

基于无人机倾斜摄影的堆石坝表面变形监测与三维重建技术

符 帅

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]堆石坝表面变形观测是检测大坝结构稳定状况的有效方式,传统的监测具有监测网点少、精度差、不易获得完整变形场等优点。针对这一问题,在西南某大型水电站堆石坝的基础上,系统地研究了基于无人机倾斜摄影开展堆石坝表面变形监测以及三维重建的主要技术。通过制定科学合理的航摄计划,改进高海拔地区数据采集方式,建立精确的三维模型,利用多次点云配准来实现对表面变形信息的提取,从而完成全流程的技术路径设计。工程项目实践证明该方法能快速建立大坝表面高清晰度三维模型,在进行大坝表面变形“点-线-面”的全方位监测的基础上,可以为堆石坝全生命周期的安全评价提供有效的保障工具。

[关键词]无人机倾斜摄影;堆石坝;表面变形监测;三维重建;点云配准

DOI: 10.33142/hst.v9i3.19329

中图分类号: TV698.1

文献标识码: A

Surface Deformation Monitoring and 3D Reconstruction Technology for Rock Fill Dams Based on Drone Oblique Photography

FU Shuai

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: Surface deformation observation of rockfill dams is an effective way to detect the stability of dam structures. Traditional monitoring methods have disadvantages such as few monitoring points, poor accuracy, and difficulty in obtaining a complete deformation field. In response to this issue, a systematic study was conducted on the main technology of surface deformation monitoring and 3D reconstruction of a large hydropower dam in Southwest China based on unmanned aerial vehicle oblique photography. By developing a scientific and reasonable aerial photography plan, improving the data collection method in high-altitude areas, establishing accurate 3D models, and utilizing multiple point-cloud registrations to extract surface deformation information, the technical path design of the entire process is completed. Engineering project practice has proven that this method can quickly establish high-definition 3D models of dam surfaces. Based on the comprehensive monitoring of dam surface deformation "point - line - surface", it can provide an effective guarantee tool for the safety evaluation of the entire life cycle of rockfill dams.

Keywords: drone oblique photography; rock-fill dam; surface deformation monitoring; 3D reconstruction; point-cloud registration

引言

堆石坝是水电站建筑物的重要类型之一,在水电站工程项目建设阶段以及运行过程中对坝面进行变形观测是衡量坝体安全状况的重要标准。本文以西南一个特大型水电站堆石坝为例,其最大坝高约为300m,总填方达4300多万方,施工区平均海拔在3000m左右,河床狭窄,两岸地形陡峭,位于高寒、高海拔、高地震动区,工程所用土石料种类繁多,大坝建设十分困难。传统的巡测、定点测量方法很难获得坝体表面连续变形情况,容易造成观测点布置不合理、时间滞后等情况发生。近几年来无人机倾斜摄影测绘技术因为灵活性强、采集速度快、能构建出精

确度高的三维模型等原因,被广泛应用于工程建设监控中来。本文提出一种基于无人机影像的三维建模方法应用于大坝应急监测及检查工作中,应用结构来自运动的方式,匹配多个重叠影像中的特征点,建立出含有场景几何信息的高精度三维大坝模型,利用无人机制作出来的倾斜航拍获取到水库大坝的表面三维模型进行点云化、拼接融合的方式得到大坝内部隐蔽部位的准确定位及其三维数字化表达。本文以西南地区某巨型水电站堆石坝为工程项目实例,围绕无人机倾斜摄影测量设计方案确定、高海拔地区无人机数据获取优化等问题展开讨论,对无人机倾斜摄影测量技术下的堆石坝表面变形检测、三维重建相关技术进

行系统的介绍。

1 无人机倾斜摄影测量技术特点

倾斜摄影测量技术是一种近年发展较快,应用较广的一种实景三维数据采集方式。相较于传统的垂直摄影测量而言,倾斜摄影是在无人机上安装多个镜头相机,同时从垂直及多个倾斜方向拍摄照片可以得到物体全貌的空间几何轮廓以及表观结构特征。倾斜航摄为在同一飞行平台安装多个镜头相机,在飞行时同时可以从垂直、倾斜等不同方面拍照,得到更为详尽准确的信息。这解决了普通正射影像只能从一个竖直方向进行拍照的局限问题,使三维模型立面的信息更全面更真实。针对堆石坝外表形变观测来说,无人机倾斜摄影测量存在以下优点。首先,在测量过程中不需要像以往一样在坝体表面大规模地布置各种监测点,从而规避了传统的方式造成的对施工的影响;其次,一次航拍就可以得到坝体表面数十万平方米的全部图像信息,实现了“一点看全坝”的全新检测思路^[1];再次,通过对不同阶段的数据进行对比,能够回溯到任何一个测点的历史变形情况;最后,由摄影测量产生的三维模型也作为评估大坝安全状况、观测随时间的变化以及制定维修计划的重要依据之一。生成好的三维模型不仅可以用来进行形变研究而且还可以应用于工程施工的形象进度表示和数字移交。但是无人机倾斜摄影测量用于堆石坝监测还存在不足之处,堆石坝表面纹理杂乱,高低起伏较大,影像重叠率以及地面分辨率较高,高海拔地区气温较低、空气稀薄、风速较强,对于无人机的性能要求十分苛刻。所以要形成一套完整的实施方案来保证监测的准确性和安全性。

2 堆石坝表面变形监测与数据采集设计

2.1 无人机航测方案设计

科学合理的航摄方案是保障后三维建模效果的基础。因堆石坝体型细长、落差大等特点,系统的航摄方案采取了井字形航线加环绕航线的组合式飞行方式,井字形航线布置沿着坝轴线方向,保证对整个坝体主体的覆盖,环绕航线布置在坝体上下游面及两侧边坡地带增加密度,从而得到更多的立面纹理资料。而航摄参数的设计要兼顾地面分辨率、飞行安全性以及数据采集速度之间的关系,在垂直影像重叠度上,航向重叠度一般应达到70%~80%,而旁向重叠度一般也应在50%~80%左右,复杂地形区则需要将航向重叠度控制在70%~80%左右,以保证相片拼接的效果。结合堆石坝变形监测精度需求及坝高差异变化情况,本文设计方案选取地面分辨率好于3cm/像素,飞行航向重叠度大于等于80%,飞行旁向重叠度大于等于70%,

为使模型具有较高的几何精度,在大坝上、下游坝面、坝顶以及两侧边坡等重要部位放置像控点,使用GNSS静态测量取得坐标精度平面、高程误差均小于2cm。具体航测技术参数见下表。

表1 无人机航测方案设计参数表

参数名称	取值/方案	设置依据/说明
飞行相对高度	120~150m	兼顾地面分辨率与空域限制
地面分辨率(GSD)	2.5~3.0cm/pixel	满足毫米级变形监测精度要求
航向重叠度	85%	保证立体像对匹配质量与冗余
旁向重叠度	75%	提升模型边缘完整性与覆盖均匀性
航线敷设方式	井字形+环绕	多角度覆盖,减少盲区,增强立面纹理
飞行速度	6~8m/s	避免运动模糊,保证影像清晰度
相机倾角	45°(前视/后视)	兼顾顶面与立面信息的完整采集

2.2 控制点布设与测量方法

控制点是联系相片坐标与地面实际坐标的一个桥梁,控制点设置的质量对整个三维模型的几何定位精度有着至关重要的影响。选择在大坝上、下游坝面、坝顶以及两侧岸坡等重点部位布置控制点,实行“外围布设、中间加密”,像控点采用黑白相间的十字标靶,大小由航摄间隔高度决定,在相片上清晰可见并方便刺点,像控点的密度要综合测区范围、地貌高低错落程度、精度指标等因素来确定,在本方案中,在坝体主体部分布设像控点距离为200m,在坝顶、坝肩等重要的变形监测剖面进行加密到100m。控制点坐标利用全球卫星定位静态测量方式获得,观察时间不低于60min,平面、高程精度都控制到2cm以内^[2],为了检验模型精度,在大坝坝体上增加至少是控制点数量百分之三十以上检查点,这些检查点都不参与空中三角测量解算,只用于最后模型精度独立判定。

2.3 数据采集流程与质量控制

数据采集程序包括飞行前作业、航拍飞行路径规划实施、影像获取以及数据完整性校验四个部分,在飞行之前的准备工作要做好无人机的空域申报、气象状况调查及设备状况检测;注意风速、光照和能见度等气象参数的影响问题。航空摄影时间尽量安排在对成图影响不大的晴天或阴天、有较少云层、有较多阳光照射、大气透明度高天气的情况下进行,如果是晴天拍摄时太阳高度角 $\geq 40^\circ$ 。航拍飞行中地面站实时监测无人机飞行姿态、电量、图传信号等状态情况,保证按照预定航迹稳定飞行。影像获取采

取定时触发和等距触发结合的方式,以使重叠度保持稳定。每次完成一次飞行之后马上做数据完整性的校验工作,主要是影像的数量对比,曝光参数相同与否的检测以及影像的质量判断,因为照明条件的变化,或者是移动造成的清晰度下降等问题所引发的质量较差的影像则在下一次飞行中重新拍摄。

2.4 高海拔复杂环境下的飞行与数据获取优化

西南高海拔地区无人机飞行面临着低氧、低温、强风等诸多恶劣复杂的自然环境因素带来的巨大难题。高原环境使无人机面临着严峻的挑战——稀薄的空气使得飞机失去部分升力,突然出现的大强度大风会干扰无人机的平稳飞行,极端低温使得锂电池活性下降等问题,因此需要对其进行专门的适应性改进设计来增加低温加热型电池以及充足的电力冗余量。为解决这些问题,系统做出了如下的改进:一是加强飞机动力装置的设计——采用高原设计的动力装置,提高无人机在低压大气中的升力系数;二是选用耐低温高倍率特种电芯组成的智能锂聚合物电池;三是加强无人机动力系统的维护管理——使用智能锂聚合物电子控制系统,安装专门用于保藏锂电池的保温箱,起飞前对锂电池加热到20~25℃左右,从而激活锂电池活性,减少电池内部电阻。飞行方案上,挑选风力相对弱一些的上午实施工作,减少阵雨影响。适当减少每批次飞行面积并加快电瓶更换频率使无人机时刻保持在良好电量水平。

2.5 数据预处理与影像筛选

在采集原始影像数据的基础上应进行一系列系统的处理以及挑选。主要包括影像纠正、色彩一致性和影像增强三个部分。其中影像纠正就是使用摄像机内参来修正由镜头产生的径向失真以及切向失真对于影像准确性的破坏;色彩一致性则是为了调整因各个飞行架次以及时间的不同而导致的一系列影像间色彩偏差的问题,让同样地物具有相近的色调基调;影像增强主要是指对影像中阴影部位以及逆光条件下影像进行加强处理以增加其纹理上的可见性^[3]。通过对影像进行纠正、特征点选择、分区网平差、多视影像配准等一系列的技术,从而建立三维实景模型。图像预处理环节中舍弃曝光过大、抖动模糊不清、不能正确聚焦等不理想的图像,只留下优质图像进行下一步三维重建工作。

3 三维重建与变形监测方法研究

3.1 点云数据生成与处理技术

高精度点云数据是三维建模及变形观测的基本要求,点云采集使用运动恢复结构法,利用多个角度的影像之间对应点来进行匹配计算相机位置以及场景三维模型,整个

处理过程分为特征点检测、匹配、增量式的重建、集束调整、优化以及稠密点云生成六个环节。特征点检测运用了尺度不变特征变换算法来保证不同大小,不同旋转条件下对角点的匹配准确性,在原始点云中有大量的噪声点以及离群点需要去除,先用统计滤波的方法将孤立的噪声点去掉,并使用半径过滤去除孤立节点,通过使用局部平面对点云表面做平滑处理以降低点云表面的噪声,并且可以保持大坝表面石子纹理的真实几何特性。地控点对于建模精度的影响是基于不同位置集合来研究的,以满足不同的需求。

3.2 高精度三维模型构建方法

基于密集点云基础上,建立高精度的三维网格模型和实景纹理模型。网格重构用的是泊松表面重构的方法,它可以很好地解决一些非封闭曲面以及复杂曲面的问题,构造出平滑、连贯的三维网格。网格约简过程,通过减少网格数目而不影响整体的几何精度来对原始高密度网格简化成适合渲染、分析用的小型网格。纹理贴图环节,把原始图像上纹理信息贴附到三维网格表面,得到逼真的实景三维模型。实验结果表明所创建的三维实景模型几何精度较高,可以精确展示大坝本体结构、配套设施等的空间几何轮廓以及表层纹理结构。

3.3 多期数据配准与差异分析

多期三维数据准确融合是获取大坝表面变形的重要手段,因为不同时间所采集的数据可能有不同的坐标参考系,所以需要配准的方法把各个时期的点云归结到一个相同的坐标系中。本文利用了基于特征点的初步配准与ICP法进一步细化的融合步骤。传统基于3D点云的方式求变形量,包括最邻近距离法,点云到云比较,不同层次的模型到模型云比较等,这些方法实际上就是找到两个最邻近的部分点云之间的距离就认为这是变形值,实际上是变形前、后的同一部位之间真实的距离变化情况;ICP算法即为目前最常用的点云融合方法之一,它不断迭代求算刚性的变换矩阵来使得两次点云间的相对欧式距离变得尽可能小。根据分块迭代最近点法可以更好地获取到建筑物沉降的空间变化特点^[4]。通过对不同块大小与变形矢量偏差进行统计可以找到最合适分块大小。

3.4 堆石坝表面变形提取方法

以多期配准后的三维模型为基础,系统实现了对堆石坝表面变形的定量获取。变形提取分为整体位移提取及局部差异提取两方面。整体位移提取主要是通过对坝面各个区域内点云块之间重心位移来进行求取坝面在各个方向上的变形大小,在堆石坝变形主要是以沉降、水平位移为主的前提下,着重提取出竖直方向沉降量以及顺河向水平

位移。局部差异提取使用的是模型与模型之间的比对方式,得到坝体表面的变形色阶图,清晰地展示出变形分布情况。从多个测量角度出发重建外貌变形场能全方位了解堆石坝的总体变形状况,减少单一指标检测造成的对于实际变形遗漏或错判的风险。变形提取成果以热图与位移向量图以及剖面变形曲线的形式给出,可分时序观察变形发展过程。这种方法解决了传统点状监测不能获得完整变形场的问题,完成了对大坝表层变形由点及线再到面全方位的刻画,给堆石坝施工期到运行时期的稳定检测提供精确的变形观测依据。

4 结语

本文以西南一巨型水电站堆石坝工程为例,对无人机倾斜摄影下堆石坝表面变形监测及三维重建技术进行了系统的分析研究。首先介绍了无人机倾斜摄影监测方案的设计、控制网点的布置和技术参数的选择以及无人机影像数据的质量控制;然后针对高海拔复杂环境下飞行校正及点云生成等问题开展了具体的研究工作;最后通过多期数据同名点匹配实现了坝体变形情况的提取。无人机倾斜摄影影像进行三维大坝建模可得到较为准确的结果,在提高大坝监测及巡检工作的效率上有很大的优势。工程项目实践证明该方法能快速建立大坝表面高清晰三维模型,在对多个时期的数据进行配准后达到对堆石坝表面变形无

接触式的大面积精确测量,克服了一直以来依靠单一监测点方式的空间覆盖面及持续性的缺陷,在整个堆石坝全寿命周期的安全监视以及智能化管理中都起到了重要的技术支持作用,在今后的研究中我们将继续探索基于人工智能算法的自动变形检测手段,还有无人机自主巡视并实时计算的方法来提高对堆石坝变形监视智能化水平等。

[参考文献]

- [1]刘科鑫.无人机技术在复杂山区三维建模中的应用[J].测绘与空间地理信息,2026,49(3):138-141.
- [2]茅耀辉.基于无人机倾斜摄影技术的自然资源执法监察系统开发与研究[J].测绘与空间地理信息,2026,49(3):77-80.
- [3]钟心怡.无人机倾斜摄影在建筑竣工测绘中的安全作业规范与技术分析[J].中国安防,2026(3):104-106.
- [4]赵亚鹏.无人机倾斜摄影在工程地形三维建模中的应用[J].石材,2026(3):46-48.

作者简介:符帅(1996.7—),毕业院校:西安理工大学高科学院,所学专业:水利水电工程,当前工作单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目施工管理部副主任,职称级别:工程师。