

# 基于无人机倾斜摄影的白格堰塞区三维重建

朱 征<sup>1,2</sup>,包腾飞<sup>1,2,3</sup>,郑东健<sup>1,2</sup>,龚 健<sup>1,2</sup>,胡雨菡<sup>1,2</sup>,谈家诚<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;  
2. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 3. 三峡大学水利与环境学院,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为研究倾斜摄影技术在堰塞灾害现场的适用性,在介绍倾斜摄影的建模原理的基础上,阐述了无人机倾斜摄影的步骤要点,并在白格堰塞现场进行了无人机飞行作业。以无人机所采集的POS数据、图像数据为基础,进行了图像筛选、空中三角测量计算、点云稠密重建及点云三角化,完成了白格堰塞区三维数字模型重建。以数字高程模型、数字地表模型、正射影像等形式展示了白格堰塞区地貌,并测算了白格堰塞体形态、结构等方面的特征信息。结果表明,无人机倾斜摄影可以适应堰塞现场的复杂环境,具备快速进入目标区域、高效完成测绘任务的能力。

**关键词:**白格堰塞区;滑坡;倾斜摄影;三维重建;无人机

**中图分类号:**X43      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006-7647(2020)05-0081-08

**3D reconstruction of Baige landslide area based on UAV oblique photographs**//ZHU Zheng<sup>1,2</sup>, BAO Tengfei<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Dongjian<sup>1,2</sup>, GONG Jian<sup>1,2</sup>, HU Yuhuan<sup>1,2</sup>, TAN Jiacheng<sup>1,2</sup> (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China*)

**Abstract:** In order to study the applicability of oblique photography in the field of damming hazard, the model construction principles of oblique photography were introduced, and the key steps of UAV oblique photography were expounded. Based on the POS data and image data collected by the UAV, image screening, air triangulation calculation, point cloud dense reconstruction and point cloud triangulation were carried out to complete the 3D digital model reconstruction, and the terrain of the Baige damming area is displayed in the form of digital elevation model, digital surface model and orthoimage. The morphology of the Baige dam is also measured. The results show that UAV oblique photography can well adapt to the complex environment of the damming site, and has the ability to access the target area quickly and complete the mapping task efficiently.

**Key words:** Baige damming area; landslide; oblique photogrammetry; 3D reconstruction; UAV

我国西南地区滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害多发,运动土石冲入河道就会截断河流,形成堰塞湖。仅2008—2017年,有记录的滑坡堰塞坝超过100座<sup>[1]</sup>。该地区历史上曾发生过多起大型堰塞堵江事件,如1786年大渡河<sup>[2]</sup>、1933年叠溪<sup>[3]</sup>、1967年唐古栋<sup>[4]</sup>、2000年易贡<sup>[5-6]</sup>、2008年唐家山<sup>[7]</sup>、2010年舟曲<sup>[8]</sup>、2014年红石岩<sup>[9]</sup>。堰塞湖形成迅速,牵涉范围广,具有很高的危险性。2018年10和11月发生的白格堰塞事件,位于四川省白玉县则巴村和西藏自治区江达县白格村交界处(31.08°N, 98.71°E)。白格堰塞湖是同一地点连续两次大规模高位滑坡阻断

金沙江干流形成的堰塞湖<sup>[10]</sup>,造成上游多个乡被淹,下游多座桥梁被冲毁,四川、西藏及云南多地紧急转移安置数万人,引起了社会的广泛关注。

堰塞体往往结构松散、稳定性差,极易受外界环境影响发生形态变化,存在随时溃决的风险。堰塞体一旦失稳,其蓄积的大量水体将冲击沿线数百公里,造成的破坏难以估量。作为了解灾情和科学决策的重要依据,快速、准确地获取现场信息必不可少。然而,受灾地区一般伴有通信与电力中断、交通瘫痪、基础设施遭受重大破坏等紧急情况,堰塞灾害的事发地也存在交通不便、环境原始、人员物资输送困难等

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508603,2016YFC0401601);国家自然科学基金(51579086,51739003)

作者简介:朱征(1994—),男,博士研究生,主要从事堰塞体监测与预警技术研究。E-mail:934363719@qq.com

通信作者:包腾飞(1974—),男,教授,博士,主要从事大坝安全监测理论与应用研究。E-mail:baotf@hhu.edu.cn

问题。这些因素制约了常规测绘手段的开展。

无人机倾斜摄影作为一种新兴的测绘技术,在灾害救援<sup>[11]</sup>、建筑<sup>[12]</sup>、城市规划<sup>[13]</sup>、测绘<sup>[14]</sup>、考古<sup>[15]</sup>、水利规划<sup>[16]</sup>等领域已经有许多应用。Kimbauer 等<sup>[17]</sup>利用倾斜摄影量化研究了高山雪线的变化。Doneus<sup>[18]</sup>使用航空影像进行倾斜摄影成图,从而还原了 Teurnia 古城遗址。Mergili 等<sup>[19]</sup>以 Piz Cengalo-Bondo 滑坡事件的倾斜摄影重建成果为基础,对该灾害事件进行了后分析。Tonkin 等<sup>[20]</sup>使用地面控制点提升了无人机倾斜摄影重建精度,并在一处野外边坡开展了验证试验。Harwin 等<sup>[21]</sup>利用无人机采集海边悬崖的图像,并以重建点云实现了亚分米级侵蚀监测。Eltner 等<sup>[22]</sup>在野外搭设多目相机系统,监测了雨水冲刷引起的土壤流失。在滑坡灾害研究方面,帅向华等<sup>[23]</sup>将倾斜摄影技术用于在云南鲁甸地震引发的滑坡测绘;许建华等<sup>[24]</sup>利用无人机倾斜摄影对地震裂缝、滑坡等几何信息进行量测,从而为烈度评估提供参考;许强等<sup>[25-26]</sup>将倾斜摄影用于白格堰塞堵江事件的灾害调查;王晓刚等<sup>[27]</sup>利用旋翼无人机倾斜摄影技术在茂县高位滑坡灾害进行了应急测绘。陈诚等<sup>[28]</sup>采用无人机进行了表面流场测量。

倾斜摄影在众多领域的运用中表现出该技术具有测绘效率高、人力资源占用较少、成果呈现方式多元化等优点,具备用于堰塞现场的非接触式应急测绘的潜力。

本文介绍了倾斜摄影的建模原理,阐述了无人机倾斜摄影的步骤要点,并在白格堰塞现场进行了无人机飞行作业。重建了白格堰塞现场的三维数字模型,并生成了数字高程模型(DEM)、数字地表模型(DSM)、数字正射图像(DOM)。无人机倾斜摄影三维重建技术在白格堰塞现场测绘方面表现出了良好的适用性。

1 倾斜摄影的建模原理

倾斜摄影是运用无人机云台摄像机,以一定倾斜角度获取地面物体的图像。通过设定拍摄间隔,保证图像间存在重叠。利用图像间的重叠部分进行空中三角测量计算,还原相机姿态并获得稀疏点云。再以稀疏点云为基础进行稠密重建得到稠密点云,从而实现倾斜摄影三维重建。

1.1 空中三角测量

空中三角测量(aerial triangulation)包含4个部分:图像特征检测、图像特征点匹配、点云初值计算、误差优化。

图像特征检测指的是在图像中找出具有一定代表性的像素点,并且用描述算子对该点进行描述。

在众多算法中,SIFT (scale-invariant feature transform)算法<sup>[29]</sup>得到广泛应用。该方法对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变性,同时对视角变化、仿射变换、噪声也保持一定程度的稳定性。

特征点匹配将图像间的具有一定相似度的特征点进行配对。如图1所示,倾斜摄影图像间存在重叠,重叠区域内存在大量的相似特征点。相似度计算主要有两类方法,一类是按候选点描述算子间的空间距离按阈值过滤,另一类则是采用聚类算法寻找同类点。由于匹配时不可避免地存在一些错误匹配,这需要应用双重检验机制来提高准确性,如随机采样一致性(RNSAC)<sup>[30]</sup>算法。

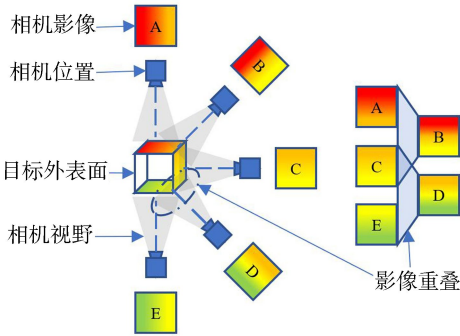


图1 基于重叠图像的特征检测原理

点云初值计算是利用特征点间的配对关系进行的特征点三维坐标计算的过程。根据经典的小孔成像模型,像素点、实物点、焦点之间满足式(1)的关系。在此成像模型下,实物点坐标和像素点坐标之间呈线性关系。当以多视角拍摄物体时,相机焦点、实物点、像素点间存在一定关系,即外极几何约束。如图2所示,两张图像拍摄于不同位置,对应的焦点位置为 $F_1$ 、 $F_2$ ,其中,像素点 $A_1$ 、 $A_2$ 指向同一实物点 $A$ ,那么在极线平面 $F_1AF_2$ 上存在关系式(2)。

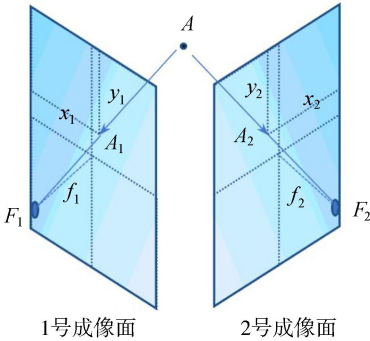


图2 基于两视图的实物点坐标计算原理

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = K[R | t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u \\ 0 & f & v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [R | t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $K$ 为内部参数矩阵; $f$ 为相机焦距; $u$ 、 $v$ 为相机

主点位置; $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{t}$  分别为相机成像坐标系与世界坐标间的旋转矩阵和平移矩阵; $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为实物点坐标; $x$ 、 $y$  为像素点坐标。

$$\mathbf{A}_2^T \mathbf{K}_2^{-T} \mathbf{E} \mathbf{K}_1^{-1} \mathbf{A}_1 = 0 \tag{2}$$

式中: $\mathbf{A}_1$ 、 $\mathbf{A}_2$  分别为像素点  $A_1$ 、 $A_2$  的坐标  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$  ; $\mathbf{K}_1$ 、 $\mathbf{K}_2$  分别为两相机的内部参数矩阵; $\mathbf{E}$  为本质矩阵。

式(2)中仅本质矩阵  $\mathbf{E}$  中存有未知量,应用 8 组以上的特征点对即可求解  $\mathbf{E}$  全部未知量。再通过 SVD 分解得到相机间相对姿态,以此代入式(1)可计算出每个特征点的三维坐标。匹配点组数越多,该过程的准确度越高。

实际成像过程与理论存在差异,如镜头畸变、投影模型非线性、特征点的检测与匹配错误。这些由各处积累的误差会降低实物点三维坐标计算的精准度。目前,得到广泛运用的思想是最小化整体重投影误差平方(式(3))。重投影误差平方和最小化的实现,普遍采用的是光束平差法(bundle adjustment)。这是一种启发式的阻尼高斯牛顿法,在几何视觉中广泛使用,具有较高的求解速度和稳健性。

$$\min \sum_i^n \|\mathbf{P}_i \mathbf{X}_i - \mathbf{x}_i\|^2 \tag{3}$$

式中: $\mathbf{P}$  为实物点向像素点的投影矩阵; $\mathbf{X}_i$  为实物点坐标; $\mathbf{x}_i$  为像素点坐标。

1.2 稠密重建

空中三角测量通过对图像集特征点的三维投影计算,重建了特征点对应的实物点云。然而,特征点数量相对全部像素点而言是稀疏的,因此空中三角测量得到的点云也是天然稀疏的,包含信息丰富度较低。

多视影像密集匹配(multiple view stereo)以稀疏点云为基础,以一定方法寻找具有一致性的像素点加密点云,从而增强点云的可利用度。点云扩散法是较为常用的稠密重建方法,主要思想是以初始点云为基础按照邻近关系逐步填充未重建像素。在此过程中会产生部分飞离点,以深度值与邻近区域一致程度可以剔除这些飞离点。

经过多年的发展,倾斜摄影及三维重建技术的理论水平和应用能力随着研究的深入不断提升。摄像器材、数字成像技术、三维重建算法和计算机性能的发展使得三维重建更加容易实现,其成图精度更高、速度更快、成图规模更大。

2 倾斜摄影三维重建的基本步骤

2.1 原始数据采集

原始数据指倾斜摄影作业采集到的图像数据、

POS(position and orientation system)数据(位置、姿态)和相机参数。图像由机载相机拍摄,POS 数据由机载传感器记录,相机参数(径向畸变、成像中心点等)由厂商标定。

图像数据使用无人机机载相机获取,采集的图像应当清晰、重叠度高、视角丰富。倾斜摄影作业前应拟定好飞行线路、摄像重叠度、拍摄数量等参数,选择光照充足、少云正光的时段进行飞行作业,避免云朵移动造成被摄物体阴阳变化及斜光照射产生的大背光区。

2.2 数据筛选

采集到图像后,有必要对图像进行筛查。一方面,检查采集成果是否达到计划的数量、范围,重点关注地形起伏、细节复杂、光影交错的区域,若不足要求,应重飞补拍;另一方面,筛查图像质量,防止低质量图像增大重建误差,应舍弃失焦、杂物遮挡的图像,有杂点、移动物的图像可作蒙盖处理。

2.3 重建计算

图像集经过预处理后,首先进行空中三角测量计算。空中三角测量通过图像间的像素特征匹配生成大量连接点,利用连接点的匹配信息计算获得连接点的三维位置(稀疏点云)。POS 数据和图像畸变的误差会随迭代得到修正。然后,采用多视影像密集匹配技术,利用像素网格匹配对稀疏点云进行加密计算,生成稠密点云。由于稠密点云数据量极大,通常采用切块降低计算机的压力。切块也有利于计算机群的平行处理。随后,稠密点云经过优化处理降低数据冗余,通过三角网格化最终获得不规则三角网模型。利用不规则三角网模型与像素间的匹配关系,将原始图像纹理贴附到不规则三角网模型上,可得到带纹理的三维真实感模型。

2.4 成果生成

倾斜摄影三维重建的基本成果是三维网格模型(3D mesh),三维网格模型由不规则三角网构成。对三维网格模型进行光滑处理可生成不同精度的数字高程模型(DEM);三维网格模型经材质附着可得到数字地表模型(DSM);数字地表模型经正射投影可生成数字正射图像(DOM)。

这些成果可以被运用到广泛的领域,数字高程模型可用于地理信息系统(GIS)、正射投影影像可用于测绘成图(Mapping)、数字地表模型可用于建筑信息模型(BIM)。

3 研究区域和数据获取

3.1 白格堰塞湖形成过程

金沙江是长江上的重要支流,位于青藏高原东



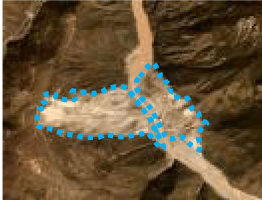
缘。金沙江落差大、流速快,两岸边坡陡峻,周围地形沟壑交错,山顶与谷底的落差可达 1 km。频繁的地质活动和强烈的风化作用使沿线的滑坡、崩塌事件非常多,由此引发的堰塞灾害是沿线居民生产生活安全的重大威胁。图 3 为卫星记录的白格堰塞的初期征兆、堰塞规模、溃后状态等光学影像信息。



(a) 2018年9月18日



(b) 2018年10月12日



(c) 2018年10月30日



(d) 2018年11月10日



(e) 2018年11月24日

图 3 白格堰塞事件全阶段卫星光学图像

2018 年 10 月 11 日,第 1 次滑坡发生,滑坡体积 2400 万  $\text{m}^3$ 、堆积高度 85 m;1 天后,堰塞湖蓄水达 2.9 亿  $\text{m}^3$ ,堰塞体自溃留下左岸残积体<sup>[31-32]</sup>;11 月 3 日,第 1 次滑坡区域原位发生第 2 次滑坡,下滑土石 350 万  $\text{m}^3$ ,冲压第 1 次滑坡残积体形成 135 m 高的堰塞体,数天内水位快速上涨,抢险人员采取人工开挖导流槽的方式主动降低坝体高度;11 月 12 日堰塞湖蓄水达 5.24 亿  $\text{m}^3$ ,水位达到人工导流槽高程 2956.40 m 并开始泄流,3 天后金沙江水位基本稳定,险情解除。这起连续滑坡堰塞事件造成上游江达县波罗乡、白玉县金沙乡等先后被淹;导致下游 318 国道金沙江大桥损毁严重,云南迪庆藏族自治州、丽江市部分道路中断、学校被淹、农田被冲毁。

白格堰塞事件发生突然、滑坡体量大、周边环境原始,造成的经济损失巨大、威胁人口众多,具备大型堰塞灾害的典型特征,对研究无人机倾斜摄影技术在堰塞现场的适用性有很高的参考价值。

3.2 数据获取

采用无人机对堰塞体展开了倾斜摄影作业,使用的无人机型号是 DJI Phantom 4 RTK,该设备质量 1.3 kg、单次续航能力约 30 min,综合 GPS、北斗和伽利略全

球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS),机载相机型号为 DJI FC6310R(1 英寸 CMOS; 5472 像素  $\times$  3 648 像素分辨率;3 轴云台稳定系统)。

如图 4 所示,无人机飞行两个架次分别重点采集右岸泄流槽和左岸残积体数据。为保证三维数据生产成果质量,航线采用大重叠率:航向重叠率为 80%,旁向重叠率为 70%。这两架次飞行共获取 1497 幅 JPEG 格式图像(29.9 G 像素)及每张图像的位置信息、姿态信息。如图 5 所示(图中箭头指向为

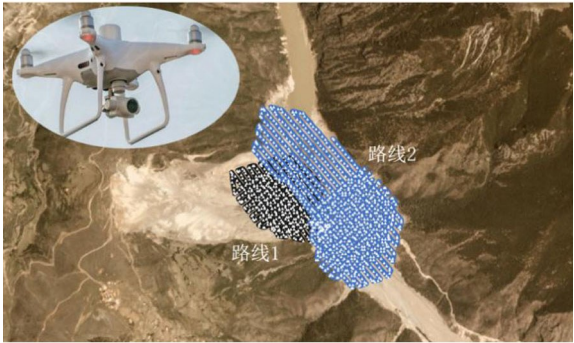


图 4 白格堰塞体无人机倾斜摄影作业



(a) 泄流槽右岸边坡



(b) 河谷左岸残积体



(c) 上游河谷全貌



(d) 河谷右岸滑坡面

图 5 白格堰塞区现场无人机航拍影像

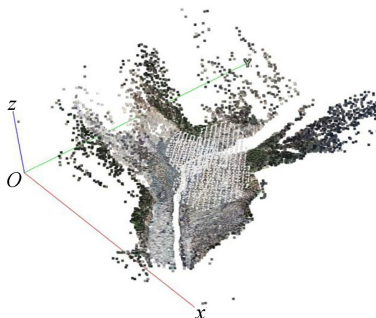
水流方向),图像涵盖了堰塞区的重点部位,如泄流槽右岸边坡、河谷左岸残积体、河谷右岸滑坡面等。

### 4 基于图像的三维重建处理

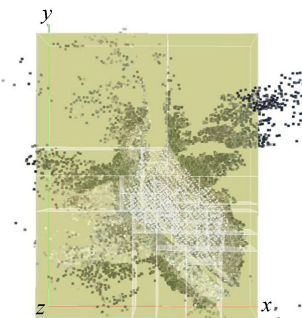
三维重建需要图像数据、POS 数据(位置、姿态)、相机参数。完成现场采集后,导出无人机内置 GNSS 中记录的位置数据、云台稳定器中记录的姿态数据以及相机拍摄的图像数据。

无人机 GNSS 记录的位置数据存在一定误差,这部分误差可在空中三角测量计算过程中由光束平差法迭代优化,调整后的位置数据精度得到提高。姿态信息(俯仰角、横滚角、偏航角)由云台稳定器记录,云台稳定器的硬件性能保证了角度抖动量低于  $0.02^{\circ}$ ,具备高精度。相机参数在无人机出厂时经过校正,其径向畸变、横向畸变、焦距、成像中心点等参数较准确。

图像经过初步处理后,进行空中三角测量计算。以 GNSS 定位最大误差为调整限值对位置数据采取平差调整策略,姿态数据采用云台稳定器记录数据原值,相机参数采用了出厂校正值。如图 6 所示,空中三角测量计算总计生成 442 947 个连接点(平均每张图像包含 1 223 个连接点),覆盖面积为 417 万  $\text{m}^2$ ,像素点的地面分辨率平均值为 5.79 cm,重建均方根误差(RMS)为 0.62 个像素点。



(a) 空中三角计算优化



(b) 点云稠密重建分瓦片处理

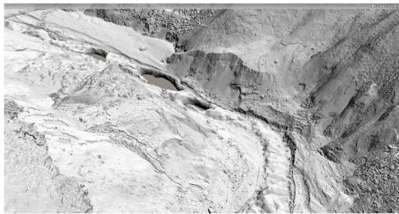
图 6 白格堰塞区倾斜摄影三维重建

完成空中三角测量计算后,进行三维场景重建。白格堰塞区的场景范围较大,以堰塞体为建模中心( $31.083^{\circ}\text{N}, 98.715^{\circ}\text{E}$ )设定建模区域( $1\,796\text{ m} \times$

$2\,322\text{ m} \times 573\text{ m}$ )。三维场景重建对计算机内存的需求较高(310 GB),因此采用自适应切块方法。自适应切块是以稀疏点云密度分度预估稠密点云的密度分布,将高密区域分成小瓦片,从而保证单个瓦片的内存需求在硬件容量内。三维重建成果如图 7 所示。其中数字高程模型描述的是堰塞区地面高程信息,可用于堰塞体覆盖面积、体积、堆积高度、坡度等特征的计算,作为现场作业规划的直接依据;数字地表模型是在数字高程模型的基础上,进一步涵盖了除地面以外的其他地表信息的高程,丰富的信息用于判别堰塞体的结构分布、材料类型、颗粒级配等,可为堰塞体稳定评估提供参考。



(a) 三维网格模型



(b) 数字高程模型



(c) 数字地表模型

图 7 白格堰塞区倾斜摄影建模三维成果

本节三维场景重建处理所采用的工具为三维图像建模软件 ContextCapture 和 PhotoScan。

### 5 成果应用

#### 5.1 白格堰塞区建模成图

无人机倾斜摄影获取现场图像数据、POS 数据,经过空中三角测量计算、三维场景重建,获得堰塞区三维网格模型。以此为基础可生成白格堰塞区的数字高程模型(DEM)、数字地表模型(DSM)、数字正射图像(DOM)等形式的成果如图 8 所示。数字正射图像是利用数字高程模型对无人机图像进行投影差改正、镶嵌、剪裁生成的数字正射影像数据集,具有精度高、信息丰富、直观真实等特点,可作为减灾规划决策的参考依据(图 8(a))。



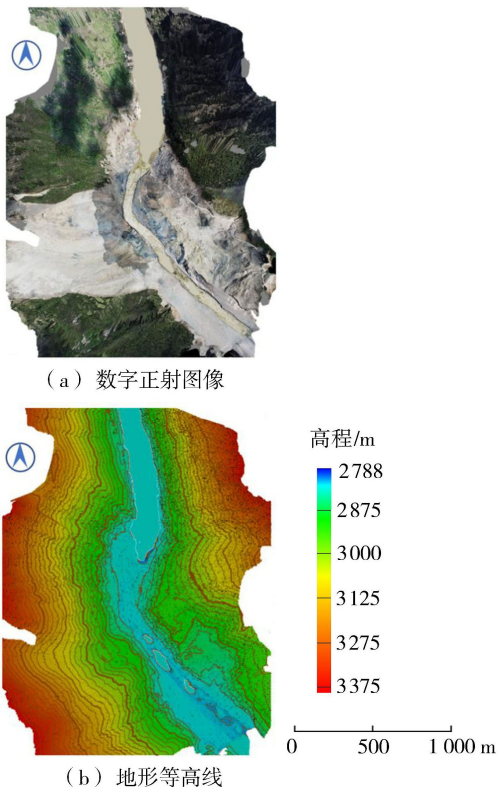


图8 白格堰塞区倾斜摄影建模平面成果

## 5.2 堰塞体形态测算

结合倾斜摄影重建成果,在数字三维模型中进行坐标读取、距离量测、坡比计算等工作,获得了堰塞体形态、结构等方面的信息,为救灾减灾提供服务。

人工泄流槽初始尺寸为:坎底高程 2 952.52 m、长 220 m、顶宽 42 m、底宽 3 m、最大深度 15 m<sup>[32]</sup>。经测量,冲刷扩大后泄流槽左岸边坡角度为 35°~38°、右岸边坡角度为 32°~36°,与初始边坡角度 35°基本一致;槽底高程约为 2 865.50 m,较初始降低 85 m;槽底宽度约为 80 m,约为初始底宽的 26 倍;槽底长度约 720 m,约为初始底长的 3.5 倍;槽顶宽度约为 300 m,约为初始顶宽的 7 倍。

堆积体最高点位于左岸边坡(高程 2 974.93 m),距泄流槽左坡顶距离约 160 m。以最大纵剖面为基准,距上游坡脚水平距离约 230 m(23°~25°),距下游坡脚水平距离约 500 m(11°~14°)。

## 6 结 论

a. 堰塞区具有范围宽、地表起伏大等特点,无人机分批次变高度飞行可覆盖堰塞区的重点部位,如泄流槽边坡、残积体、滑坡面等。同时,采用大重叠率的航线规划可保证无人机影像间的有效匹配,从而保证三维重建的高质量。

b. 白格堰塞区三维重建计算表明,大量的高分

分辨率影像数据会产生较大的计算压力,尤其占用计算机内存资源。以堰塞体中心设定建模区域,采用切块分批计算策略可有效缓解计算压力。

c. 测算白格堰塞区倾斜摄影重建模型得出:残积体最高点高程 2 974.93 m,上游平均坡度为 24°、下游平均坡度 13°。人工泄流槽经冲刷扩大后,其侧坡坡度与初始坡度基本一致,均约为 35°,其槽底下切至 2 865.50 m 高程、宽底扩至 80 m,槽底长度约 720 m。

## 参考文献:

- [1] 罗辉,邓创,赵高文. 2008—2017 年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(1): 17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(1): 17-24. (in Chinese))
- [2] DAI F C, LEE C F, DENG J H, et al. The 1786 earthquake-triggered landslide dam and subsequent dam-break flood on the Dadu River, southwestern China[J]. Geomorphology, 2006, 73(3/4): 277-278.
- [3] WANG P, ZHANG B, QIU W, et al. Soft-sediment deformation structures from the Diexi paleo-dammed lakes in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 865-872.
- [4] 王孔伟,邓成进,张帆. 中国西南雅砻江流域唐古栋滑坡及雨日堆积体形成机理分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(6): 955-970. (WANG Kongwei, DENG Chengjin, ZHANG Fan. Formation process of Tanggudong Landslide and Yuri Accumulation Body in Yalong River Valley in Southwest China [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(6): 955-970. (in Chinese))
- [5] DELANEY K B, EVANS S G. The 2000 Yigong Landslide (Tibetan Plateau), rockslide-dammed lake and outburst flood: review, remote sensing analysis, and process modelling[J]. Geomorphology, 2015, 246(6): 377-393.
- [6] 吕杰堂,王治华,周成虎. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 76-81. (LYU Jietang, WANG Zhihua, ZHOU Chenghu. A tentative discussion on the monitoring of the Yigong Landslide-blocked Lake with satellite remote sensing technique[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 76-81. (in Chinese))
- [7] 胡卸文,黄润秋,施裕兵,等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181-189. (HU Xiewen, HUANG Runqiu,

- SHI Yubing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan Landslide and dam-breaking mode of its barrier dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 181-189. (in Chinese))
- [ 8 ] CUI P, ZHOU G G D, ZHU X H, et al. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures[J]. Geomorphology, 2013, 182: 173-189.
- [ 9 ] SHI Z M, XIONG X, PENG M, et al. Risk assessment and mitigation for the Hongshiyuan Landslide Dam triggered by the 2014 Ludian Earthquake in Yunnan, China[J]. Landslides, 2017, 14(1): 269-285.
- [10] FAN X, XU Q, ALONSO-RODRIGUEZ A, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response[J]. Landslides, 2019, 16(5): 1003-1020.
- [11] WARRICK J A, RITCHIE A C, ADELMAN G, et al. New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry[J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(1): 39.
- [12] BEMIS S P, MICKLETHWAITE S, TURNER D, et al. Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology[J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 163-178.
- [13] YALCIN G, SELCUK O. 3D city modelling with oblique photogrammetry method[J]. Procedia Technology, 2015, 19: 424-431.
- [14] SVENNEVIG K, GUARNIERI P, STEMMERIK L. From oblique photogrammetry to a 3D model-structural modeling of Kilen, eastern North Greenland [J]. Computers & Geosciences, Elsevier, 2015, 83: 120-126.
- [15] VERHOEVEN G. Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan [J]. Archaeological Prospection, 2011, 18(1): 67-73.
- [16] 王冬梅,高士佩,吴杰. 基于无人机遥感技术的水利规划实施监督管理与后评价研究[J]. 水利经济, 2016, 34(6): 17-20. ( WANG Dongmei, GAO Shipai, WU Jie. Supervision and post evaluation of water conservancy planning based on UAV remote sensing technology [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(6): 17-20. (in Chinese))
- [17] KIRNBAUER R, BLOSCHL G, WALDHAUSL P, et al. An analysis of snow cover patterns as derived from oblique aerial photographs[J]. Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas, 1991, 205: 91-99.
- [18] DONEUS M. Precision mapping and interpretation of oblique aerial photographs [J]. Archaeological Prospection, 2001, 8(1): 13-27.
- [19] MERGILI M, JABOYEDOFF M, PULLARELLO J, et al. Back calculation of the 2017 Piz Cengalo-Bondo Landslide cascade with r. avaflo [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(2): 505-520.
- [20] TONKIN T, MIDGLEY N. Ground-control networks for image based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry [J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 786.
- [21] HARWIN S, LUCIEER A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery [J]. Remote Sensing, 2012, 4(6): 1573-1599.
- [22] ELTNER A, KAISER A, ABELLAN A, et al. Time lapse structure-from-motion photogrammetry for continuous geomorphic monitoring[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(14): 2240-2253.
- [23] 帅向华, 刘钦, 甄盟, 等. 倾斜摄影技术在云南鲁甸地震现场的应用研究[J]. 震灾防御技术, 2018, 13(1): 158-167. ( SHUAI Xianghua, LIU Qin, ZHEN Meng, et al. Application of the UAV oblique photography technique in the field of Ludian Earthquake, Yunnan [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2018, 13(1): 158-167. (in Chinese))
- [24] 许建华, 张雪华, 王晓青, 等. 无人机倾斜摄影技术在地震烈度评估中的应用:以九寨沟 7.0 级地震为例[J]. 中国地震, 2017, 33(4): 655-661. (XU Jianhua, ZHANG Xuehua, WANG Xiaoqing, et al. The application of oblique photography technology in seismic intensity assessment: taking the Jiuzhaigou  $M_s$  7.0 earthquake as an example [J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(4): 655-661. (in Chinese))
- [25] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018 年 10 月和 11 月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 129-146. (XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3, 2018 [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 129-146. (in Chinese))
- [26] 李鹏. 倾斜摄影技术在“1011Bg 堰塞湖”受灾现场应用分析[J]. 北京测绘, 2019, 33(5): 532-535. (LI Peng. Application research of oblique photography technology inefficient topographic mapping [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(5): 532-535. (in Chinese))
- [27] 王晓刚, 高飞云, 杨磊, 等. 高精度倾斜摄影在高位滑坡灾害应急监测中的应用[J]. 四川地质学报, 2019, 39(4): 600-603. (WANG Xiaogang, GAO Feiyun, YANG Lei, et al. The Application of high-precision tilt

photography to emergency monitoring of ridge-top landslide [J]. Acta Geologica Sichuan, 2019, 39(4): 600-603. (in Chinese))

[28] 陈诚, 王新, 李子阳, 等. 基于无人机自标定的表面场测量方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 39-42. (CHEN Cheng, WANG Xin, LI Ziyang, et al. Surface flow field measurement method based on UAV self-calibration [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 39-42. (in Chinese))

[29] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[30] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications

to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381-395.

[31] LIANG G, WANG Z, ZHANG G, et al. Two huge landslides that took place in quick succession within a month at the same location of Jinsha River [J]. Landslides, 2019, 16(5): 1059-1062.

[32] 金兴平. 金沙江雅鲁藏布江堰塞湖应急处置回顾与分析[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 5-9. (JIN Xingping. Reviews and reflections on emergency response countermeasures for barrier lakes in Jinsha River and Yarlung Zangbo River[J]. Yangtze River, 2019, 50(3): 5-9. (in Chinese))

( 收稿日期: 2019 - 12 - 16 编辑: 郑孝宇)

( 上接第 80 页)

[11] 施正友, 曹周生, 韦灿强, 等. 低热硅酸盐水泥在三峡工程大体积混凝土中的研究及应用[J]. 混凝土, 2007(12): 84-87. (SHI Zhengyou, CAO Zhousheng, WEI Canqiang. Research and application of low-heat Portland cement in large-volume concrete for Three Gorges Project [J]. Concrete, 2007(12): 84-87. (in Chinese))

[12] 樊启祥, 李文伟, 李新宇, 等. 美国胡佛大坝低热水泥混凝土应用与启示[J]. 水力发电, 2016, 42(12): 46-49. (FAN Qixiang, LI Wenwei, LI Xinyu, et al. Application of low heat Portland cement concrete in Hoover Dam and its revelation [J]. Water Power, 2016, 42(12): 46-49. (in Chinese))

[13] HUO J H, PENG Z G, YE Z B, et al. Preparation, characterization and investigation of low hydration heat cement slurry system used in natural gas hydrate formation [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2018, 170: 81-88.

[14] 张国新, 刘有志, 刘毅. 特高拱坝温度控制与防裂研究进展[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 382-389. (ZHANG Guoxin, LIU Youzhi, LIU Yi. Temperature control and crack prevention of super-high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 382-389 (in Chinese)).

[15] 张国新, 刘有志, 刘毅, 等. 特高拱坝施工期裂缝成因分析与温控防裂措施讨论[J]. 水力发电学报, 2010, 20(5): 47-53. (ZHANG Guoxin, LIU Youzhi, LIU Yi, et al. Analysis on the causes of and crack formation and the methods of temperature control and crack prevention during construction of super-high arch dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 20(5): 47-53 (in Chinese)).

[16] WANG Renkun, CHEN Lin, ZHANG Chong. Seismic design of Xiluodu ultra-high arch dam [J]. Water Science

and Engineering, 2018, 11(4): 288-301.

[17] 徐世烺, 葛唯. 硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 54-59. (XU Shilang, GE Wei. Effect of silica fume and limestone powder on crack resistance property for roller compacted concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 54-59. (in Chinese))

[18] 周秋景, 张国新. SAPTIS: 结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之二)[J]. 水利水电技术, 2013, 44(9): 39-43. (ZHOU Qiuqing, ZHANG Guoxin. Development and application of SAPTIS-software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structures (part II) [J]. Water Resources and Hydropower Engineering. 2013, 44(9): 39-43. (in Chinese))

( 收稿日期: 2019 - 12 - 06 编辑: 郑孝宇)

