DOI：10.16285/j.rsm.2022.1725

基于轮廓曲线的岩体结构面三维粗糙度获取方法

顾　岩[1]，雍　睿[1]，沈　伟[1]，杜时贵[1]，简杰东[2]，刘松林[3]

（1. 宁波大学 岩石力学研究所，浙江 宁波 315211；2. 绍兴文理学院 土木工程学院，浙江 绍兴 312000；
3. 浙江大学 海洋学院，浙江 舟山 316000）

摘　要：现场获取岩体结构面三维形貌对于边坡稳定性评价至关重要，受限于三维激光扫描仪等精密设备高昂的使用成本、繁琐的操作过程以及对测量对象的严苛要求，使其在工程现场难以被广泛应用，因此提出了一种基于轮廓曲线的岩体结构面三维粗糙度获取方法。以重构结构面与原始结构面的峰值抗剪强度相对误差是否小于 5%为标准，采用 Tatone 提出的峰值剪切模型评估岩石结构面的剪切特性，以确定合理的采样间隔；在此基础上，通过轮廓曲线仪绘制结构面二维轮廓曲线，并根据图像数字化矩阵与实际长度的大小关系提取每条轮廓曲线的坐标数据；利用 Griddata 函数对已有数据进行空间插值生成重构的三维结构面，从而进行相关粗糙度研究。根据理论分析、直剪试验两方面检验，求得重构结构面与原始结构面的峰值抗剪强度相对误差均小于 5%，满足工程应用要求。研究证明该方法能够准确地获取结构面三维粗糙度，具有操作简单、成本低廉、受测量环境影响小等优势，可为相关结构面粗糙度分析及抗剪强度研究提供借鉴。

关　键　词：三维重构；轮廓曲线；采样间隔；空间插值

中图分类号：TU451　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－7598 (2023) 增刊－0485－10

3D roughness obtaining method of rock joint based on profile measurement

GU Yan[1]，　YONG Rui[1]，　SHEN Wei[1]，　DU Shi-gui[1]，　JIAN Jie-dong[2]，　LIU Song-lin[3]

(1. Institute of Rock Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China；2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China；3. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316000, China）

Abstract: Obtaining the 3D profile of the rock joint in the field is crucial for slope stability evaluation. Constrained by the high usage costs, cumbersome operational procedures, and stringent requirements for measurement subjects, precision equipment such as 3D laser scanners are difficult to widely apply to engineering sites. The paper proposes a method to obtain the 3D roughness of rock joint based on the profile measurement. The shear characteristics of rock joint are assessed using Tatone's peak shear model. The goal is to determine a suitable profile interval for reconstructing the rock joint, ensuring that the relative error of the peak shear strength between the reconstructed and original rock joint is less than 5%. Then, two-dimensional profile measurement of the rock joint is obtained by using a mechanical hand proflograph. The coordinate data for each profile measurement is extracted by considering the relationship between the size of the image digitization matrix and the actual length. The existing data is subjected to spatial interpolation using the Griddata function to generate a reconstructed three-dimensional rock joint, facilitating the study of relevant roughness. According to both the theoretical analysis and the direct shear test, the relative error of the peak shear strength of the two rock joint is less than 5%, which meets the requirements of engineering applications. The study shows that the method can accurately obtain the three-dimensional roughness of the rock joint and has the advantages of simple operation, low cost and low influence by the measurement environment, which provides a reference for related rock joint roughness analysis and shear strength research.

Keywords: 3D reconstruction; profile measurement; profile interval; spatial interpolation

1　引　言

岩体是由各种类型的结构面切割完整岩石形成的复杂地质体，结构面的存在一定程度上对岩体的稳定性起着控制作用[1-4]。结构面抗剪强度是工程岩体稳定性分析的重要参数，它受基本摩擦角、壁岩

收稿日期：2022-11-03　　录用日期：2023-01-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 42177117）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (42177117).
第一作者简介：顾岩，男，1997 年生，硕士研究生，主要从事结构面力学性质及其工程应用方面的研究工作。E-mail: 1074433067@qq.com
通讯作者：雍睿，男，1987 年生，博士（后），研究员，主要从事结构面力学性质及其工程应用方面的研究工作。E-mail: yongrui@nbu.edu.cn

强度、结构面粗糙度等诸多因素的影响。研究表明，粗糙度是影响结构面抗剪强度的关键因素[5-9]。准确获取结构面形貌数据是量化粗糙度的首要问题。因此，结构面形貌数据的精确获取对岩体稳定性分析至关重要[10-11]。

岩体结构面形貌数据是指表征结构面表面起伏形貌的空间几何数据。获取岩体结构面形貌数据方法根据获取过程是否与结构面接触分为：接触式测量和非接触式测量两类。早期获取结构面形貌数据以接触式测量为主，Barton[12]使用自制的针状轮廓尺获取了试件结构面的二维轮廓曲线，并给出 10 条标准轮廓曲线；吉锋等[13]研制的接触打孔器，实现了硬性结构面精细测量的机械化；杜时贵[14]根据转绘仪的工作原理，研制轮廓曲线仪，实现了野外结构面数据的快速获取。随着研究深入，结构面形貌数据的获取完成了从二维向三维、低精度到高精度的发展，非接触式测量实现了结构面形貌数据的全面采集，极大提高了测量精度。Fardin[15]、黄曼[16]、侯钦宽[17]等采用三维激光扫描仪，获取了室内外相应岩体结构面三维形貌数据；陈世江等[18]基于摄影测量技术，获得了石膏试件断口面的三维形貌数据。以三维激光扫描为代表的非接触式测量是发展的主流方向，它可以直接、精准获取岩石结构面三维形貌，但是囿于其设备成本高昂、操作繁琐、对测量环境较为敏感等不足，短时间内难以在实际工程中广泛应用。另一方面，接触式测量方法所记录的结构面二维轮廓曲线难以描述整个结构面几何特征[19]，导致基于二维轮廓曲线形貌数据评估的结构面抗剪强度往往存在主观性和不确定性[20-21]。然而，接触式测量具有操作简单、仪器携带方便、成本低廉、受测量环境影响小等优点，在有限条件下仍然不失为一种经济实用的结构面形貌数据采集方法。因此，一些学者提出了接触式测量方法获取的二维轮廓曲线以近似结构面三维形貌的理念[22-24]。然而，基于接触式测量结果进行结构面三维形貌重构的研究较少，如何确保重构精度仍然值得我们深究。

在满足工程测量精度要求、经济效益的前提下，提出一种采用轮廓曲线仪绘制结构面二维轮廓曲线，并据此重构三维形貌的方法，重点探究了二维轮廓曲线重构结构面三维形貌的精度问题。以三维激光扫描仪为参照标准，对比轮廓曲线仪和三维激光扫描仪记录的二维轮廓曲线，提出相似度概念，研究两种方式所记录的轮廓曲线吻合程度，给出轮廓曲线采样间隔的取值参照。同时，通过对 6 种空间插值方法的比选，确定了最适重构方法。

2 结构面三维形貌重构方法

结构面三维形貌重构具体过程可分为轮廓曲线测量、轮廓曲线数据提取、结构面形貌插值重构 3 个部分（见图 1）。整体工作流程见下文。

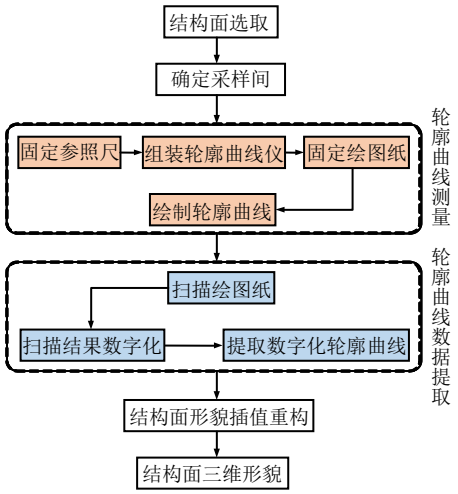


图 1 结构面三维形貌获取流程

Fig.1 Rock joint 3D morphology acquisition process

轮廓曲线测量：

（1）固定参照尺。对岩样建立相应的坐标系，选取长度适中的参照尺使起始刻度均与预设坐标平面对齐。

（2）组装轮廓曲线仪。轮廓曲线仪由探针、绘图笔、平衡块、固定板和绘图纸组成，如图 2 所示。

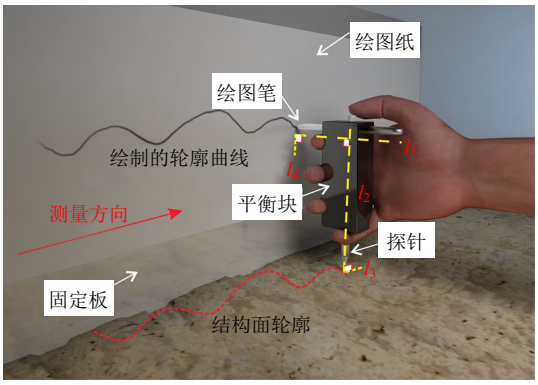


图 2 轮廓曲线仪的组成[25]

Fig.2 The components of a mechanical hand proflograph[25]

（3）固定绘图纸。将绘图纸平整地固定在固定板上，使轮廓曲线仪所在平面、绘图纸所在平面、结构面表面在绘制过程中始终保持两两垂直。

（4）绘制轮廓曲线。手握平衡块沿着测量方向

平稳匀速的从一端滑动到另一端，将结构面表面轮廓曲线记录在绘图纸上。根据上述步骤，选用固定的采样间隔绘制多条相互平行的轮廓曲线。若采样方向长度不能被采样间隔等分，还需记录结构面样本两侧边缘的轮廓。

轮廓曲线数据提取：

（1）扫描绘图纸。使用扫描仪对绘图纸扫描。

（2）扫描结果数字化。利用 MATLAB 软件的图像数据处理功能对轮廓曲线扫描图按灰度值进行提取，并根据图像数字化矩阵与实际长度的大小关系，将图像数据数字化。

（3）手绘轮廓曲线提取。以固定的采样间距提取每条轮廓曲线的坐标数据，最终得到多条长度相同的手绘轮廓曲线。

结构面形貌插值重构：

（1）确定插值范围。根据结构面尺寸确定插值范围。若结构面尺寸为 n cm×n cm，则插值范围[x_1，x_2]=[$-n/2$，$n/2$]，[y_1，y_2]=[$-n/2$，$n/2$]。

（2）选取插值函数。选取软件内置的插值函数，在设定的范围内对处理后的轮廓曲线插值。

（3）重构结构面三维形貌。插值处理后，根据已有的轮廓曲线数据，生成重构的三维结构面。

3　基于轮廓曲线仪测量方法精度分析

重构结构面的精度如何，首先取决于轮廓曲线仪绘制的轮廓曲线与结构面的真实起伏吻合程度。以三维激光扫描仪记录的结构面为岩样真实表面，使手绘轮廓曲线与对应机扫轮廓曲线（三维激光扫描仪扫描的轮廓曲线）进行吻合匹配处理，探究轮廓曲线仪绘制的二维轮廓曲线精度。

3.1　岩体结构面形貌数据采集及处理

岩样取自浙江省常山县某采石场的钙质板岩，沿其板理方向开采出厚度基本相同的岩石薄片，得到较为完整的岩石结构面。运回室内后加工成尺寸为 110 cm×110 cm 四边齐平的板状结构。

基于轮廓曲线仪的结构面形貌数据采集及处理见第 2 节。其中，轮廓曲线测量的采样间隔设置为 1 cm，并将绘制第 1 条轮廓曲线的刻度作为起始刻度，绘制 100 条手绘轮廓曲线。扫描仪的扫描精度设置为 300 dpi；以 0.2 mm 为数据点的采样间距提取每条数字化轮廓曲线的坐标数据，最终处理得到 100 条长度为 101 cm 的手绘轮廓曲线。

基于 Metra SCAN™手持式三维激光扫描仪的结构面形貌数据采集和处理过程如下：

（1）点云提取。扫描仪精度设置为 0.2 mm，对结构面进行全方位扫描，提取结构面点云。

（2）点云模型导入。将点云数据导入软件生成尺寸为 110 cm×110 cm 的结构面模型。

（3）模型处理。剔除点云中无用的数据后，截取尺寸为 100 cm×103 cm 的结构面模型，建立如图 3 所示坐标系并以 1 cm 为采样间隔提取轮廓曲线。

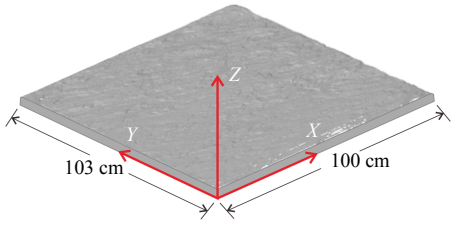
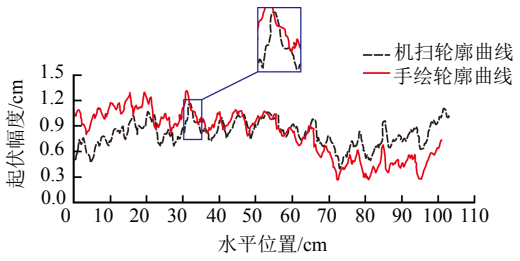


图 3　处理面三维模型
Fig.3　Rock joint 3D model

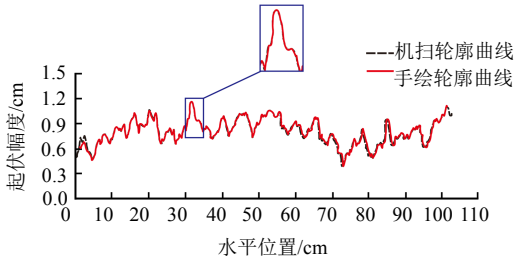
（4）机扫轮廓曲线处理。以 0.2 mm 为轮廓曲线数据点的采样间距提取 100 条长为 103 cm 的轮廓曲线。为了使得两种轮廓曲线能够达到更好的匹配效果，处理后的机扫轮廓曲线要略长于手绘轮廓曲线。

3.2　精度分析

以两种轮廓曲线数据点起伏度差值平方和最小为标准，进行轮廓曲线匹配，将匹配结果作为一组最佳轮廓线组，如图 4 所示。



(a) 匹配前



(b) 匹配后

图 4　最佳轮廓线组获取
Fig.4　Obtaining of best profile group

最佳轮廓线组的具体获取步骤如下：

（1）以机扫轮廓曲线为参照，使手绘轮廓曲线起始点依次与机扫轮廓曲线的点重合；

（2）以重合点为圆心，旋转手绘轮廓曲线，使其末端点与机扫轮廓曲线的点重合，计算此时两条轮廓曲线重合段内各个点的起伏度差值平方和；

（3）重复上述步骤，直至两种轮廓曲线的末端点重合，由此得到起伏度差值平方和的集合；

（4）以起伏度差值平方和最小时，两条轮廓曲线重合段内的数据作为空间位置匹配结果，最终完成最佳轮廓线组的获取。

按照上述方法，依次匹配出尺寸为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 cm 的最佳轮廓线组，匹配结果如图 5 所示。

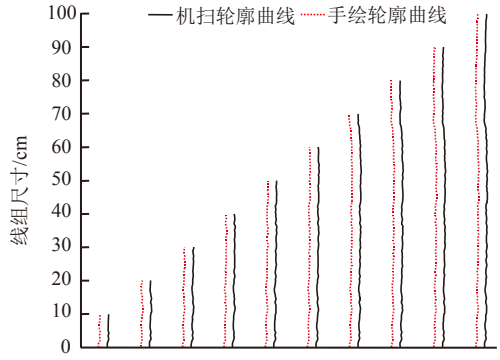


图 5 系列尺寸最佳轮廓线组截取

Fig.5 Interception of series size best profile group

为评估轮廓曲线测量精度，基于曲线相似性原理，提出定量计算结构面手绘轮廓曲线与实际起伏形貌吻合程度的方法。轮廓曲线相似度计算公式为

$$S(\mathrm{p}_1,\mathrm{p}_2)=\frac{S_{\mathrm{F}}+S_{\mathrm{E}i}+S_{\mathrm{E}h}}{3} \tag{1}$$

式中：S 为相似度；p_1、p_2 为两条轮廓曲线；S_{F} 为轮廓曲线 p_1、p_2 基于 Fréchet 距离的曲线轨迹相似度[26-28]；$S_{\mathrm{E}i}$、$S_{\mathrm{E}h}$ [29]分别为轮廓曲线 p_1、p_2 基于 Wasserstein 距离计算的轮廓曲线坡度 i 特征集合和起伏度 h 特征集合相似度。

相似度 $S\leqslant 1$，S 越接近 1，两条轮廓曲线的相似程度越高；$S=1$，表明两条轮廓曲线完全重合；否则，两者相似度越低，差异程度越大。

截取图 4(b)中曲线可以得到一组 100 cm 最佳轮廓线组。经过计算，两条曲线相似度为 0.938 4，结果非常接近于 1，说明该组的手绘轮廓曲线基本与机扫轮廓曲线吻合。

经统计分析发现差异度（1−S）基本符合对数正态分布（见图 6），经变量变换后可转换为正态分布。因此，可按正态分布的统计规律反映差异度（1−S）的分布特性。同理，相似度 S 的分布特性同样可以通过正态分布的统计规律进行反映。

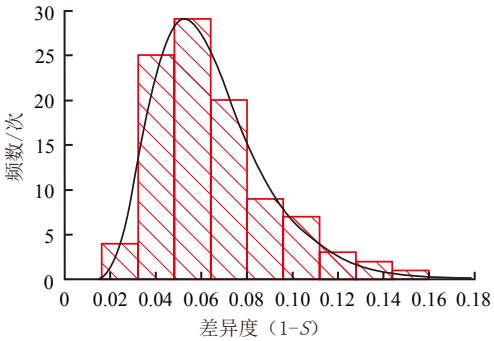


图 6 10 cm 最佳轮廓线组差异度（1−S）频数分布直方图

Fig.6 (1−S) frequency distribution histogram of 10 cm best profile group

10 cm 最佳轮廓线组的相似度统计结果见图 6，根据正态分布的 2σ 原则，即 $P(\mu-2\sigma<X<\mu+2\sigma)=0.954\ 4$，$P$ 为概率，μ 为均值，σ 为标准差，按区间分布概率 95.44%计算其分布区间为（0.885 2，0.970 9）。统计学中将发生概率小于 5%的事件称为“小概率事件”，并认为其在一次试验中是几乎不可能发生的，基本上可以把区间（$\mu-2\sigma$，$\mu+2\sigma$）看作是随机变量 X 实际可能的取值区间。因此，10 cm 手绘轮廓曲线与对应机扫轮廓曲线的相似度 S 几乎一定在区间（0.885 2，0.970 9）内。系列尺寸最佳轮廓线组相似度 S 的参考区间见表 1。

表 1 系列尺寸最佳轮廓线组相似度统计结果

Table 1 S statistical result of series size best profile group

尺寸 cm	组数	相似度 S			
		最大值	均值	标准差	参考区间
10	100	0.973 5	0.938 7	0.021 7	(0.885 2，0.970 9)
20		0.978 7	0.928 2	0.023 0	(0.873 5，0.972 8)
30		0.973 4	0.936 5	0.028 8	(0.862 7，0.975 7)
40		0.975 8	0.929 4	0.031 6	(0.848 6，0.972 6)
50		0.970 4	0.927 6	0.031 0	(0.848 9，0.970 7)
60		0.976 8	0.924 0	0.036 6	(0.829 3，0.972 5)
70		0.973 0	0.932 1	0.030 2	(0.854 8，0.973 5)
80		0.976 0	0.932 8	0.027 7	(0.862 8，0.971 9)
90		0.978 2	0.933 0	0.026 9	(0.865 3，0.971 3)
100		0.972 4	0.933 3	0.024 9	(0.871 4，0.969 6)

最大值、均值、标准差分别反映一组数据的最高水平、平均水平和离散程度。由此，这 3 个数据可以很好表征最佳轮廓线组匹配结果与尺寸之间的关系。由表 1 和图 7 所示：相似度 S 随着尺寸增加，

最大值基本稳定在 0.975 附近；均值在 0.930 上下浮动，当尺寸超过 70 cm 后稳定在 0.933 附近；标准差先升后降，并在 60 cm 处达到最大值 0.036，表明轮廓曲线尺寸为 60 cm 时匹配的结果最不稳定，原因可能是绘制人员臂长在 60 cm 左右，导致绘制过程中不能匀速移动手臂。

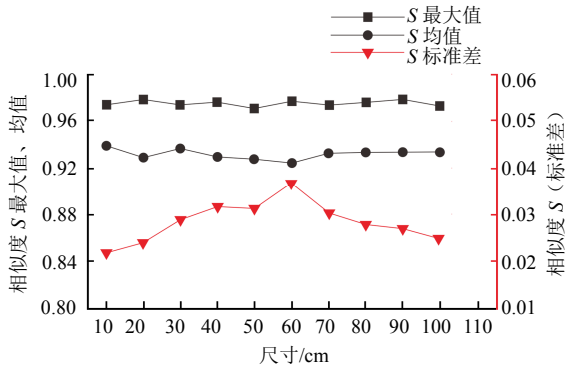


图 7　系列尺寸轮廓线组相似度 *S* 统计分析图

Fig.7　*S* statistic diagram of series size best profile group

通过上述研究，可以得出结论：轮廓曲线仪获取的手绘轮廓曲线与机扫轮廓曲线拥有较高的相似度，其匹配结果不受线组数量、曲线尺寸变化的影响，具有良好的稳定性，其精度能够满足重构要求。

但是，重构方法仍存在两个问题：①采样间隔的确定。采样间隔过大会导致结构面形貌数据丢失严重，采样间隔过小则会增加工作负担，有悖于快速高效的初衷；②如果直接使用手绘轮廓曲线进行重构，则会忽略相邻轮廓曲线之间的结构面信息，导致重构的精度有所降低。

在第 4 节和第 5 节中，分别研究了采样间隔和空间插值法对结构面三维形貌获取精度的影响。

4　采样间隔确定方法

合理的采样间隔 PI（profile interval，简称 PI）不仅可以极大提高工作效率，还能够采集到更多具有代表性的结构面信息进而提高重构精度。

选取 6 个典型结构面试样 A~F，尺寸为 100 mm×100 mm，使用三维激光扫描仪以 0.5 mm[30]的扫描间隔获取试样结构面的点云数据，记作“原始点云”（见图 8）。研究发现[31-33]，对于一个给定的结构面，不同粗糙度参数所表征的粗糙度可能不尽相同。但是，结构面形貌定量描述的最终目的都是为了评估岩石结构面的峰值剪切强度[34]。因此，采用 Tatone[35]提出的岩石结构面峰值剪切强度模型评估结构面的剪切特性，探究不同法向应力对 *PI* 选取的影响。

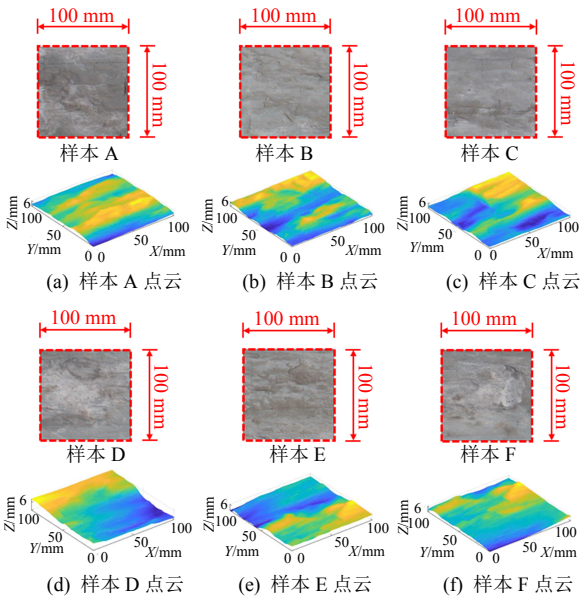


图 8　6 个样本及其原始点云

Fig.8　Six samples and their original point clouds

以机扫结构面为原始结构面，通过 Griddata 函数法对手绘轮廓曲线进行结构面三维形貌重构后，通过下式计算两种结构面的峰值剪切强度。

$$\tau_{\mathrm{p}}=\sigma_{\mathrm{n}}\tan\left[\varphi_{\mathrm{b}}+\left(\frac{\theta^{*}_{\max}}{C+1}\right)^{1.34l^{0.058}}\right]\cdot\left[1+\exp\left(-\frac{\theta^{*}_{\max}}{9A_{0}(C+1)}\frac{\sigma_{\mathrm{n}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}\right)\right] \tag{2}$$

式中：τ_{p} 为峰值剪切强度；$\theta^{*}_{\max}/(C+1)$ 为沿剪切方向的粗糙度度量；C 为度量粗糙度的参数，由试验数据拟合得到；$\theta^{*}_{\max}$ 为最大视倾角；σ_{n} 为施加在岩石结构面上的法向应力；σ_{t} 为岩石结构面的抗拉强度；φ_{b} 为岩石结构面的基本摩擦角；l 为同一条轮廓曲线的点云点间距；A_0 为面积。用两种结构面峰值剪切强度的相对误差作为评估指标。

$$\delta_{\tau_{\mathrm{p}}}=\left|\frac{\tau_{\mathrm{p}_1}-\tau_{\mathrm{p}_2}}{\tau_{\mathrm{p}_1}}\right|\times100\%\leqslant5\% \tag{3}$$

式中：$\delta_{\tau_{\mathrm{p}}}$ 为原始结构面和重构结构面之间峰值抗剪强度的相对误差；τ_{p_1} 和 τ_{p_2} 分别为原始结构面和重构结构面沿同一剪切方向的峰值剪切强度。工程上通常要求该误差不大于 5%[30, 36-37]，当误差超过 5% 时，则需要重新选取采样间隔直至误差不超过 5%，最后确定最佳的采样间隔。

岩块和结构面物理力学参数的取值及法向应力 σ_{n} 的选取分别如表 2、3 所示。同一条轮廓曲线的点云点间距 l 设置为 0.5 mm。按前述重构方法，重

构样本 A～F，6 个结构面的三维形貌，研究不同 σ_n 对 PI 选取的影响，结果见表 3。

表 2 岩块及结构面的基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of rock masses and its joint

性质	密度 ρ /(g·cm^{-3})	抗压强度 σ_c / MPa	抗弯强度 R_0 / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	基本摩擦角 φ_b / (°)	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ
取值	2.68	78.6	12.46	7.8	32	43	0.23

表 3 法向应力 σ_n 与轮廓采样间隔 PI 的关系

Table 3 Relationship between normal stress σ_n and profile interval PI

典型结构面样本	$\theta^*_{max}/(C+1)_{3D}$	PI/mm				
		σ_n=0.5 MPa	σ_n=1.0 MPa	σ_n=1.5 MPa	σ_n=2.0 MPa	σ_n=2.5 MPa
A	8.596	6	8	12	20	25
B	7.665	7	9	12	22	24
C	6.392	10	12	15	26	32
D	5.623	11	15	18	24	36
E	4.207	12	16	21	32	45
F	3.479	9	13	20	36	47

如表 3 和图 9 所示，同一结构面样本，随着法向应力的不断增大，其轮廓曲线的采样间隔 PI 也逐渐增加。同时，粗糙度越高的试样，其轮廓曲线的采样间隔基本都低于低粗糙度样本的 PI，这种现象在高法向应力下更为明显。究其原因，粗糙度越高的结构面包含的几何特征越复杂，重构过程中选用较大的采样间隔难以捕捉到结构面上更为复杂的形貌细节。

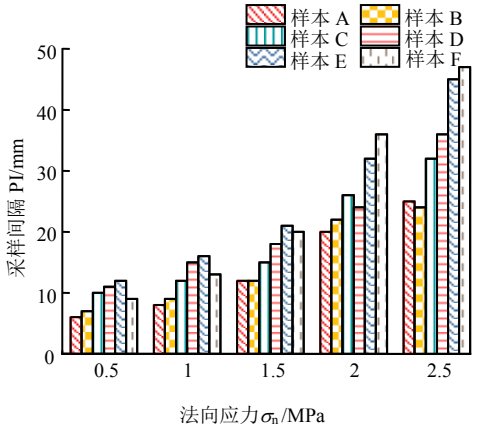


图 9 不同法向应力条件下的采样间隔分布

Fig.9 Profile interval PI distribution at different normal stresses σ_n

5 空间插值方法研究

选取粗糙度不同的样本 A、样本 C 和样本 E，通过 6 种空间插值方法（Griddata 函数法、径向基函数法、克里金插值法、反距离加权插值法、局部多项式法和最小曲率法）[38-39]进行结构面三维形貌重构得到“重构点云”，以“原始点云”为标准，从采样间隔和粗糙度角度比选出最佳空间插值方法。

Griddata 函数法是根据离散的数据点进行插值的二维插值函数，语句格式为：z_i=griddata（x，y，z，x_i，y_i，method）其中，x、y、z 可以为非单调向量，可进行离散数据点插值，z_i 为点云中点的垂直坐标。

径向基函数法是多个插值方法的组合，包括一系列精确的插值方法，生成的光滑曲面经过每一个采样点。

克里金插值法是以变异函数理论和结构分析为基础，充分地利用在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法。

反距离加权插值法是基于相似相近的原理，以预测点（x，y）和已知采样点（x_i，y_i）之间的距离为权重进行加权平均，距离预测点越近的采样点权重越大。

局部多项式法的基本思想是对指定区域的采样数据进行最小平方拟合给出多项式，采用多个多项式，并且每个多项式都处在特定重合的邻域内，对全局进行插值。

最小曲率法是假设一个弹性薄片受到一系列沿表面离散分布的垂向力 f_i（i=1，2，…，n'）的作用，则这个薄片在所有穿过离散点的曲面中具有最小曲率。

用 $\theta^*_{max}/(C+1)_{3D}$ 评估结构面粗糙度水平，$\theta^*_{max}/(C+1)_{3D}$ 值愈大，结构面愈粗糙，反之亦然[40]。将同一样本的两种点云在同一坐标系中进行配准，以两个点云之间的均方根误差 RMSE 和平均中间高度的相对误差 δ_D 作为两者之间的差异度量：

D 为点云的平均中间高度，可通过下式[41]计算：

$$D=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|z_i| \tag{4}$$

式中：N 为点云总点数。

RMSE 为

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(z_1-z_2)^2}{N}} \tag{5}$$

式中：z_1 和 z_2 为原始点云和重构点云中点的垂直坐标。

δ_D 为

$$\delta_D = \left|\frac{D_1 - D_2}{D_1}\right| \times 100\% \qquad (6)$$

式中：D_1 和 D_2 为原始点云和重构点云的平均中间高度。

RMSE 和 δ_D 的值越小，说明重构点云愈接近原始点云，重构的精度愈高。

选取不同的轮廓采样间隔（PI 分别为 15、30、45 mm）绘制样本 E 多条平行轮廓曲线，用上述 6 种空间插值方法进行结构面三维形貌重构。插值间隔与三维激光扫描仪的扫描精度均设置为 0.5 mm。通过式（5）、（6）计算 RMSE 和 δ_D。结果如图 10、11 所示，相较于其他空间插值方法，使用 Griddata 函数法得到的 RMSE 和 δ_D 结果最小，表明两种点云之间的差异程度最小，重构的结构面更接近真实结构面。

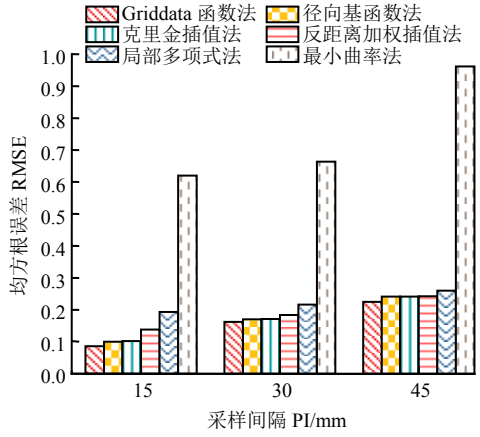


图 10　采用 6 种空间插值方法计算不同轮廓采样间隔条件下得到的 RMSE

Fig.10　RMSE calculated by six spatial interpolation methods under different profile intervals

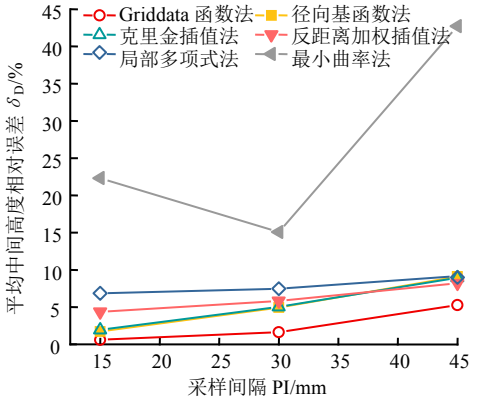


图 11　采用 6 种空间插值方法计算不同轮廓采样间隔条件下得到的 δ_D

Fig.11　δ_D calculated by six spatial interpolation methods under different profile intervals

以 30 mm 为采样间隔，绘制样本 A 和样本 C 的多个平行轮廓，同样用上述方法进行结构面重构。分别计算样本 A、样本 C 的 RMSE 和 δ_D。结果见表 4、5。对于不同粗糙度的结构面样本，Griddata 函数法仍然是重构过程中空间插值方法的最佳选择，其可靠性不会因粗糙度的变化而有所波动。

表 4　采用 6 种空间插值方法计算不同粗糙度水平条件下得到的 RMSE

Table 4　RMSE calculated by six spatial interpolation methods under different roughness levels

空间插值法	样本 A		样本 C		样本 E	
	RMSE /mm	排名	RMSE /mm	排名	RMSE /mm	排名
Griddata 函数	0.218 8	1	0.226 1	1	0.162 2	1
径向基函数法	0.253 5	2	0.244 4	2	0.170 1	2
克里金插值法	0.255 4	3	0.246 1	3	0.171 2	3
反距离加权插值法	0.272 6	4	0.270 1	4	0.183 4	4
局部多项式法	0.312 1	5	0.305 9	5	0.216 2	5
最小曲率法	0.769 6	6	0.785 0	6	0.664 1	6

表 5　采用 6 种空间插值方法计算不同粗糙度水平条件下得到的 δ_D

Table 5　δ_D calculated by six spatial interpolation methods under different roughness levels

空间插值法	样本 A		样本 C		样本 E	
	δ_D/%	排名	δ_D/%	排名	δ_D/%	排名
Griddata 函数	3.290	1	3.477	1	1.637	1
径向基函数法	6.853	2	9.212	2	4.944	2
克里金插值法	7.094	3	9.618	3	5.035	3
反距离加权插值法	8.081	4	9.897	4	5.831	4
局部多项式法	12.533	5	16.254	6	7.468	5
最小曲率法	15.636	6	15.836	5	15.083	6

上述研究表明，不同轮廓采样间隔、不同粗糙度水平都不会影响 Griddata 函数法在结构面三维形貌重构中的精度。相较于其他方法，Griddata 函数法拥有良好的可靠性与稳定性，是结构面三维形貌重构中空间插值方法的最适选择。

6　实例验证

确定合理的空间插值方法和轮廓采样间隔后，该方法可用于岩石结构面三维形貌的大量重构，实现野外结构面信息的快速获取。为验证该方法可靠性，从采石场收集另外 4 个尺寸为 100 mm×100 mm 的结构面样本（样本 G～J）进行验证。按前述方法，提取 4 个样本相应的原始点云和重构点云（见图 12）。将 4 个样本分为两组：样本 G、H；样本 I、J。其中，样本 G、H 用于试验验证，样本 I、J 用于理论验证。

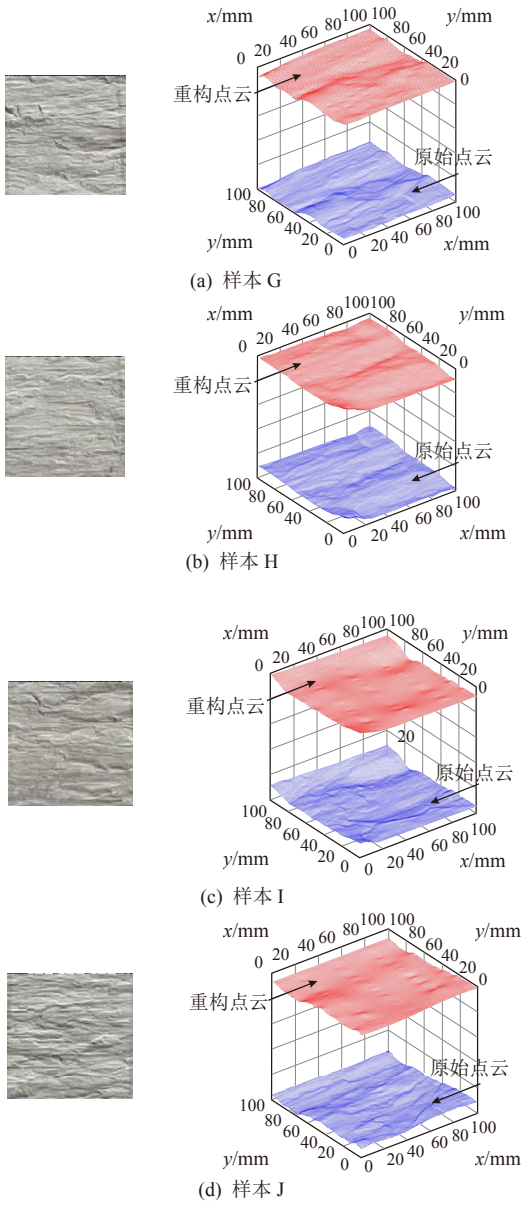


图 12 4 个样本及其原始和重构的点云

Fig.12 Four samples and their original and reconstructed point clouds

根据式（2）、（3）计算样本 I、J 的峰值抗剪强度和相对误差。结果如表 6 所示，τ_{p1} 均大于相应的 τ_{p2}，原因可能是重构过程中不可避免地忽略了一些结构面微观形貌特征。4 组样本的峰值抗剪强度相对误差 δ_{τ_p} 均小于 5%，满足工程应用要求。

根据样本 G、H 的点云，打印其岩块试样。根据岩石矿物成分和岩石结构面的基本物理力学参数（见表 2）确定各种原材料的混合比，结果如表 7 所示。为验证该方法的可行性，本试验选用美国 GCTS 公司 RDS-200XL 全自动伺服控制岩石直剪仪进行试验验证，试验的法向应力 σ_n 设置为 0.5 MPa 和 2.5 MPa，剪切速度选择国际岩石力学与岩石工程学会[42]建议的 0.2 mm/min，最大剪切位移限制为 15 mm。

表 6 结构面样本的理论计算结果

Table 6 Theoretical calculation results for the rock joint samples

结构面样本	σ_n=0.5 MPa			σ_n=2.5 MPa		
	τ_{p1}/MPa	τ_{p2}/MPa	$\delta\tau_p$/%	τ_{p1}/MPa	τ_{p2}/MPa	$\delta\tau_p$/%
I	0.698 8	0.669 2	4.24	3.185 2	3.042 7	4.47
J	0.696 6	0.672 2	3.50	3.168 0	3.027 8	4.43

表 7 原材料的配合比

Table 7 The mixture ratio of raw materials

水胶比	质量配合比			砂细度模数
	高效减水剂/水泥	硅灰/水泥	水泥/砂	
0.3:1.0	1:84	1:10	1.0:1.5	2.5

试验结果如表 8 所示，4 组样本的峰值抗剪强度相对误差 $\delta\tau_p$ 均小于 5%，满足工程应用的要求。

表 8 结构面样本的试验结果

Table 8 Test results for the rock joint samples

结构面样本	σ_n=0.5 MPa			σ_n=2.5 MPa		
	τ_{p1}/MPa	τ_{p2}/MPa	$\delta\tau_p$/%	τ_{p1}/MPa	τ_{p2}/MPa	$\delta\tau_p$/%
G	0.718	0.685	4.60	2.653	2.531	4.60
H	0.689	0.661	4.06	2.565	2.460	4.09

通过两组样本，分别从理论、试验两个方面检验该方法的可靠性。结果表明，8 对试样的峰值抗剪强度相对误差 $\delta\tau_p$ 均小于 5%，可满足工程应用的精度要求。

7 结 论

（1）基于轮廓曲线仪的接触式测量方法具有较高的可靠性，能够满足结构面三维重构的精度需求。通过分析单线组、多线组的相似度以及尺寸变化对相似度的影响，发现手绘轮廓曲线与对应结构面表面真实起伏拥有很好的吻合程度。

（2）分别从不同粗糙度、不同采样间隔角度，证明 Griddata 函数法是岩石结构面三维重构中空间插值法的最适选择，相较于其他方法 Griddata 函数法的精度更高，可靠性更好。

（3）PI 的准确选取，对于测定的结构面粗糙度精度具有显著的影响作用。

（4）经过试验、理论检验该方法的有效性，证明该方法能够满足野外快速获取结构面三维形貌数据的需求，具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
SUN Guang-zhong. Rock mass structure mechanics[M].

Beijing: Science Press, 1988.

[2] 陈祖煜. 岩质边坡稳定分析: 原理・方法・程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
CHEN Zun-yu. Rocky slope stability analysis: principle・methodology・procedure[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.

[3] 杜子建, 高永涛, 朱俊等. 基于 REV 的岩质边坡力学参数模拟试验方法[J]. 工程科学学报, 2009, 31(2): 139-143.
DU Zi-jian, GAO Yong-tao, ZHU Jun, et al. Simulation test method of rocky slope mechanical parameters based on REV[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2009, 31(2): 139-143.

[4] 王晓明, 郑银河. 裂隙岩体表征单元体及尺寸效应研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 3456-3464.
WANG Xiao-ming, ZHENG Yin-he. Progress in the study of fractured rock characterization unitary and size effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(12): 3456-34649.

[5] 杜时贵, 潘别桐.黄河小浪底水库风雨沟西侧边坡稳定性研究[J]. 地球科学, 1992, 17(6): 709-718.
DU Shi-gui, PAN Bie-tong. Study on the stability of the slope on the west side of the storm ditch of Xiaolangdi Reservoir of Yellow River[J]. **Earth Science**, 1992, 17(6): 709-718.

[6] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. **Rock Mechanics**, 1977, 10(1): 1-54.

[7] HONG E S, LEE J S, LEE I M. Underestimation of roughness in rough rock joints[J]. **International Journal For Numerical and Analytical Methods Geomechanics**, 2008, 32(11): 1385-1403.

[8] GRASSELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(6): 789-800.

[9] ÖZVAN A, DINÇER İ, ACAR A, et al. The effects of discontinuity surface roughness on the shear strength of weathered granite joints[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2014, 73(3): 801-813.

[10] ZHANG X B , JIANG Q H , KULATILAKE P H S W, et al. Influence of asperity morphology on failure characteristics and shear strength properties of rock joints under direct shear tests[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2018, 19(2): 04018196.

[11] LIU Q S, TIAN Y C, JI P Q, et al. Experimental investigation of the peak shear strength criterion based on three-dimensional surface description[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2018, 51(3): 1005-1025.

[12] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. **Engineering Geology**, 1973, 7(4): 287-332.

[13] 吉锋, 石豫川, 冯文凯. 一种新型的结构面起伏形态测量工具——接触打孔器的研制[C]//第三届全国岩土与工程学术大会论文集. 成都: 四川科学技术出版社, 2009.
JI Feng, SHI Yu-chuan, FENG Wen-kai. Development of a new tool for measuring the undulation pattern of structural surfaces- contact punch[C]//Proceedings of the 3rd National Geotechnical and Engineering Academic Conference. Chengdu: Sichuan Science & Technology Press, 2009.

[14] 杜时贵. 简易纵剖面仪及其在岩体结构面粗糙度系数研究中的应用[J]. 地质科技情报, 1992, 11(3): 91-95.
DU Shi-gui. Simple longitudinal profilometer and its application in the study of roughness coefficient of rock structure surface[J]. **Geological Science and Technology Information**, 1992, 11(3): 91-95.

[15] FARDIN N, STEPHANSSON O, JING L. The scale dependence of rock joint surface roughness[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38(5): 659-669.

[16] 黄曼, 洪陈杰, 杜时贵, 等. 岩石结构面形貌分级方法及两级粗糙特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1153-1164.
HUANG Man, HONG Chen-jie, DU Shi-gui, et al. Study of rock structure surface morphology classification method and two-level roughness characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(6): 1153-1164.

[17] 侯钦宽, 雍睿, 杜时贵, 等. 结构面粗糙度统计测量最小样本数确定方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1259-1269.
HOU Qin-kuan, YONG Rui, DU Shi-gui, et al. Minimum sample size determination method for statistical measurement of structural surface roughness[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(4): 1259-1269.

[18] 陈世江, 朱万成, 于庆磊, 等. 基于多重分形特征的岩体结构面剪切强度研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 703-710.
CHEN Shi-jiang, ZHU Wan-cheng, YU Qing-lei, et al. Study on shear strength of structural surface of rock mass based on multiple fractal features[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 703-710.

[19] LI Q H, SONG D Q, YUAN C M, et al. An image recognition method for the deformation area of open-pit

rock slopes under variable rainfall[J]. **Measurement**, 2021, 188: 110544.

[20] BELEM T. HOMAND-ETIENNE F. SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000, 33(4): 217-242.

[21] GRASSELLI G, EGGER P. Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(1): 25-40.

[22] WEISSBACH G. A new method for the determination of the roughness of rock joints in the laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1978, 15(3): 131-133.

[23] TATONE B S A, GRASSELLI G. A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47 (8): 1391-1400.

[24] ZHAO Y L, ZHANG C S, WANG Y X, et al. Shear-related roughness classification and strength model of natural rock joint based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2021, 137: 104550.

[25] YONG R, GU L, YE J. et al. Neutrosophic function with NNS for analyzing and expressing anisotropy characteristic and scale effect of joint surface roughness[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2019, 2019: 8718936.

[26] ALT H, GODAU M. Computing the Fréchet distance between two polygonal curves[J]. **International Journal of Computational Geometry & Applications**, 1995, 5(1): 75-91.

[27] EITER T, MANNILA H. Computing discrete Fréchet distance[J]. **Computer Science, Economics, Mathematics**, 1994, 64(3): 629-637.

[28] WANG J F, XU C D, TONG S L, et al. Spatial dynamic patterns of hand-foot-mouth disease in the People's Republic of China[J]. **Geospat Health**, 2013, 7(2): 381-390.

[29] 王洪申, 汪勇, 汪雨蓉. 三维自由曲线的相似性比较算法[J]. 机械设计, 2019, 36(11): 91-95.
WANG Hong-shen, WANG Yong, WANG Yu-rong. Similarity comparison algorithm for three-dimensional free curves[J]. **Mechanical design**, 2019, 36(11): 91-95.

[30] RUI Y, JUN Y, BO L, et al. Determining the maximum sampling interval in rock joint roughness measurements using Fourier series[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2018, 101: 78-88.

[31] LI Y, XU Q, ADNAN A. Uncertainties in estimating the roughness coefficient of rock fracture surfaces[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2017, 76: 1153-1165.

[32] ABOLFAZLI M, FAHIMIFAR A. An investigation on the correlation between the joint roughness coefficient (JRC) and joint roughness parameters[J]. **Construction and Building Materials**, 2020, 259(11): 120415.

[33] BAN L, DU W, QI C. A modified roughness index based on the root mean square of the first derivative and its relationship with peak shear strength of rock joints[J]. **Engineering Geology**, 2020, 279: 105898.

[34] BAO H, XU X, LAN H, et al. A new joint morphology parameter considering the effects of micro-slope distribution of joint surface[J]. **Engineering Geology**, 2020, 275: 105734.

[35] TATONE B S A. Quantitative characterization of natural rock discontinuity roughness in-situ and in the laboratory[D]. Toronto: University of Toronto, 2009.

[36] DU S G , LIN H, YONG R, et al. Characterization of joint roughness heterogeneity and its application in representative sample investigations[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2022, 55(6): 3253-3277.

[37] HUANG M, HONG C, DU S G, et al. Experimental technology for the shear strength of the series-scale rock joint model[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53(8): 1-19.

[38] HANSELMAN D, LITTLEFIELD B C. Mastering MATLAB 5: a comprehensive tutorial and reference[M]. New Jersey: Prentice Hall Upper Saddle River, 1997.

[39] BRESNAHAN T, DICKENSON K. Surfer 8 self-paced training guide[M]. [S. l.]: Golden Software Inc., 2002.

[40] TATONE B S A, GRASSELLI G. A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials[J]. **Review of Scientific Instruments**, 2009, 80(12): 181-106.

[41] JIANG Q, FENG X T, GONG Y H, et al. Reverse modelling of natural rock joints using 3D scanning and 3D printing[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 73: 210-220.

[42] MURALHA J, GRASSELLI G , TATONE B. S. A, et al. ISRM suggested method for laboratory determination of the shear strength of rock joints: revised version[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2014, 47(1): 291-302.