

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202202009

党杰, 董吉, 何松标, 等. 机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 106-113.

DANG Jie, DONG Ji, HE Songbiao, *et al.* Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 106-113.

机载 LiDAR 与地面三维激光扫描在贵州水城独家寨崩塌地质灾害风险调查中的应用

党杰^{1,2}, 董吉¹, 何松标¹, 范宣梅²

(1. 贵州省地质环境监测院, 贵州 贵阳 550081;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要:在贵州岩溶山区开展地质灾害风险调查时, 由于局部存在高差较大的复杂山体, 传统的地面调查手段往往具有局限性。为有效地识别及测量潜在的高位隐蔽性地质灾害隐患, 采用无人机载 LiDAR 和地面三维激光扫描的方法, 通过“俯视”数据与“正视”数据相融合, 可完整、精确地获取崩塌危岩带的高精度点云及三维模型等数据。以贵州省水城区鸡场镇独家寨崩塌为例, 通过野外数据采集-原始点云处理-不同数据融合-整体着色修复等步骤, 最后得到研究区高精度三维模型数据, 在此基础上对岩体结构和裂隙进行提取, 解译出层面和两组节理裂隙产状, 进而有效识别危岩体的空间分布, 并基于网格划分方法计算出危岩带的规模约 $6.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。结果表明无人机载 LiDAR 与地面三维激光扫描相融合的方法可优势互补, 具有可操作性强、精度高、识别准等特点, 可有效地获取解译并识别危岩体的分布及规模, 为后续稳定性分析及风险评价提供基础。

关键词:机载 LiDAR; 三维激光扫描; 地质灾害; 风险调查; 三维模型; 贵州

中图分类号: P642.21

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)04-0106-08

Application of airborne LiDAR and ground 3D laser scanning in geological hazard risk investigation of Dujiazhai collapse in Shuicheng, Guizhou

DANG Jie^{1,2}, DONG Ji¹, HE Songbiao¹, FAN Xuanmei²

(1. Guizhou Geological Environment Monitoring Institute, Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In karst mountainous area of Guizhou, in China, traditional ground survey methods often have limitations due to the existence of complex mountains with large elevation differences. In order to effectively identify and measure potential high-order position and hidden geological hazards, the technology method of integrating unmanned aerial vehicle LiDAR with

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-04-10

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家杰出青年科学基金(42125702); 贵州省地质灾害综合防治体系建设项目(Z195110010003)

第一作者: 党杰(1987-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事地质灾害防治、地质环境调查评价等方面的工作。

E-mail: 396816806@qq.com

通讯作者: 范宣梅(1981-), 女, 博士, 研究员, 主要从事地质灾害评价预测及防治方面的工作。E-mail: fxm-cdut@qq.com

ground 3D laser scanning is adopted. Through the fusion of “vertical view” data and “front view” data, the high-precision point cloud and 3D model data of the collapse can be obtained completely and accurately. This study takes the collapse of Dujiazhai in Jichang Town, Shuicheng District, Guizhou Province as an example, and finally obtains high-precision 3D model data in the study area through the steps of field data collection, original point cloud preprocessing, different data fusion, and overall coloring repair. Based on the 3d model data, the rock mass structure and fractures were extracted, and the stratification plane and two groups of joint fractures were interpreted, in order to effectively identify the spatial distribution of the dangerous rock mass. The size of the dangerous rock belt was calculated to be about 66,000 m³ based on the grid division method. The results show that the technical method of the integration of UAV-borne LiDAR and ground 3D laser scanning can complement each other with advantages, and has the characteristics of strong operability, high accuracy and accurate identification. It can effectively obtain the distribution and scale of dangerous rock mass, provide a basis for subsequent stability analysis and risk assessment.

Keywords: airborne LiDAR; 3D laser scanning; geological hazard; risk investigation; 3D model; Guizhou

0 引言

贵州岩溶山区地质环境脆弱,局部形成“上硬下软”、“软硬相间”且高差较大的复杂山体,给当地开展地质灾害风险调查工作带来一定难度。这些区域由于坡高、坡陡、人迹罕至,传统的地面调查手段很难有效地识别及测量潜在的高位隐蔽性地质灾害隐患。近十几年来,全国多起突发性地质灾害带来了巨大的生命财产损失,如 2009 年 6 月 5 日重庆武隆鸡尾山滑坡造成 79 人死亡,2010 年 6 月 28 日贵州关岭岗乌滑坡造成 99 人死亡,2013 年 7 月 10 日四川都江堰五里坡滑坡造成 161 人死亡,2017 年 6 月 24 日四川茂县新磨村滑坡造成 83 人死亡,2019 年 7 月 23 日贵州水城鸡场镇滑坡造成 52 人死亡和失踪。这些惨痛的教训让人们更加关注地质灾害风险源的位置以及如何精准量测、评价。

许强等^[1]针对高位隐蔽性地质灾害事件往往不在预案点范围内的现实问题,提出构建天-空-地一体化的“三查”体系进行地质灾害早期识别与监测预警:“天”即星载平台,利用光学遥感影像和合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR);“空”即航空平台,利用机载激光雷达测量和无人机摄影测量技术;“地”即地面平台,利用地基 SAR、三维激光扫描和地面调查等技术手段。

激光雷达测量技术(Light Laser Detection and Ranging, LiDAR)是近年来应用于地质灾害防治领域的新技术,其利用激光测距原理获取激光器与目标之间的距离,从而生成三维点云数据和数字高程模型(DEM),进而获取地质灾害体的各项地貌特征。由于其能很好地“穿透”植被,获取地表的真实特征,逐渐应用于地质灾害防治领域:谭德军等^[2-3]运用机载 LiDAR 对重庆市奉节区竹园镇百步村高植被覆盖复杂山区开展地形测量和李

子崖危岩识别,提出高植被覆盖区点云数据分类处理方法,显示出 LiDAR 技术对崩塌识别具有有效性和准确性;彭艺伟等^[4]基于机载激光雷达对江苏省宜兴市竹海风景区公路边坡开展研究,成功分析和解译出一处隐蔽滑坡地质灾害,并提出了一套针对植被覆盖区小型地质灾害激光雷达快速识别的技术流程;贾虎军等^[5]基于无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术对九寨沟九道拐滑坡进行研究分析,表明无人机载 LiDAR 和倾斜摄影技术在地质灾害早期识别方面具有较大的应用价值;郭晨等^[6]利用机载 LiDAR 数据结合基于 SVF 的 DEM 可视化方法,开展了四川省丹巴县城周边 135 km² 的地质灾害识别研究工作,识别出 146 处地质灾害,并现场实地调查验证了机载 LiDAR 识别结果的可靠性;刘小莎等^[7]基于高分辨率机载 LiDAR 数据结合震前卫星影像,开展了九寨沟震区的日则泥石流沟识别研究,根据色彩和纹理差异,解译出 155 处泥石流物源,为泥石流物源计算提供数据支撑。

三维激光扫描技术(3D Laser Scanning)最先在测绘领域应用,后凭借其高分辨率、高精度、非接触测量等优点^[8],逐渐应用于地质灾害测量、监测领域:谢谟文等^[9]基于三维激光扫描对云南省乌东德地区金坪子滑坡开展表面变形研究,通过三种方法比较分析点云数据,监测结果较传统监测方法具有很大优势;李强等^[10]采用三维激光扫描对重庆市某采煤沉陷区地表变形进行监测研究,通过两期采集数据对比分析,得到点变形值、剖面线变形趋势、地表整体变形等监测结果;陆三福等^[11]将三维激光扫描与结构面三维模拟技术应用某跨江大桥桥址岸坡岩体结构调查中,高精度、高效率地获取了岩体结构特征;舒飞等^[12]采用三维激光扫描技术对四川雅安天全县南部某泥石流灾害进行测量,

通过获取高精度三维地理信息数据,为灾后重建提供第一手资料;褚宏亮等^[13]利用三维激光扫描技术对高陡危岩、大型滑坡等复杂地质环境下地形构建、DEM 建模及几何测量等快速调查方法进行讨论,并提出点、线、面相结合的变形监测方法;王梓龙等^[14]以丹巴沙坝子危岩为例,研究了三维激光扫描技术在危岩体监测中的应用,并针对溜滑与掉块两种不同的破坏模式提出不同的监测思路;马福贵等^[15]利用三维激光扫描对某典型地质灾害进行两次观测,对比分析和识别出危岩体特征及裂缝变化特征;薛强等^[16]为分析子长县阎家沟滑坡的变形特征,对滑坡体进行两期三维激光扫描,基于获取的不同时期 DEM 数据开展变形分析,得到滑坡体的变形速率及变形量;梁玉飞等^[17]通过三维激光点云快速获取四川省绵阳市安州区照壁岩滑坡的边界岩体结构信息,并基于 HSV 色彩重建对结构面直观显示,进而利用 DBSCAN 算法对结构面间距、延续性、粗糙度参数进行提取分析。

不同学者应用机载 LiDAR 或三维激光扫描技术开展地质灾害研究,多采用单一技术手段,且侧重于隐患识别,技术手段本身的局限性会导致部分结果不尽人意。机载 LiDAR 技术与三维激光扫描技术原理相似,都是基于激光测距原理确定测量对象的空间位置信息。在应用中,机载 LiDAR 多采用无人机载或者有人机载方式获取数据,三维激光扫描多采用地面扫描方式获取数据。机载 LiDAR 扫描由于从天空向下进行获取点云数据,对部分陡立的崩塌地质灾害难以获取危岩的坡面信息,而三维激光扫描从危岩带斜下方或正前方进行扫描获取数据,可以有效量测危岩的坡面岩体结构以及危岩特征信息。三维激光扫描技术在复杂环境下具有测量距离有限、受植被影响较大等局限性,而机载 LiDAR 则具有在一定程度上“穿透”植被的能力,可以获取高分辨率的数字高程模型 (DEM)。将两种技术结合使用,可以有效的获取崩塌危岩带的高精度点云数据,进而对危岩带节理裂隙的产状、长度、宽度、间距等变形特征进行解译,分析确定地质灾害隐患的准确位置,量测崩塌(危岩)体积、范围等信息。本文以贵州省水城区鸡场镇独家寨崩塌为例,通过两种技术手段相结合,获取崩塌危岩带的高精度点云及三维模型等数据,实现结构特征解译、危岩分布识别、危岩带规模量测,为后续稳定性分析及风险评价提供基础。

1 研究区概况

独家寨崩塌地质灾害位于贵州省六盘水市水城区鸡场镇旗帜村独家寨组,见图 1(a)、(b)。研究区属亚

热带高原季风气候区,年均降水量 1137.0 mm,最大 1 日降水量达 103.6 mm(2014 年 9 月 18 日),最大 3 日降水量为 201.2 mm(2014 年 9 月 17—19 日)。区内河流属珠江水系北盘江流域,灾害点位于北盘江右岸河谷切割形成的高陡斜坡地带,距北盘江直线距离约 1 km。研究区整体位于滇东高原向黔中丘原的过渡地带,地形切割较深,相对高差多在 300~700 m,河谷深邃、“V”型谷发育,为溶蚀—侵蚀沟谷地貌。研究区大地构造总体处于扬子陆块上扬子地块威宁隆起区内的发耳穹盆地,以北盘江河谷多级阶地及不同标高上的 3~4 层溶洞为标志,反映了区域地壳的间歇性抬升。灾害点附近发育地层主要有三叠系中下统嘉陵江组(T_{1-2j})灰岩、泥灰岩和下统飞仙关组(T_1f)粉砂岩组成,地层产状 $315^\circ \angle 18^\circ$,地震烈度 VI 度。

独家寨崩塌所处的斜坡总体北西高、南东低,见图 1(c),危岩带分布高程为 1357~1481 m,坡高 124 m,坡长 97 m,坡宽 214 m,坡向 143° ,危岩带上陡下缓,上部坡度达到 85° ,下部居民区坡度约 12° ,见图 1(c)、图 2(a)、图 2(d)。直接威胁下方 32 户 110 人的生命财产安全,见图 1(d),威胁财产 2 000 万元。

根据现场调查,危岩带下方存在分散分布的崩塌堆积体,整体分布规模约 $2\,250\text{ m}^3$,堆积单体最大 $2.5\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,一般约 $1.2\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 。据村民介绍,规模较大的历史崩塌堆积体,崩落于 20 世纪五六十年前,当时该地村民房屋较少,未造成严重危害。此后随着人口增长及村民收入水平提高,独家寨附近房屋逐渐增多,部分崩塌堆积体被处理打碎作为村民建房使用,部分堆积体作为房屋建房的地基,见图 2(b)—图 2(c)。

在野外调查期间,受强降雨影响,危岩带表面发生零星崩塌落石现象,落石规模约 0.6 m^3 ,共约 8 块单体,最大单体体积约 $0.8\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ 。该崩塌落石是高陡斜坡坡面上岩体受节理裂隙切割,在长期风化作用和强降雨影响下,由一整块危岩体呈倾倒式破坏下落并崩解扩散形成,见图 2(f),在斜坡坡面上留下清晰的运动痕迹,见图 2(e)。

2 技术方法

为实现崩塌体三维数据的全面精确获取,满足对崩塌体节理、裂缝等关键结构面的精确识别,首先采用地面三维激光扫描与无人机载 LiDAR 相结合的方式数据进行数据采集,然后对三维激光扫描数据和机载 LiDAR 数据进行原始点云去噪、拼接、融合、着色、漏洞修复和植被剔除等处理步骤,最后得到研究区三维数据。在此

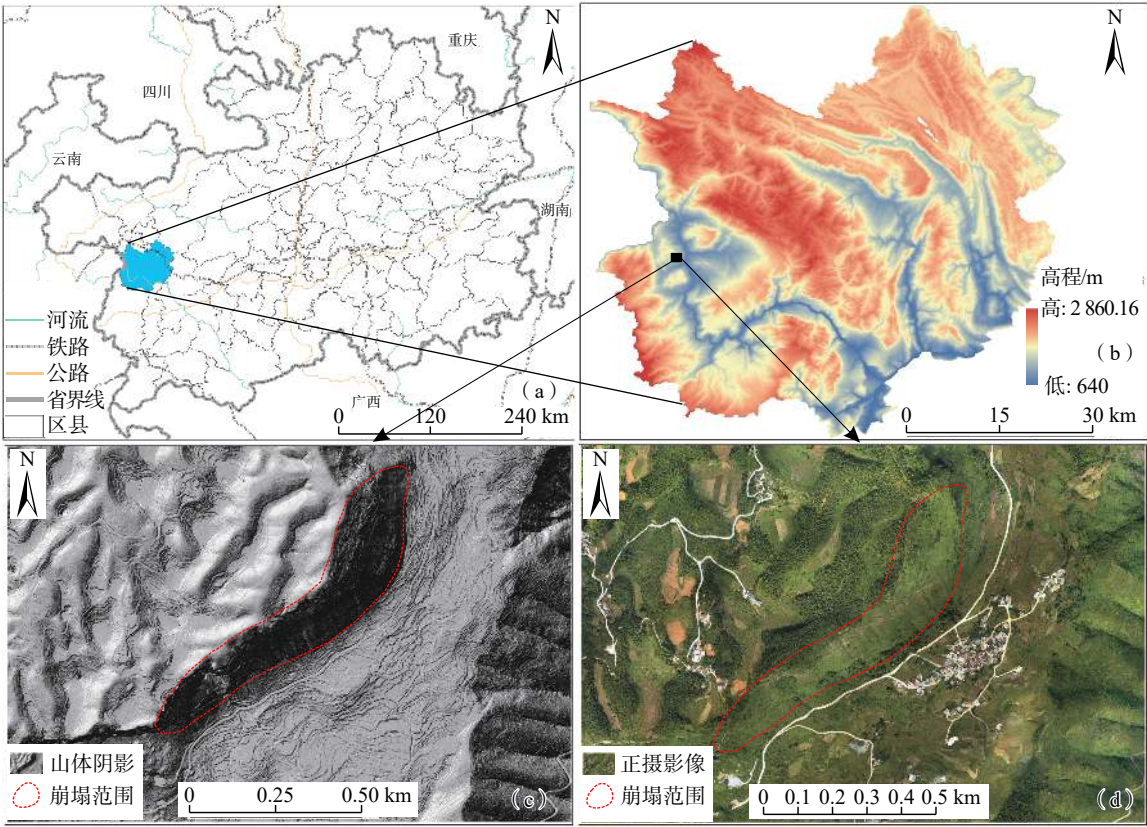


图 1 研究区总体位置及地质环境

Fig. 1 Location and geological environment of the study area



图 2 独家寨崩塌变形破坏特征

Fig. 2 Characteristics of deformation and failure of Dujiazhai collapse

基础上开展岩体结构分析,危岩体识别及体积估算等工作。其中,地面三维激光扫描主要用于获取高陡危岩体临空面一侧的结构面信息,而机载 LiDAR 则用于获取高位崩塌体顶部结构面信息和周边几何形态信息。工作流程如图 3 所示。

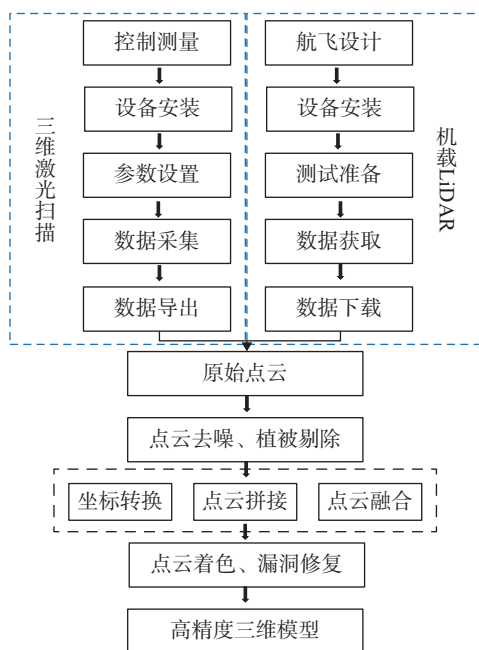


图 3 技术流程图

Fig. 3 Technical flow chart

研究所用的主要设备有:控制测量采用中海达 V90 GPS 接收机,RTK 动态精度达到水平 $8\text{ mm} \pm 1 \times 10^{-6}\text{ mm}$,垂直精度达到 $15\text{ mm} \pm 1 \times 10^{-6}\text{ mm}$ 。三维激光扫描采用 RIEGL VZ-2000i,最大测量距离 2 050 m,激光脉冲发射频率 50/100/300/550/1 000 kHz,精度 8 mm,近红外波长,激光发散度 0.3 mrad,扫描速度 3~240 lines/s,垂直角度分辨率 $<0.001^\circ$,水平角度分辨率 $<0.000^\circ$;无人机载 LiDAR 采用 RIEGL RiCOPTER,最大起飞高度 3 000 m,垂直起降 (VTOL),最大速度 14 m/s,激光发射视场角 230° ,测量范围 3~550 m,测量频率 350 000 means/s,测量精度 10 mm。

在保证测量对象信息完整的情况下,为减少不同测站数据拼接的误差,本次独家寨崩塌三维激光扫描布设测站 2 站,经数据去噪、拼接、融合、着色、漏洞修复和植被剔除等预处理步骤后,三维激光点云精度达到 1.84 cm。机载 LiDAR 数据采集覆盖独家寨崩塌体及其周边区域,面积 0.99 km^2 ,布置检查点 7 个,成果精度为 4.05 cm。以高精度的三维激光点云为基础,基于 3 个的高精度 RTK 控制点,精准校正周边环境机载 LiDAR 点云数据,得到危岩带机载 LiDAR 点云实景图,并将两者有效融合,形成覆盖崩塌体(危岩带)及周围区域的高精度完整点云模型,见图 4(a),其点云密度达到 $128\text{ 个}/\text{m}^2$,并生成植被过滤后的三维模型,见图 4(b)。

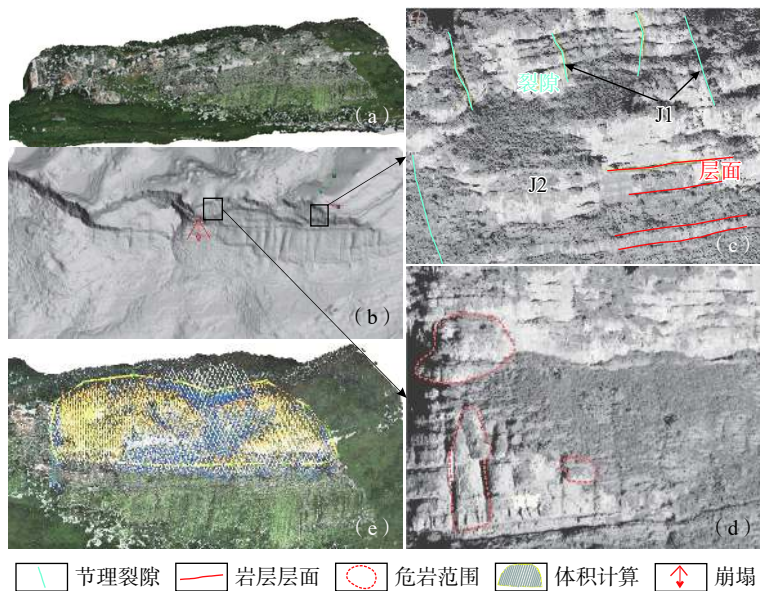


图 4 危岩带三维点云融合实景图

Fig. 4 3D point cloud fusion of the dangerous rock belt

3 成果与讨论

融合无人机载 LiDAR 与地面三维激光扫描成果,

可获取单一技术手段所不能得到的全方位高精度三维数字成果,进而开展岩体结构分析,危岩体识别以及体积估算等工作。

3.1 岩体结构、裂隙提取

基于融合后的高精度三维数据,可全方位观测危岩带的岩体结构特征和裂缝发育特征,俯视与正视观测相结合,实现不同手段的优势互补。特征提取的主要依据为真彩色影像及反射率灰度影像:

(1)基于真彩色影像的裂隙提取

当岩体出露面上发育裂隙时,在真彩色影像中具有明显色调特征,其节理裂隙的迹线破坏了岩体色调的完整性,其迹线易于辨识。

(2)基于反射率灰度影像的裂隙提取

当岩体出露面上发育裂隙时,在反射率灰度影像中具有明显色调特征。当裂隙无填充时,裂隙处反射率较低,灰度偏深;当裂隙被方解石等岩石填充时,裂隙处反射率较高,灰度偏浅。此裂隙迹线易于辨识。

基于俯视观测可发现陡崖顶部后缘位置存在许多拉张裂缝,裂缝宽 0.1 ~ 0.2 m,走向 161°,可见深度约 3 m。

基于正视观测可提取岩体结构信息和坡面裂隙位置(表 1)。坡体表面受两组节理裂隙切割及风化作用影响,岩体结构呈块裂结构,岩体块度约为 1.5 m×1.0 m×0.5 m。斜坡表面存在较多的不稳定块体,见图 4(c)。

表 1 结构面特征表
Table 1 Structural plane characteristics

类型	产状	长度/m	张开度/cm	间距/m	特征
层理	315°∠16°	10 ~ 15	闭合	0.3 ~ 1.1	-
节理J1	35° ~ 45°∠65° ~ 78°	5 ~ 8	0.2 ~ 0.6	0.3 ~ 2.5	无填充
节理J2	130° ~ 155°∠75° ~ 89°	4 ~ 9	0.3 ~ 0.6	0.2 ~ 1.3	无填充

3.2 危岩体识别

崩塌危岩带通常发育节理裂隙,将原本完整的岩体切割形成若干危岩单体。采用三维激光扫描与机载 LiDAR 融合获取灾害体三维点云数据,并提取裂隙信息,可快速、准确、高效的识别危岩体的分布特征。

对高陡危岩带,三维激光扫描由于植被遮挡、视线阻隔等原因,往往会造成点云存在“空洞”等数据缺失区域,将机载 LiDAR 数据与三维激光扫描数据相匹配融合,可很好的弥补由于数据缺失造成对危岩体的漏判、误判。

通过对岩体结构识别、裂隙提取分析,可以根据裂隙发育与结构面的组合关系,识别出危岩带上的潜在危岩体。文中研究基于节理 J1 与节理 J2 以及层面的交切组合关系,尤其是节理 J2 形成的外倾结构面与灰岩、泥灰岩差异风化形成的凹岩腔构成不利组合,有效识别

出危岩带表面的潜在危岩体,见图 4(d)。

3.3 危岩体体积估算

文中研究危岩体体积估算的方法为:以危岩单体边界的三维属性为基础,分析模拟形成危岩单体下表面,将危岩单体下表面以等间隔 d 划分成方格网, d 远小于任一条边界线的长度,由落在网格内的点云计算的平均竖向落差值,代表该格网的高程,乘以格网的面积,对整个区域累加即为总体积,见图 4(e)。

基于本次研究采集的三维数据进行危岩体识别,以岩体节理裂隙等结构为单体边界,划分出危岩带分布范围。根据上述方法及数字表面模型所形成的危岩体上表面与分析模拟所形成的危岩体下表面,开展危岩单体不规则体积计算,危岩带累计危岩体规模约 $6.6\times10^4\text{ m}^3$,为中型崩塌。

3.4 适用性讨论

(1)地面三维激光扫描是崩塌危岩带精细化调查的有效手段之一,但对于植被大量覆盖的灾害点,激光点反映的多为植被表面,无法有效测量真实的地形表面,因此地面三维激光扫描在高植被覆盖区域的有效探测精度会显著降低。

(2)对地形条件复杂、危岩带表面凹凸不平的崩塌地质灾害,地面三维激光扫描设站困难,部分凹腔、裂隙部位存在视线遮挡,造成获取的点云数据存在“空洞”,尽管通过插值算法等技术手段可以部分修补空洞区域,但修补的点云数据无法真实反映危岩带本身的裂隙特征,且修补的范围往往较小。

(3)以上情形,单一采用三维激光扫描显然达不到理想的调查效果,结合采用机载 LiDAR 技术,凭借俯视角度及可“穿透”植被的优势,可有效的弥补单一采用三维激光扫描的局限性。但机载 LiDAR 并非能完全替代三维激光扫描,在测危岩带立面细节信息时,三维激光扫描具有比机载 LiDAR 更好的观测角度和测量精度。

(4)将两种技术相融合,可实现优势互补,弥补单一手段的不足,解决高位、隐蔽性、复杂崩塌地质灾害的识别量测问题。当然,采用两种技术手段势必会推高费用成本和增加技术难度,对部分不甚复杂的崩塌灾害点,在能有效获取高精度数字表面模型的前提下,也可因地制宜的选取合适的单一技术手段。

4 结论

此次研究采用无人机载 LiDAR 与地面三维激光扫描相融合的技术方法,以贵州省水城区鸡场镇独家

寨崩塌为研究对象,通过两种技术方法进行野外扫描、数据处理、数据融合等步骤,形成高精度三维点云及 DEM 数据,可为地质灾害风险调查提供较为全面精确的数据基础,具有单一手段无法实现的技术优势。此次研究主要得出如下结论:

(1)机载 LiDAR 从上向下扫描获取点云数据,对立面信息获取不足,而三维激光扫描从危岩带斜下方或正前方扫描获取数据,可以有效量测危岩带坡面岩体结构以及危岩特征信息。三维激光扫描易受植被遮挡及视线阻隔,造成数据存在空洞,而机载 LiDAR 则具有在一定程度上“穿透”植被的能力,可以获取高分辨率的数字高程模型(DEM)。在崩塌地质灾害调查中,将两种技术融合使用,可有效弥补单一方法的不足,获取崩塌危岩带的高精度点云数据。

(2)机载 LiDAR 技术与三维激光扫描技术融合使用的技术流程为野外数据采集-原始点云预处理-不同数据融合-整体着色修复等步骤,最后得到高精度三维模型数据。基于该模型数据,可以对岩体结构和裂隙进行提取,进而有效识别危岩体的空间分布,并确定危岩带的规模等信息。

(3)将两者相融合的技术方法,适用于植被覆盖率高、存在视线遮挡、顶部存在张拉裂缝等情况下崩塌地质灾害的精细化调查。该方法在岩体结构分析及裂隙特征提取基础上,还可以进一步分析危岩体的稳定性、运动轨迹、危害范围,结合承灾体特征,开展易发性评价、危险性评价、易损性评价和风险评价等工作。

参考文献(References):

- [1] 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 Wei. 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)]
- [2] 谭德军,尹晨洋.高植被覆盖复杂山区机载激光LiDAR点云分类与处理[J].地球科学前沿,2020,10(7):616-621. [TAN Dejun, YIN Chenfeng. Classification and processing of airborne laser LiDAR point clouds in complex mountainous areas with high vegetation cover [J]. Advances in Geosciences, 2020, 10(7): 616-621. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 谭德军,王勇,任世聪.机载激光雷达技术在崩塌调查识别中的应用——以奉节县李子崖危岩为例[J].地球科学前沿,2020,10(7):648-658. [TAN Dejun, WANG Yong, REN Shicong. Application of airborne lidar technology in collapse investigation and identification: A case study of Liziya dangerous rock in Fengjie County [J]. Advances in Geosciences, 2020, 10(7): 648-658. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 彭艺伟,董琦,田冲,等.基于机载激光雷达的地质灾害识别关键技术及应用研究[J].安全与环境工程,2021,28(6):100-108. [PENG Yiwei, DONG Qi, TIAN Chong, et al. Research on key technologies and application of geological hazard identification based on airborne LiDAR [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 100-108. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贾虎军,王立娟,范冬丽.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[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(2):60-65. [JIA Hujun, WANG Lijuan, FAN Dongli. The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(2): 60-65. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭晨,许强,董秀军,等.复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1538-1547. [GUO Chen, XU Qiang, DONG Xiujun, et al. Geohazard recognition by airborne LiDAR technology in complex mountain areas [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1538-1547. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘小莎,董秀军,钱济人,等.高植被山区泥石流物源LiDAR遥感精细识别方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021. [LIU Xiaosha, DONG Xiujun, QIAN Jiren, et al. A weighted radial basis function interpolation method for high accuracy DEM modeling [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描测量在汶川地震后都汶公路快速抢通中的应用[J].工程地质学报,2008,16(6):774-779. [DONG Xiujun, HUANG Runqiu. Application of 3D laser scanner in making DUWEN road travelable in short term after WENCHUAN earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 774-779. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 谢谟文,胡嫚,王立伟.基于三维激光扫描仪的滑坡表面变形监测方法——以金坪子滑坡为例[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):85-92. [XIE Mowen, HU Man, WANG Liwei. Landslide monitoring by three-dimensional laser scanner: Case study of the displacement detection of the Jinpingzi landslide (Southwest, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 85-92.

- (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李强,邓辉,周毅. 三维激光扫描在矿区地面沉陷变形监测中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1): 119 – 124. [LI Qiang, DENG Hui, ZHOU Yi. Application of 3D laser scanning to the ground subsidence deformation monitoring in mining area [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(1): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陆三福,熊承仁,龙露. 三维激光扫描与结构面模拟在地质勘察中的应用 [J] . 人民长江, 2014, 45(12): 54 – 58. [LU Sanfu, XIONG Chengren, LONG Lu. Application of 3D laser scanning and structural plane simulation technologies in investigation of rock mass structure [J] . Yangtze River, 2014, 45(12): 54 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 舒飞,蒋小勇,韩天培. 三维激光扫描技术在地质灾害体测绘生产中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 77 – 81. [SHU Fei, JIANG Xiaoyong, HAN Tianpei. Application of 3D laser scanner to surveying and mapping production of the geo-hazard site [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 77 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 褚宏亮,殷跃平,曹峰,等. 大型崩滑灾害变形三维激光扫描监测技术研究 [J] . 水文地质工程地质, 2015, 43(3): 128 – 134. [CHU Hongliang, YIN Yueping, CAO Feng, et al. Research on deformation monitoring of large collapses and landslides based on 3D laser scanning technology [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 43(3): 128 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王梓龙,裴向军,董秀军,等. 三维激光扫描技术在危岩监测中的应用 [J] . 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 124 – 129. [WANG Zilong, PEI Xiangjun, DONG Xiujun, et al. Application of a terrestrial laser scanner to the study of rockfall monitoring [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 124 – 129. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 马富贵,宋元福,然见多杰,等. 三维激光扫描技术在地质灾害调查中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(3): 101 – 105. [MA Fugui, SONG Yuanfu, RAN Jianduojie, et al. Application of the three-dimensional laser scanning in the investigation of geologic hazard [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(3): 101 – 105. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 薛强,毕俊攀,李政国,等. 三维激光扫描技术在闫家沟滑坡变形监测中的应用 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(3): 108 – 112. [XUE Qiang, BI Junbo, LI Zhengguo, et al. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of the Yanjiagou Landslide [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(3): 108 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 梁玉飞,裴向军,崔圣华,等. 基于地面三维激光点云的滑坡破坏边界岩体结构特征分析 [J] . 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1209 – 1225. [LIANG Yufei, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Analysis of rock mass structure characteristics of landslide boundaries based on ground 3D laser point cloud [J] . Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1209 – 1225. (in Chinese with English abstract)]