

# 无人机摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用

贾曙光<sup>1,2</sup>, 金爱兵<sup>1,2</sup>, 赵怡晴<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 在高陡边坡的地质调查中, 测量岩体结构面的工作经常受到复杂地形的限制无法正常开展, 急需一种全方位的精确测量技术。结合近年来低空低速小型无人机技术的快速发展, 使用搭载单镜头的小型无人机, 基于多视立体视觉算法 (PMVS) 和运动结构恢复算法 (SfM) 对目标物进行三维重建, 通过现场试验和数据后处理, 总结出了一套无人机摄影测量技术在高陡边坡地质调查中的应用方法, 并得到了初步的研究结论: 轻小型的单镜头多旋翼无人机能够采集到有效的地形数据, 在三维点云中处理使用基于最小二乘法的平面拟合算法, 可以提取出准确的结构面参数, 进一步将这些结构面绘制在赤平极射投影图中, 能实现高陡边坡的数字化岩体产状测量。

**关 键 词:** 无人机; 立体视觉; 高陡边坡; 岩体结构

中图分类号: P 231.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 03-1130-07

## Application of UAV oblique photogrammetry in the field of geology survey at the high and steep slope

JIA Shu-guang<sup>1,2</sup>, JIN Ai-bing<sup>1,2</sup>, ZHAO Yi-qing<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of China for High Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Civil & Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Due to the limit of complex terrain, the structural plane of rock mass is difficult to measure in the geological survey of high and steep slopes. Hence, a new technique is in urgent need to achieve all-around precise measurement. In recent years, the technology of the low-altitude and low-speed small unmanned aerial vehicle (UAV) has been developed rapidly. In this study, three-dimensional (3D) reconstruction of the target was performed using the small UAV with a single-lens reflex camera, based on the patch-based multiview stereo (PMVS) and structure from motion (SfM). By means of field experiments and data post-processing, an application method of the UAV oblique photogrammetry was proposed for the geological survey of the high and steep slope. The preliminary conclusions were also obtained. The valid terrain data was successfully collected by the small multicopter UAV with the single-lens reflex camera. During the process of analysing 3D point clouds, the parameter of the structural surface was extracted by the plane fitting algorithm based on the least square method. The structure plane of rock mass was further drew into the polar-radiation equatorial-plane projection map. Thus, the digital measurement of rock mass in high and steep slope was achieved in this study.

**Keywords:** unmanned aerial vehicle (UAV); stereo vision; high and steep slope; rock mass structure

## 1 引 言

在水利水电、金属矿山、公路铁路等大型工程的建设中, 高陡边坡是一种常见的工程结构, 也是最大的风险来源。对边坡地质条件的掌握和描述是进行高陡边坡稳定性评价的基础, 而在高峻的山岭或深邃的露天矿坑中, 复杂的地形条件制约了地质工作人员的深入, 正常的地质调查工作无法开展;

此外, 建设中的工程需要及时的地质编录, 以反馈给施工部门。而工程现场松动的岩石、未爆的炮孔都给岩石测量人员留下了巨大的安全隐患, 因此, 如何突破传统的岩石结构测量方法, 实现快速高精度的地质编录, 同时不受地形条件制约, 需要引进新的地质调查技术。

在国内外, 新型的地质编录技术目前得到了大量的研究和应用, 总体方向是对岩体结构进行三维

收稿日期: 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51674015)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation Grants Program (51674015).

第一作者简介: 贾曙光, 男, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事无人机及岩石力学等方面的工作。E-mail: jiashuguangxx@163.com

通讯作者: 赵怡晴, 女, 1980 年生, 博士, 副教授, 主要从事采矿工程方面的教学与研究工作。E-mail: zyzq@ustb.edu.cn

重建, 常见的有激光三维扫描技术和近景摄影测量技术。

董秀军等<sup>[1]</sup>在国内最早提出了激光三维扫描技术在岩体结构测量方面的应用, 依据工程实例应用, 总结了激光三维扫描技术在岩体结构测量中的方法; 宋杰等<sup>[2]</sup>提出用模糊聚类分析的方法处理三维激光扫描获得的岩石模型, 实现了岩石结构面的自动识别和统计分组, 并进行了有限元稳定性解算; 刘昌军等<sup>[3]</sup>结合三维激光扫描获取的岩体数据, 开发了专门的分析软件 LIDAREFM, 用无单元算法进行岩体裂隙流场分析; 黄江<sup>[4]</sup>、刘昌军<sup>[5]</sup>等讨论了三维激光扫描技术在高边坡危险岩体调查中的应用, 通过获取危岩的三维几何数据进行岩体的稳定性分析; 江颜等<sup>[6]</sup>分析了三维激光扫描技术在露天矿边坡地质调查中的应用, 并在攀枝花兰尖铁矿进行了现场试验, 证明了该项技术在露天矿中具有好的实用性。

近景摄影测量在岩土工程中的应用国内起步较早, 李浩等<sup>[7]</sup>在 20 世纪 90 年代就提出了利用近景摄影测量技术进行地质编录的方法; 王凤艳等<sup>[8]</sup>应用近景摄影测量技术提取了岩体裂隙迹长信息, 用普通非量测数码相机实现了高效、高精度的岩体信息提取。文献[9]中研究人员利用数字摄影测量工作站 VirtuoZo 进一步实现了岩体结构面的几何信息获取, 可见该技术在不断成熟; 在金属矿山环境中, 赵兴东等<sup>[10]</sup>利用近景摄影测量技术实现了岩体结构面的数字识别, 并基于此进行了采场稳定性分级, 验证了该技术在金属矿山领域应用的可行性。

可见, 以激光三维扫描和近景摄影测量为代表的三维重建技术在岩土工程领域扮演了越来越重要的角色, 学术上也取得了大量成果, 但仍存在不足, 两者具有一个共同的使用难点, 在特殊复杂的地形条件下, 无法找到合适的观测地点以架设仪器。激光三维扫描依靠棱镜折射的激光光斑采集样本, 扫描距离越远, 扫描入射角度与目标面法向夹角越大, 三维扫描的系统误差就会更大。同样, 近景摄影测量中, 测站距离目标面过远或拍摄夹角过大都会造成较大的模型畸变。而我们现在假设把测量站布置到目标岩体的近距离临空空间中, 即使用低空低速的轻小型无人机进行抵近目标的倾斜摄影测量, 这个技术难点就可以得到突破。

无人机倾斜摄影测量能够快速准确地获得目标物的三维模型, 在大量行业中已经得到了应用。

在数字城市的行业应用中, 李镇洲等<sup>[11]</sup>研究了

采用无人机倾斜摄影测量技术进行城市快速三维建模的方法; 在古建筑保护方面, 陈斯亮<sup>[12]</sup>使用倾斜摄影测量技术采集了山崖中的古代栈道点云模型, 并结合激光三维扫描实现了高精度的古建筑模型复原; 在建筑信息管理 (BIM) 技术应用中, 臧伟<sup>[13]</sup>利用五拼倾斜摄影相机对同济大学校园的建筑物进行了低空三维扫描建模工作, 获得了高精度的建筑模型; 在露天矿领域中, 许志华等<sup>[14]</sup>利用无人机倾斜摄影测量技术进行了露天矿采场堆体的变形量监测工作。

综上所述, 无人机倾斜摄影测量技术可以实现高精度、高效率、高还原度的地物三维建模工作, 这也正是地质调查工作中需要进行的第 1 步, 而且目前从各方面的研究资料来看无人机倾斜摄影测量技术在岩土工程领域的应用颇为鲜见, 尤其在岩体结构面这样细观的层面, 还没有公开发表的研究成果。基于, 此本文将探索此项技术在高陡边坡地质调查中的应用方法。

## 2 倾斜摄影测量在高陡边坡地质调查中的应用研究

传统的航空摄影测量一般采用大型固定翼无人机搭载几公斤重的多拼相机进行数据采集, 固定翼飞机飞行速度较快, 单次作业的覆盖范围广, 常用于大场景的地形测量工作。然而, 根据上文分析, 这样获取模型的分辨率较低, 同时, 高陡边坡所处地形环境往往比较复杂, 工程范围局限性较强, 不具备宽阔平坦的固定翼无人机起降场地。因此, 在高陡边坡的地质调查中, 适合采用轻小型的单镜头电动多旋翼无人机进行倾斜摄影测量。

### 2.1 基于立体视觉的三维模型重建

单镜头无人机在同一时刻只能获取一个方向上的单张数字相片, 并且由于小型无人机载荷重量较轻, 所搭载的相机画幅往往较小, 需要按照一定的序列和间隔采集大量相片, 基于多视立体视觉原理实现目标物的三维模型重建。

基于多视立体视觉原理的三维重建算法可直接从二维影像中恢复出相机拍摄位置和目标场景的稀疏几何结构<sup>[15]</sup>。具体流程包括: 特征点的提取、影像匹配和运动恢复结构。

(1) 特征点提取: 无人机拍摄相片畸变较大, 传统的基于几何特征、纹理特征的提取法很难有效使用, 需要采取尺度不变的特征点提取算法 (scale invariant feature transform, 简称 SIFT)。SIFT 算法

具有放缩、旋转和仿射不变性,能够抗拒一定光照变化和视点变换<sup>[16]</sup>。SIFT 的主要思路是:首先,建立无人机航摄图像的尺度空间表示;然后,在尺度空间中搜索图像的极值点,这些极值点即可作为特征点被提取出来。

(2) 影像匹配:单纯利用 SIFT 特征点进行的影像匹配速度较慢,在无人机采集的图像中包含的 GPS 坐标位置数据以及 IMU 提供的姿态角数据可以辅助建立影像间的拓扑结构。接下来可采用最邻近方法,寻找图像间特征点的对应关系,建立满足几何约束的匹配特征点集,大量的坐标点在空间中构成了目标物的三维点云。

(3) 运动恢复结构:按照相机成像原理,将相片中的像点投影到空间坐标中,定义误差函数为重投影误差的平方和,目标函数为

$$g(C_p, X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} f(P(C_i, X_j), q_{ij})^2 \quad (1)$$

式中:  $C_p = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_n\}$ , 为相机参数;  $X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_m\}$  为空间点坐标;  $v_{ij}$  为一个变量,表示空间点  $X_i$  在相机  $C_i$  中是否可见;  $n$  为相片总数,  $m$  为精匹配特征点个数; 函数  $f(P(C_i, X_j), q_{ij})^2$  表示点  $X_j$  在相机  $C_i$  中的投影误差。

最后,采用通用稀疏光束法平差法(sparse bundler adjustmenu)逐步迭代,不断最小化投影点和观测图像点之间的重投影误差,解算出最佳相机位姿和场景的三维点云坐标。

## 2.2 现场试验数据采集与后处理

本次现场试验选取了北京市昌平区南口镇的一处采石场,这里紧邻 G6 高速,其边坡安全性严重威胁着高速公路的行车安全。

使用无人机倾斜摄影测量技术进行三维模型获取的一般作业流程为:现场踏勘、航线规划、飞行作业、数据后处理。

(1) 现场踏勘:该采石场边坡为北东走向,西北倾向,长度为 300 m 左右,坡顶坡底落差为 100 m 左右。坡底与运输道路之间有两座面积较大蓄水池,步行难以接近,人工测量岩体结构面非常困难。

(2) 航线规划:在地面控制站软件中进行航线规划,航向重叠率为 70%,旁向重叠率为 50%,飞行相对高度为 110 m,航线总长度为 1 554 m,飞行时间为 5 min,覆盖整个采石场边坡。如图 1 所示。

(3) 飞行作业:本试验使用一款轻型电动单镜头多旋翼无人机进行飞行作业,利用无人机飞控的自动飞行模式,按照预设的航线进行全自动飞行和

拍照,获取测区的数字航摄相片。

(4) 数据处理:按照 2.1 节中的处理流程,整理本次航线所采集的航摄相片,提取每张相片包含的 GPS 坐标数据和相机姿态,如图 2 所示。



图 1 目标区域航线规划

Fig.1 Target regional route planning

Cameras	Longitude	Latitude	Altitude (m)
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0180.JPG	116.115390	40.254871	303.614000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0181.JPG	116.115353	40.254939	303.714000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0182.JPG	116.115321	40.254968	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0183.JPG	116.115228	40.255003	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0184.JPG	116.115021	40.255009	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0185.JPG	116.114896	40.255004	303.914000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0186.JPG	116.114840	40.255013	303.914000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0187.JPG	116.114789	40.255018	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0189.JPG	116.114658	40.254972	303.914000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0190.JPG	116.114529	40.254947	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0191.JPG	116.114462	40.254903	303.814000
<input checked="" type="checkbox"/> DJI_0192.JPG	116.114448	40.254857	303.814000

图 2 航摄相片包含的 GPS 位置数据

Fig.2 Aerial photographs with GPS location data

同时采用 SIFT 算法提取每张相片的特征点,进行相片之间的特征匹配,构建相片拓扑关系合集,按运动恢复结构算法(structure from motion,简称 SfM)生成目标区域的稀疏点云,如图 3 所示。



图 3 稀疏点云图

Fig.3 Sparse point cloud image

进一步,采用多视立体视觉算法(patch-based multiview stereo,简称 PMVS),通过特征点的匹配、重建以及空间点的扩散、过滤,最后得到精度相对较高的稠密点云。如图 4 所示。



图 4 三维稠密点云图

Fig.4 Three-dimensional dense point cloud image

### 2.3 数字化结构面产状测量

由无人机倾斜摄影测量的一系列流程所获得了稠密点云数据，在点云数据中岩体结构面被抽象为数以百万计的三维坐标点，其空间几何特征信息赋存其中。点云数据的三维坐标计算参照系为无人机搭载的 GPS 传感器所获取的空间三维坐标系，即通用的 WGS84 大地坐标系，因此，这些点云信息包含着岩体结构几乎所有的外部几何特征，可以对点云数据所重建的虚拟的岩体结构面进行识别与提取。

通过观察可以发现，本测区中的三维点云数据可以很好地反映结构面的出露几何形态。大部分产状稳定的结构面在三维点云数据中特征明显，表现为一个规整的平面，很容易在三维图像上进行准确识别，可以采用直接判识的方式进行结构面提取。

对于三维点云数据中明显的出露面，通过多点拟合的方法，选取具有代表性、起伏度小的点云数据。如图 5 所示，在三维点云图中，用鼠标圈定目标岩体出露结构面。



图 5 点云模型中的结构面拟合

Fig.5 Structural surface fitting in point cloud

接下来，采用最小二乘算法进行平面拟合，设拟合平面的方程式为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (2)$$

式中：A、B、C、D 为平面方程参数。（三者不能同时为 0，且为该平面法向量坐标  $t = \{A, B, C\}$ ）。

选中的点云样本为  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) \dots (x_i, y_i, z_i)$ 。构建偏差平方和方程：

$$d = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Ax_i + By_i + Cz_i + D)^2 \quad (3)$$

当  $d$  有最小值时，拟合程度最高，因此可对  $d$  求导进而求出极值点，A、B、C、D 为变量。

$$\frac{\partial d}{\partial A} = A \sum x_i^2 + B \sum x_i y_i + C \sum x_i z_i + D \sum x_i \quad (4)$$

$$\frac{\partial d}{\partial B} = A \sum x_i y_i + B \sum y_i^2 + C \sum y_i z_i + D \sum y_i \quad (5)$$

$$\frac{\partial d}{\partial C} = A \sum x_i z_i + B \sum y_i z_i + C \sum z_i^2 + D \sum z_i \quad (6)$$

$$\frac{\partial d}{\partial D} = A \sum x_i + B \sum y_i + C \sum z_i + nD \quad (7)$$

由  $\frac{\partial d}{\partial A} = 0, \frac{\partial d}{\partial B} = 0, \frac{\partial d}{\partial C} = 0, \frac{\partial d}{\partial D} = 0$  可解得 A、B、C、D 4 个参数的拟合数值。

点云数据中拟合生成的平面包含的几何参数，就代表了要求解的结构面的产状。

在三维点云图像中采用直接判识的方法选取 a、b、c...m 共 13 个结构面出露面，如图 6 所示。通过最小二乘法计算程序得出这些结构面拟合得到的平面参数以及参数方程为



图 6 直接判识选取岩体结构出露面

Fig.6 A direct selection of the rock body structure appears

$$0.349x - 0.518y + 0.782z - 163.335 = 0 \quad (8)$$

$$0.404x - 0.565y + 0.719z - 133.665 = 0 \quad (9)$$

$$0.439x - 0.464y + 0.769z - 168.332 = 0 \quad (10)$$

$$-0.451x - 0.682y + 0.576z - 29.355 = 0 \quad (11)$$

$$0.428x - 0.500y + 0.753z - 151.583 = 0 \quad (12)$$

$$0.404x - 0.516y + 0.755z - 0.154.673 = 0 \quad (13)$$

$$-0.829x - 0.485y + 0.278z + 86.068 = 0 \quad (14)$$

$$0.394x - 0.480y + 0.754z - 166.788 = 0 \quad (15)$$

$$0.419x - 0.501y + 0.757z - 167.536 = 0 \quad (16)$$

$$0.801x - 0.524y + 0.288z - 292.600 = 0 \quad (17)$$

$$0.370x - 0.521y + 0.769z - 152.678 = 0 \quad (18)$$

$$0.333x - 0.530y + 0.780z - 145.029 = 0 \quad (19)$$

$$-0.220x - 0.910y + 0.351z + 167.274 = 0 \quad (20)$$

利用地质结构面产状的定义,可以推导出结构面产状与平面参数的对应关系<sup>[17]</sup>,如表 1 所示。

表 1 岩体结构面产状与平面方程参数关系  
Table 1 Relationship between the shape of rock mass and plane equation

走向	倾向	A	B	C
NW	NE	>0	>0	>0
NW	SW	>0	>0	<0
NE	SE	>0	<0	>0
NE	NW	>0	<0	<0
NE	NW	<0	>0	>0
NW	SW	<0	<0	>0
NW	NE	<0	<0	<0

量化计算走向角与倾角公式为

$$\text{结构面走向与 N 向夹角} = \arctan \left| \frac{B}{A} \right| \quad (21)$$

$$\text{结构面倾角} = \arctan \left| \frac{\sqrt{A^2 + B^2}}{|C|} \right| \quad (22)$$

由此可以得出结构面  $a$  到结构面  $m$  的具体产状,计算成果见表 2。

表 2 结构面产状计算成果表  
Table 2 Table of results of occurrence of structural surface

结构面	拟合平面方程参数			产状参数	
	A	B	C	走向	倾角
a	0.349	-0.518	0.782	NE38.6°	∠38.6°
b	0.404	-0.565	0.719	NE41.0°	∠44.0°
c	0.439	-0.464	0.769	NE54.2°	∠39.7°
d	-0.451	-0.682	0.576	NW37.9°	∠54.8°
e	0.428	-0.500	0.753	NE49.0°	∠41.2°
f	0.404	-0.516	0.755	NE44.9°	∠41.0°
g	-0.829	-0.485	0.278	NW98.0°	∠73.9°
h	0.394	-0.480	0.784	NE47.0°	∠38.4°
i	0.419	-0.501	0.757	NE48.0°	∠40.8°
j	0.801	0.524	0.288	NW87.6°	∠73.6°
k	0.370	-0.521	0.769	NE40.7°	∠39.7°
l	0.333	-0.530	0.780	NE36.0°	∠38.7°
m	-0.220	-0.910	0.351	NW13.8°	∠69.5°

### 3 赤平极射投影分析

把边坡产状和选取测量得到的 13 个结构面产状绘制于赤平极射投影图中,如图 7 和图 8 所示,可以确定边坡与各组结构面的空间位置关系。

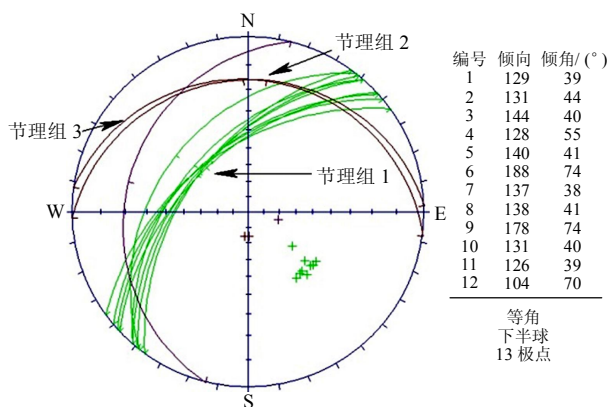


图 7 赤平极射投影图

Fig.7 Stereographic projection

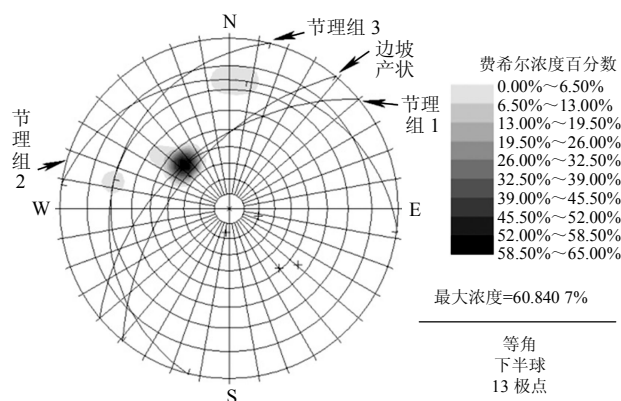


图 8 边坡产状与主要节理组空间关系

Fig.8 Spatial relationship between slope yield and main joint group

在边坡工程中,顺倾边坡往往容易失稳,逆倾边坡比较稳定。在本测区中,节理组 2 走向跟边坡走向有 54° 夹角,可认为节理组 2 为逆倾结构面,对边坡的稳定性影响不大。而节理组 1 和节理组 3 走向接近于边坡走向,其中节理组 1 倾向略小于边坡倾向,边坡在自重的作用下存在着沿节理组 1 向下滑动的趋势,节理组 3 倾向大于边坡倾向近 40°,在充分发育的本组节理面上边坡存在着崩塌倾倒的危险。从数量上看节理组 1 发育程度最高,主控着边坡的稳定性,是该边坡的第 1 优势结构面。

由上述分析可知本测区存在两组危险的节理,影响着边坡的稳定性,在工程施工中需要重点采取措施进行加固,预防滑动和崩塌。

## 4 结 论

从倾斜摄影测量技术的原理出发, 本文结合实际工程应用, 提出了无人机倾斜摄影测量技术在岩体结构面产状测量中的应用方法, 总结了数据分析的流程和步骤, 经过探索得到以下结论:

(1) 结合立体视觉三维重建算法, 配备单镜头的轻小型电动多旋翼无人机具有良好的地形适应能力, 可以在复杂的地形条件下开展对高陡边坡的摄影测量工作, 并得到可靠的三维点云数据, 具有较高的实际应用价值。

(2) 在得到的三维点云数据中采用基于最小二乘法的多点拟合方法可以得到岩体出露结构面的平面参数, 与传统的测量方法相比更加省时省力, 避免了攀爬高陡边坡的风险, 与地面三维激光扫描等方法相比避免了盲区的产生。

(3) 将采集到的结构面产状绘制于赤平极射投影图中, 得到 3 组结构面, 平均产状分别为  $NE45^{\circ} \angle 41^{\circ}$ 、 $NW98^{\circ} \angle 74^{\circ}$ 、 $NW14^{\circ} \angle 74^{\circ}$ 。可以反映测区中多组不连续结构面与边坡的相对空间位置关系, 判断不同节理组对边坡稳定性的影响。

本文的创新点在于使用轻小型无人机进行岩体结构面测量, 摸索出了一系列的工作流程和方法。

## 参 考 文 献

- [1] 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(增刊2): 3629—3635.  
DONG Xiu-jun, HUANG Run-qiu. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 3629—3635.
- [2] 宋杰, 胡辉, RAFIG A. 基于 LiDAR 技术的节理岩质边坡有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊2): 3972—3978.  
SONG Jie, HU Hui, RAFIG A. Lidar-based finite element simulation for jointed rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Supp.2): 3972—3978.
- [3] 刘昌军, 丁留谦, 宁保辉, 等. 基于激光点云数据的裂隙岩体渗流场的无单元法模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2330—2337.  
LIU Chang-jun, DING Liu-qian, DING Bao-hui, et al. Simulation of seepage field for fractured rock mass by element free method based on laser point cloud data[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2011, 30(11): 2330—2337.
- [4] 黄江, 石豫川, 吉锋, 等. 三维激光扫描技术在高陡边坡危岩体调查中的应用与讨论[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 45—49.  
HUANG Jiang, SHI Yu-chuan, JI Feng, et al. The 3D laser scanning technology is in high slope[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2013, 30(11): 45—49.
- [5] 刘昌军, 张顺福, 丁留谦, 等. 基于激光扫描的高陡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): 2139—2146.  
LIU Chang-jun, ZHANG Shun-fu, DING Liu-qian, et al. Identification of dangerous rock mass of high slope and study of anchoring method based on laser scanning[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2012, 31(10): 2139—2146.
- [6] 江颜, 闫俊, 陈思娇. 三维激光扫描在矿区边坡地质调查中的应用[J]. 有色金属(矿山部分), 2013, 65(5): 96—100.  
JIANG Yan, YAN Jun, CHEN Si-jiao. Application of 3D laser scanning technology in mining slope geological survey[J]. **Nonferrous Metals**, 2013, 65(5): 96—100.
- [7] 李浩, 张友静, 吴继敏. 用近景摄影测量方法进行边坡地质编录[J]. 工程地质计算机应用, 1999, 13(2): 18—20.  
LI Hao, ZHANG You-jing, WU Ji-min. The geological survey of the slope carried out using the near shot photogrammetric method[J]. **Engineering Geological Computer Application**, 1999, 13(2): 18—20.
- [8] 王凤艳, 陈剑平, 庞贺民. 应用数字近景摄影测量提取岩体裂隙迹长信息方法研究[J]. 世界地质, 2006, 25(1): 39—42.  
WANG Feng-yan, CHEN Jian-ping, PANG He-min. Research on method of distilling trace length information of rock mass crevice by digital close-range photogrammetry[J]. **Global Geology**, 2006, 25(1): 39—42.
- [9] 王凤艳, 陈剑平, 付学慧, 等. 基于 VirtuoZo 的岩体结构面几何信息获取研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 169—175.  
WANG Feng-yan, CHEN Jian-ping, FU Xue-hui, et al. Study on geometrical information of obtaining rock mass discontinuities based on virtuosoz[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2008, 27(1): 169—175.
- [10] 赵兴东, 刘杰, 张洪训, 等. 基于摄影测量的岩体结构面数字识别及采场稳定性分级[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 127—133.  
ZHAO Xing-dong, LIU Jie, ZHANG Hong-xun, et al. Rockmass structural plane digital recognition and stope stability classification based on the photographic surveying method[J]. **Journal of Mining & Safety**

- Engineering**, 2014, 31(1): 127—133.
- [11] 李镇洲, 张学之. 基于倾斜摄影测量技术快速建立城市 3 维模型研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(4): 117—119.  
LI Zhen-zhou, ZHANG Xue-zhi. Research on the quick construction of 3D model of city based on oblique photogrammetric technique[J]. **Geomatics & Spatial Information Technology**, 2012, 35(4): 117—119.
- [12] 陈斯亮. UAV 航测结合三维激光扫描的古栈道测绘建模[J]. 测绘科学, 2017, 42(8): 1—7.  
CHEN Si-liang. UAV aerophotography and TLS in surveying and modeling of ancient gallery road[J]. **Science of Surveying and Mapping**, 2017, 42(8): 1—7.
- [13] 臧伟. 高分辨率低空无人机倾斜摄影测量辅助 BIM 技术的应用研究[C]//2016 年全国建筑院系建筑数字技术教学研讨会论文集. 沈阳: [出版社不祥], 2016.  
ZANG Wei. Application Research of High-resolution Low-altitude UAV oblique photogrammetry assisting with BIM technique[C]//2016 National Construction Department Teaching Symposium on Building Digital Technology. Shenyang: [s. n.], 2016.
- [14] 许志华, 吴立新, 陈绍杰, 等. 基于无人机影像的露天矿工程量监测分析方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 84—88.  
XU Zhi-hua, WU Li-xin, CHEN Shao-jie, et al. Method of engineering volume monitoring and calculation for open-pit mine from UAV images[J]. **Journal of Northeastern University Natural Science**, 2016, 37(1): 84—88.
- [15] SNAVELY N. Scene reconstruction and visualization from internet photo collections[D]. Washington: University of Washington, 2008.
- [16] LINDBERG T. Feature detection with automatic scale selection[J]. **International Journal of Computer Vision**, 2008, 80(2): 189—210.
- [17] 董秀军. 三维空间影像技术在地质工程中的综合应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.  
DONG Xiu-jun. The research of three-dimensional space image technology in geological engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

#### 上接第 1122 页

- [7] 余贤斌, 王青蓉, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 18—23.  
YU Xian-bin, WANG Qing-rong, LI Xin-yi, et al. Experimental research on deformation of rocks in direct tension and compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 18—23.
- [8] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸-劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137—142.  
YU Xian-bin, XIE Qiang, LI Xin-yi, et al. Acoustic emission of rocks under direct tension, Brazilian and uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(1): 137—142.
- [9] 赵宝云, 刘东燕, 朱可善, 等. 重庆红砂岩单轴直接拉伸蠕变特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 3960—3966.  
ZHAO Bao-yun, LIU Dong-yan, ZHU Ke-shan, et al. Experimental research on creep characteristics of Chongqing red sandstone under direct tension[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(2): 3960—3966.
- [10] 李建林. 岩石拉剪流变特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 299—304.  
LI Jian-lin. A test study on tension-shear creep of rock[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(3): 299—304.
- [11] 周火明, 熊诗湖, 刘小红, 等. 三峡船闸边坡岩体拉剪试验及强度准则研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4418—4422.  
ZHOU Huo-ming, XIONG Shi-hu, LIU Xiao-hong, et al. In-situ tension-shear tests and strength criterion studies on TGP shiplock slope rockmass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(24): 4418—4422.
- [12] 李守定, 郭静芸, 李晓, 等. 岩石拉伸剪切破裂试验研究[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 655—667.  
LI Shou-ding, GUO Jing-yun, LI Xiao, et al. Research of rock failure testing under combined shear and tension[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2014, 22(4): 655—667.
- [13] RAMSEY J M, CHESTER F M. Hybrid fracture and the transition from extension fracture to shear fracture[J]. **Nature**, 2004, 48(4): 63—66.
- [14] 周辉, 卢景景, 徐荣超, 等. 硬脆性大理岩拉剪破坏特征与屈服准则研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 305—315.  
ZHOU Hui, LU Jing-jing, XU Rong-chao, et al. Research on tension-shear failure characteristics and yield criterion of hard brittle marble[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 305—315.