doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.025

基于无人机遥感的滑坡几何参数测量方法研究

刘　鹏[1]，邹崇尧[2]，何　雯[1]，肖　聪[2]，熊　涛[1]
（1. 湖北省航测遥感院，湖北 武汉 430074；2. 湖北省测绘工程院，湖北 武汉 430074）

摘　要：介绍了一种利用无人机遥感影像测量滑坡体的技术方法，探讨了无人机在获取滑坡监测几何参数方面的优势。以鄂西某滑坡为例，利用无人机摄影测量技术，根据该滑坡区域不同时期航摄影像制作完成DEM、DOM等多类型成果，计算得到该滑坡不同时期的特征断面和土石方变化量，综合分析得出滑坡趋于稳定的结论，验证了基于无人机遥感的滑坡几何参数测量方法的实效性。

关键词：无人机；滑坡监测；几何参数；遥感
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0123-04

Research on Landslide Geometric Parameters Measurement Method Based on UAV Remote Sensing

LIU Peng[1], ZOU Chongyao[2], HE Wen[1], XIAO Cong[2], XIONG Tao[1]
(1. Hubei Institute of Photogrammetric and Remote Sensing, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Institute of Surveying and Mapping Engineering, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, we introduced a technical method of measuring landslide mass based on UAV remote sensing image, and discussed the advantages of UAV in obtaining geometric parameters of landslide monitoring. Taking a landslide in western Hubei for example, we used UAV photogrammetry technology to complete DEM, DOM and other types of results according to the aerial photography in different periods of the landslide area, calculated the variation of characteristic section and earthwork volume of landslide in different periods, and finally put forward the conclusion that the landslide tends to be stable through comprehensive analysis, which could verify the effectiveness of landslide geometric parameter measurement method based on UAV remote sensing.

Key words: UAV, landslide monitoring, geometric parameter, remote sensing

受强烈地震和极端气象事件频发影响，近年来我国地质灾害处于多发态势。据自然资源部发布的最新报告，2020年全国共发生泥石流、地面塌陷、山体滑坡等地质灾害7 840起，给人民群众的生命财产安全造成了巨大损失。滑坡发生后，对滑坡形态进行动态监测，可为准确分析研判滑坡体变化趋势，预防次生灾害提供有效支撑[1]。然而，滑坡发生时常伴有大风、雨雪、雷电、冰雹等恶劣天气，且中心区域因存在再次滑坡风险禁止人车通行，给应急测绘工作带来了极大困难。相对于传统技术手段[2]，无人机遥感技术具有快速高效、机动安全等方面的优势[3-7]，在人员不进入灾害现场的前提下，利用多期遥感数据进行灾害区域变化发展情况的对比分析，可快速、准确获取滑坡体形状参数变化量。

2020年7月21日鄂西某村出现大面积山体滑坡，形成堰塞湖[4]，对清江下游某地城区人民生命财产造成重大安全隐患。为配合地方政府抢险救援工作，利用无人机对滑坡区域进行低空、高分辨率、高频度航空遥感，获取灾害现场多视图像，经数据处理得到关键时间点的滑坡体形态参数。

1　数据获取与预处理

1.1　滑坡前数据收集

本文收集滑坡前（2016年）该区域0.5 m地面分辨率的DOM存档数据和2 m格网DEM历史数据。

1.2　遥感影像获取

本文选用S200型垂直起降无人机，搭载黑卡相机，并配备后差分系统实施航摄，设置飞行高度为1 690 m，航向重叠度为70%，旁向重叠度为40%，地面分辨率为7 cm。考虑到后期可能再次滑坡，且滑坡区域有可能进一步扩大，航摄范围覆盖到滑坡区域外10 km。为保证比对的一致性，在滑坡周边稳固区域布设地面控制点标志，控制点间隔1 km，且每处均布设了备用点[5]，共布设地面控制点24个。7月19日到

收稿日期：2021-06-03。

达现场后，立即组织首次航摄，后续每天飞行1~2次，7月25日滑坡区域有大暴雨，停飞一天，26日雨停后进行最后一次飞行。

1.3 数据预处理

无人机摄影测量预处理流程如图1所示。摄影完成后，首先整理航摄相片文件和POS数据，采用PhotoScan软件导入影像数据、POS成果和控制点坐标，完成空中三角测量；然后进行密集影像匹配，生成密集点云[6]；再对点云进行分类，剔除粗差和地物点；最后根据点云数据插值得到2 m格网DEM数据，并利用DEM数据微分纠正得到DOM影像。

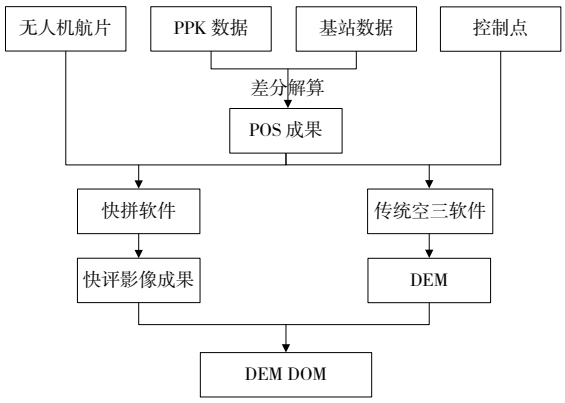


图1 无人机摄影测量预处理流程图

2 几何参数选择与测量

滑坡事件发生前后该滑坡区域全局影像对比图如图2所示。滑坡位于鄂西某村中坝东侧约0.8 km的香树湾组南侧，地处清江左岸；平面形态呈“舌”形，纵向长约为1 500 m，平均横向宽约为400 m；地形总坡度为12°，前缘高程约为695 m，后缘高程约为920 m，相对高差为225 m；滑体厚10.0~43.0 m，平均厚度为25 m。

本文研究的滑坡区为图2中红线包含的范围，选取位于滑坡上、中、下区域的3个横断面A_1–B_1、A_2–B_2、A_3–B_3以及滑坡中心纵断面A_4–B_4四个特征断面和土石方量5个参数作为监测滑坡变化的变量，利用ArcGIS软件，在不同时期2 m间距的DEM上内插得到A_1–B_1、A_2–B_2、A_3–B_3、A_4–B_4断面数据，再通过不同时期的DEM进行填挖方计算，得到所需DEM的差值，获取土石方的变化量。

3 对比结果与分析

3.1 首次滑坡监测

为了尽快获取滑坡厚度、体积等定量数据，为现场分析研判提供数据支撑，本文将7月19日的DEM与



图2 滑坡前后影像对比图

滑坡前的DEM数据进行叠加处理，计算4个特征断面变化和滑坡土石方量。

3.1.1 特征断面变化

上、中、下3个特征横断面以及滑坡纵断面滑坡前与7月19日的变化情况如图3、4所示，可以看出，A_1–B_1断面变化最大，滑坡后地面高程明显降低（最大降低50 m），沟底东侧变化量明显大于沟底西侧；A_2–B_2断面沟底和西侧高程变化较小，且西侧上沿局部高程增高，东侧变化较大，地面高程降低明显；A_3–B_3断面东西两侧高程变化较小，沟底高程明显升高；A_4–B_4断面上部高程明显降低，中部高程变化不大，下部高程有所升高。上述情况表明，滑坡主要发

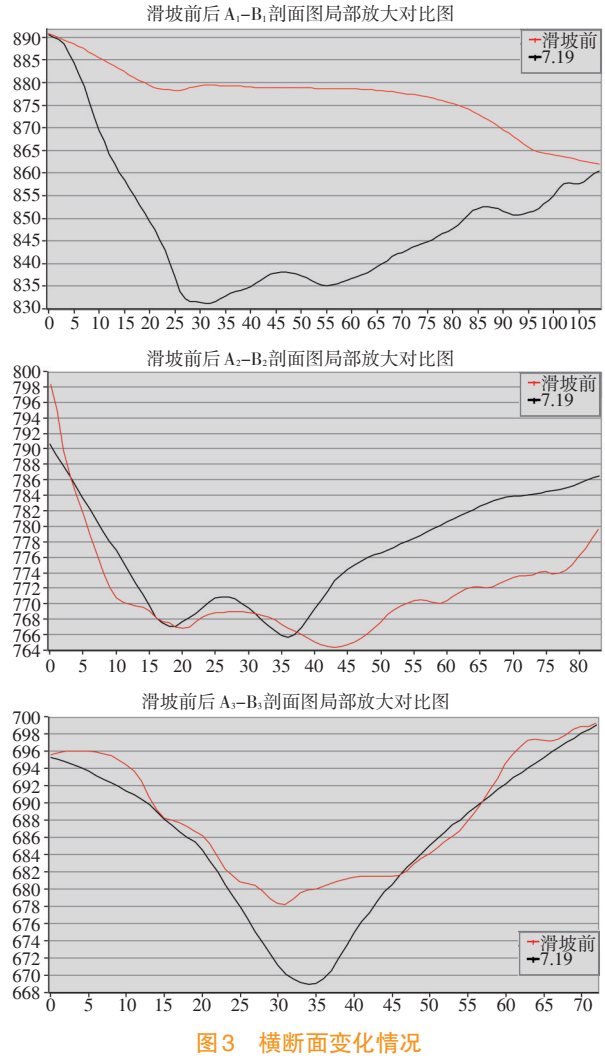


图3 横断面变化情况

生在A_2–B_2断面以上区域，且东侧山体滑坡量大于西侧山体，A_3–B_3断面沟底高程升高是由于下部岩石山体较稳固，上部土石滑落堆积所导致的。

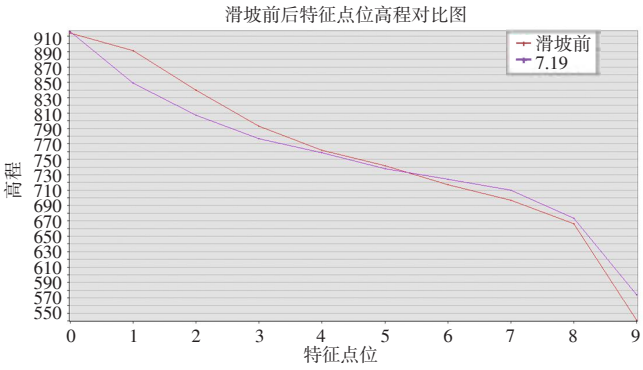


图4　纵断面变化情况

3.1.2　土方量变化

将滑坡前的DEM成果与7月19日的DEM成果作差值计算[8]，得出首次滑坡体积。通过对比滑坡前后DEM发现，A_2–B_2与A_3–B_3断面之间存在一条不规则的分界线（图5），首次滑坡发生后，分界线以上部分地面高程明显降低，属于土方滑落区域；分界线以下部分地面高程明显上升，属于土方堆积区域，两部分土方量差值为滑落江中的土方量。滑坡区域滑落总土方量约为3 000 000 m^3，堆积区域土方量约为350 000 m^3，滑落江中的土方量约为2 650 000 m^3。

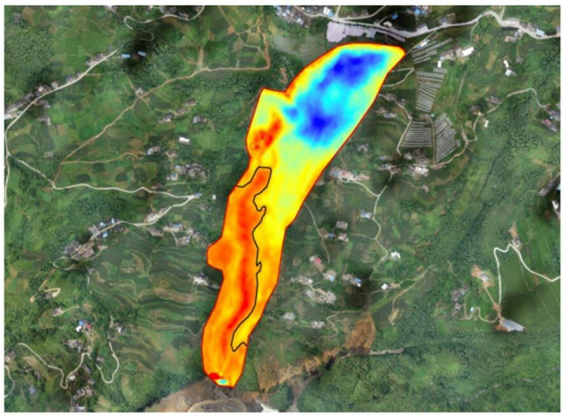


图5　土方滑落区和堆积区的分界线

3.2　滑坡变化监测

3.2.1　特征断面变化

从7月19日开始，利用每天的航摄数据，观测上述5个变量（4个特征断面和土方量）的变化，为滑坡体的稳定性监测提供参考。由于天气预报7月25日有大暴雨，可能诱发再次滑坡，本文以7月19日、7月24日（大雨前）、7月26日（大雨后）为例进行分析。上、中、下3个特征横断面以及滑坡纵断面在19日、24日、26日的变化情况如图6、7所示，可以看出，7月19日和7月24日监测滑槽A_1–B_1、A_2–B_2、A_3–B_3三个断面的地面高差呈下降趋势，局部略有上升，整体地面平均高程下降0.385 m，A_1–B_1断面靠近滑槽中线的位置高差变化非常小，靠近滑槽东侧和西侧边缘处高差变化较大，最大处约为2 m，A_2–B_2断面靠近滑槽边缘处变化较小，地面高差最大处约为1 m，A_3–B_3断面西部区域变化较大，高差变化最大处亦约为2 m，滑槽纵断面A_4–B_4基本吻合；7月24日和7月26日滑槽A_1–B_1、A_2–B_2、A_3–B_3三个断面均变化不大，A_1–B_1断面平均高差小于0.2 m，A_2–B_2断面平均高差小于0.2 m，局部略大一些，A_3–B_3断面西部和中部区域局部变化较大，横断面平均高差不超过0.5 m，滑槽纵断面A_4–B_4基本吻合。

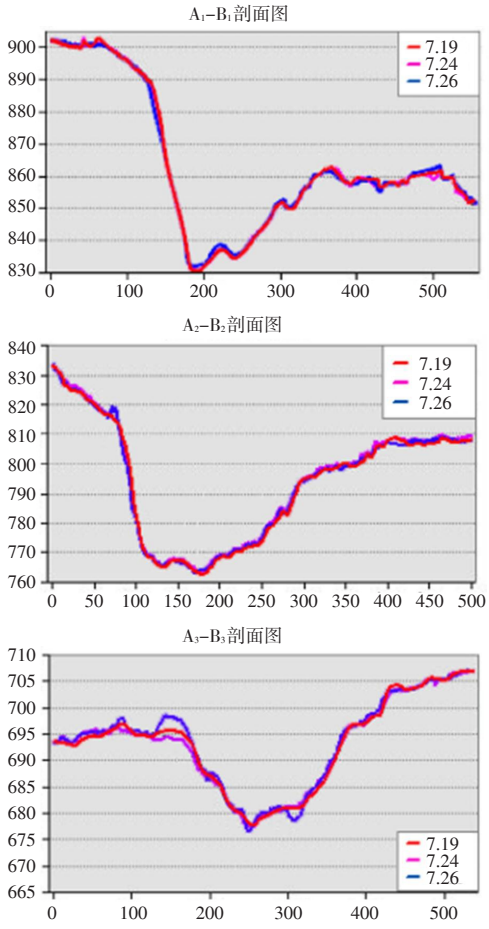


图6　横断面变化监测情况

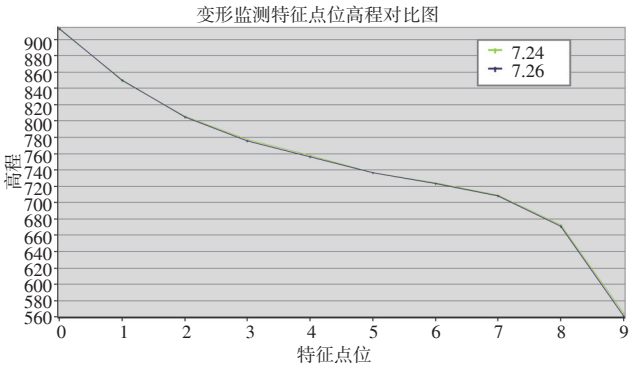


图7　纵断面变化监测情况

3.2.2 土方量变化

本文将19日与24日的DEM成果作差值计算发现，滑坡区域土石呈零星下滑趋势，共滑落土方量约为92 000 m^3，每日滑坡约为18 400 m^3；再将24日与26日的DEM成果作差值计算，分界线以上区域滑落的土方量约为15 000 m^3，分界线以下区域堆积土方量约为8 500 m^3。

3.2.3 滑坡稳定性分析

对比分析19日、24日的特征断面和DEM可知，滑坡区域上段A_1–B_1和下段A_3–B_3局部最大高差不足2 m，中段A_2–B_2局部最大高差约为1 m，滑坡区域整体高程降低0.385 m，说明首次滑坡发生后至24日，滑槽局部仍有少量土石滑落和堆积的情况发生，不排除由前期滑坡造成的浮土导致。对比分析24日、26日特征断面和DEM可知，滑坡区域各断面高差进一步缩小，分界线以上滑坡土方量约为15 000 m^3，滑坡面积约为160 000 m^2，平均高程变化约为0.095 m；分界线以下滑坡土方量约为8 500 m^3，滑坡面积约为73 000 m^2，平均高程变化约为0.16 m，说明25日滑坡区发生暴雨后，监测得到的特征断面变化很小，DEM差值也较小。

自首次滑坡发生后，通过对比分析无人机多期监测数据发现，横断面和土方量变化均逐渐变小，可判断滑槽体基本趋于稳定，即便遭受7月25日的暴雨侵袭，槽体内土石方变量也未发生较大变化，可以预测滑槽体周边发生二次大滑坡的可能性较小。

4 结 语

本次滑坡航摄范围为29.1 km^2，共获取地面分辨率为7 cm的影像2 022张，合计39.2 GB。每天18:00前处理得到当日滑槽变形数据和图样，为滑坡监测提供了有力的数据支撑，取得了良好效果，验证了基于无人机遥感的滑坡几何参数测量方法的有效性和实用性。通过几何参数测量可以发现，滑坡前后几何参各项监测值差异较大，而在7月26日监测值变化很小，则可预判得出滑坡基本稳定的结论。

本次无人机搭载的遥感设备均为可见光成像的传感器，当滑坡上方云雾遮蔽时，无法获取滑坡影像数据，且夜间也无法获取滑坡影像数据，可探索搭载小型LiDAR和SAR等主动遥感设备，以满足全天24 h提供滑坡监测数据的需求。后期应研究通过三维模型半自动测定滑坡几何参数的技术方法，可极大提升滑坡几何参数的测定效率和频度，以便更加高效的开展应急测绘工作，切实提高应急测绘的保障能力。

参考文献

[1] 叶伟林,宿星,魏万鸿,等.无人机航测系统在滑坡应急中的应用[J].测绘通报,2017(9):70-74

[2] 韦明.滑坡监测工程中GPS测量技术探讨[J].中国高新技术企业,2010(13):49-50

[3] 李小玲,胡才源,孙全福,等.无人机遥感在高山峡谷区崩塌地质调查中的应用[J].地理空间信息,2021,19(1):78-81

[4] 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):1 534-1 551

[5] 刘冬烨,问鼎,朱京海.基于无人机影像的面向对象地类信息提取[J].地理空间信息,2020,18(12):75-80

[6] 李然,刘万增.无人机遥感与应急测绘:三大关键技术[J].中国减灾,2020(11):35-36

[7] 张广庆,张浩,王宏昌.无人机遥感技术在溃坝应急测绘保障中的应用[J].现代测绘,2019,42(6):13-15

[8] Saleem N,Huq M E,Twumasi N Y D,et al.Parameters Derived from and/or Used with Digital Elevation Models (DEMs) for Landslide Susceptibility Mapping and Landslide Risk Assessment: A Review[J].ISPRS International Journal of Geo-information,2019(12):11-13

第一作者简介：刘鹏（1976—），主任工程师，主要从事无人机遥感和测绘应急工作。

（上接第93页）

[7] 周芹芳,方小二,叶杨,等.基于地理信息技术的自然资源资产审计实地核查取证系统研究[J].测绘与空间地理信息,2019,42(9):101-103

[8] 梁永刚,谢秋昌,陈琼.基于在线核查土地变更调查的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2021,44(增刊1):228-230

[9] Mell P, Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing(Draft)[M]. NIST Special Publication,2011

[10] Rivest R. The MD5 Message-digest Algorithm[Z]. MIT Laboratory for Computer Science and RSA DATA Security Incorporated,1992:4

[11] 蒋永生,彭俊杰,张武.云计算及云计算实施标准:综述与探索[J].上海大学学报(自然科学版),2013,19(1):5-13

第一作者简介：陈琼（1983—），硕士，工程师，主要研究方向为自然资源调查与信息化。