig. 4 LiDAR data penetration of vegetation

3.3 数据生成

针对地质灾害隐患早期识别需求,本文研究获取地质灾害隐患点的高精度、精细化 LiDAR 点云、DEM、DOM 和实景三维模型等数据(图 5)。本文基于 Context Capture 软件,经融合差分 GPS 解算、空三加密、数据生成等步骤,生成实景三维模型见图 5(d)和 DOM 见图 5(b)。基于飞马无人机管家预处理 LiDAR 点云数据,通过对 LiDAR 点云数据分类处理并进行滤波处理后,获得 LiDAR 点云数据成果^[17],见图 5(a)。基于离散

点构建不规则三角网模型(Triangulated Irregular Network, TIN),然后由 TIN 利用高程内插算法生成 DEM^[18],见图 5(c)。数据生成后,需要进行精度检查,本实验检查采取人工实测的方式对比精度。经检验, LiDAR 数据的点云平均密度 12~45 个/m²,平面中误差为 0.033 m,高程中误差为 0.039 m。

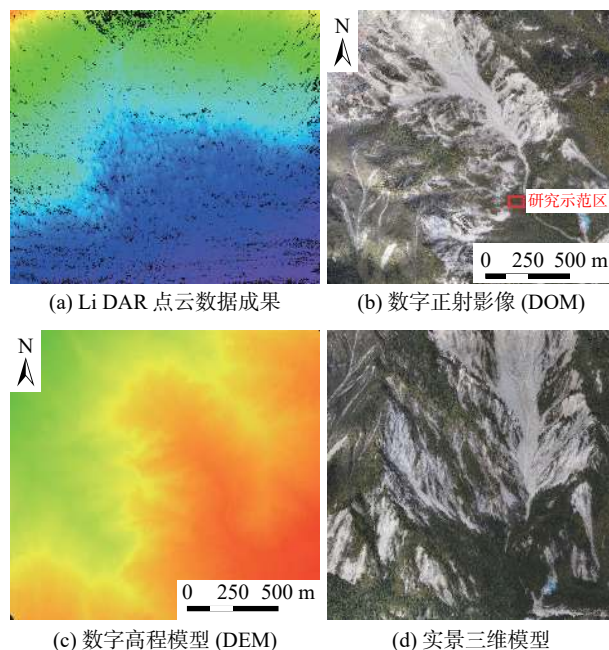


图 5 无人机载 LiDAR 和倾斜摄影数据产品
Fig. 5 UAV LiDAR and tilt photography data products

3.4 地质灾害早期识别分析

准确识别地质灾害体并确定其具体分布范围和体积是科学评估地质灾害隐患点危险性与危害性的重要前提^[19]。在选择地质灾害隐患点数据获取的技术手段时,应充分考虑地形、岩土体出露条件,可采用基岩裸露区使用无人机倾斜摄影技术,植被覆盖区使用无人机载 LiDAR 技术的工作原则^[15]。无人机 LiDAR 和倾斜摄影技术生成的高精度实景三维模型、LiDAR 点云数据、DEM 和 DOM 及其衍生特征参数可用于对地质灾害隐患点进行定性和定量分析,并通过二维高分辨率影像、三维精细化模型综合研判,能够实现地质灾害隐患早期识别^[17]、边界圈定。

3.4.1 定性分析

定性分析是通过高精度、高清晰的实景三维模型和 DOM,在室内直观立体形态下,解译活动断层的几何展布特征和地质灾害体,发现微地貌和微变形,准确识别岩土体出露明显的各类不良地质体和地质要素信息^[15],如从图 5(b)、图 5(d)中可以明显判识出,研究

区斜坡岩体普遍松动,碎屑物质沿沟谷走向呈流态化运动。

3.4.2 定量分析

定量分析是利用真实地表的 DEM 数据提取山体阴影、坡度、等值线和粗糙度等精细微地形地貌参数,分析地质灾害特征要素^[19],实现准确圈定地质灾害体范围。也可使用相关算法计算出地质灾害体的面积和体积大小等数据。图 5(b)研究示范区去除植被后生成的 DEM。山体阴影、坡度、等高线等分别如图 6(b)、图 6(c)、图 6(d)所示。通过对比分析图 6(a)和图 6(b),可以清晰的看出基于去除植被 DEM 的山体阴影,能够明显增强滑坡的立体形态,显著提升识别能力。通过分析图 6(c)和图 6(d),坡度和等高线等 DEM 衍生因子可以刻画出滑坡的线性特征,对于辅助圈定滑坡边界具有重要作用。

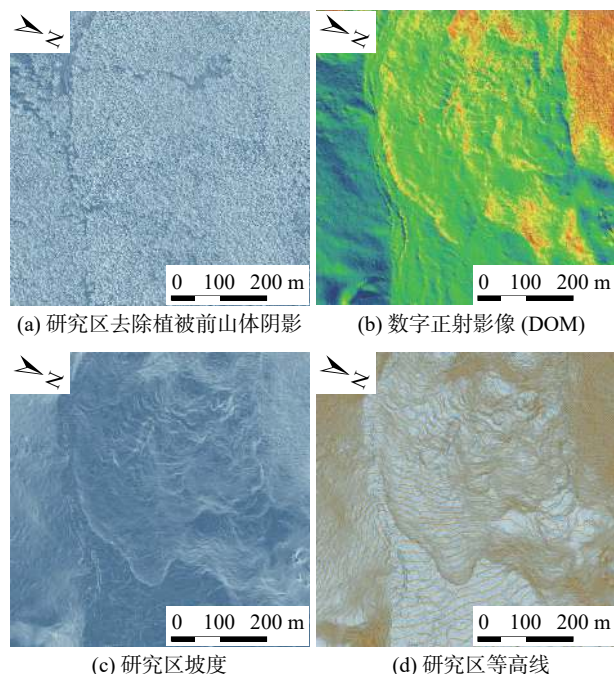


图 6 滑坡 DEM 衍生因子

Fig. 6 Derived factor of DEM on landslide

4 结果与讨论

地质灾害隐患早期识别工作的重要性、紧迫性和艰巨性,是当前地质灾害防治工作的重点任务和难点问题。研究地质灾害隐患的早期识别特征和技术方法,对提高地质灾害的预防能力具有重要意义。无人机倾斜摄影能够提供高分辨率、高精度的地形地貌影像和实景三维模型。无人机载 LiDAR 通过多次回波技术可“穿透”地面植被,结合滤波算法可有效去除地表植被,

获取真实地面数据高程信息,可以为高位、隐蔽性地质灾害隐患早期识别提供重要技术手段。本文研究主要得出如下结论:

(1)无人机平台具有机动性强、便捷性好、载荷模块多等勘测技术优势,搭载多种类型传感器,可以充分发挥各项技术优势,可作为高位、隐蔽性地质灾害隐患勘测的重要技术。

(2)无人机倾斜摄影技术可有效获取大面积地质灾害隐患的高分辨率、高精度地形地貌影像和实景三维模型,其承载信息丰富、对地质灾害体地表信息全覆盖,可快速地调查清楚孕灾环境和承灾体。

(3)基于 LiDAR 数据获取的高精度真实地表 DEM 数据,通过衍生参数特征信息,如山体阴影、坡度、等高线、粗糙度等,可有效识别植被覆盖下隐藏的地质灾害体,突破因数据不全对地质灾害隐患识别的局限性,对地质灾害的预防预警具有重要的意义。

(4)需要指出的是,利用无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术进行地质灾害隐患早期识别的准确率,作者将在后续的工作中进一步研究和验证。

参考文献 (References):

- [1] 王立朝,温铭生,冯振,等.中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究[J].中国地质灾害与防治学报,2019,30(1):1-9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang river, Tibet, China [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 梁鑫,范文,苏艳军,等.秦岭钒矿集中开采区隐蔽性地质灾害早期识别研究[J].灾害学,2019,34(1):208-214. [LIANG Xin, FAN Wen, SU Yanjun, et al. Study on early identification technology of concealed geological hazards in vanadium mining area of Qinling [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 208-214. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 刘传正.关于地质灾害防治中两个问题的认识[J].中国地质灾害与防治学报,2015,26(3):1-2. [LIU Chuanzheng. Understanding of two problems in the prevention and control of geological disasters [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(3): 1-2. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 葛大庆,郭兆成.重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考[J].中国应急救援,2019(1):10-14. [GE Daqing, GUO Zhaocheng. Application of integrated remote sensing in early identification of major geological hazards [J]. China Emergency Rescue, 2019(1): 10-14. (in

- Chinese with English abstract)]
- [5] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966. [XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 石菊松,吴树仁,石玲. 遥感在滑坡灾害研究中的应用进展 [J]. 地质论评, 2008, 54(4): 505-514. [SHI Jusong, WU Shuren, SHI Ling. Remote sensing for landslide study: an overview [J]. Geological Review, 2008, 54(4): 505-514. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 邵延秀,张波,邹小波,等. 采用无人机载LiDAR进行快速地质调查实践 [J]. 地震地质, 2017, 39(6): 1185-1197. [SHAO Yanxiu, ZHANG Bo, ZOU Xiaobo, et al. Application of uavls to rapid geological surveys [J]. Seismology and Geology, 2017, 39(6): 1185-1197. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘圣伟,郭大海,陈伟涛,等. 机载激光雷达技术在长江三峡工程库区滑坡灾害调查和监测中的应用研究 [J]. 中国地质, 2012, 39(2): 507-517. [LIU Shengwei, GUO Dahai, CHEN Weitao, et al. The application of airborne LiDAR technology in landslide investigation and monitoring of Three Gorges Reservoir Area [J]. Geology in China, 2012, 39(2): 507-517. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 罗达,林杭生,金钊,等. 无人机数字摄影测量与激光雷达在地形地貌与地表覆盖研究中的应用及比较 [J]. 地球环境学报, 2019, 10(3): 213-226. [LUO Da, LIN Hangsheng, JIN Zhao, et al. Applications of UAV digital aerial photogrammetry and LiDAR in geomorphology and land cover research [J]. Journal of Earth Environment, 2019, 10(3): 213-226. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 郑史芳,黎治坤. 结合倾斜摄影技术的地质灾害监测 [J]. 测绘通报, 2018(8): 88-92. [ZHENG Shifang, LI Zhikun. Geohazard monitoring based on tilt photography [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(8): 88-92. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 高哲. 探讨无人机倾斜摄影测量的关键技术及应用领域 [J]. 工程建设与设计, 2020(2): 255-256. [GAO Zhe. Discussion on the key technology of UAV tilt photogrammetry and its application fields [J]. Construction & Design for Project, 2020(2): 255-256. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈德立. 无人机载LiDAR点云数据的应用探讨 [J]. 福建建设科技, 2017(5): 73-76. [CHEN Deli. Application of LiDAR point cloud data in unmanned aerial vehicle [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2017(5): 73-76. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘伟,翟斌斌,刘燃,等. 无人机倾斜航空摄影在三维实景建模中的应用 [J]. 地理空间信息, 2020, 18(1): 45-46. [LIU Wei, ZHAI Binbin, LIU Ran, et al. Application of integrated remote sensing in early identification of major geological hazards [J]. Geospatial Information, 2020, 18(1): 45-46. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李芳,刘洋洋,李孙桂. 基于无人机倾斜摄影测量技术的三维建模和精度分析 [J]. 江西测绘, 2019(3): 40-42. [LI Fang, LIU Yangyang, LI Sungui. 3D modeling and precision analysis based on UAV tilt photogrammetry technology [J]. Jiangxi Cehui, 2019(3): 40-42. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 冯威. 高寒高海拔复杂艰险山区无人机勘察技术应用 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 9-13. [FENG Wei. Application of unmanned aerial vehicle survey technology in alpine and high altitude complex and difficult mountainous area [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(8): 9-13. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王纯,黄炳龄. 机载LiDAR与无人机影像三维重建精度分析 [J]. 建材与装饰, 2019(10): 143-144. [WANG Chun, HUANG Bingling. Accuracy analysis of 3D reconstruction of airborne LiDAR and UAV images [J]. Construction Materials & Decoration, 2019(10): 143-144. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈刚,陈伟涛,李显巨. 基于机载LiDAR技术的滑坡识别参数提取方法 [J]. 地理空间信息, 2013, 11(6): 3-4. [CHEN Gang, CHEN Weitao, LI Xianju. Extraction method of landslide identification parameters based on airborne LiDAR technology [J]. Geospatial Information, 2013, 11(6): 3-4. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 康义凯. 机载LiDAR技术在地质灾害监测中的应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(9): 117-119. [KANG Yikai. Application of airborne LiDAR technology in geological disaster monitoring [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(9): 117-119. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 马晓雪,吴中海,李家存. LiDAR技术在地质环境中的主要应用与展望 [J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 93-103. [MA Xiaoxue, WU Zhonghai, LI Jiacun. LiDAR technology and its application and prospect in geological environment [J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1): 93-103. (in Chinese with English abstract)]