

## 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取

宣程强, 章杨松, 许文涛

### Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model

XUAN Chengqiang, ZHANG Yangsong, and XU Wentao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104029>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于数字图像处理的颗粒流厚度动态提取方法研究

A study of the dynamic extraction method for granular flow thickness based on digital image processing

吴越, 李坤, 程谦恭, 王玉峰, 龙艳梅, 姜润昱, 宋章, 刘毅 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 151-159

#### 基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 刁朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158

#### 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82-89

#### 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用

Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope

黄海宁, 黄健, 周春宏, 潘勇杰 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 149-155

#### 基于数字图像相关方法的裂隙砂岩应变场演化规律及前兆识别

Evolution law of strain field and precursor identification of flawed sandstone based on Digital Image Correlation method

张科, 李娜 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 150-156

#### 基于地面三维激光扫描的三峡库区危岩体监测

Monitoring of dangerous rock mass in the Three Gorges Reservoir area based on the terrestrial laser scanning method

褚宏亮, 邢顾莲, 李昆仲, 王国利, 段奇三 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 124-132



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202104029

宣程强, 章杨松, 许文涛. 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 75-83.  
XUAN Chengqiang, ZHANG Yangsong, XU Wentao. Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model[J].  
Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 75-83.

## 基于数字表面模型的岩体结构面产状获取

宣程强, 章杨松, 许文涛

(南京理工大学土木工程系, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对传统现场接触式测量获取岩体结构面参数效率低、工作量大、结果精确性受人为因素影响等问题, 本文结合数字摄影测量技术与运动法 (structure from motion, SFM) 进行岩体三维数字表面模型重建, 并在此基础上建立了岩体结构面自动识别方法。岩体数字表面模型重建步骤主要为岩体影像资料采集, 基于尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 算法进行图像特征匹配、稀疏点云构建、点云稠密化以及岩体曲面模型重构。结构面识别方法流程主要为: 首先平滑岩体数字表面模型; 通过改变搜索半径和角度阈值实现模型平面分割; 基于区域生长原理进行结构面搜索; 最后基于随机采样一致性拟合结构面得到结构面产状。将该方法应用于甘肃北山地下实验巷道, 实现了巷道三维数字表面模型的重建与结构面产状数据获取, 最后将识别到的结构面分组表征在模型表面。与人工实地测量方法以及现有的结构面识别软件相比, 本文提出的方法具有良好的准确性, 可为工程应用提供一定的参考。

**关键词:** 结构面识别; 摄影测量; 运动重构; 数字表面模型; 区域生长

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0075-09

## Extraction of the discontinuity orientation from a digital surface model

XUAN Chengqiang, ZHANG Yangsong, XU Wentao

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** The traditional field contact measurement for obtaining parameters of the rock mass discontinuity is of low efficiency and big workload, and the accuracy of the results are affected by human factors. In this paper a method is presented to automatically recognize the discontinuity based on the three dimensional (3D) digital surface model (DSM) of rock mass obtained with the digital photogrammetry and structure from motion (SFM) algorithm. The steps of rock mass DSM reconstruction include collecting rock mass images, matching image features based on the Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) algorithm, reconstructing sparse point cloud, encrypting point cloud, and reconstructing the rock mass surface model. The main flow of the discontinuity recognition method include smoothing the DSM of rock mass, changing the searching radius and the angle threshold to split model plane, searching the discontinuity based on the regional growth principle, and fitting the discontinuity based on random sampling consistency to get the orientation. The method is applied to the underground experimental roadway in the Beishan area of Gansu, and the reconstruction of 3D digital surface

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-07-05

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 国家高放废物地质处置重点研究开发项目 (KEGONGERSI2020-194); 国家自然科学基金项目 (40872172)

第一作者: 宣程强 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。E-mail: [xcq10554096@njjust.edu.cn](mailto:xcq10554096@njjust.edu.cn)

通讯作者: 章杨松 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程和地质工程教学与科研工作。E-mail: [zhangys@njjust.edu.cn](mailto:zhangys@njjust.edu.cn)

model of roadway and the orientation acquisition of discontinuities are realized. The discontinuities are also mapped on the roadway model by groups. A comparison the results with those of the manual field measurement method and the existing discontinuity recognition software shows that the method proposed in this paper is of good accuracy and can provide a certain reference for engineering applications.

**Keywords:** discontinuities recognition; photogrammetry; structure from motion; digital surface model; regional growth

岩体结构面参数主导岩体结构稳定性并控制岩体裂隙中流体的渗流路径,对岩土工程研究有着至关重要的作用。岩体结构面参数通常由专业的工程师使用皮尺、罗盘等工具现场测量获取。但该方法工作量较大,在一些地势较为复杂的地段如峭壁、隧道难以使用,同时需要量测人员长时间置身野外环境,受环境因素影响较大,也带来了较大的安全隐患<sup>[1-2]</sup>。

目前三维激光扫描技术(light detection and ranging)<sup>[3-5]</sup>和数字摄影测量技术(digital photogrammetry)<sup>[6-8]</sup>被广泛应用于岩土工程领域。三维激光扫描技术基于激光测距原理,记录被测物体表面大量密集点的三维坐标、反射率和纹理等相关信息,可以精确重构岩体三维点云模型。然而其缺点也十分明显,性能优异的三维激光扫描仪及其配套设备软件价格十分昂贵,不利于其技术普及<sup>[9]</sup>。随着数字摄影测量技术和计算机技术的不断发展,基于运动法(structure from motion, SFM)的计算机视觉三维重建算法使获取目标物三维模型的方法变得更加简单,只需利用高清数码相机从不同角度拍摄目标物体就可以还原出其三维模型。该方法与传统摄影测量方法相比有较大的便利性,不需要事先确定拍摄相机的空间位置和姿态,通过对拍摄得到的一组有一定重叠度的目标物图像迭代计算就能自动求解出相机内外参数,十分适合有场地空间限制的复杂工程环境<sup>[10]</sup>。因此本文结合数字摄影测量技术与 SFM 算法,使用高清数码相机拍摄岩体影像,实现岩体三维模型的重建。

近些年来,许多研究者已经对从岩体三维模型上手动、半自动或者自动提取结构面信息展开了大量研究。杨文治等<sup>[11]</sup>通过手动选点的方式从岩体三维激光点云模型表面提取结构面。Cacciari 等<sup>[12]</sup>使用激光雷达扫描仪对隧道围岩进行扫描建模,采用手动的方式提取围岩模型表面的迹线并投影到二维平面进行分析。显然,对于专业技术人员来说,采用人机交互的方式从岩体三维模型表面提取结构面参数会有更高的准确度。但是这种方式自动化率较小,无法快速获取大规模的结构面参数。目前比较常见的自动或

半自动识别岩体结构面方法主要基于点云的直接分类<sup>[13]</sup>,包括另一种形式的三角网格分类<sup>[14]</sup>,都是通过对岩体点云进行平面子集的划分,然后基于平面子集的法向量方向采用不同的聚类方法(如模糊聚类方法, K 均值聚类方法)实现结构面的分割。该类方法在点云模型规模不大的情况下具有较高的准确度,但当点的数目达到百万、千万级别时,每个点的计算和分类需要花费较长时间。

综上所述,本文基于数字摄影测量技术与 SFM 算法进行三维重构,建立精度较高岩石数字表面模型并基于此开发结构面自动识别算法。

## 1 基于 SFM 的岩体数字表面模型重建

### 1.1 岩体影像资料采集

传统摄影测量方法基于双目立体视觉原理通过双摄像机或者单摄像机从不同角度获取目标物体的两幅数字影像进行三维重建。然而,其前提条件是必须事先获得摄像机内外参数。相比之下,运动法(SFM)通过特征匹配从两幅或者多幅图像中提取相同的特征点并使每个特征点之间相互关联,自动求解出摄像机的内外参数,然后基于模型的一些特征点与被测目标物体之间的比例关系就可以计算出所有特征点的空间坐标<sup>[10]</sup>。针对巷道内部复杂、狭小的空间环境,为构建真实比例大小的高精度巷道三维表面模型,采用如下拍摄流程:

(1) 在巷道围岩测量区域表面均匀布置一定数量的控制点和检查点,并利用全站仪获取其真实世界坐标。

(2) 手持高清数码相机从不同角度拍摄巷道围岩影像。拍摄过程中尽量保证相邻影像覆盖范围的重叠度大于 30%,所采集到的影像能够覆盖整个测量区域。

(3) 经过一轮拍摄后,再对巷道围岩控制点所在区域以及一些关键结构面位置进行二次补拍。

拍摄所用的数码相机为尼康 COOLPIX P310,镜头焦距为 5 mm。总共采集了 161 张巷道围岩照片,每一张照片的像素为 4 608×3 456。

## 1.2 基于 SIFT 的图像特征匹配

在利用 SFM 算法进行三维重建之前, 需要对获取的岩体图像进行特征点的检测和匹配, 主要利用尺度不变特征变换 (Scale-Invariant Feature Transform, SIFT) 算法实现。该算法由 Lowe 提出, 通过尺度空间的极值检测从图像中提取特征点的尺度和旋转不变量, 并利用高斯滤波器 (Difference of Gaussian, DOG) 计算得到特征点的位置, 然后通过比较特征点的描述子 (Descriptor) 来匹配多幅图像中的公共点。

尺度空间即为试图在图像领域中模拟人眼观察物体的概念与方法, 目的是检测图像在尺度变化时的稳定特征。为了在尺度空间中检测到稳定的关键点, 通过使用不同的尺度参数对图像进行高斯模糊处理生成图像的高斯金字塔, 然后对高斯模糊后的相邻图像进行差分得到图像的高斯差分金字塔, 再判断差分后图像中每一个点与其 26 个邻域像素点的关系是否满足最大或者最小并保留满足的特征点为候选关键点。在确定了图像关键特征点以后, 需要对特征点进行方向赋值。通过计算获取关键特征点邻域像素的梯度方向以及幅值, 比较各个方向的幅值大小, 幅值最大的方向即为该特征点的主方向<sup>[15]</sup>。图 1 为利用

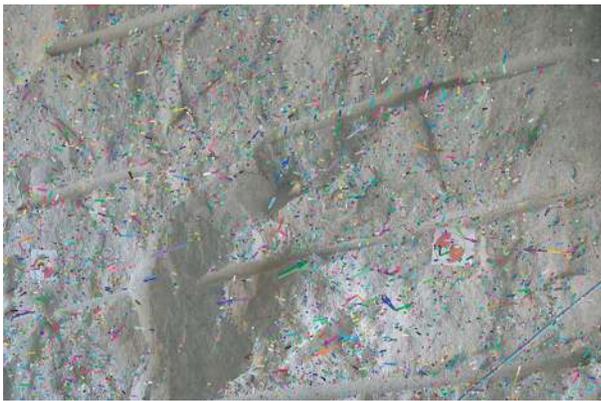


图 1 SIFT 特征点向量

Fig. 1 SIFT feature point vectors

SIFT 算法计算得到的围岩图像局部特征点及其主方向向量, 图中箭头的朝向即为特征点的主方向, 长度代表其尺度大小。

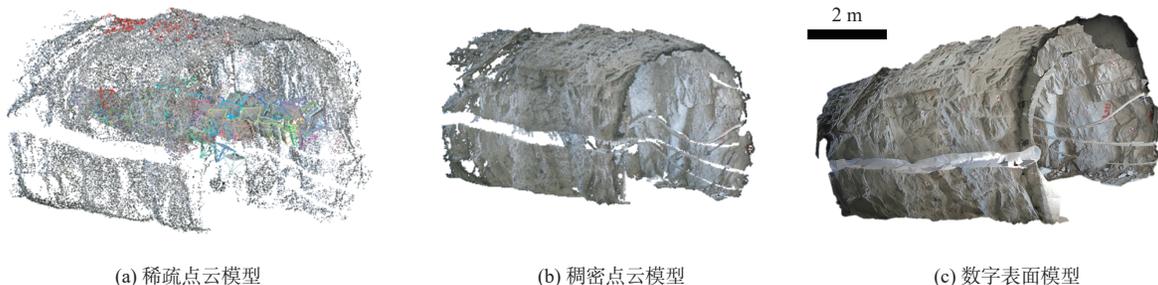
在获取图像关键特征点位置和特征向量后, 通过比较不同图像特征点向量的欧氏距离来判断特征点是否匹配。为提高匹配的正确率, 采用设立距离阈值的方法比较特征点之间欧氏距离的最近邻距离与次近邻距离, 当距离小于该阈值时, 则认为匹配成功<sup>[16]</sup>。当对所有图像完成关键特征点获取与匹配后, 通过计算就能得到大量目标物体图像特征点的内外方元素和坐标。

## 1.3 表面模型构建

从目标物图像到其三维模型生成主要经历以下几个流程: ①稀疏点云构建; ②点云稠密化; ③曲面重构。

稀疏点云的构建主要依靠 SFM 算法实现, 首先从大量经过特征匹配的图像中选取种子图像进行初始位姿估计, 然后向整个系统中不断添加新的图像进行特征匹配, 同时对新添加图像中匹配到的特征点进行三角定位和位姿估计, 直至所有图像添加完毕<sup>[17]</sup>。种子图像的选取很大程度上决定了后续建模的精准度, 其选取原则主要有以下两点: (1) 两图像间匹配的特征点个数; (2) 图像间的基线宽度。通常两个图像间匹配的特征点越多越有利于相机位姿的求解, 得到的结果也更加精确。巷道围岩稀疏点云模型如图 2(a) 所示。

点云稠密化主要基于面片的三维多视角立体视觉 (Patch-Based Multi-View Stereo, PMVS) 算法实现, PMVS 算法的输入是经 SFM 处理得到的稀疏点集、图像以及相关参数, 通过匹配、膨胀、过滤三个步骤完成在局部灰度一致性下的特征点密集匹配, 最终输出带有颜色的密集点云<sup>[18]</sup>。如图 2(b) 所示为通过点云加密得到的巷道稠密点云模型。该算法几乎实现了图像中每一个像素点的匹配, 重建了每一个像素点在三维空间中的位置, 使获取的点的密集程度基本达到



(a) 稀疏点云模型

(b) 稠密点云模型

(c) 数字表面模型

图 2 巷道三维重建模型

Fig. 2 3D reconstruction model of roadway

了原有图像的清晰度。

巷道三维模型的曲面重构由 MeshLab 网格编辑软件<sup>[19]</sup>实现,利用该软件中强大的三角网格编辑功能可以轻松实现由点云到数字表面模型的转化。经统计最终得到的巷道数字表面模型表面共有 1 376 877 个顶点,2 709 674 个三角网格。

### 1.4 建模精度分析

为验证上述结合摄影测量技术与 SFM 算法重构巷道三维数字表面模型方法的有效性,对 5 个检查点的外业实测坐标与重构得到的三维坐标进行了误差比较,如表 1 所示。从表 1 中可以看出,检查点的中误差都在 0.01 m 以内,模型的精度可以满足实际工程需要。

表 1 三维模型检查点误差统计

Table 1 Error statistics of the 3D model checkpoints

检查点编号	误差/m		
	X	Y	Z
32	-0.002	-0.005	0.004
35	-0.003	-0.007	0.001
38	-0.001	-0.006	0.001
41	-0.005	-0.001	0.002
44	0.001	-0.004	-0.001
中误差/m	0.003	0.005	0.002

## 2 结构面识别算法

结构面识别算法程序基于 Matlab2016b 平台编写,测试环境个人 PC 主要配置如下: 64 位 WIN10 操作系统, CPU 为 Intel core i5-9300H, GPU 为 NVIDIA GeForce GTX1660Ti, 内存 16 GB。算法基本流程如图 3 所示。

### 2.1 平滑处理

通过激光雷达扫描仪或者摄影测量方法获取的目标物三维表面模型由于一些人为操作问题和环境因素影响或多或少会产生一些噪声<sup>[20]</sup>。显然,这些噪声相对于整个模型来说占比十分渺小,对于目标物模型的三维可视化产生不了很大的问题,但对于后续算法分析组成整个三维表面模型的每一个三角网格来说,噪声所带来的高频偏差会使得其表面法向量与实际产生较大的出入,从而导致结构面搜索的中断。其中一些孤立的离群噪声点比较容易区分,可以利用点云编辑软件,如 CloudCompare,通过自动或者手动的方式去除。另一些存在于模型表面的噪声由于其特征不清楚,难以通过上述方式消除,所以本文利用拉普拉斯平滑算法对表面模型进行平滑处理以降低噪声对后续算法开展的影响。

拉普拉斯平滑算法是计算机数字几何处理领域

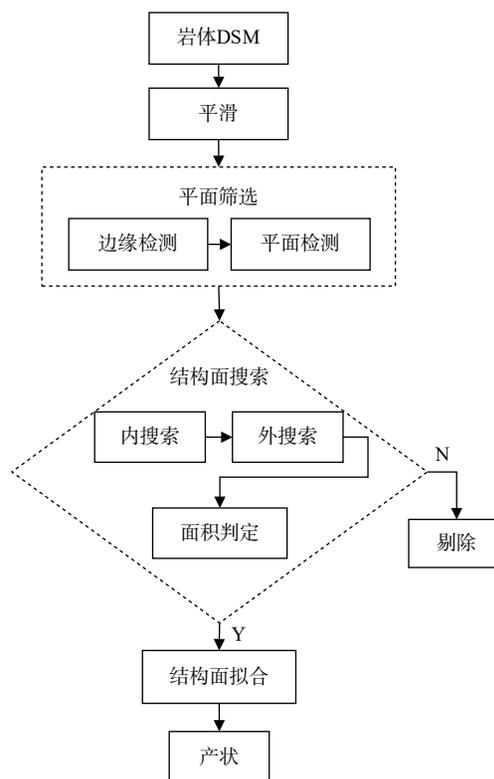


图 3 结构面识别算法流程图

Fig. 3 Flow chart of discontinuities recognition

中比较常用的网格平滑算法,该算法以三角网格中的伞状结构为单元,先求出模型中所有伞状结构顶点  $P_{original}$  和构成其相邻面的顶点的重心  $P_{mean}$ ,然后将该重心坐标作为新的三角网格顶点  $P_{new}$  替换原来顶点  $P_{original}$  的位置,从而达到平滑三角网格的作用。本文采用阻尼迭代拉普拉斯平滑算法对岩体模型三角网格进行平滑处理,该算法是由拉普拉斯平滑算法变形而来,由于基础的拉普拉斯平滑算法在平滑网格时可能会因其单次平滑处理对模型表面点的位置有较大影响而使模型表面三角网格发生重叠,所以引入一个加权系数  $\lambda$ ,通过控制该系数的大小改变单次平滑算法对模型顶点位置影响,降低三角网格发生重叠的概率,其定义如下:

$$P_{new} = (1 - \lambda)P_{original} + \lambda P_{mean} \quad (1)$$

平滑算法阶段需要用户控制的变量只有一个迭代次数  $I$ ,首先建立一个临时点集用于存储平滑处理后模型中所有点的位置,当迭代次数从  $I_i \rightarrow I_{i+1}$  时,对临时集中的点进行同样的平滑处理得到新的顶点位置并重新存入临时点集,直至迭代次数到达用户设定的上限,平滑即算完成。随着迭代次数的增加,三角网格顶点的位置分布就更加均匀,从而得到更加平滑的模型。图 4 为加权系数  $\lambda=0.3$  时在一小块巷道围

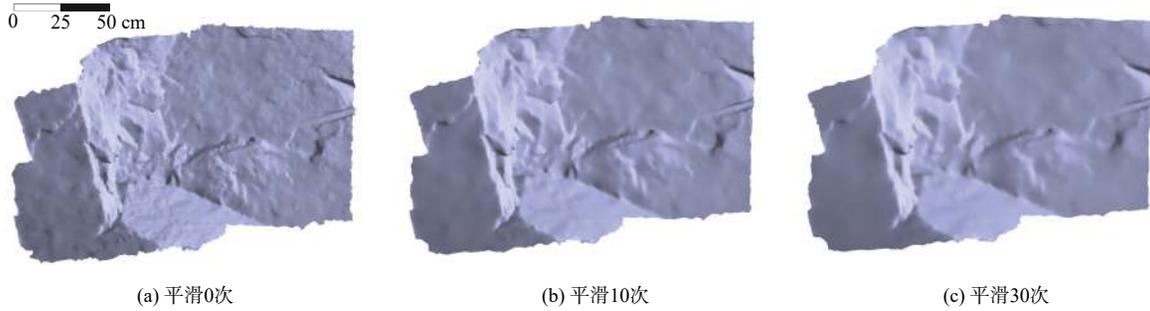


图 4 平滑岩体数字表面模型

Fig. 4 Smoothing rock mass DSM

岩数字表面模型表面分别作用 0, 10, 30 次平滑迭代处理的效果对比图。

## 2.2 平面筛选

平面筛选阶段的作用主要有两点: ①分隔不同的平面区域; ②平坦性检测, 为后续结构面区域生长算法挑选种子点集。主要由边缘检测和平面检测两个步骤实现。

### 2.2.1 边缘检测

为了保证检测到的平面只代表一个潜在的结构面, 必须利用平面边缘进行分割, 防止在结构面区域生长阶段出现跨区域搜索现象。本文首先通过最小二乘法拟合模型伞状结构单元上所有节点组成的平面以获取每一个三角网格顶点的法向量 $\mathbf{v}_i$ , 然后基于每一个顶点, 设定一个较小的搜索半径(由生成模型的网格间距决定), 获取搜索半径内所有顶点法向量的平均值 $\mathbf{v}_{\text{mean}} = \sum_i^N \mathbf{v}_i / N$ ( $N$ 为顶点个数), 计算每个顶点法向量与平均法向量的角距离, 由式(2)可得, 并将其平

均值与用户设定角度阈值 $\beta_{\text{max}}$ 比较, 如果大于该阈值 $\beta_{\text{max}}$ , 则认为该点靠近边缘。边缘检测结果如图 5(a)所示, 图中绿色区域即为边缘检测算法搜索到的岩体数字表面模型上的平面边缘区域, 剩余的红色区域将用于下一个阶段的平面检测。

$$\text{Dist}(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{\text{mean}}) = \arccos |\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_{\text{mean}}| \quad (2)$$

### 2.2.2 平面检测

平面检测方法和边缘检测类似, 只是需要设定较大的搜索半径和较小的角度阈值 $\beta_{\text{min}}$ , 如果计算得到的每一个三角网格顶点的法向量 $\mathbf{v}_i$ 与搜索半径内所有顶点法向量的平均值 $\mathbf{v}_{\text{mean}}$ 的平均角距离小于阈值 $\beta_{\text{min}}$ , 则认为该点在平面内。由于在平面检测前已经将平面边缘部分剔除, 所以最终检测到的平面应当是独立分开的。图 5(b)中红色区域部分即为最终检测到的潜在结构面, 将用于下一步结构面区域生长算法进行最终判定。

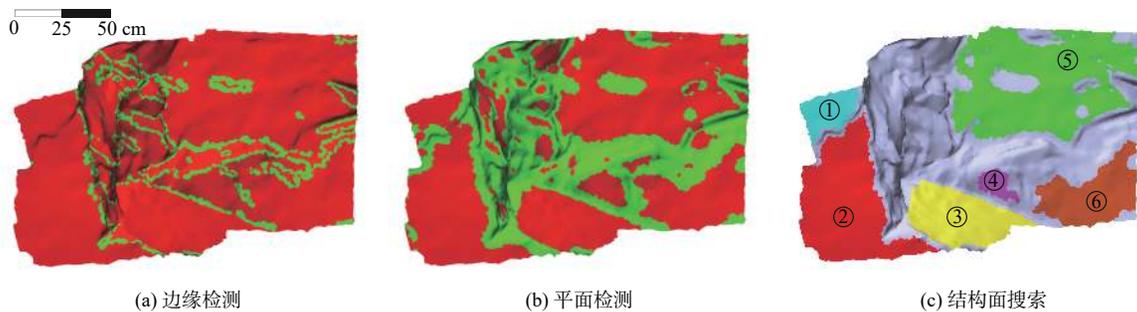


图 5 结构面识别过程

Fig. 5 Processes of discontinuities recognition

## 2.3 结构面搜索

结构面搜索基于区域生长法原理, 区域生长法的基本思想是: 在一个区域中, 确定一个种子点作为生长起点, 将种子点邻域内的候选点与种子点比较, 当

候选点与种子点具有相似属性时, 合并候选点并将其作为下一个生长点进行向外生长。本文采用的结构面区域搜索算法主要包括三个步骤: 内搜索、外搜索、面积判定。

内搜索主要目的是判断潜在结构面区域内部的每个点是否满足构成结构面的要求。首先为每个潜在结构面区域建立临时点集,然后在每个独立的潜在结构面区域内确定合适的种子点并赋予其中心法向量 $\mathbf{v}_{\text{center}}$ , $\mathbf{v}_{\text{center}}$ 通过计算各自所在平面区域范围内所有顶点法向量的平均值得到。计算种子点中心法向量 $\mathbf{v}_{\text{center}}$ 与其邻域内候选点法向量 $\mathbf{v}_i$ 的角距离并与设定的角度阈值 $\beta$ 进行比较来判断是否合并该候选点。如果其角距离小于阈值 $\beta$ ,则将该候选点存入临时点集并作为下一个生长点继续向外生长以不断扩大结构面区域。根据 Riquelme 等<sup>[13]</sup>关于平面子集共面性的结论,通过反复试算,本文最终采用的阈值 $\beta=20^\circ$ 。当所有结构面区域大小均不再发生变化时,即可判定内搜索已经完成。

外搜索的目的是对结构面边缘进行补全,由于在平面筛选阶段为了分隔平面剔除了一部分靠近平面边缘的点使其没有参与后续计算,这些点中的部分有可能也满足结构面区域判定条件,可以被归入相应的结构面区域中。采用相同的判定条件对结构面边缘附近的点进行判定并将符合条件的点存入相应的结构面临时点集中。

最后计算每个结构面临时点集构成的三角网格区域大小,与设定的面积阈值 $S_{\text{min}}$ 进行比较,当网格区域面积大于 $S_{\text{min}}$ 时,则认为该结构面有效。图 5(c)为在岩体数字表面模型搜索到的结构面,每个结构面都用不同的颜色在模型中表征,同图 5(b)比较,可以看到,结构面的边缘部分得到了很好的补全,保证了后续计算结构面产状结果的准确性。

#### 2.4 岩体结构面拟合与转换

在搜索得到构成每一个结构面的点集后,基于随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)拟合计算岩体结构面法向量。

RANSAC 算法最大的特点就是随机性和假设性,其假设一组样本数据中包含正确数据和噪声,同时也假设存在相应的方法可以计算出符合这些样本数据的模型参数<sup>[21]</sup>。通过随机抽取组成结构面点集中的任意三个点构成一个参考平面作为样本模型参数,比较点集中其余点与该参考平面的距离。这里需要提前设置一个距离阈值,当点与参考平面的距离小于阈值时,视该点为正确点,反之,则该点为无效点。经过多次随机抽取,存在最多正确点的参考平面就是结构面的最佳拟合平面。

由于暴露在岩体表面的结构面通常比较粗糙,成波浪状,而 RANSAC 算法考虑了点的波动性<sup>[14]</sup>,其平面拟合结果更加符合实际情况,所以采用该算法进行岩体结构面拟合是十分合适的。图 6 是 RANSAC 算法拟合结构面示意图。

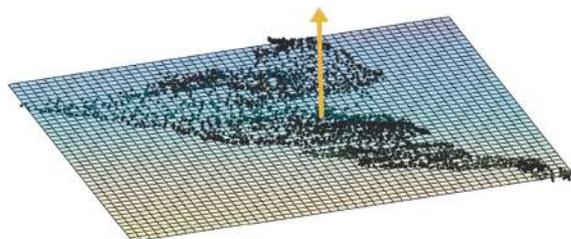


图 6 RANSAC 算法拟合结构面点云  
Fig. 6 Fitting a plane to the point cloud of a discontinuity by RANSAC

获取了结构面法向量之后就要将其换算成产状,如图 7 所示建立三维空间坐标系, $X$ 轴指向正东, $Y$ 轴指向正北, $Z$ 轴竖直向上。

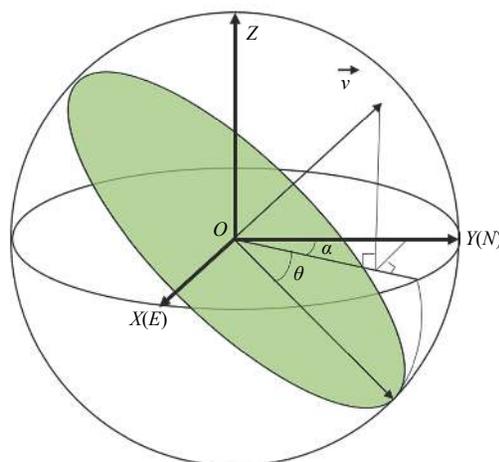


图 7 法向量与产状关系

Fig. 7 Relationship between normal vector and orientation

用一个圆盘代表结构面, $\mathbf{v}$ 为结构面的单位法向量, $\theta$ 和 $\alpha$ 分别是结构面的倾角和倾向。根据空间解析几何理论,很容易得到结构面产状与法向量的计算关系:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \alpha \sin \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

相应地,可以推导出岩体结构面法向量转换成倾角 $\theta$ 和倾向 $\alpha$ 的公式:

$$\theta = \arccos v_z \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan \frac{v_x}{v_y} \quad (5)$$

## 2.5 可靠性验证

为验证本文提出结构面产状提取算法的有效性, 分别使用人工现场测量方法和 Riquelme 等<sup>[13]</sup>开发的 DSE 软件对同一部位岩体的 6 个结构面(在图 5(c) 中用黑色圆圈标号)产状结果进行采集。其中 DSE 软件的结构面分割效果如图 8 所示, 最终的结构面产状对比结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 本文方法所获取的产状同 DSE 软件提取的结果较为接近, 与人工现场测量结果相比, 倾向最大误差为  $6.535^\circ$ , 平均误差为  $2.812^\circ$ ; 倾角最大误差为  $3.789^\circ$ , 平均误差为  $2.121^\circ$ 。

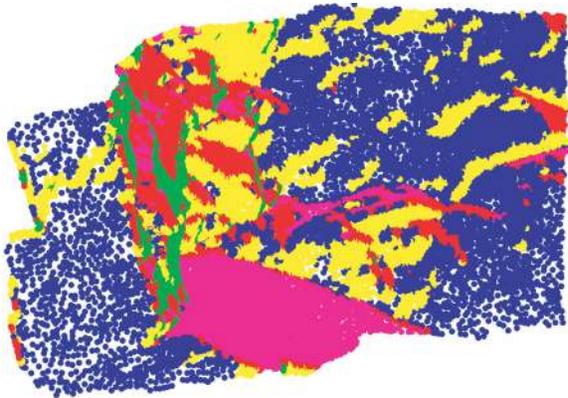


图 8 DSE 分割结构面点云  
Fig. 8 Segmenting discontinuities point cloud using DSE

表 2 结构面产状测量比较  
Table 2 Comparison of the discontinuities orientation measurements

结构面编号	人工现场实测		本文方法		DSE软件提取	
	倾向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	倾向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	倾向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$
1	182	72	180.672	74.437	179.436	74.813
2	179	75	185.535	78.789	184.782	78.462
3	329	51	331.460	49.451	332.075	49.574
4	176	68	177.675	69.619	178.635	70.536
5	177	79	174.995	81.630	173.824	82.137
6	172	84	174.871	83.298	173.582	83.679

由于岩体结构面通常较为粗糙, 呈弯曲状, 而人工接触式测量往往只对结构面单点进行数据采集, 其结果准确性无法得到有效保证。本文所提出的产状提取方法考虑了单个结构面上所有点的影响, 其结果是可以被接受的。

## 3 工程应用

北山坑探(图 9)位于甘肃北山旧井块段的十月井 I 级断裂带附近, 是研究地下岩体特性、结构面分布

规律以及进行现场测试的基础试验平台<sup>[22]</sup>。北山坑探主要由斜坡道和水平巷道组成, 在开挖巷道揭露特征明显的花岗岩结构面。对巷道开挖部分进行三维模型重构, 在此基础上进行智能化提取裂隙节理参数, 可为后续的岩体质量评价、裂隙网络建模提供重要的基础参数, 同时也为本文提出结构面智能化识别算法的适用性提供一个典型的案例研究。



图 9 北山坑探现场测量工作照片  
Fig. 9 Field measurement work photo in the Beishan exploration tunnel

本文中结合数字摄影测量技术与 SFM 算法重构了一段长约 8 m 的巷道数字表面模型, 如图 2(c) 所示。通过对模型旋转、放大, 可以更清楚地观察巷道内部各个位置岩体的节理特征。

对整个巷道数字表面模型进行平滑、边缘检测、平面检测和结构面搜索, 共计识别得到 120 个具有明显特征的面状结构面。每个结构面都用不同的颜色加以区分表征在模型上, 如图 10 所示。

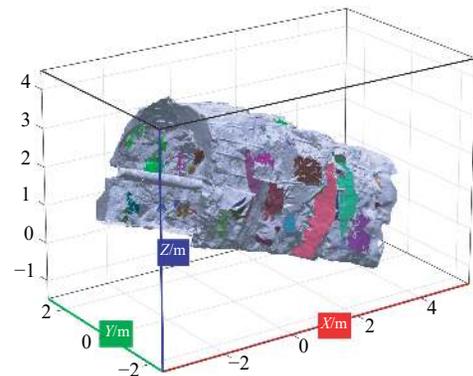


图 10 巷道围岩结构面识别结果  
Fig. 10 Roadway surrounding rock discontinuities recognition result

基于改进的模糊聚类算法和  $K$  均值聚类算法实现对自动识别的巷道岩体结构面产状动态聚类, 可以得到结构面产状的优势分组情况, 如图 11 所示。最后一次聚类时所确定的聚类中心就是优势组的中心产

状,其反映了测区岩体结构面的整体分布情况。再根据优势组内结构面分组情况计算其 Fisher 概率分布模型<sup>[23]</sup>的离散程度系数  $k$ ,  $k$  值越大,表明该组结构面分布比较密集,  $k$  值越小,则分布较分散,如表 3 所示。

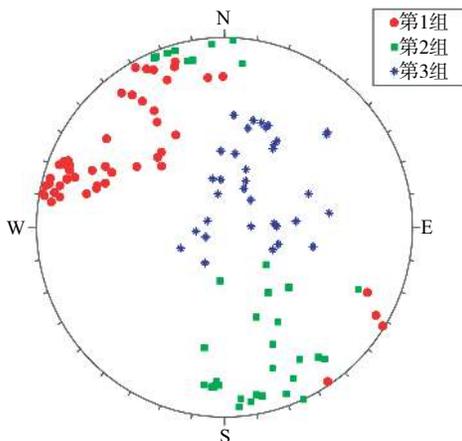


图 11 结构面产状聚类分组极点图  
Fig. 11 Pole distribution of discontinuities orientation cluster grouping

表 3 结构面产状分组结果

Table 3 Results of discontinuities orientation grouping

组号	倾向/(°)	倾角/(°)	样本数	离散系数 $k$
1	303.984	78.418	49	3.580 3
2	157.433	45.823	38	2.286 7
3	20.737	29.329	33	8.168 3

将巷道 DSM 上的结构面按照极点图分组结果使用不同颜色进行表征,如图 12 所示,可以让工程人员方便、快捷地判断巷道内部结构面的分布情况。

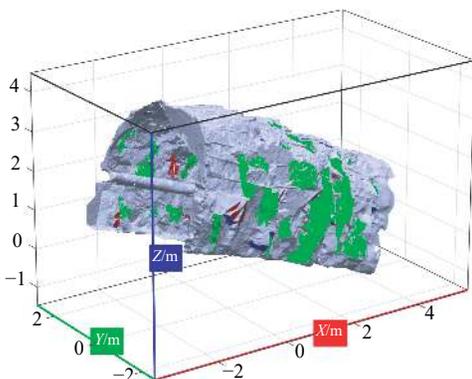


图 12 巷道围岩结构面分组表征  
Fig. 12 Roadway surrounding rock discontinuities mapped by groups

#### 4 结论

(1) 精度较高、特征点识别丰富的岩体 DSM 模型

对岩体结构面识别工作十分重要,在对目标岩体进行摄影测量时应尽量保证每张照片之间有一定的重叠度,拍摄的仰角不要过大,最好使镜头与岩体结构面保持平行或近似平行。

(2) 结构面产状的提取流程主要为:①平滑岩体数字表面模型;②边缘检测;③平面检测;④基于区域生长原理进行结构面搜索;⑤基于 RANSAC 算法进行结构面拟合。通过与人工实地测量方法以及现有的结构面识别软件对比,该方法具有较高的准确度,能够满足实际工程需要。然而,本文提出的方法并不是要代替地质工程师的知识和经验,旨在为他们提供一个高效、准确的测量岩体结构面参数的工具,减少由于人为因素而产生的错误。最后将结构面按照聚类结果表征在岩体三维表面模型上也提供给工程人员一种随时随地查看现场结构面分布的途径。

(3) 考虑到算法的局限性,本文所提出的结构面识别方法还只适用于识别形状接近于平面的面状结构面,还无法有效识别闭合的线状结构面,这也是作者未来需要突破的重点。

#### 参考文献 (References) :

[ 1 ] 徐则双. 基于近景摄影测量获取结构面信息的岩体质量评价[D]. 长春: 吉林大学, 2019. [ XU Zeshuang. Quality evaluation of rock mass based on close-range photogrammetry to structural plane information[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese with English abstract) ]

[ 2 ] XU W T, ZHANG Y S, LI X Z, et al. Extraction and statistics of discontinuity orientation and trace length from typical fractured rock mass: a case study of the Xinchang underground research laboratory site, China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105553.

[ 3 ] LATO M, DIEDERICHS M S, HUTCHINSON D J, et al. Optimization of LiDAR scanning and processing for automated structural evaluation of discontinuities in rockmasses[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2009, 46(1): 194 – 199.

[ 4 ] GUO J T, LIU S J, ZHANG P N, et al. Towards semi-automatic rock mass discontinuity orientation and set analysis from 3D point clouds[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 103: 164 – 172.

[ 5 ] RIQUELME A J, ABELLÁN A, TOMÁS R. Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds[J]. *Engineering Geology*, 2015, 195: 185 –

- 195.
- [ 6 ] 黄海宁, 黄健, 周春宏, 等. 无人机影像在高陡边坡危岩体调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 149 – 155. [ HUANG Haining, HUANG Jian, ZHOU Chunhong, et al. Application of UAV images to rockfall investigation at the high and steep slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 149 – 155. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 胡瀚, 王凤艳, 王明常, 等. 数字摄影测量采集岩体结构面信息的控制测量方法[J]. 世界地质, 2018, 37(1): 309 – 315. [ HU Han, WANG Fengyan, WANG Mingchang, et al. Control survey for rock discontinuity information acquisition by digital photogrammetry[J]. Global Geology, 2018, 37(1): 309 – 315. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 嵇美伟, 章杨松, 李晓昭. 基于摄影测量技术的岩体结构面参数的获取[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 344 – 351. [ JI Meiwei, ZHANG Yangsong, LI Xiaozhao. Extraction of rock mass structural attitudes based on photogrammetry technology[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 344 – 351. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 陈建琴, 李晓军, 朱合华. 基于点云的岩体间距与粗糙度的自动化提取[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(1): 133 – 140. [ CHEN Jianqin, LI Xiaojun, ZHU Hehua. Automatic extract of rock mass spacing and roughness based on point clouds[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(1): 133 – 140. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] SUN Shangqu, LI Liping, QIN Chengshuai, et al. Digitizing and modeling of structural planes in fractured rock mass tunnel based on SFM[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(11): 1 – 13.
- [ 11 ] 杨文治, 赵鹏. 基于三维激光点云数据的岩体结构面提取方法研究[J]. 勘察科学技术, 2015(3): 22 – 25. [ YANG Wenzhi, ZHAO Peng. Research on extraction method of rock structural plane based on three-dimensional laser point cloud data[J]. Site Investigation Science and Technology, 2015(3): 22 – 25. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] CACCIARI P P, FUTAI M M. Mapping and characterization of rock discontinuities in a tunnel using 3D terrestrial laser scanning[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 75(1): 223 – 237.
- [ 13 ] RIQUELME A J, ABELLÁN A, TOMÁS R, et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds[J]. Computers & Geosciences, 2014, 68: 38 – 52.
- [ 14 ] CHEN J Q, ZHU H H, LI X J. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud[J]. Computers & Geosciences, 2016, 95: 18 – 31.
- [ 15 ] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 – 110.
- [ 16 ] LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. September 20–27, 1999, Kerkyra, Greece. IEEE, 1999: 1150–1157.
- [ 17 ] 韩超. 基于无人机航拍图像的三维重建SFM算法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019. [ HAN Chao. SFM algorithm of 3D reconstruction from UAV aerial images[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] FURUKAWA Y, PONCE J. Carved visual hulls for image-based modeling[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(1): 53 – 67.
- [ 19 ] CIGNONI P, CALLIERI M, CORSINI M, et al. MeshLab: an open-source mesh processing tool[J]. Computing, 2008, 1: 129 – 136.
- [ 20 ] UMILI G, FERRERO A, EINSTEIN H H. A new method for automatic discontinuity traces sampling on rock mass 3D model[J]. Computers & Geosciences, 2013, 51: 182 – 192.
- [ 21 ] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6): 381 – 395.
- [ 22 ] WANG J, CHEN L, SU R, et al. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(3): 411 – 435.
- [ 23 ] FISHER R. Dispersion on a sphere[J]. Proceedings of the Royal Society A:Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1953, 217(1130): 295 – 305.