

# 基于三维点云的岩体结构面自动分类与参数计算

郭甲腾, 张紫瑞, 毛亚纯, 刘善军

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 结构面间距是岩体稳定性和力学特性分析中的一个重要参数,在岩石力学、采矿工程、边坡监测等领域的数值计算中广泛应用. 本文以岩体边坡露头为研究对象,基于非接触测量获得的三维点云数据,提出一种基于密度聚类的结构面细化分类方法;在结构面粗略分组提取的基础上,通过投影变换、散乱点拟合等算法,求得结构面间距和岩体体积节理数. 设计开发了结构面细化分类及间距等参数计算与分析原型系统,实际案例分析表明,本文方法可有效实现结构面的自动细化分类,并能够计算出间距等相关参数,可为岩体质量分级和岩体稳定性分析等提供方法支撑.

**关 键 词:** 三维点云;结构面;细化分类;DBSCAN 聚类;结构面间距

**中图分类号:** TD 67      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)08-1161-06

## Automatic Discontinuity Classification and Parameter Calculation from Rock Mass 3D Point Cloud

GUO Jia-teng, ZHANG Zi-rui, MAO Ya-chun, LIU Shan-jun

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: GUO Jia-teng, E-mail: guojiateng@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The structural plane spacing is an important parameter in rock mass stability and mechanical properties analysis. It is widely used in the numerical computation of rock mechanics, mining engineering, slope monitoring and other fields. Based on the three-dimensional rock mass slope point cloud data acquired by non-contacting surveying method, this paper proposes a structural surface refinement classification method using density clustering. Projection transformation and scattered point fitting are used after a previous step of general discontinuity classification. The refinement classification is used to compute the structural plane spacing and the rock mass joint number. A prototype system for parameter calculation and analysis of structural surface refinement classification and spacing was designed and developed. The real case experiment and analysis show that the proposed method performs effectively in realizing the automatic refinement classification of structural planes, and in calculating the related parameters such as structural surface spacing, which may provide further support for rock mass quality classification and rock mass stability analysis.

**Key words:** 3D point cloud; structural surface; refinement classification; DBSCAN clustering; structural plane spacing

1995年7月1日由国家水利部主编的国家标准《工程岩体分级标准》(GB50218—94)对结构面给出了如下定义:岩体内开裂和易开裂的面,如层面、节理、断层、片理等又称不连续面.岩体的完整程度可由结构面发育程度、主要结构面的结

合程度、主要结构面类型等定性划分,而结构面间距是确定结构面发育程度的重要指标之一,也是工程岩体质量分级的重要指标之一.如何快速准确地获取结构面间距,已成为岩体力学分析和岩体稳定性分析的关键.

传统的结构面测量方法主要为接触式测量,使用地质罗盘、测绳、米尺等工具,如 Guerriero 等<sup>[1]</sup>通过扫描线测量方法对碳酸盐岩进行了裂缝分析;Zhang 等<sup>[2]</sup>通过在矩形采样窗口中设置扫描线来估计平均迹线长度.传统的测量方法在实际操作时,由于测量人员和现场情况的复杂性会对结果产生较大的误差,且费时、费力、危险.随着测量技术的进步,非接触测量已经被更多的研究者所青睐,如摄影测量、三维激光扫描技术、遥感技术<sup>[3]</sup>等.非接触测量可以更方便地实现岩体结构面产状等信息的采集,并有效扩大测量范围、提高测量效率,避免测量人员暴露于裸露岩体下的危险.

在非接触测量方法研究中,Hammah 等<sup>[4]</sup>使用模糊  $K$  均值法对结构面进行分组;宋腾蛟等<sup>[5]</sup>提出了一种基于萤火虫算法的岩体结构面产状数据划分的方法,对岩体结构面优势产状进行聚类分析;Guo 等<sup>[6]</sup>采用八叉树分割和 FCM 聚类实现了结构面的自动分类提取;葛云峰等<sup>[7]</sup>通过区域生长法与解析几何理论,实现了岩体结构面智能识别与信息提取;Liu 等<sup>[8]</sup>通过对三维点云进行主方位估计来提取岩石表面;王述红等<sup>[9]</sup>通过将人工鱼群算法与  $k$ -means 算法相结合,建立了 AFSA-RSK 结构面分类算法,将结构面进行分组.以上研究对结构面进行了分组提取,但更多相关参数信息的获取需要对分组后的结构面进行细化分类.本文着重研究结构面的细化分类方法.

结构面细化分类是为了求取更多岩体特征参数.在结构面间距等相关参数计算方面,Hudson 等<sup>[10]</sup>通过大量野外实测和数据分析得出,结构面中小间距出现的概率比大间距出现的概率大;Riquelme 等<sup>[11]</sup>通过 MATLAB 生成三维点云,并求取其法向间距;Buyer 等<sup>[12]</sup>通过 Shape Metri X3D (3GSM GmbH) 软件,对结构面间距进行了分析;王常明等<sup>[13]</sup>利用 MATLAB 编制  $K-S$  检验程序来统计分析结构面间距的分布情况;Elci 等<sup>[14]</sup>通过分析岩石扫描线估算岩石间断间距,从而求得岩体平均体积.在获取结构面间距时,以上方法需要大量的人工交互,操作繁琐.本文针对结构面间距的自动计算做出详细叙述,并在此基础上计算岩体体积节理数;这些参数的计算,对岩体的质量分级和岩体稳定性分析有着重要的作用.

综上所述,结构面的提取再分类对求取结构面参数起重要作用.本文将介绍如何对分组后的结构面进行自动细化分类,并通过相关算法求取结构面之间的间距和岩体体积节理数.

# 1 结构面提取和分类方法

结构面提取和分类是结构面间距等相关参数计算的前提.本文提出一种基于密度聚类 (DBSCAN) 算法的结构面细化分类方法,并通过投影变换,将三维点云转换到平面,据此计算结构面之间的距离,进而计算岩体体积节理数.方法流程如下:

- ①通过相机获取岩体的多幅影像,使用多视影像三维重建软件(如 AgisoftPhotoScan, Autodesk Mememto 等)提取三维点云,或采用三维激光扫描仪直接获取岩体点云;
- ②采用八叉树分割和 FCM 聚类方法<sup>[6]</sup>对结构面点云进行分类提取;
- ③使用密度聚类 (DBSCAN) 算法对分类提取的结构面点云进行细化分类;
- ④将细化分类后的结构面点云进行投影转换、散乱点拟合等处理,计算结构面之间的间距和岩体体积节理数.

## 1.1 结构面自动分类

首先将结构面进行分组提取,然后对结构面进行细化分类.

### 1.1.1 结构面提取

采用八叉树分割和 FCM 聚类对结构面进行分类提取<sup>[6]</sup>.图 1 为赤平极射投影图.

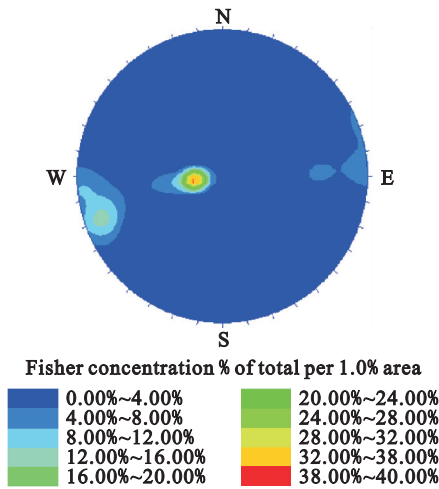


图 1 赤平极射投影图  
Fig. 1 Stereographic projection

首先通过赤平极射投影(如图 1 所示),根据岩体的产状,得到分组的个数;再通过八叉树可以得到每一个立方体内点云拟合平面的法向方向;最后通过 FCM 聚类,将具有相同方向的点云进行分类,提取出不同组的结构面,分类提取结果见图 2.

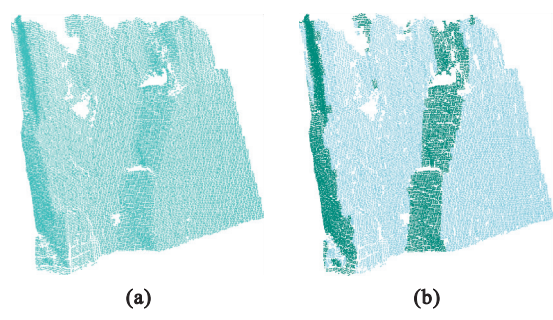


图 2 结构面分类结果

Fig. 2 Structural surface classification result

(a)—结构面三维点云模型；  
(b)—分类后的三维点云模型。

1. 1. 2 结构面细化分类

DBSCAN 是一种很典型的密度聚类算法,与  $k - means$  和 BIRCH 这些一般只适用于凸样本集的聚类相比,DBSCAN 既适用于凸样本集,也适用于非凸样本集. 本文使用 DBSCAN 算法将分类提取的结构面点云进行细化分类,以便完成结构面参数计算.

算法流程如下:

- ①读入对象点集  $PointList = \{p_1, p_2, \cdots, p_m\}$ ;
- ②计算每个点的邻近点个数,即  $N(p_j) = \{p_i \in PointList | dist(p_i, p_j) \leq Eps\}$ ,其中  $Eps$  为检测对象的邻近点距离;
- ③寻找核心点,将邻近点个数符合  $|N(p_j)| \geq MinPts$  的点标记为核心点,其中  $MinPts$  为检测对象邻域内的点个数阈值;
- ④将核心点分类,得到几组分类簇.

将一组结构面进一步细化分类,分成多个簇.

图 3 所示是将一组点云分成多个簇.

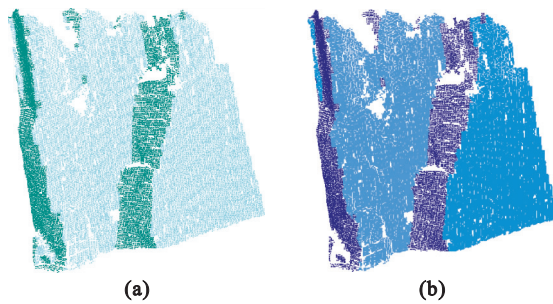


图 3 结构面细化分类结果

Fig. 3 Structural surface refinement classification result

(a)—细化分类前点云;(b)—细化分类后点云.

密度聚类算法:

```
Read PointList;  
If(  $dist(p_i, p_j) \leq Eps$  )  
     $N(p_j) ++$   
End if;
```

```
If(  $|N(p_j)| \geq MinPts$  )  
     $p_j$  为核心点  
    将  $p_j$  添加到 cluster  
End if;  
Draw cluster.
```

1. 2 相关参数计算

将分类后的结构面投影至平面,得到投影的散乱点,再将散乱点拟合成线段,求得结构面之间的法向距离,进而求得岩体体积节理数.

1. 2. 1 结构面间距

1) 分类簇投影:

①通过主成分分析法求得结构面的法向向量  $DisnVector$ ;

②求得水平方向向量  $PronVector$  (即投影方向):

已知一个向量  $V_1 = [x_1, y_1, z_1]$ ,求与它垂直的水平向量  $V_2 = [x_2, y_2, z_2]$ ,由  $V_1 \cdot V_2 = 0$ ,即  $(x_1 \times x_2) + (y_1 \times y_2) + (z_1 \times z_2) = 0$ ,可得到  $V_2$ ,即  $PronVector$ ;

③将分类簇沿水平投影方向投影到平面,如图 4a 所示,在平面上计算两条拟合线段间距,如图 4b 所示. 分类簇的投影如图 5a 所示.

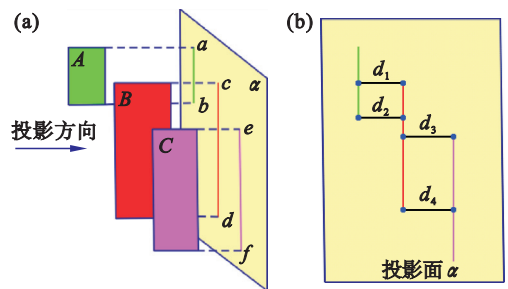


图 4 结构面分类簇投影示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structural surface classification cluster projection

(a)—投影方向和投影平面;(b)—投影平面上的线段间距.

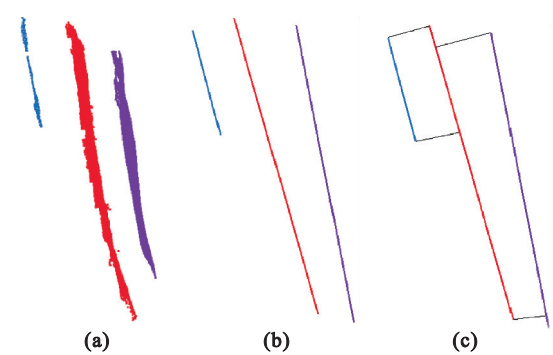


图 5 分类簇投影细化及间距

Fig. 5 Cluster projection refinement and spacing

(a)—分类结构面投影图;(b)—投影散乱点拟合图;  
(c)—结构面间距示意图.

2) 散乱点拟合:

用最小二乘法求线性回归方程,将投影得到的散乱点拟合成线段,如图 5b 所示。

设直线方程为  $y = ax + b$ ,求得所有点坐标的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

求线性回归参数:

$$L_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}),$$

$$L_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

$$L_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2.$$

由此可得  $a = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}, b = \bar{y} - \frac{L_{xy}}{L_{xx}} \cdot \bar{x}$ ,即可确定拟合线段的方程。

3) 结构面间距计算:

沿结构面法向(即测线),分别计算每组结构面之间的法向距离,如图 5c 所示。

①寻找有效的交点:过一条投影拟合线段的端点  $p_0$ ,作一条沿测线方向延伸的直线,计算该直线与其余拟合线段所在直线的交点;若交点在拟合线段上,则此交点为有效交点,将其添加到交点列表 IntersectionList 中,如图 6 中的  $J_0, J_1$ 。

②计算端点与交点之间的距离:如果有效的交点均在端点  $p_0$  的一侧,则寻找距离  $p_0$  最近的交点 Point1,计算  $p_0$  与 Point1 之间的距离  $d_1$ ,并将求得的距离添加到距离列表 SpacingList

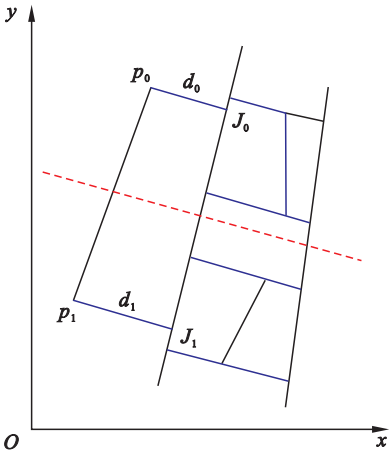


图 6 间距计算示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of spacing calculation

中;如果有效的交点分布在  $p_0$  两侧,则分别寻找  $p_0$  两端距离  $p_0$  最近的交点 Point1 和 Point2,分别计算  $p_0$  与 Point1 以及  $p_0$  与 Point2 之间的距离  $d_1, d_2$ ,并将求得的距离添加到距离列表 SpacingList 中。

根据 SpacingList,求得最大间距 MaxSpacing,最小间距 MinSpacing 和平均间距 MeanSpacing。

1. 2. 2 岩体体积节理数计算

岩体体积节理数  $J_v$  是指每立方米岩体体积内的结构面数目。早在 1974 年, Palmstrom<sup>[15]</sup>便提出了岩体体积节理数的统计方法,在各组节理发育得较好的情况下,其计算公式如下:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \cdots + \frac{1}{S_n}.$$

其中  $S_1, S_2, \cdots, S_n$  为每组结构面的平均间距。

用岩体体积节理数  $J_v$  进行换算,节理数  $J_v$  与岩体完整性系数  $K_v$  的关系如表 1 所示。

表 1  $J_v$  与  $K_v$  对照表  
Table 1 Comparison table of  $J_v$  and  $K_v$

$J_v$	<3	3 ~ <10	10 ~ <20	20 ~ <35	≥35
$K_v$	>0. 75	0. 55 ~ 0. 75	0. 35 ~ <0. 55	0. 15 ~ <0. 35	<0. 15

2 实验结果分析

2. 1 案例 1 分析

案例 1 研究区域位于沈阳一本溪公路边牛境内一处边坡,使用单反相机近景摄影获取三个站位的 44 幅照片影像,并采用多视影像三维重建软件提取边坡三维点云,提取过程如图 7 所示,结果如图 8a 所示。

为便于验证结构面间距的算法计算结果,在实地采集数据时,采用全站仪测量了 5 个明显位置点的坐标,如图 8b ~ 8d 所示,每个位置测量两点坐标求其间距,如图 8e 所示,采集结果见表 2。



图 7 多幅影像三维重建软件提取三维点云的过程  
Fig. 7 Process of extracting 3D point cloud by multi-view image reconstruction software



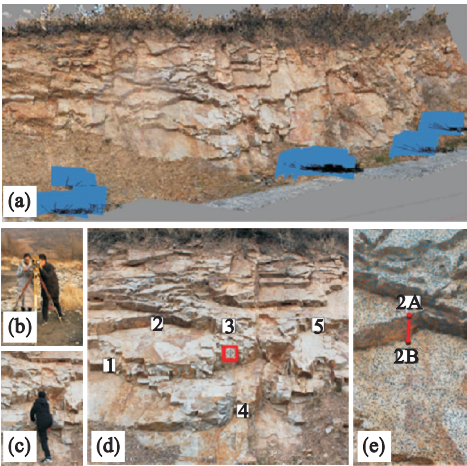


图 8 案例 1 研究区域  
Fig. 8 Study area of Case 1

(a)—提取的三维点云；(b)—全站仪采集控制点和检测点；  
(c)—人工架设棱镜采点；(d)—粘贴反光片的检测点；  
(e)—2 号位置实地间距测量采样点。

通过结构面按组分类得到图 9a,通过结构面细化分类得到图 9b,最后求得结构面间距和岩体体积节理数,如图 9c 所示,结果如表 2 所示。

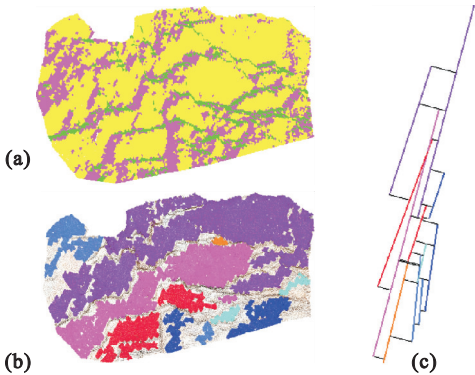


图 9 结构面细化分类结果  
Fig. 9 Structural surface refinement classification result  
(a)—结构面提取结果；(b)—结构面细化分类结果；  
(c)—结构面间距。

表 2 案例 1:实地采集与本文方法获得的结构面间距对比

Table 2 Case 1:spacing comparison between data field investigated and obtained by the proposed method						
编号	点号	实测坐标/m			实测间距/m	本方法获得的 结构面 间距/m
		x	y	z		
1	1A	3 006. 126	4 005. 591	202. 780	0. 362	0. 374
	1B	3 006. 392	4 005. 824	202. 858		
2	2A	3 004. 276	4 006. 178	201. 071	0. 392	0. 404
	2B	3 004. 117	4 005. 824	201. 020		
3	3A	3 002. 640	4 007. 801	200. 812	0. 546	0. 541
	3B	3 002. 238	4 007. 435	200. 775		
4	4A	3 002. 527	4 010. 176	203. 579	0. 434	0. 427
	4B	3 002. 825	4 010. 480	203. 596		
5	5A	2 999. 739	4 010. 325	200. 130	0. 398	0. 404
	5B	2 999. 465	4 010. 036	200. 128		

2.2 案例 2 分析

案例 2 研究区域如图 10a 所示,该数据来源于 Rockbench 信息库中公开提供的 LiDAR 数据<sup>[16]</sup>,该区域位于美国科罗拉多州的一个公路边坡,数据采集仪器为 OptechIiris 三维激光扫描仪.同时此数据也被很多研究者用于岩体特征信息提取<sup>[17]</sup>.

通过结构面提取得到图 10c,通过结构面细化分类得到图 10d,最后求得结构面之间的间距和岩体体积节理数,如图 10b 所示,结果见表 3.

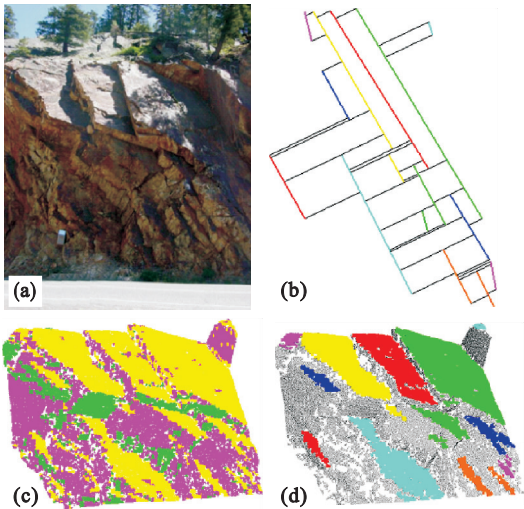


图 10 案例 2 研究区域及计算结果  
Fig. 10 Study area of Case 2 and computation results  
(a)—研究区域现场；(b)—结构面间距；  
(c)—结构面提取结果；(d)—结构面细化分类结果。

表 3 案例 2:结构面参数计算结果  
Table 3 Case 2: structural parameters computation results

案例	点数	细化后结构面数量	结构面间距平均值/m	结构面间距最大值/m	结构面间距最小值/m	岩体体积节理数/(条·m <sup>-3</sup> )
案例 2	1 515 722	15	1. 632	4. 343	0. 440	35. 637

3 结 论

本文针对摄影测量、三维激光扫描等非接触方式获取的真实纹理岩体结构面三维点云,通过密度聚类、投影变换、线性回归分析等方法,实现了结构面的自动细化分类,以及结构面间距和岩体体积节理数的自动计算,为岩体质量分级和稳定性分析提供了一种新的自动化辅助方法。

1) 非接触结构面数据获取方法,适用于高陡边坡、水域边坡等危险、难以接触测量区域的岩体数据快速、安全采集,并满足精度要求。

2) 基于 DBSCAN 密度聚类和投影变换的岩体结构面细化分类方法,可有效地将粗略分组的结构面三维点云进一步分解为单个结构面并逐一提取,以计算结构面间距和统计体积节理数。

3) 设计开发了结构面分类和计算原型系统,国内外典型案例实验分析表明,该系统可高效、准确地自动提取岩体三维点云中的结构面,并实现细化分类和参数计算。

参考文献:

[ 1 ] Guerriero V, Lannace A, Mazzoli S, et al. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks[ J ]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32( 9 ): 1271 – 1278.

[ 2 ] Zhang Q, Wang Q, Chen J P, et al. Estimation of mean trace length by setting scanlines in rectangular sampling window [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 84: 74 – 79.

[ 3 ] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellan A, et al. Use of LIDAR in landslide investigations: a review [ J ]. *Natural Hazards*, 2012, 61( 1 ): 5 – 28.

[ 4 ] Hammah R E, Curran J H. Fuzzy cluster algorithm for the automatic identification of joint sets [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1998, 35 ( 7 ): 889 – 905.

[ 5 ] 宋腾蛟,陈剑平,张文,等. 基于萤火虫算法的岩体结构面优势产状聚类分析[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版), 2015, 36( 2 ): 284 – 287, 304.

( Song Teng-jiao, Chen Jian-ping, Zhang Wen, et al. Clustering analysis of dominative attitudes of rock mass structural plane based on firefly algorithm [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2015, 36 ( 2 ): 284 – 287, 304. )

[ 6 ] Guo J T, Liu S J, Zhang P N. Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation and set analysis from 3D point clouds[ J ]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 164 – 172.

[ 7 ] 葛云峰,夏丁,唐辉明,等. 基于三维激光扫描技术的岩体结构面智能识别与信息提取[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36( 12 ): 3050 – 3061.

( Ge Yun-feng, Xia Ding, Tang Hui-ming, et al. Intelligent recognition and information extraction of rock mass structure surface based on 3D laser scanning technology[ J ]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36 ( 12 ): 3050 – 3061. )

[ 8 ] Liu L P, Xiao J, Wang Y. Major orientation estimation-based rock surface extraction for 3D rock-mass point clouds [ J ]. *Remote Sensing*, 2019, 11( 6 ): 635 – 658.

[ 9 ] 王述红,任艺鹏,陈俊智,等. 一种改进鱼群聚类算法在结构面分组中的应用[ J ]. 东北大学学报( 自然科学版), 2019, 40( 3 ): 420 – 424.

( Wang Shu-hong, Ren Yi-peng, Chen Jun-zhi, et al. An improved fish swarm clustering algorithm for structural grouping [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2019, 40( 3 ): 420 – 424. )

[ 10 ] Hudson J A, Priest S D. Discontinuity frequency in rock mass [ J ]. *International Journal of Rock Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1983, 20( 2 ): 73 – 89.

[ 11 ] Riquelme A J, Abellán A, Tomás R. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds [ J ]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 185 – 195.

[ 12 ] Buyer A, Schubert W. Calculation the spacing of discontinuities from 3D point clouds [ J ]. *Procedia Engineering*, 2017, 191: 270 – 278.

[ 13 ] 王明常,徐则双,王凤艳,等. 基于摄影测量获取岩体结构面参数的概率分布拟合检验[ J ]. 吉林大学学报( 地球科学版), 2018, 48( 6 ): 1898 – 1906.

( Wang Ming-chang, Xu Ze-shuang, Wang Feng-yan, et al. Probability distribution fitting test for obtaining structural parameters of rock mass based on photogrammetry [ J ]. *Journal of Jilin University( Earth Science Edition )*, 2018, 48 ( 6 ): 1898 – 1906. )

[ 14 ] Elci H, Turk N. Block volume estimation from the discontinuity spacing measurements of mesozoic limestone quarries, Karaburun Peninsula, Turkey [ J/OL ]. *The Scientific World Journal*, 2014 [ 2019 – 10 – 12 ]. [http://dx. doi. org/ 10. 1155/2014/363572](http://dx.doi.org/10.1155/2014/363572).

[ 15 ] Palmstrom A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation ( RQD ) [ J ]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20 ( 4 ): 362 – 377.

[ 16 ] Matthew J L, Malte V. Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 54: 150 – 158.

[ 17 ] Guo J T, Liu S J, Zhang M M. Towards automatic discontinuity trace extraction from rock mass point cloud without triangulation [ J ]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 226 – 237.