



# 无人机倾斜摄影测量在边坡岩体结构面调查中的应用

叶震<sup>1</sup> 许强<sup>1</sup> 刘谦<sup>2</sup> 董秀军<sup>1</sup> 王晓晨<sup>1</sup> 宁浩<sup>1</sup>

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

2 格拉茨理工大学应用地球科学学院,奥地利 格拉茨

**摘要:**在高陡边坡岩体结构面的调查中,无人机倾斜摄影测量技术可全面、精确、快捷地获得坡面岩体结构信息。以实际崩塌为研究对象,使用多旋翼单镜头无人机开展航测重建三维边坡模型,利用霍夫法向算法和HSV(hue, saturation, value)算法构建可视化三维岩体结构模型,并对模型进行球形 $k$ 均值聚类来完成结构面分组提取。研究表明,该方法能从三维岩体结构模型中对结构面倾向和倾角进行快速提取和分析,还可在三维空间中对结构面间距、迹长等要素进行准确测量,并根据提取出的结构面构建原位三维岩体结构面模型,为利用倾斜摄影测量调查高陡边坡岩体结构面信息和崩塌灾害形成机理提供了一套可行的解决方案。

**关键词:**岩体结构面;高陡边坡;无人机倾斜摄影测量;HSV算法;三维模型可视化;球形 $k$ 均值聚类

**中图分类号:**P237

**文献标志码:**A

岩质边坡的变形和破坏通常都是受控于岩体介质特性并沿着岩体结构面发生的,结构面则是在岩体成岩过程中经漫长的地质作用后发育而来的。由于受到结构面的切割,岩体成为一个复合结构体,具有各式各样的结构形式。而掌握岩体结构面的几何特征及空间组合关系是对边坡稳定性进行分析与评价的基础,因此获取大量可靠的岩体结构面信息至关重要。

在边坡岩体结构面的实际调查过程中,传统的人工接触式测量工作效率低,危险性大,且受地形条件及外业环境的限制较大。遥感技术凭借其快捷、高效、安全等优势被广泛应用于现场地质调查,如最为常见的三维激光扫描技术和摄影测量技术。文献[1]在国内最早将三维激光扫描技术应用于高陡边坡的地质调查,并结合工程案例总结了一套测量高陡边坡岩体结构面的方法。文献[2]通过使用三维激光扫描技术统计出高陡边坡岩体结构面信息,获取了危岩体的空间几何特征并进行岩体的稳定性分析。文献[3-4]讨论了三维激光扫描技术在水库边坡、采石场和隧道地质调查中的应用,根据获取的点云模型识

别并拟合出了岩体结构面,证明了该项技术在岩体结构特征描述中具有很好的应用前景。此外,近景摄影测量技术在地质调查中的应用也较广泛。文献[5]通过使用数字近景测量技术对边坡不连续性结构面特征进行了分析和描述。文献[6]应用数字近景测量技术在采石场边坡开展实验,并提取了边坡岩体结构面的迹长和产状等信息。文献[7]通过摄影测量技术调查了岩质边坡的结构面发育情况,并对边坡破坏模式进行了反演分析。

然而三维激光扫描与近景摄影测量技术这两种方法均会遇到特殊复杂地形,导致测量视场角度受限,由于扫描和拍摄距离、角度等原因,会造成测量的系统误差增大,数据获取不够均匀,致使模型发生畸变等。而无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)摄影测量可凭借其灵活、快捷、方便等优势,前往待测区域进行多角度航拍,这不但降低了测量风险和测量成本,还提高了效率,节省了时间。文献[8]分析了无人机摄影测量技术在高陡边坡地质调查中的应用,提出了一套使用无人机测量岩体结构面的工作流程。文献[9]

收稿日期:2020-03-12

项目资助:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(41521002);四川省科技计划(2018SZ0339);四川省科技厅重点研发计划(2019YFS0074)。

第一作者:叶震,博士生,主要从事地质灾害与空间数据处理分析研究。569207021@qq.com

通讯作者:许强,博士,教授。xq@cdut.edu.cn

采用无人机摄影测量技术获取岩体结构面信息,提取出了结构面二维迹线及产状等。文献[10]利用无人机摄影测量半自动统计了岩体结构面的产状信息,并与人工实测值进行了比较分析,验证了方法的可行性。文献[11]利用无人机开展倾斜摄影测量调查高陡边坡,提取了岩体结构面信息并研究了几种拟合结构面算法的精度。文献[12]最早提出了倾斜影像自动空中三角测量的处理方法,并以城市场景为例重建出了效果逼真的精细三维表面模型。文献[13]通过对倾斜影像开展三维重建,提出了局部区域表面一致性约束的纹理映射方法,并有效消除了三维模型重建过程中纹理映射碎片化的现象。文献[14]融合了机载点云、地面点云以及倾斜摄影等多源数据,构建了一套空地联合的建筑物三维精细模型重建方法。对三维精细模型重建中算法的改进以及运用多源数据的联合建模,为今后重建出更为精细且可供地灾工程师分析的三维自然边坡模型和三维地质灾害模型奠定了坚实的基础。

综上所述,通过无人机倾斜摄影可实现近直立高陡边坡三维模型重建并对岩体结构面进行产状测量。已有的研究主要是针对岩体结构面倾角、倾向的手动测量,而缺少结构面三维间距以及迹长等关键参数的统计。现有三维岩体结构模型的可视化效果与结构面信息自动提取的程度也有待进一步提高。因此,本文借助开源软件 Cloud Compare 中霍夫法向算法计算点云模型法向,利用 Matlab 编程实现非结构化三维点云模型的可视化赋色。完成赋色后使用 R 语言进行编程,调用球形  $k$  均值聚类分析算法自动提取出各组岩体结构面点云。从分离出的各组结构面点云模型中,不仅可对各组结构面倾角和倾向进行提取与分析,还能够实现在三维空间环境中对各组结构面的间距和迹长进行直接量测和统计。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省黔东南苗族侗族自治州凯里市湾水镇江口村,如图1所示,崩塌区位于江口村北东侧的陡峭岩壁上,坐标为(107.94°E, 26.72°N),海拔高程462~900 m,垂直高差438 m,属中低山河谷地貌和中亚热带湿润季风气候区,多年平均气温16.1℃,多年平均降雨量1 235 mm<sup>[15]</sup>。

根据地质资料可知,崩塌区周边主要以碳酸盐岩高陡边坡为主,如图2所示,出露的地层有下

二叠统栖霞组( $P_1q$ )、茅口组( $P_1m$ )发育的灰、深灰色中厚层灰岩夹少量砂页岩,下二叠统梁山组( $P_1l$ )发育的石英砂岩、页岩及铝土岩,上泥盆统尧梭组( $D_3y$ )、望城组( $D_3w$ )发育的灰、灰黄、深灰色中厚层白云岩,中上志留统翁项组( $S_{2-3}w$ )发育的灰绿、灰褐色砂页岩。本文收集到谷歌地球(2014-09-02—2018-11-03)共5幅卫星影像,通过上述历史光学影像可确定崩塌发生于2016-09—2017-12期间。需详细了解该边坡岩体结构面信息和此次崩塌形成的机理。由于该地区碳酸盐岩边坡高陡,几乎无法对岩体结构面信息进行接触式测量,并且经过初步勘察可知该边坡再次发生崩塌的可能性较大,采取近景摄影测量及近距离激光扫描调查也具有较大的危险,因此,针对此类近直立、风化严重且有明显裂隙存在的高陡边坡,采用无人机倾斜摄影测量的方法进行边坡岩体结构面信息的调查与分析,可安全有效地解决上述问题。

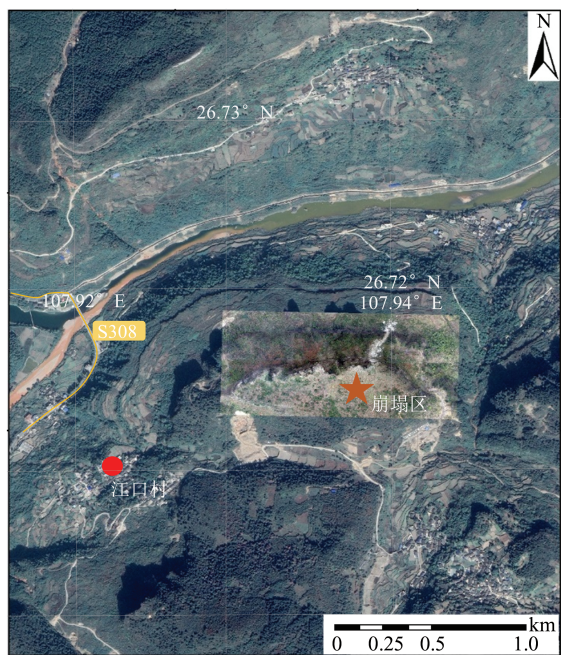


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of the Study Area

## 2 数据获取与处理

无人机倾斜摄影测量是指在获取影像的过程中,镜头拍摄时始终与地面成一定倾斜角度,从而更好地获取地物表面信息的一种新型技术手段<sup>[16-17]</sup>,其可用于地质灾害隐患点的监测与调查。考虑到本文研究区内边坡高差较大,因此选用 DJI Phantom4 Pro 无人机开展倾斜摄影测量调



查。DJI Phantom4 Pro 无人机配备惯性导航系统、全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)与 GPS 组合定位系统,所拍摄的每一张影像均具有相应的经度、纬度和高程信息,以便于后期数据处理。无人机的相关参数见表 1。

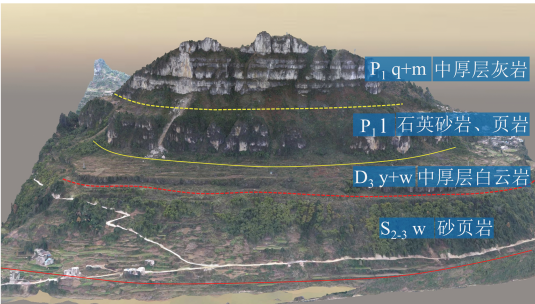


图 2 江口崩塌源区出露地层及分布  
Fig.2 Stratums and Distribution in Jiangkou Rockfall Source Area

表 1 无人机关键技术参数		
Tab.1 Key Technical Specifications of the UAV		
设备	参数名称	参数值
无人机	重量/g	1 388
	尺寸/mm <sup>3</sup>	285×285×18
	飞行时间/min	30
	卫星定位模块	GPS/GLONASS
	传感器类型	CMOS(FC6310)
相机	影像分辨率/像素	5 472×3 648
	水平(垂直)分辨率/dpi	72
	焦距/mm	9
	感光度	100~3 200

为保证所获取影像数据的规范化,使用专业版 UAV Manager 软件对飞行航线进行规划设计,全程采用交叉等高飞行。传感器在交叉飞行过程中始终倾斜 45°。航线所设置的旁向重叠率和航向重叠率均为 80%,飞行高度为 270 m,飞行总里程 17.7 km,飞行总时长 30 min,本次航测共获得 462 张带有 GPS 坐标信息和相机姿态的影像。使用 Bently 公司的 Context Capture 软件对所采集的影像进行三维模型重建,分别重建出三维实景模型和三维点云模型。重建出的三维实景模型和三维点云模型可高精度还原边坡的纹理信息,如图 3 所示。

图 4 从俯视角度可观察到山坡顶部发育有长约 17 m、宽约 8 m 的大型落水洞,洞壁颜色呈土黄色,且洞内含有大量土黄色松散堆积物,由此可推断出该山体岩溶作用强烈。

图 5 中边坡主要由灰色、深灰色灰岩夹少量

砂页岩组成,由于崩塌发生处出露的岩体较为新鲜,可通过岩体颜色差异判断出崩塌源区的大概范围。

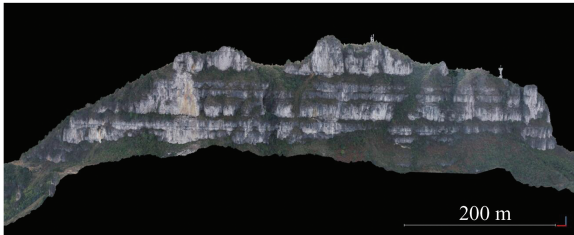


图 3 边坡彩色三维点云模型  
Fig.3 Colored Three-Dimensional Point Cloud Model of Slope

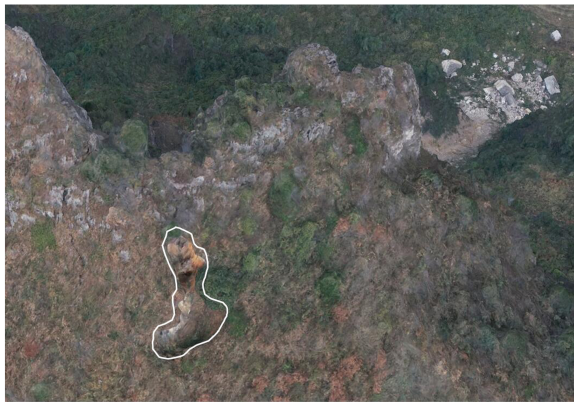


图 4 落水洞  
Fig.4 Image of the Doline

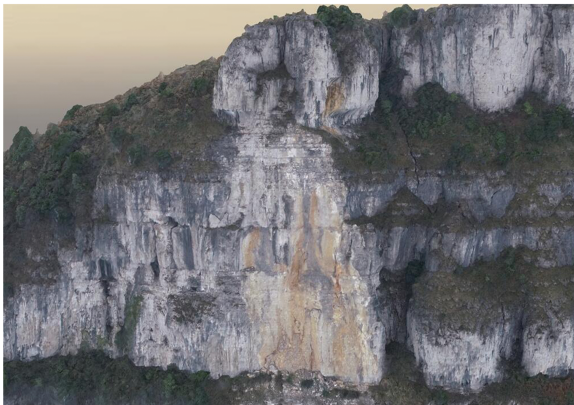


图 5 崩塌源区  
Fig.5 Rockfall Source Area

### 3 岩体结构模型构建

通过上述数据处理流程,获得重建出的具有坐标信息的三维彩色点云共计 36 722 521 个,生成点云模型的坐标系定义为通用的 UTM WGS84 坐标系统,坐标系中的 X 轴代表东方向, Y 轴代表北方向, Z 轴代表高程。快速从非结构化点云中提取出岩体结构面信息的步骤如下。

### 3.1 点云模型法向量计算

点云模型由空间中离散的点组成,为使边坡岩体结构面几何特征更具真实性,需通过法向构建可视化的三维岩体结构模型,并从非结构化的点云中提取出精细的边坡三维岩体结构面信息。而霍夫法向算法可以快速计算复杂环境的点云模型法向量,并且对具有噪声和异常值的点云模型鲁棒性较强<sup>[18]</sup>。进一步地,将代表法线方向的离散化的霍夫空间投影到适合的深度学习框架上,可实现对尖锐边缘点法向的准确计算,并且同时能够处理计算数以百万的点云量<sup>[19]</sup>。凭借快速和精准的特性,该算法非常适合三维岩体结构模型的法向计算。因此,本文借助开源软件Cloud Compare中的霍夫法向算法来完成点云模型的法向量计算。该模型满足此次特殊地形近直立边坡法向量计算的要求,具体输入参数见表2。在霍夫法向算法中,计算的起始点是随机的,通过法向量计算后,每一个点在三维空间中都具有法向量值。如图6中所示,指向坡外的法向为白色,指向坡内的法向为黑色。

表2 霍夫法向计算参数

Tab.2 Computation Parameters for Hough Normals

参数名称	参数值
邻域尺寸/个	10
原语数量/个	1 000
累加器步数/步	15
累加器循环次数/次	5
公差角/(°)	90
邻域尺寸密度估计	5

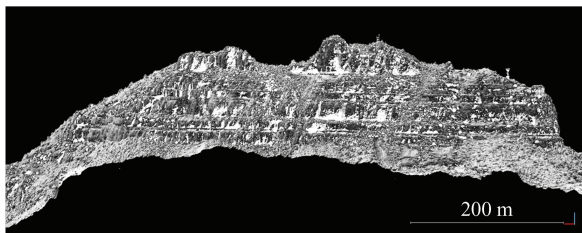


图6 具有霍夫法向的三维点云模型

Fig.6 Three-Dimensional Point Cloud Model with Hough Normal

### 3.2 点云模型可视化赋色

为使岩体结构面的几何信息能更为直观地进行展示与提取,需将经过霍夫法向算法处理的具有法向信息的点云模型进行可视化赋色处理。最早的COLTOP-3D商业软件通过点云的法向量值将HIS(hue intensity saturation)彩色轮盘与施密特投影图相关联,实现了对数字高程模型及

三维点云模型边坡的岩体结构的赋色渲染<sup>[20]</sup>。HSV(hue saturation lightness value)算法可对点云模型中不同几何信息的岩体结构赋予颜色,且对不同倾向和倾角的信息赋予独特的色彩<sup>[21]</sup>。根据HSV彩色圆锥颜色与极点关系,利用Matlab编程构建一个RGB(red green blue)的颜色矩阵,并将不同法向的HSV值转化为0~1之间的RGB颜色进行显示。例如H=0,S=1处为完全饱和的红色,表示在倾向90°投影圆周处0°倾角的法线,在实际边坡中即为垂直的结构面。而当饱和度S为白色时,则表示水平发育的结构面。图7为融合渲染后形成的HSV彩色轮盘,轮盘上法向量的方位与等角度下极射赤平投影图中极点所在的位置一一对应,且每个方向上的角度分辨率为1°。由此根据具体的颜色,可直观地分辨出模型中岩体结构面的分布组合情况。

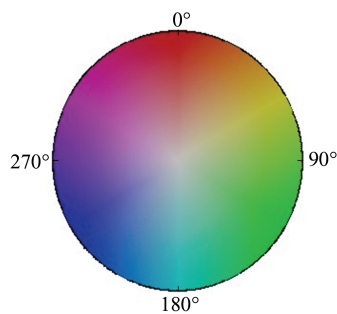


图7 HSV彩色轮盘

Fig.7 HSV-Colour Wheel

## 4 岩体结构面信息提取

### 4.1 球形k均值聚类分析

完成点云模型可视化赋色后,为进一步分析各组结构面的发育分布情况,选取图8白框中崩塌源区范围对该区域的岩体结构面信息进行球形k均值聚类分析,以实现不同空间分布的结构面分组。球形k均值聚类算法已被创建为R语言中的一个完整程序包,它可以对不同的向量进行聚类分析并完成分组<sup>[22]</sup>。聚类分析涉及的最大标准向量与其相关数据向量之间的相似性标准计算公式为:

$$\sum_n \sum_{b \in C_n} \cos(x_b, p_n) \quad (1)$$

式中, $n$ 为聚类划分时的群组数量; $p_n$ 为 $n$ 组中的标准向量; $x_b$ 为 $n$ 组中第 $b$ 个向量; $C_n$ 为第 $n$ 组的群组; $\cos(x, p)$ 为两个向量相似度的余弦值。

根据上述原理,本文利用开源软件R编写相关程序,将生成的点云结构面法向信息构建矩



阵,通过调用球形 $k$ 均值聚类程序包并输入聚类划分的群组数完成对法向矩阵的分组分析。在聚类分组计算前,应结合三维实景模型、无人机影像等数据,通过对崩塌区具有独特颜色的 HSV 三维岩体结构模型进行多角度旋转并与影像资料进行解译,对该边坡区域的地质构造发育情况有大体了解。

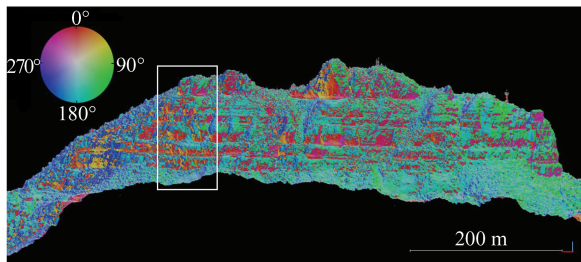


图 8 HSV 彩色三维岩体结构模型

Fig.8 HSV-Colored Three-Dimensional Rock Mass Structure Model

聚类分组计算完成后,结合上一步完成的可视化 HSV 彩色三维岩体结构模型,可直接根据分组提取出的每组结构面颜色检验各组结构面分组的效果。每组结构面经聚类分组后应为纯色而不含其他颜色。本文针对崩塌源区最终共划分出 7 组主要发育的结构面,如图 9 所示。通过球形 $k$ 均值聚类算法可以直接对点云数据进行自动聚类分析和分组,不需要建立三角网格和三角面片来进行分组,大大提高了计算效率。同时,各组独立纯色的结构面点云也为下一步对其间距和迹长直接在点云模型中开展三维量测提供了重要基础。

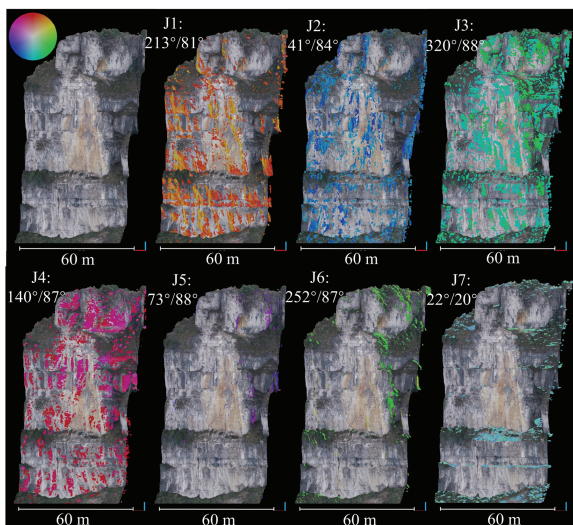


图 9 崩塌源区岩体结构面提取

Fig.9 Structural Extraction of Discontinuity Pattern in the Rockfall Source Area

## 4.2 结构面产状提取

经过聚类计算将崩塌区点云进行分组,7 组纯色的结构面被单独地分离了出来,因此可直接根据所赋颜色提取出结构面倾角以及倾向。如图 10 中 7 组不同颜色的结构面,其中 J1 为橙色( $213^\circ/81^\circ$ ),J2 为蓝色( $41^\circ/84^\circ$ ),这两组陡倾结构面倾角均超过  $80^\circ$ ,倾向大约相差  $180^\circ$ 。由于实际边坡坡面中常存在风化、侵蚀等作用,致使边坡结构面不可能为一个平整光滑的平面,因此在倾向上产生了这样的偏差也是符合边坡结构面发育实际情况的。J3 为绿色( $320^\circ/88^\circ$ ),J4 为红色( $140^\circ/87^\circ$ ),这两组结构面也为陡倾结构面,并与 J1 和 J2 相互共轭,4 组共同为崩塌提供了东西两侧的边界。J5 为紫色( $73^\circ/88^\circ$ ),J6 为黄色( $252^\circ/87^\circ$ ),这两组为陡倾结构面,虽对此次崩塌不起主要控制作用,但也破坏了坡体的完整性。J7 为青色( $22^\circ/20^\circ$ ),为一组缓倾的岩层层面,这组也是形成结构面不利空间组合中重要的一组。

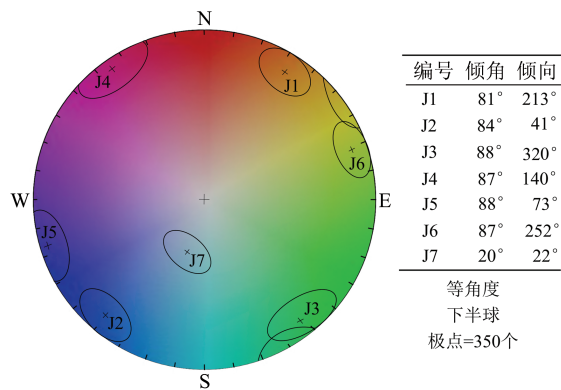


图 10 结构面赤平投影

Fig.10 Stereoplot of Discontinuity Sets

## 4.3 结构面间距提取

将聚类分组提取出的赋色后的各组结构面点云与彩色点云模型叠加进行显示,可明显观察到各组结构面在三维边坡中精确的发育分布位置及形状。因此,上述叠加显示的精细模型利用最小代价路径算法可在完全三维环境中实现结构面间距和迹长等地质特征的测量和统计<sup>[23]</sup>。本文借助 Cloud Compare 中软件的线状测量工具,对上述构建的可视化模型在全三维空间中完成结构面间距以及迹长的测量。如图 11 中以 J4 结构面为例,对三维空间中崩塌源区出露的所有红色 J4 结构面,测量其每组相邻结构面之间的垂直距离作为间距,并计算平均值后可得 J4 的平均间距为 3.29 m。其余各组统计结果见表 3。

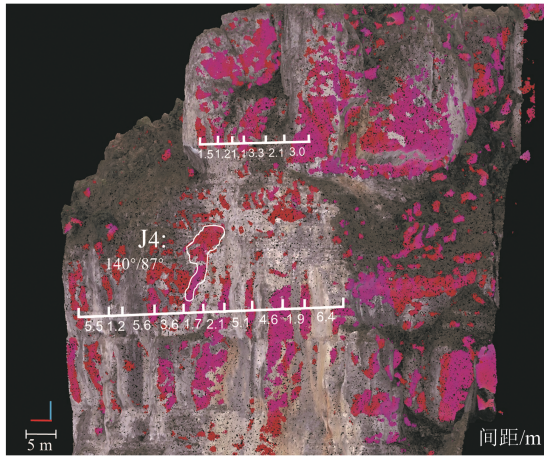


图 11 结构面间距测量

Fig.11 Spacing Measurement of Discontinuity Sets

#### 4.4 结构面迹长提取

同样以 J4 结构面为例,图 12 中将赋色后的各组结构面与彩色点云模型叠加,取每个结构面范围内连线最长的端点,用直线进行连接作为迹线,通过使用线状测量工具在构建的三维岩体结构可视化模型中直接测量崩塌源区各组结构面出露的迹长。最终统计出各组结构面的平均迹长见表 3。

表 3 结构面特征统计

Tab.3 Characteristics of Discontinuity Sets

编号	倾向/(°)	倾角/(°)	间距/m	迹长/m
J1	213	81	3.57	6.84
J2	41	84	2.51	4.16
J3	320	88	2.61	5.81
J4	140	87	3.29	5.52
J5	73	88	5.45	3.67
J6	252	87	2.78	3.55
J7	22	20	18.78	10.51

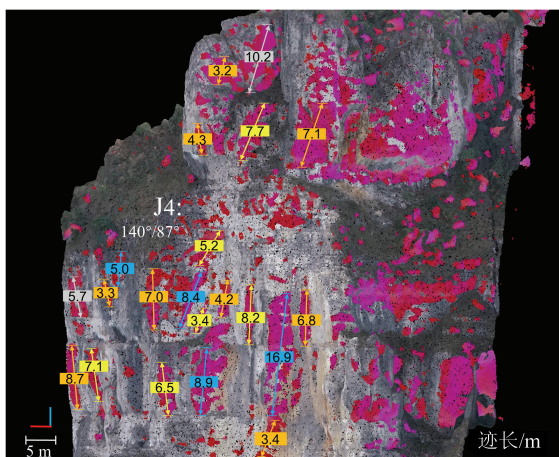


图 12 结构面迹长测量

Fig.12 Trace Length Measurement of Discontinuity Sets

#### 4.5 三维结构面模型构建

通过结合 HSV 岩体结构模型与提取出的各组结构面几何形态,可构建出原位三维结构面模型。由于结构面实际并不是完全平直的,故在建模时采用平直的矩形来拟合出露的岩体结构面。如图 13 中结构面 J1 与 J2 为蓝色, J3 与 J4 为红色, J5 与 J6 为绿黄色, J7 为浅绿色,模型最终根据各组赋色后的结构面共创建了 87 组原位结构面。三维结构面模型的构建为后期建立三维块体模型和块体运动分析评价等工作提供了可靠的数据基础。

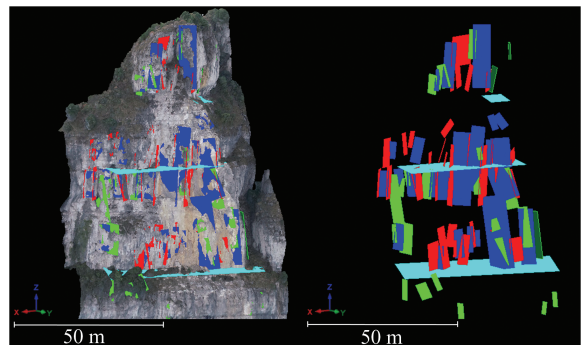


图 13 原位三维结构面模型

Fig.13 In-situ Three-Dimensional Discontinuity Model

### 5 结语

本文提出了一种针对高陡边坡岩体结构面的快速、综合性调查方法。无人机倾斜摄影测量在实际崩塌灾害调查中的应用表明,通过本文方法进行岩体结构面调查所提取到的信息较为全面,可视化效果好,且计算效率高,不仅对结构面倾角和倾向进行了提取,还可在三维空间对结构面间距及迹长等信息进行直接获取,为此类边坡实际的地质灾害调查及防治提供了良好的参考。根据所提取的结构面几何信息构建三维原位结构面模型,也为下一步构建三维块体模型和崩塌块体运动分析及稳定性评价提供了基础数据。

#### 参 考 文 献

- [1] Dong XiuJun, Huang Runqiu. Application of 3D Laser Scanning Technology to Geological Survey of High and Steep Slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (Sup2) : 3 629-3 635(董秀军, 黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增2): 3 629-3 635)
- [2] Liu Changjun, Zhang Shunfu, Ding Liuqian, et al. Research on Identification and Anchoring Method of



- High Slope Dangerous Rock Mass Based on Laser Scanning [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 2 139-2 146(刘昌军, 张顺福, 丁留谦, 等. 基于激光扫描的高边坡危岩体识别及锚固方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 2 139-2 146)
- [3] Liu Qian, Kieffer D S. Virtual Outcrop Modeling for 3D Characterization of Engineering Rock Masses [C]. The 45th US Rock Mechanics and Geomechanics Symposium, San Francisco, America, 2011
- [4] Liu Qian, Kieffer D S. Digital Tunnel Mapping Using Terrestrial LiDAR a Case Study [C]. Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction, Stockholm, Sweden, 2012
- [5] Sturzenegger M, Stead D. Close-Range Terrestrial Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Discontinuity Characterization on Rock Cuts [J]. *Engineering Geology*, 2009, 106(3): 163-182
- [6] Wang Fengyan, Chen Jianping, Yang Guodong, et al. The Geometric Information Solution Model of Rock Mass Structural Surface Based on Digital Close-range Photogrammetry [J]. *Journal of Jilin University*, 2012, 42(6): 1 839-1 846(王凤艳, 陈剑平, 杨国东, 等. 基于数字近景摄影测量的岩体结构面几何信息解算模型[J]. 吉林大学学报, 2012, 42(6): 1 839-1 846)
- [7] Kim D H, Gratchev I, Balasubramaniam A. Back Analysis of a Natural Jointed Rock Slope Based on the Photogrammetry Method [J]. *Landslides*, 2014, 12(1): 147-154
- [8] Jia Shuguang, Jin Aibing, Zhao Yiqing. UAV Photogrammetry in Geological Survey of High and Steep Slopes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 1 130-1 136(贾曙光, 金爱兵, 赵怡晴. 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1 130-1 136)
- [9] Zhao Mingyu, Wang Fengyan, Wang Mingchang, et al. Information Acquisition of Rock Mass Structural Surface Based on Drone Photogrammetry [C]. The National Annual Conference on Engineering Geology, Xi'an, China, 2018(赵明宇, 王凤艳, 王明常, 等. 基于无人机摄影测量的岩体结构面信息获取 [C]. 全国工程地质学术年会, 西安, 中国, 2018)
- [10] Li Shuiqing, Zhang Huichao, Liu Ruyan. UAV Photogrammetric Semi-automatic Statistics of Rock Surface Occurrence [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(26): 18-22(李水清, 张慧超, 刘乳燕. 无人机摄影测量半自动统计岩体结构面产状[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 18-22)
- [11] Niccolò M, Daniele G, Cesare P, et al. Detection and Geometric Characterization of Rock Mass Discontinuities Using a 3D High-Resolution Digital Outcrop Model Generated from RPAS Imagery-Ormea Rock Slope, Italy [J]. *Engineering Geology*, 2019, 252: 145-163
- [12] Li Deren, Xiao Xiongwu, Guo Bingxuan, et al. Oblique Image Based Automatic Aerotriangulation and Its Application in 3D City Model Reconstruction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 711-721(李德仁, 肖雄武, 郭丙轩, 等. 倾斜影像自动空三及其在城市真三维模型重建中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(6): 711-721)
- [13] Li Yuan, Hu Han, Xie Jinhua, et al. An Automatic Texture Mapping Method Using Local Surface Consistency Constraint [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(12): 1 599-1 604(李媛, 胡翰, 谢金华, 等. 局部区域表面一致性约束的三维模型纹理映射方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41(12): 1 599-1 604)
- [14] Wen Xuedong, Chen Weimin, Xie Hong, et al. A Method for Building Model Reconstruction Based on Multi-source Feature Fusion [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 731-736(文学东, 陈为民, 谢洪, 等. 一种融合多源特征的建筑物三维模型重建方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(5): 731-736)
- [15] Dong Xiujun, Pei Xiangjun, Huang Runqiu. Basic Features and Causes of Mountain Collapse in Longchang Town, Kaili, Guizhou [J]. *Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2015, 26(3): 3-9(董秀军, 裴向军, 黄润秋. 贵州凯里龙场镇山体崩塌基本特征与成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(3): 3-9)
- [16] Yang Guodong, Wang Minshui. Application and Prospect of Oblique Photogrammetry [J]. *Surveying and Spatial Information*, 2016, 39(1): 13-15(杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(1): 13-15)
- [17] Sun Jie, Xie Wenhan, Bai Ruijie. UAV Oblique Photogrammetric System and Its Application [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(6): 145-150(孙杰, 谢文寒, 白瑞杰. 无人机摄影技术研究与应用[J]. 测绘科学, 2019, 44(6): 145-150)
- [18] Alexandre B, Renaud M. Fast and Robust Normal Estimation for Point Clouds with Sharp Features [J]. *Computer Graphics Forum*, 2012, 31(5): 1 765-1 774
- [19] Alexandre B, Renaud M. Deep Learning for Robust Normal Estimation in Unstructured Point Clouds [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(5): 281-290

- [20] Jaboyedoff M, Metzger R, Oppikofer T, et al. New Insight Techniques to Analyse Rock-Slope Relief Using DEM and 3D-Imaging Cloud Points: COLTOP-3D Software [C]. The 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 2007
- [21] Liu Qian, Kaufmann V. Integrated Assessment of Cliff Rockfall Hazards by Means of Rock Structure Modelling Applied to TLS Data: New Developments[C]. Future Development of Rock Mechanics, Salzburg, Austria, 2015
- [22] Dhillon I S, Modha D S. Concept Decompositions for Large Sparse Text Data Using Clustering [J]. *Machine Learning*, 2001, 42(1/2): 143-175
- [23] Thiele S T, Lachlan G, Anindita S, et al. Rapid, Semi-automatic Fracture and Contact Mapping for Point Clouds, Images and Geophysical Data [J]. *Solid Earth*, 2017, 8(6): 1 241-1 253

## Application of Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photogrammetry to Investigation of High Slope Rock Structure

YE Zhen<sup>1</sup> XU Qiang<sup>1</sup> LIU Qian<sup>2</sup> DONG Xiujun<sup>1</sup> WANG Xiaochen<sup>1</sup> NING Hao<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

<sup>2</sup> Institute of Applied Geosciences, Graz University of Technology, Graz, Austria

**Abstract: Objectives:** Traditional remote sensing methods are often limited by the complex terrain and the hardware equipment, which often leads to in-situ measurements that cannot comprehensively, accurately and quickly obtain the slope rock structure data sets. Unmanned aerial vehicle (UAV) oblique photogrammetry technology can obtain comprehensive information on rock structure. **Methods:** We describe a method for acquiring, visualizing, and extracting three-dimensional information of high slope rock structure based on the dense surface points. The oblique photogrammetric data acquired with UAV is considered and a multi-rotor drone with single-lens is used for aerial surveys to reconstruct the three-dimensional point cloud model of the high slope. The Hough normal algorithm and the HSV (hue, saturation, value) algorithm are used to build a visual three-dimensional rock mass structure model and the model is spherical  $k$ -means clustering to complete the automatic extraction of rock structure. **Results:** From the three-dimensional rock structure analysis, it is possible to quickly extract rock structure characteristics such as orientation, spacing and trace length by rendering the geometry of the three-dimensional slope face. **Conclusions:** Further research is being carried out in order to build blocky slope masses and identify the kinematic instability of the high limestone cliffs.

**Key words:** rock structure; high slope; unmanned aerial vehicle oblique photogrammetry; HSV algorithm; 3D visualization model; spherical  $k$ -means clustering

**First author:** YE Zhen, PhD candidate, specializes in data processing and analysis of geological hazards. E-mail: 569207021@qq.com

**Corresponding author:** XU Qiang, PhD, professor. E-mail: xq@cdut.edu.cn

**Foundation support:** The Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (41521002); Sichuan Science and Technology Program (2018SZ0339); Key Research and Development Program of the Department of Science and Technology of Sichuan Province(2019YFS0074).

**引文格式:** YE Zhen, XU Qiang, LIU Qian, et al. Application of Unmanned Aerial Vehicle Oblique Photogrammetry to Investigation of High Slope Rock Structure[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1739-1746. DOI: 10.13203/j.whugis20200077(叶震, 许强, 刘谦, 等. 无人机倾斜摄影测量在边坡岩体结构面调查中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(11): 1739-1746. DOI:10.13203/j.whugis20200077)