

倾斜影像辅助的无人机载 LiDAR 高陡边坡形变监测

杨 耘¹, 江万成^{1*}, 任超锋¹, 马正龙², 蒲禹池¹, 焦宇航¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 国家电投集团青海黄河电力技术有限责任公司, 青海 西宁 810000)

摘要: 针对高海拔峡谷地形地貌环境下基于轻小型无人机载 LiDAR 对高陡边坡激光点云扫描数据缺失导致 DEM 重建及形变分析精度低的问题, 优化设计了一种垂直于山脊线、变高飞行的无人机点云/多视影像数据采集, 以及影像密集匹配点云辅助下 LiDAR 三维激光点云的滑坡群 DEM 重建方案, 实现了复杂地形地貌下 LiDAR 点云数据安全、高效的采集, 改善了高陡边坡 DEM 重建及形变监测的精度和完整性。该方法基于迭代最邻近点算法, 将倾斜影像生成的点云数据与同期获取的 LiDAR 点云数据配准和融合, 实现了 LiDAR 点云数据缺失补偿, 进而构建出完整、高精度的 DEM, 并与往期倾斜影像生成的 DEM 进行差分, 对三个典型滑坡体进行了高程形变分析。以青海龙羊峡水电站的高陡边坡滑坡群为研究区, 利用实测的 GNSS 地面控制点进行实验验证, 得出结论: 融合后的 LiDAR 点云精度为 0.063 m, 比融合前提高了 0.018 m; 重建的三个典型滑坡体的 DEM 高程精度为 0.08 m, 提升了边坡 DEM 重建的完整性和精度; 对三个典型滑坡体 2018、2021 年两期高程形变分析, 表明: 滑坡群中多个边坡发生不同程度的土体滑动, 高程方向的形变高达 50 多米, 滑坡群形变量大。

关键词: 倾斜影像; 无人机载 LiDAR; 点云配准; 形变监测; 高陡边坡

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220373

Deformation monitoring of high and steep slopes with UAV LiDAR technology assisted by oblique images

Yang Yun¹, Jiang Wancheng^{1*}, Ren Chaofeng¹, Ma Zhenglong², Pu Yuchi¹, Jiao Yuhang¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. State Power Investment Group Qinghai Yellow River Electric Power Technology Co. LTD, Xining 810000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of DEM reconstruction and deformation analysis due to the lack of data during the scanning of high and steep slope point cloud based on light and small unmanned airborne LiDAR in the topographic environment of high-altitude gorge, this paper proposed an optimized data acquisition scheme using UAV image/point cloud data acquisition of high and steep slope flying perpendicular to the ridge, and DEM reconstruction scheme using UAV LiDAR point cloud with the aid of dense point cloud derived from multi-view oblique images. The accuracy and integrity of DEM reconstruction of high and steep slope and the accuracy of landslide deformation measurement in different periods have been improved. This method uses the point cloud data generated from the collected tilted image and the LiDAR point cloud data of the same period, in

收稿日期:2022-05-31; 修订日期:2022-08-05

基金项目:国家自然科学基金(41929001);陕西省自然科学基金计划(2022JM-163);长安大学中央高校基本科研业务费(300102269205)

作者简介:杨耘,女,副教授,博士,主要从事影像/点云数据处理及应用方面的研究。

通讯作者:江万成,男,硕士生,主要从事三维激光扫描技术及地质灾害监测方面的研究。

order to compensate the LiDAR point cloud missing data based on the iterative nearest neighbor point algorithm. Then, high-precision DEM products of landslides are constructed using the compensated LiDAR point cloud; Finally, the deformation of the landslides in elevation direction is obtained by comparing the current DEM with the DEM generated from the oblique images acquired in the past. Taking the landslides located at high and steep slopes of Qinghai Longyangxia Hydropower Station as the study area, an experiment is carried out and verified using the measured GNSS ground control points. It is concluded that the accuracy of LiDAR point cloud after fusion is 0.063 m, which is 0.018 m higher than that before fusion. The elevation accuracy of the reconstructed DEM of three typical landslides is 0.08 m, which improves the completeness and accuracy of DEM of slopes. The deformation results of typical landslides in the area are obtained by a comparison of DEM from two different epochs. The conclusions can be drawn that many slopes in the landslide group have different degrees of soil sliding, and the deformation in the elevation direction is up to more than 50 m, heavy deformations happened to the landslides.

Key words: oblique images; UAV LiDAR; point cloud registration; deformation monitoring; high and steep slopes

0 引言

滑坡灾害对电站的安全运行,对滑坡区域及附近区域的人员和财产安全都会带来重大威胁,并可能伴随交通中断和堰塞湖等多种次生灾害。因此,在峡区水电站的施工建设和运营管理中,对峡区高陡边坡进行地形变化监测是一项十分重要的工作^[1]。传统的基于全站仪和 GNSS 的滑坡监测技术是通过在滑坡体关键位置布设一定数量的监测点,根据监测点的位置变化判断滑坡体的运动变化。这种技术监测精度高,但是监测点的数量有限,不能全面覆盖滑坡体表面。而且,由于滑坡本身存在重大安全威胁,监测点及其上的人员和设备面临较大风险^[2]。

无人机载 LiDAR 技术是将惯性导航系统 (INS)、全球导航卫星定位系统 (GNSS) 和激光扫描测距系统进行集成,利用 INS 获得飞行过程中的瞬时刻姿参数,通过 GNSS 获取激光扫描仪中心坐标,利用激光扫描系统获取扫描仪中心至地面点的距离,由此计算出地面上相应激光点的空间坐标 (X,Y,Z),同时还可以获得反射率、激光脉冲回波次数等信息^[3],与无人机倾斜航测技术生成地表三维模型^[4]相比,无人机 LiDAR 技术可以直接获取三维点云数据,在各种高陡边坡、危岩体等复杂地形地貌环境下,具有高分辨率、高精度及高效的特点^[5-6]。在有植被覆盖的区域,可获取植被下地形,已成为生产高精度数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的主要手段^[7]。

但是,在高海拔、沟壑纵横的复杂地形地貌环境下,利用无人机载 LiDAR 设备对多处沟壑边坡数据采集过程中会由于山区地形起伏、沟壑多,无人机在飞行中时常会发生 GNSS 信号中断而无法持续安全飞行的问题;另一方面,由于轻小型无人机载 LiDAR 扫描角度和测距精度受限,在高差大、边坡陡且形态复杂的区域采集数据时,会存在部分高陡边坡点云数据缺失的问题。

针对上述问题,文中优化设计了一种垂直于山脊线、变高飞行的高陡边坡无人机影像/点云数据采集方案,实现了复杂地形地貌环境下无人机倾斜影像及 LiDAR 点云数据安全、高效的数据采集。进而提出利用对应区域的多视倾斜影像密集点云辅助下的 LiDAR 点云融合方案,以解决对高陡边坡数据采集时点云缺失问题,提升其 DEM 重建的精度和完整性。该工作对高海拔高陡滑坡灾害监测、国家安全生产及人民生命和财产安全保障具有重要的意义。

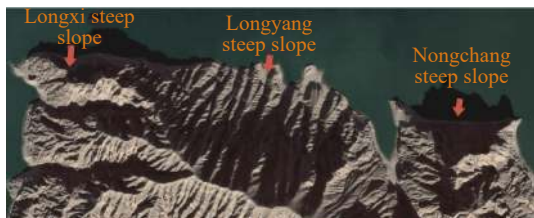
1 研究区概况

龙羊峡水电站位于青海省共和县和贵南县交界处的黄河干流上,其周长约 123 km,其地理位置如图 1 所示。它是黄河干流上游第一座梯级电站,工程以发电为主,兼顾防洪、灌溉、防凌等作用。龙羊峡坝址以上控制流域面积 131 420 km²,多年平均流量 650 m³/s,多年平均径流量 2.05×10¹⁰ m³。受区域差异

构造运动影响,龙羊峡水库北岸发育多级阶地,而南岸地形陡峭,沟壑众多。斜坡的相对高差为 300~500 m,坡度为 35°~45°;水渗透和水侵蚀降低了南岸土壤的抗剪强度,形成空洞,导致边坡不稳定,直接威胁着电站的安全运行和周围来往的船只安全。而库区右岸的“龙西”、“龙羊”、“农场”三个典型的高陡边坡位于高海拔、连绵起伏的山区,周边是水域,地形地貌及环境复杂,是该电站重点关注的滑坡群。因此,文中以上述三个典型的高陡边坡为研究对象开展 DEM 重建方案设计及形变监测。



(a) 龙羊峡地理位置
(a) The location of Longyang Gorge



(b) 研究区重点边坡分布
(b) The distribution of three interested slopes in the area

图 1 龙羊峡地理位置及三个典型滑坡体

Fig.1 The location of Longyang Gorge and its three interested slopes near the dam bank

2 方案设计

2.1 总体技术路线

文中主要是针对复杂地形地貌环境下的高陡滑坡群形变监测任务,开展轻小型无人机多视影像/LiDAR 点云数据采集和 DEM 重建方案设计优化,以及不同时期重点滑坡体形变监测和分析,技术路线如图 2 所示。

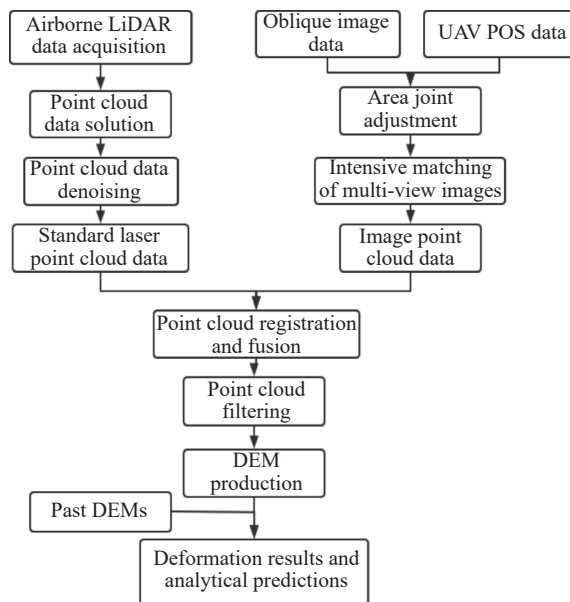


图 2 总体技术路线

Fig.2 Overall technical route

2.2 数据采集方案设计

文中外业数据采集时间为 2021 年 11 月 28-29 日,采用飞马 D2000 旋翼无人机平台,分别搭载了轻型的 D-LiDAR2000 激光载荷系统和 D-OP3000 载荷五镜头倾斜系统。该系统是由飞行器、载荷、地面控制站、GNSS 差分定位系统及相应的数据预处理软件组成,设备主要参数如表 1、表 2 所示。

表 1 D-LiDAR2000 激光雷达模块参数

Tab.1 D-LiDAR2000 LiDAR equipment parameters

Ranging mode	Wave-length/nm	Ranging precision/cm	Point frequency/kHz	Echo strength/bits	Horizontal accuracy/m
TOF	905	±2	240	8	0.02

表 2 D-OP3000 倾斜相机参数

Tab.2 D-OP3000 oblique cameras parameters

Camera selection	Size of sensor/mm	Effective pixels	Lens focal length/mm
SONYa6000	23.5×15.6	2.430 million×5	25(down) 35(oblique)

注:×5指五个相机获取的实际像素

针对研究区复杂的地形地貌环境,文中设计了安全、高效的数据采集方案,具体如下:

(1) 设备准备:利用同一无人机平台下 D-LiDAR2000 激光雷达和 D-OP3000 倾斜相机数据采集设备。考虑

高陡边坡邻接水库,海拔高且风力大,选取了高原无人螺旋翼来代替普通的螺旋翼。

(2) 起降点设置:研究区内的多处高陡边坡紧邻大面积水域,因此,选取至少 5~6 m²、地形平坦且通讯状况良好区域作为无人机安全起降的场地。当起降点距离测区较远时,应设置不少于 30% 剩余电量以保证无人机安全返回。

(3) 航线优化设计:因研究区地形起伏大、沟壑纵横,导致山脊线一侧 GNSS 信号较差。为防止长时间 GNSS 信号消失,设计了沿垂直于山脊线方向飞行的航线,并设置 GNSS 信号消失时间不超过 5 分钟,以保证无人机安全飞行和航次控制。

(4) 飞行参数设计:为保证影像分辨率或点云密度以及 DEM 精度,采用变高飞行方式。

LiDAR 数据采集航线设计如图 3 所示,主要参数设置如下:航线间距为 159 m,旁向重叠度 25%,平均点云密度 93 点/m²,飞行速度 14 m/s。

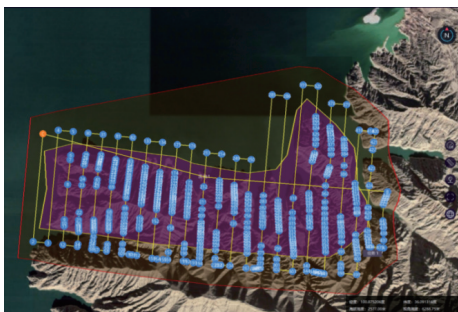


图 3 无人机载 LiDAR 数据采集航线规划图

Fig.3 UAV LiDAR data acquisition flight route planning

基于上述方案中步骤 (1)~(4),利用同一无人机平台同时采集了五镜头倾斜影像,其中,航向/旁向重叠度为 80%/65%,地面分辨率为 3 cm,其航线设计见图 4。

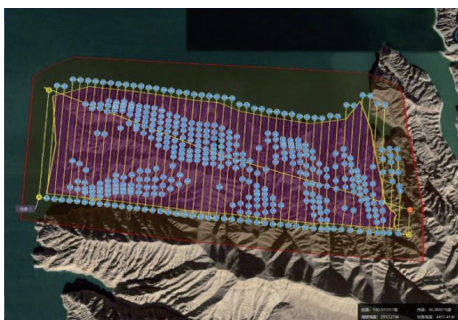


图 4 无人机载倾斜影像采集航线规划图

Fig.4 UAV oblique images flight route planning

2.3 数据处理方案

2.3.1 点云数据预处理

对获取的无人机载 LiDAR 点云数据进行航迹和坐标解算,生成标准点云。但会存在因传感器、空中、地面干扰生成的噪声点^[8-9]。因此,选取半径滤波算法对噪声点云剔除。该方法指某点所在半径 r 的圆域内的邻近点数小于某个阈值 N ,则该点视为噪声点,被剔除,否则,保留该点。如图 5 所示,在给定 r 的情况下,当 N 取为 1 时,则只有 a 点是噪声点,被删除;当 N 取 2 时,则 a 和 b 点都视为噪声点,被删除,而 c 点将被保留。

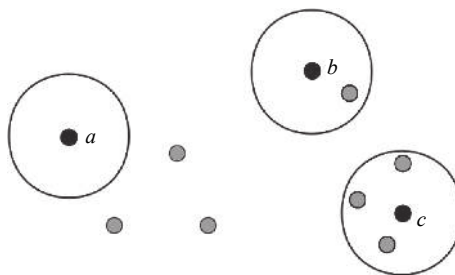


图 5 半径滤波去噪算法示意图

Fig.5 Schematic diagram of radius filtering denoising algorithm

2.3.2 基于 ICP 的激光点云与倾斜影像点云融合

针对地形起伏大、高陡边坡众多的地形地貌下,D-LiDAR2000 设备采用单一视角激光扫描方式进行数据采集,导致的部分高陡边坡点云数据缺失^[10],使该区域的 DEM 失真,无法进行边坡形变测量。因此,提出将对应区域的多视倾斜影像匹配后点云与 LiDAR 点云融合,以改善其 DEM 重建的质量和完整性,实现不同时期滑坡形变分析。具体方法如下:

(1) 从多视倾斜影像生成的密集点云中裁剪出包含 LiDAR 点云缺失区域的点集;

(2) 将预处理后的两源点云数据集进行粗配准,即,实现两源数据空间基准的统一;

(3) 选取迭代最邻点 (Iterative Closest Point, ICP) 算法^[11]进行精配准,算法描述如下:求解待配准点云数据与参考点云数据之间的旋转参数 R 和平移参数 T ,使得两点集数据之间满足如公式 (1) 所示的目标函数 $F(R,T)$ 值最小准则下的最优匹配^[12]。

$$F(R,T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|Q_i - (RP_i + T)\|^2 = \min \quad (1)$$

式中: P_i 是待配准点云; Q_i 是参考点云数据中对应 P_i 的最近点; n 是最邻近点对个数; R 是 3×3 旋转矩阵; T 是 3×1 平移矢量。

采用上述算法将 LiDAR 点云与对应区域的倾斜影像生成点云精配准, 通过两类点云融合实现缺失点云补偿, 融合前、后结果如图 6(a)、(b) 所示。

从图 6 可以看出, 经过两源点云的融合实现了对初始 LiDAR 点云缺失数据的补偿, 改善了该区域边坡 DEM 重建的完整性。为了验证融合后的点云数据质量, 利用实测选取的 15 个 GNSS 控制点进行了精度验证, 结果表明: 融合后点云均方根误差为 0.063 m, 精度提高了 0.018 m。

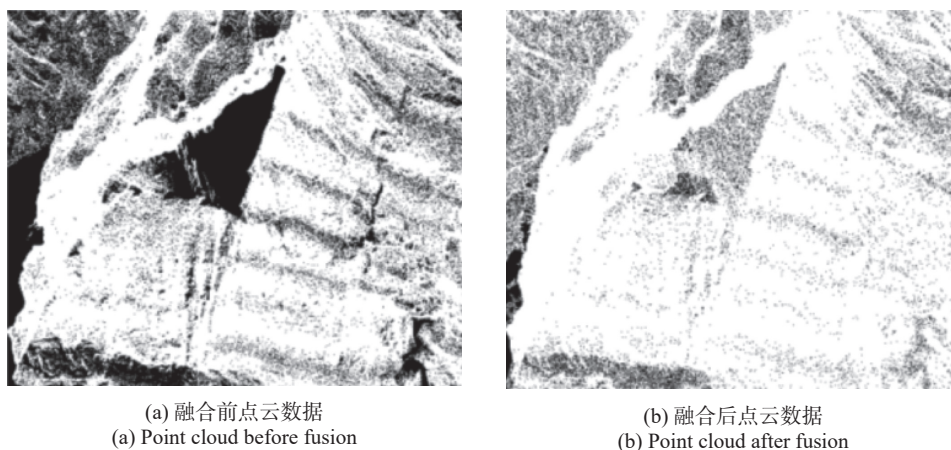


图 6 融合倾斜影像点云与 LiDAR 点云的缺失数据补偿
Fig.6 Missing compensation by fusing LiDAR point cloud and point cloud from oblique images

3 方案验证及形变分析

3.1 滑坡体 DEM 重建及精度验证

对融合后的点云数据按陡坡范围进行裁剪, 使用不规则三角网算法^[13] 建立研究区的不规则三角网之

后, 进行网格点的高程内插^[14], 生成了高斯克吕格投影下 CGCS2000 坐标系下空间分辨率 1 m 的 DEM^[15], 如图 7 所示。最后, 利用 GNSS 控制点进行精度验证, DEM 高程精度为 0.08 m。

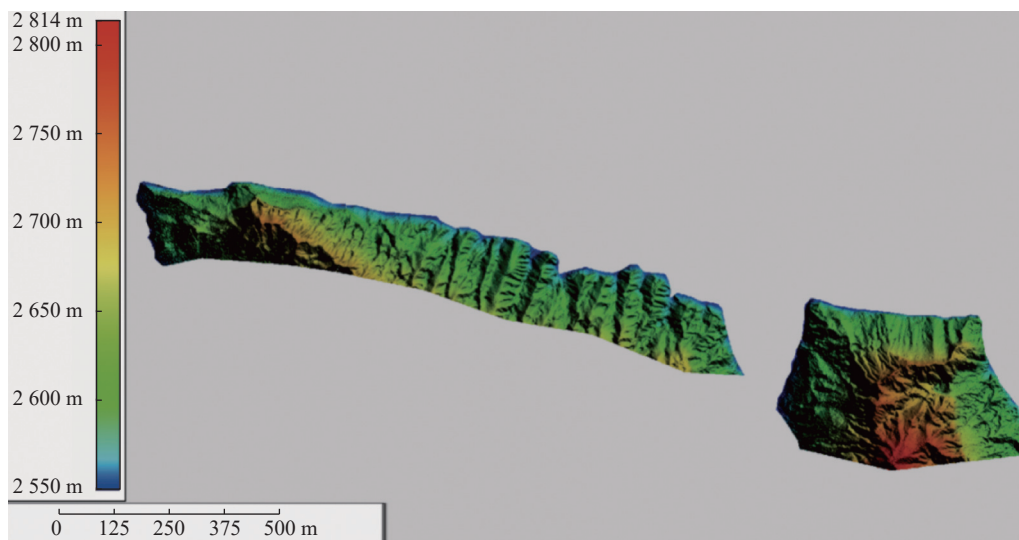
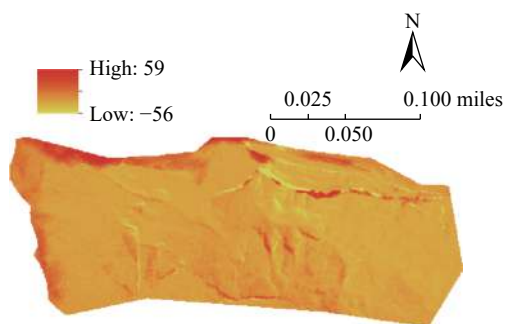


图 7 完整的 1 m 分辨率高陡边坡 DEM
Fig.7 Complete DEM with 1 m resolution of high steep slope

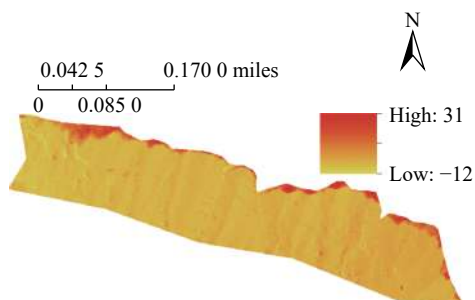
3.2 滑坡体形变分析

将该库区重点滑坡体生成的完整 DEM 与 2018 年多视倾斜航测技术生成的 DEM 进行形变分析。具体作法如下: 将 2018 年与 2021 年两期 DEM 空间基准统一到高斯克吕格投影下的 CGCS2000 坐标系, 再对两期 DEM 进行高程差分运算, 获取滑坡区域形变结果, 如图 8 所示。

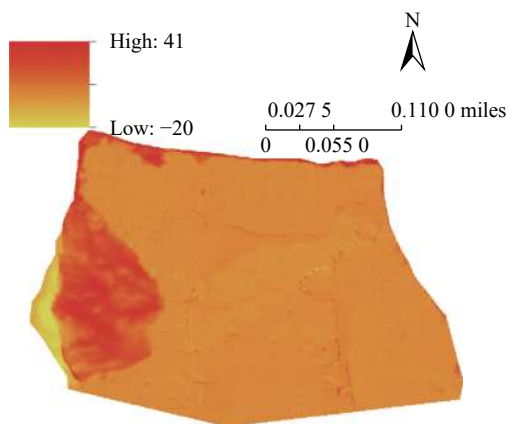
从图 8 可得出, 上述三个陡坡高程变化高达几十



(a) 龙西陡坡
(a) Longxi steep slope



(b) 龙羊陡坡
(b) Longyang steep slope



(c) 农场陡坡
(c) Nongchang steep slope

图 8 三个典型陡坡形变结果

Fig.8 Deformation results of three steep slope

米, 其中, 龙西陡坡形变量最大, 高差变化范围为: -56~59 m, 农场陡坡次之, 其高差变化范围为: -20~41 m, 龙羊陡坡高差变化范围为: -12~31 m。依据对历史资料的调查及实地踏勘结果, 2018 年至 2021 年期间多处陡坡发生较为严重的坍塌, 边坡上段的土体塌陷导致边坡下段堆积, 也缩小了水域面积。

通过对三处陡坡 DEM 开展了坡度、坡向分析, 文中以农场为例, 陡坡方向朝水域方向, 如图 9 所示。图 10 为 2018、2021 年农场陡坡近水库区域的坡度图细节对比结果, 可明显看出 2021 年该陡坡边界坡度明显高于 2018 年。

利用 ARCGIS 软件从农场陡坡的高程形变结果中获取典型陡坡滑动区域, 并对两个不同时期提取的滑动区域叠加计算出塌方量及堆方量 (见图 11)。该滑坡区域沿主滑方向剖面图如图 12 所示。经统计,

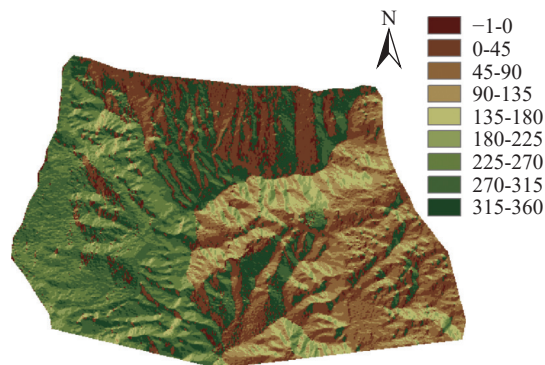
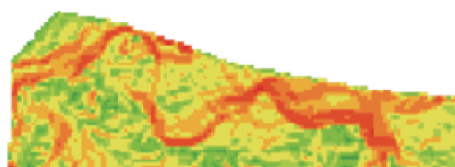
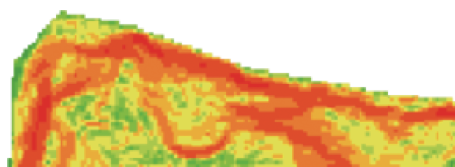


图 9 农场陡坡坡向图

Fig.9 Steep slope direction map of Nongchang



(a) 2018 年坡度图
(a) Slope map in 2018



(b) 2021 年坡度图
(b) Slope map in 2021

图 10 农场陡坡近水域处坡度图

Fig.10 Slope map near water region of Nongchang steep

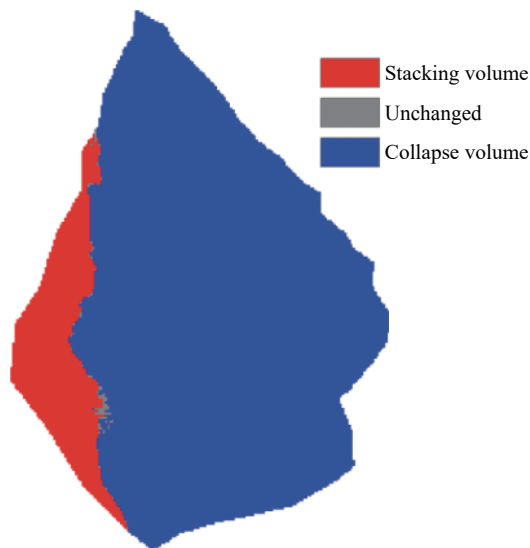
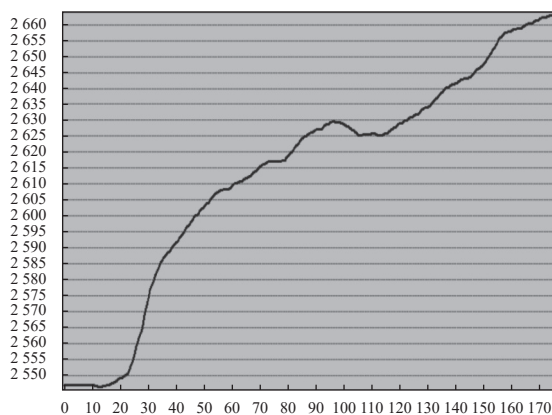


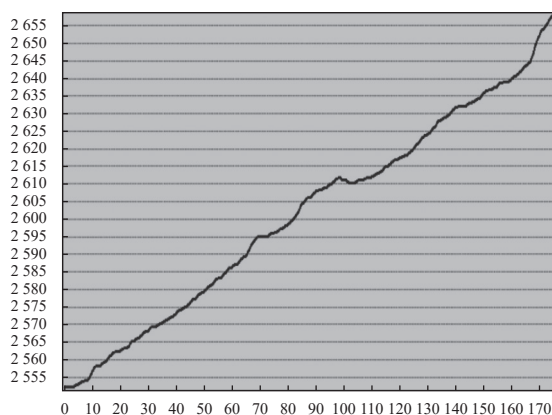
图 11 塌方、堆方示意图

Fig.11 Schematic diagram of collapse and stacking



(a) 2018 年主滑方向剖面图

(a) Main sliding direction profile in 2018



(b) 2021 年主滑方向剖面图

(b) Main sliding direction profile in 2021

图 12 主滑方向剖面示意图

Fig.12 Main sliding direction profile

农场陡坡塌方量为 $320\ 570\ \text{m}^3$, 堆方量为 $28\ 155\ \text{m}^3$, 塌方量远大于堆方量, 部分土体落入水域中。

4 结 论

针对高海拔、地形起伏大、沟壑多的复杂地形环境下的滑坡群形变监测任务, 优化设计了一种垂直于山脊线、变高飞行的高陡边坡无人机点云/多视影像数据采集, 以及影像密集匹配点云辅助下的 LiDAR 三维激光点云的滑坡群 DEM 重建方案, 解决了山区复杂地形地貌条件下无人机 LiDAR 数据采集时点云数据缺失的问题, 有效提升了高陡边坡 DEM 重建的质量以及滑坡体高程形变测量的精度。

利用实测的 GNSS 地面控制点对青海龙羊峡水电站的高陡边坡滑坡群实例进行精度验证, 得出如下结论: (1) 融合后的 LiDAR 点云中误差为 $0.063\ \text{m}$, 比融合前提高了 $0.018\ \text{m}$, 重建的三个典型滑坡体的 DEM 高程精度为 $0.08\ \text{m}$, 边坡 DEM 重建的完整性和精度得到提高; (2) 经对 2018 至 2021 年间三个高陡边坡体高程形变监测, 发现: 滑坡群中多个边坡发生不同程度的土体滑动, 高程方向的形变高达 50 多米, 滑坡群形变量大; (3) 经对滑动前后坡体的坡度分析, 陡坡群大范围边界的坡度远大于往年, 未来再次滑动可能性较大, 后期需要继续监测。

参考文献:

- [1] Wang Qingguo, Zhao Hai, Li Jianping. Landslide monitoring by merging ground laser point cloud and aerial image [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(4): 99-102. (in Chinese)
- [2] Chi Weikang, Li Xiangxin, Li Pengfei. Reservoir slope deformation monitoring based on GPS [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2018, 29(1): 9-12. (in Chinese)
- [3] Wang Chunyang, Li Guorui, Liu Xuelian, et al. 3D point cloud registration algorithm with IVCCS [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(5): 20210491. (in Chinese)
- [4] Yuan Xiuxiao, Yuan Wei, Xu Shu, et al. Research development and prospect on dense image matching in photogrammetry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1542-1550. (in Chinese)
- [5] Yao Yanli, Jiang Shengping, Wang Hongping. Landslide model monitoring and foreccast by using ground 3D laser scanner [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2014, 39(11): 42-46. (in Chinese)
- [6] Zhu Haixiong, Sui Lichun, Lu Kaixiang. Application of

- terrestrial 3D laser scanning technology in deformation monitoring of dangerous rock mass [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017, 11: 68-71. (in Chinese)
- [7] Yang Huishan, Lei Lizhen. Research on key technologies of acquisition of airborne LiDAR point cloud data and high-precision DEM [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(3): 124-127. (in Chinese)
- [8] Zhao Fuqun, Zhou Mingquan. Hierarchical point cloud denoising algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1618-1625. (in Chinese)
- [9] Wang Cong. DEM production process based on airborne LiDAR data [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(10): 204-207. (in Chinese)
- [10] Lv Yuanzhi, Sun Qiang, Bi Guoling. Recognition and repairing of surface hole in three dimensional laser scanning system [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 114-121. (in Chinese)
- [11] Wang Xin, Zhang Mingming, Yu Xiao, et al. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 2068-2077. (in Chinese)
- [12] Xie Xiaopeng, Gu Jiawei. An improved two-dimension ICP point cloud registration algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(7): 951-955. (in Chinese)
- [13] Miao Qiguang, Shi Junjie, Liu Tiange, et al. New efficient DSM generating algorithm based on TIN [J]. *System Engineering and Electronics*, 2014, 36(9): 1868-1873. (in Chinese)
- [14] Chang Bingtao, Chen Chuanfa, Guo Jiaojiao, et al. Interpolation-based filtering with segmentation for airborne LiDAR point clouds [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20200369. (in Chinese)
- [15] Wang Yunkai, Jiang Yi, He Yanlan, et al. The application of airborne LiDAR and inclination photography in beautiful rural construction [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(S1): 37-41. (in Chinese)