

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220598

# 基于无人机贴近摄影的电站近坝高边坡位移检测方法

侯春尧<sup>1</sup>, 毛延翩<sup>1,2</sup>, 刘顶明<sup>1</sup>, 宁少庆<sup>1</sup>

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002;

2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 鉴于变形监测、激光扫描、地基雷达等常规手段在水电站近坝高边坡场景中具有一定的局限性, 难以及时发现水电站近坝高边坡灾害隐患、预警边坡突发事故的问题。以金沙江流域某水电站为研究对象, 提出基于无人机贴近摄影的高边坡位移检测方法, 主要包括精准路径规划的无人机贴近摄影数据采集方法、SFM-MVS的三维模型与点云模型生成、基于近邻三维网格平面的点云比较算法。在研究区域进行了数据获取、精度分析和位移比较研究, 结果表明所提方法在水平、垂直方向精度均达到毫米级, 满足近坝高边坡大范围、高精度的位移检测需求, 具有较强的科学研究和工程实用价值。

**关键词:** 高边坡、无人机、位移检测、贴近摄影、点云处理

**中图分类号:** TP29;TV697.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)04-0172-04

## 1 引言

水电站近坝高边坡是水电工程的重大风险来源之一, 对其进行快速、高精度的巡检调查, 不仅能及时获取边坡的地形地貌变化, 同时能够对自然灾害进行预警和监测。由于近坝高边坡地形位置限制, 传统人工调查方法存在效率低、精度差、危险系数高、监测难度大等问题。因此, 水电站高边坡的巡检迫切需要新的技术手段, 来实现对边坡快速、精确的巡检, 以获取有效可靠的监测数据, 对边坡的稳定性进行判断, 保障电站安全稳定运行。高坝边坡常用自动化变形监测的手段进行位移监测<sup>[1]</sup>, 但该方法只能监测边坡的局部位移变化, 难以对边坡进行全面判断。三维激光扫描技术虽然精度高, 但易产生扫描死角, 对仪器架设点要求高, 无法适应复杂地形, 同时由于三维激光扫描在获取数据后需进行点云数据拼接, 这也会导致点云模型精度下降<sup>[2]</sup>。无人机由于具有机动性好、使用灵活的特点, 逐步用于工程领域的测量和测绘<sup>[3,4]</sup>。但已有研究采用无人机进行库坝建筑物研究时采用人工操控的方式<sup>[5]</sup>, 影响了无人机数据采集的精度和重复性。贴近摄影技术以研究对象的“面”为对象, 通过贴近摄影获取超高分

辨率影像, 进行精细化的地理信息提取, 为高坝边坡的位移检测提供了新思路, 在水利水电领域得到广泛关注<sup>[6,7]</sup>。鉴于此, 本文设计了以贴近摄影数据采集、三维模型和点云模型生成、边坡位移计算 3 部分组成的边坡位移检测方法, 在金沙江流域某水电站进行了示范应用和精度测试, 旨在为边坡安全检测提供实践方案。

## 2 研究方法

基于无人机贴近摄影的边坡位移检测方法, 主要包括贴近摄影数据采集、三维模型和点云模型生成、边坡位移计算 3 部分, 见图 1。

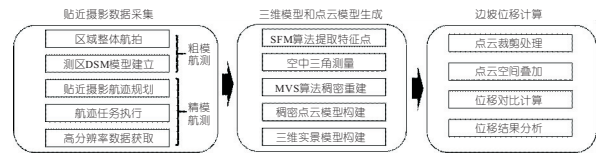


图 1 边坡位移检测技术路线图

Fig. 1 Technology road map of slope displacement monitoring

### 2.1 无人机贴近摄影数据采集

贴近摄影数据采集, 用于对边坡高分辨率、多视图影像的采集。为了保证获得数据的完整性、高精度及获取过程设备的安全, 采用无人机航迹

收稿日期: 2022-03-28, 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 四川省科技计划项目(2022YFQ0080)

作者简介: 侯春尧(1985-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程管理, E-mail: hou\_chunyao@ctg.com.cn

通讯作者: 毛延翩(1972-), 男, 硕士、教授级高级工程师, 研究方向为水利水电工程管理, E-mail: mao\_yanpian@ctg.com.cn

任务规划自动采集的方案进行数据获取。数据采集过程分为两次飞行任务,粗模航测获取边坡的地理位置信息,用于规划航迹任务;精模航测采用航迹任务自动飞行,完成高精度数据采集。采集过程中,通过实时动态载波相位差分技术(RTK)进行无人机高精度定位。如图 2,通过对区域航拍任务的规划,无人机对边坡进行远距离、充足重叠度的航测任务,获得粗模数据。对粗模数据进行空中三角计算,提取数据中的三维坐标信息,获取测量区域的数字表面模型(DSM)。在 DSM 模型上进行精细的贴近摄影任务航迹规划,生成具有拍摄角度、拍摄参数的航迹点。无人机采用自动飞行的方式,完成航迹任务的飞行,获得精模数据。

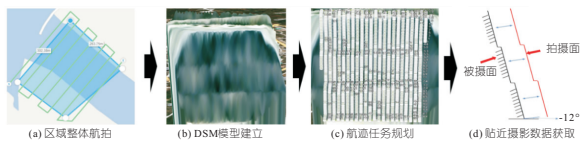


图 2 贴近摄影数据采集技术路线图

Fig. 2 Technology road map of close to photographic data acquisition

### 2.2 三维模型和点云获取

使用 SFM-MVS 算法实现点云数据的生产和实景三维模型的构建。其中 SFM 算法通过加速稳健特征算法(SURF)提取测区图片中的特征点,将得到的特征点进行定位和匹配,再结合相机参数及无人机的 RTK 信息计算特征点的三维坐标信息获得三维点云模型,生成特征点组成的三维模型。MVS 算法则通过对点云模型进行稠密重建,实现对采集到的多视角图片进行逐像素点匹配,重建生成每个像素点的三维坐标,最终输出稠密三维点云数据。SFM-MVS 算法对数据处理能够得到相对空间的三维点云数据,再结合高精度的 RTK 定位信息,实现相对空间坐标系到实际空间坐标系的转换,以此获得更高精准的测量结果。

### 2.3 边坡位移计算

边坡位移计算是计算不同时段边坡点云之间的差异,进而判断边坡发生位移的程度。考虑到点云数据无序、稀疏的特点,本方案采用点到三维网格平面点云距离来衡量两次点云之间的差异,该算法与传统的点云到点云的距离算法不同,原理为将作为参考点云中离散的点云拟合成三角平面,计算比较点云到参考点云合成的三维网格平面的距离。本方案以比较点云到参考点云拟合的网格平面的距离作为计算结果,以更好地反映不同时刻边坡三维模型之间的真实距离,减小计算

误差。图 3 为基于点云到近邻三维网格距离算法与传统的点云到点云距离算法的计算方式,其中

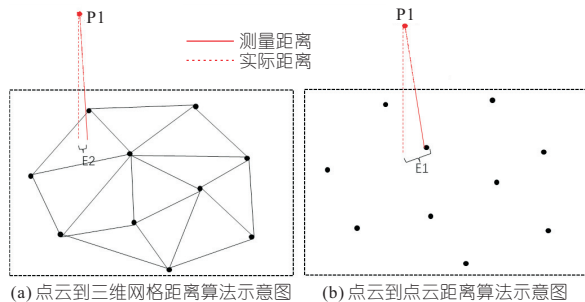


图 3 点云计算方法的差异

Fig. 3 Differences in point cloud computing methods

E1、E2 表示真实距离与测量距离的偏差值。点到三维网格平面距离  $d$  计算公式为:

$$d = \frac{|Ax_0 + By_0 + Cz_0 + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (1)$$

式中,  $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$  均为需要比较点云的三维坐标;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  均为参考点云三角网格平面的常数系数。

## 3 试验研究

### 3.1 研究区域与设备

为了验证所提方法的精度和有效性,开展了实际现场测试研究。研究区域为位于川云交界处金沙江流域的某水电站,该水电站地处青藏高原和云贵高原向四川盆地过渡的斜坡地带,属川西南、滇东北山地中热带干热气候区,夏季降水量大,冬季气候干旱。同时该水电站属于典型的“三高三大水电站”,因此对坝区内边坡安全的巡检和维护极为重要。测区位于电站右岸边坡,研究区域面积约  $1\ 829.9\ m^2$ 。

选用大疆经纬 300RTK 无人机,搭载 1 台像素为  $4\ 500 \times 10^4$  的禅思 P1 全画幅摄像机及可控俯仰角云台,采集设备的具体参数见表 1。

表 1 采集设备参数表

Tab. 1 Parameter table of acquisition equipment

大疆经纬 300RTK 无人机参数		数值	相机参数	数值
重量/g	6 300		传感器	1
最大飞行速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	23		有效像素	$4\ 500 \times 10^4$
轴距/mm	895		分辨率	$8\ 192 \times 5\ 460$
最大可倾斜角度/( $^\circ$ )	30		光圈	f2.8-f15
最大可承受风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	15		焦距/mm	35
最大作业时间/min	55		像元大小/ $\mu m$	4.4

### 3.2 数据获取

使用贴近摄影方式采集数据,通过粗模航测与精模航测相融合的方式完成研究区域的数据采集。粗模航测飞行高度设置为 200 m,飞行速度设置为 12 m/s,航向影像重叠率设置为 60%,旁向影像重叠率设置为 50%,以此保证测区 DSM

数据的完整性。精模航测利用得到的 DSM 数据进行贴近摄影精细航线规划,如图 2(c)。拍摄分辨率设定为 1 mm,即获得的图像分辨率为 1 mm,通过精度计算,无人机拍摄距离边坡固定为 8 m,且航迹点自动跟随边坡的起伏。无人机航向重叠率 80%,旁向重叠率 70%,摄像机俯仰角设定为  $-12^\circ$ 。通过多次精模航测可以得到不同时段的边坡高精度数据。

### 3.3 位移精度分析

为了进一步验证位移检测方法的精度,选取固定大小的水泥试块放置于边坡处,通过人工移动试块的位置来模拟边坡在水平和垂直方向上的位移,进行位移精度验证,试块规格见表 2。

表 2 试块规格

Tab. 2 Test block specification

试块名称	长/cm	宽/cm	高/cm
黄色试块	19.9	8.8	4.6
灰色试块	19.9	10.0	3.0

对两个试块分别进行水平位移及垫高的操作来模拟水平、垂直方向的位移,具体实施步骤见图 4。通过精模航测的方式共采集两组数据,第一组作为参考组,第二组作为比较组,是在第一组的基础上进行水平、垂直方向人为位移 1 cm,将采集到的数据进行三维模型重建,然后分别获得研究区域的“参考点云”、“比较点云”,并进行相关点云的位移精度分析。

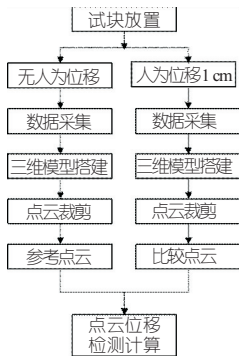


图 4 位移检测精度试验流程

Fig. 4 Flow chart of displacement detection accuracy test

图 5 为两试块位移前获得的参考点云及左侧试块水平位移后的比较点云,右侧试块垂直位移后的比较点云。如图 6 所示,虚线部分表示位移前试块的点云,实线部分表示位移后试块的点云。

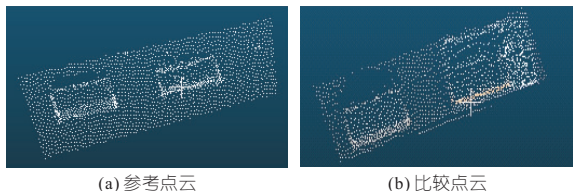


图 5 试块水平和垂直位移 1 cm 点云分布

Fig. 5 Distribution of point cloud with horizontal and vertical displacement of test block of 1 cm

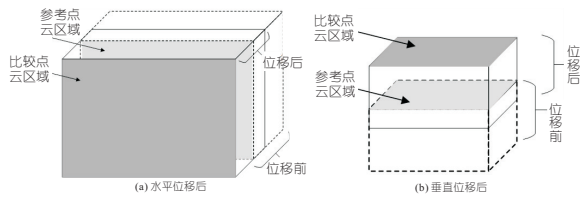


图 6 试块水平、垂直位移后比较区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of comparison area after horizontal and vertical displacement of test block

由于位移距离较小,导致位移前后试块的点云部分重叠,为了精准比较位移的检测精度,通过裁剪的方式,只保留特定区域进行位移前后的比较。对于水平位移,只对前水平面的点云进行比较(图 6(a))。对于垂直位移,只对上平面的点云进行比较(图 6(b))。

将试块在水平、垂直位移前后的比较点云区域和参考点云区域采用式(1)进行点云偏移量计算,得到点云位移量分布见图 7。对于试块在水平方向的位移,水平方向点云平均位移为 0.969 1 cm,水平方向计算距离与实际距离误差为 0.030 9 cm。对于试块在垂直方向的位移,垂直方向点云平均位移为 1.025 7 cm,垂直方向计算距离与实际距离误差为 0.025 7 cm。

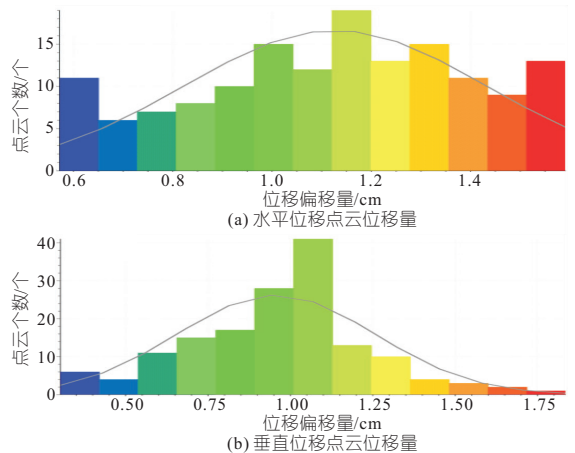


图 7 位移 1 cm 点云模型偏移量统计图

Fig. 7 Statistical diagram of offset of point cloud model with displacement of 1 cm

根据点云偏移量统计分布图进行计算,对于水平位移试块,计算得到的位移偏差波动是平均位移的  $\pm 5$  mm,而对于垂直位移试块,计算得到的位移偏差波动是平均位移的  $\pm 6$  mm。

### 3.4 边坡位移分析

为了比较研究区域不同时段边坡位移的变化,在两个时段进行数据采集,第一次采集时间为 2021 年 9 月 26~30 日,第二次采集时间为 2022 年 1 月 12~16 日,两次采集的时间间隔为 3 个月,两次数据采集使用相同的航迹点,保证了两次获得的数据为同一分辨率。将数据进行三维重建

后得到测区两次采集的三维模型及点云数据,为了保证边坡位移分析在同一范围进行比较,对点云模型进行裁剪处理,保证了比较范围的一致性,将第一次采集数据生成的点云模型作为参考数据,第二次生成的点云模型作为比较数据,裁剪后的点云模型见图 8。

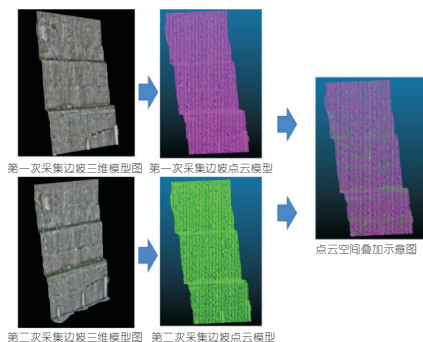


图 8 两次边坡三维模型以及点云模型

Fig. 8 Two slope 3D model and point cloud model

根据边坡位移计算方法,对参考点云与比较点云进行位移距离计算,针对得到的点云距离进行偏移数据统计能够得到两个时段边坡点云的位移偏移量统计图,见图 9。由图 9 可看出,99.85%点云的偏移距离都在 0.166 cm 以下,边坡整体的位移量较小。

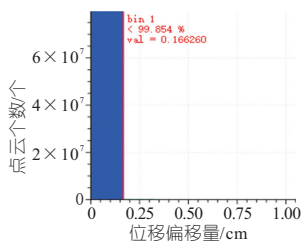


图 9 点云位移偏移量统计图

Fig. 9 Statistical diagram of point cloud displacement offset

## 4 结论

提出一种基于无人机贴近摄影的高边坡位移检测方法,主要包括精准路径规划的无人机贴近摄影数据采集方法、SFM-MVS 的三维模型与点云模型生成、基于近邻三维网格平面的点云比较算法。实例应用表明所提位移检测方法可满足近坝高边坡大范围、高精度的位移检测需求,具有较高的科学研究和工程实用价值。

### 参考文献:

- [1] 李期森. 测斜仪在高边坡位移测量中的应用[J]. 广东水利水电, 2021(9): 90-94.
- [2] 毕研发. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 科学技术创新, 2018(2): 25-26.
- [3] 朱承金, 王述红, 任艺鹏, 等. 无人机摄影测量边坡结构面及块体稳定分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(11): 1636-1640, 1647.
- [4] 李艳生, 黄星, 何君毅. 无人机边坡变形测量系统设计与实现[J]. 云南水力发电, 2019, 35(增刊 2): 171-174.
- [5] 周军, 李小亮, 马国辉, 等. 白鹤滩水电站近坝边坡图像建模及可视化监测可行性研究[J]. 水电与新能源, 2021, 35(6): 13-17.
- [6] 王小刚, 赵薛强, 王建成. 贴近摄影测量在水利工程监测中的应用[J]. 人民长江, 2021, 52(增刊 1): 130-133.
- [7] 陈昌富, 何旷宇, 余加勇, 等. 基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(1): 145-154.

## Displacement Detection Method of High Slope Near Dam of Power Station Based on UAV Nap of the Object Photogrammetry

HOU Chun-yao<sup>1</sup>, MAO Yan-pian<sup>1,2</sup>, LIU Ding-ming<sup>1</sup>, NING Shao-qing<sup>1</sup>

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;

2. State Key Lab. of Hydrosience and Eng., Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Conventional methods such as deformation monitoring, laser scanning and ground-based radar have certain limitations in the scene of high slope near the dam of hydropower station, so it is difficult to find the hidden dangers of high slope disasters near the dam in time and early-warning slope accidents. Taking a hydropower station in Jinsha River Basin as the research object, this paper proposes a high slope displacement detection method based on the UAV proximity photography, which mainly includes the UAV proximity photography data acquisition method for accurate path planning, generation of the SFM-MVS 3D model and point cloud model, and point cloud comparison algorithm based on adjacent 3D grid plane. Data acquisition, accuracy analysis and displacement comparison are carried out in the study area. The results show that the accuracy of this method in both horizontal and vertical directions reaches millimeter level, which can meet the needs of large-scale and high-precision displacement detection of high slope near the dam, and has strong scientific research and engineering practical value.

**Key words:** high slope; UAV; displacement detection; nap of the object photogrammetry; point cloud processing