

文章编号:1005-0930(2023)06-1339-022 中图分类号:U452 文献标识码:A
doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2023.06.001

岩体结构面信息采集及识别方法研究进展

朱合华¹, 潘柄屹¹, 武威¹, 黄勇²,
刘剑³, 李华明⁴

(1.同济大学地下建筑与工程系,上海 200092;2.中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043;3.中电建冀交高速公路投资发展有限公司,河北 石家庄 050090;4.四川乐汉高速公路有限责任公司,四川 乐山 614099)

摘要:识别结构面并获取其几何信息对于岩体结构分析有重要意义,为边坡稳定性分析、隧道稳定性预测、工程岩体质量分级、隧道支护设计等提供了数据基础。传统结构面信息采集方法效率低、风险高、精度低,难以获取结构面规律性特征,因此迫切需要发展智能化的信息采集与识别方法。梳理了以三维激光扫描和摄影测量为代表的非接触测量信息采集技术的应用现状;从结构面产状及分组、迹线、间距特征出发,总结了以聚类法、区域生长法、神经网络法为代表的国内外相关识别提取算法研究进展;最后从岩体块度识别、边坡稳定性分析、隧道围岩智能分级与动态支护设计3方面探讨了结构面信息采集及识别方法的应用方向。研究表明:对于实现岩体结构的快速自动分析,发展和采用适用于工程的高精度、高效率信息采集技术是重要前提,结合地质构造信息进行精细化结构面识别算法研究是重要内容,构建全流程自动化的系统是全面保障。

关键词:岩体结构面;智能识别;摄影测量;三维激光扫描;聚类;区域生长;神经网络

岩体通常由大量结构面和经结构面切割形成的几何复杂、规模多变的结构体组成,整体呈现出非均质、不连续及各向异性等特征。作为岩体内部力学性质最为薄弱的地质界面,结构面是决定岩体力学性质及稳定性的重要因素^[1]。考虑到结构面成因的复杂性,其分布具有随机性和不确定性,但自然状态下岩体结构面有着成组的特性,具备一定的规律性。断层、节理、层理、软弱夹层及不整合面均为岩体中常见的结构面,许振浩等^[2-4]创新性地提出以岩体结构面等不良地质影响带内岩石微观结构、地球化学和矿物学特征的规律性变化作为标志的识别方法,实现了对不良地质的识别能力从定性到半定量、量化的有效提高。识别结构面并进一步获取其几何信息对于获取结构面分布的规律性有重要意义,结合结构面规律性特征可以进行边坡稳定性分析、隧道稳定性预测^[5]、工程岩体质量分级、隧道支护设计等工作,因此识别结构面并且提取相关几何信息一直是岩体工程中的一

收稿日期:2023-05-15;修订日期:2023-11-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42272338,41902275);国家重大科研仪器研制项目(41827807)

作者简介:朱合华(1962—),男,教授,博士生导师.E-mail:zhuhehua@tongji.edu.cn

通信作者:武威(1986—),男,副教授,博士生导师.E-mail:weiwu@tongji.edu.cn

项重要工作.

目前,工程中常使用的地质素描方法依赖于现场工程师使用地质罗盘或测线对裸露的结构面进行接触式测量,经记录后再进行统计分析.传统的人工采集方法存在诸多问题:①受到采样困难、人为因素、采样方式选择和仪器误差影响,导致精度较低;②对于高边坡或者隧道掌子面,存在部分难以测量的区域,导致测量不完整(图1);③不稳定岩块崩塌掉落对作业人员造成危险;④测量耗时较长,数据难以及时上传、保存、分析及分享.因此亟需高效、准确、自动化的岩体结构测量和分析方法.

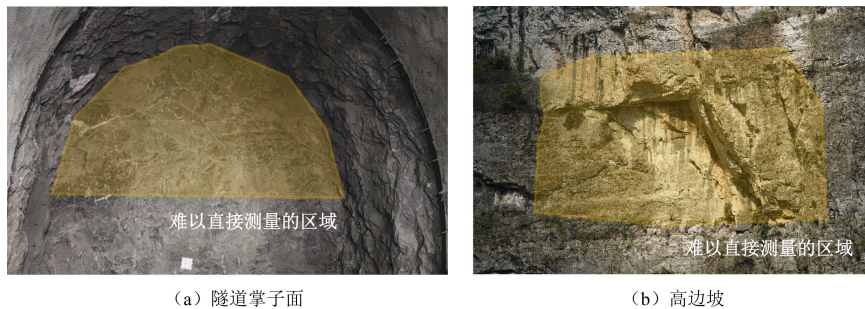


图1 难以测量的区域示意

Fig.1 Areas difficult to measure

随着测量技术的发展,非接触测量技术逐渐被应用于岩体结构面信息采集工作^[6-7],为解决传统方法所面临的问题提供了新思路.早在20世纪70年代,Lane等^[8]提出了基于二维摄影的图片解译法以获取节理的走向以及迹线的长度,但是需要人工辅助,所得的信息有限.近年来,摄影测量法有较大进展,不仅可以基于图像获取二维的岩体结构信息,还可以通过三维重构技术基于2张或多张图像获取岩体结构面的三维点云,进而进行结构面信息的提取,具有低成本、易操作、高效率的特点.相较之下,三维激光扫描法扫描精度更高,可达毫米级甚至更小,但扫描耗时长,仪器价格较昂贵.基于非接触测量技术获取的三维点云,国内外学者开展了大量结构面识别与信息提取的工作.

1 岩体结构面信息采集技术进展

非接触测量技术的大力发展,使得现场工作人员无需再接触现场就可以进行岩体结构面的信息采集,可以有效解决高边坡和危险区域难以测量的问题.根据使用设备和原理的不同,可以将非接触测量法分为摄影测量法和三维激光扫描法.

1.1 摄影测量法

摄影测量法利用数码照相技术可以快速地获取岩体出露面的二维图像,从早期通过二维图像的解译直接提取出结构面几何特性的信息发展到可以通过三维重构获取三维结构信息.早在20世纪70年代Lane等^[8]便进行了摄影测量法的尝试,随后逐渐发展.20世纪90年代,日本清水东亚计测等会社开发完成了一套基于数字图像的隧道掌子面地质图像处理系统,该系统由地质人员在拍摄到的隧道掌子面图像上书写地质信息,然后编纂观察日记,结合现场开挖方式在图像上进行切割和处理,一定程度上提高了工作效率,实现

了地质信息数据库化.早期的摄影测量主要是为了记录现场信息,需绘制掌子面素描图,将分析结果标注在素描图上^[9],后期仍需大量人工操作.吴志勇等^[10]对数码摄像机采集的裂隙图像应用人眼立体视觉能力进行了解译,但是仍需人工划线,缺少三维信息,解译的产状误差较大.Reid 等^[11]、Lemy 等^[12]运用摄影测量和图像处理技术,对隧道掌子面进行了初步的统计分析,在提取裂缝信息方面进行了研究,还提出了三维地质建模的概念,在数字化上更进一步.范留明等^[13]运用摄影测量法获取了二维岩体裂隙图像并进行了裂隙自动识别的尝试.周春霖等^[14]运用红外照相技术实现了掌子面摄影测量,解决了隧道内清晰影片获取的问题.冷彪等^[15-17]对采用摄影测量法获取的二维图像信息的自动提取进行了较长时间的研究,实现了二维图像上裂隙的自动识别统计与分组.王诗言^[9]采用摄影测量法获取二维图像并进行裂隙信息自动提取的研究.随着三维重建技术的发展,通过图像可以重构岩体结构面三维模型,进而进行三维结构信息提取,国外代表性的系统有澳大利亚的 Sirovision^[18]、奥地利 3GSM 公司的 ShapeMetriX3D、澳大利亚 ADAM Technology 的 3DM Analyst.这些系统多采用普通数码相机,通过双目视觉原理重建岩体三维模型.基于双目系统众多学者开展了大量相关的研究.于天亮^[19]、杨天鸿等^[20]、王述红等^[21]、赵兴东等^[22]借助基于双目视觉成像原理的 ShapeMetriX3D 进行了岩体结构面结构信息采集与提取的研究;李术才等^[23]、张延欢等^[7]借助基于双目视觉成像原理的 Sirovision 系统进行了岩体结构面的三维重建与信息提取;陈建琴等^[24]基于单相机双目三维重建技术获得了掌子面三维点云模型,并进行了岩体间距和粗糙度特征参数自动化提取的研究.但是双目系统操作较复杂,现场耗时较长,同时大多要求拍摄环境较好,识别的自动化程度低^[24].双目系统采集现场如图 2 所示.

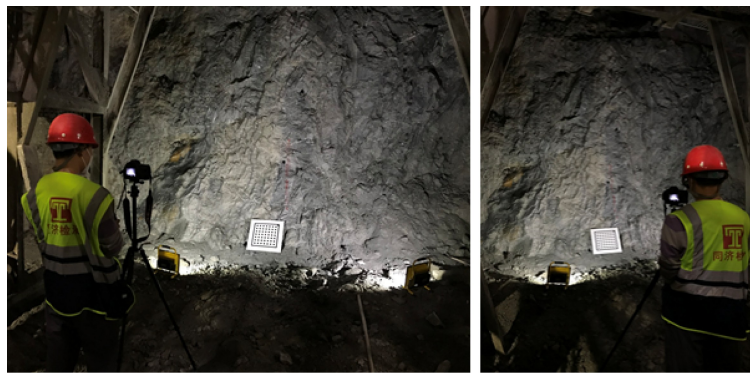


图 2 双目系统现场作业

Fig.2 Schematic diagram of on-site operation of binocular system

随着计算机视觉技术的高速发展,多目视觉技术已经成为了三维重建的新研究领域^[25].相比双目成像技术操作仍较繁琐,易受干扰且耗时较长的问题,在岩体结构面信息采集中,采用多目数字重构技术可以快速实现信息采集,且满足工程所需精度,操作便捷.多目视觉技术是双目技术的一种延伸,通过在双目视觉的基础上,增加 1 台或多台照相设备或者采用单设备多视角的方式作为辅助来进行测量^[26-27],以得到同一物体不同角度下

的多张图像.通常使用运动恢复结构(SfM)方法^[28],对1组图像中特征点进行检测以实现特征点的匹配,通过计算实现相机自标定、立体匹配等操作,得以完成待测物体的三维重建(图3).目前,多目数字重构技术广泛应用在岩体边坡的信息采集中,采用无人机拍摄^[29-39]配合地面相机拍摄^[29]的方式,大大减少了测量盲区,测量位置选取更灵活,获得的测量范围更大.在隧道开挖现场采用手持移动设备(高清拍照手机、相机等)即可进行拍摄(图4),依据多目成像技术生成三维模型^[40],对工程进度影响小,工程适用性较高.但是作为一种被动视觉技术,多目视觉要求环境光照条件好,在暗光环境中(例如隧道掌子面)需要进行多角度补光以提高亮度,消除阴影.

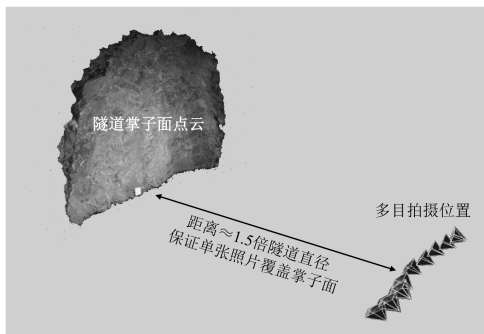


图3 多目系统原理

Fig.3 Schematic diagram of multi-vision system



图4 基于移动设备的现场图像采集

Fig.4 On-site image acquisition based on mobile devices

1.2 三维激光扫描法

目前三维激光扫描仪主要分为静态架站式激光扫描仪和移动式激光扫描仪.在岩体结构扫描中架站式激光扫描仪有了较长时间的应用发展,实现了远距离、大范围、高精度的三维重构.1999年Kocak等^[41]尝试将三维激光扫描技术应用在海底岩体露头的勘测中.2005年Slob等^[42]利用激光扫描仪获取了岩体边坡的点云数据,取得了一些初步成果.随着3D激光雷达技术在国内的推广,国内学者也基于三维激光扫描技术对岩体结构面测量进行了相关研究.董秀军等^[43]在2006年较早地使用三维激光扫描仪获取边坡岩体三维点云并进行简单测量,指出三维激光扫描在结构面测量的应用前景.何秉顺等^[44]使用三维激光扫描仪采集出露岩体点云数据并初步对比研究了半自动和自动识别方法.施星波^[45]、黄江等^[46]、宁浩^[47]、李杰林等^[48]、梁玉飞等^[49]先后采用三维激光扫描技术获取了岩体结构面的点云数据并进行了进一步的产状提取研究.Pan等^[50]基于三维激光扫描技术,针对岩体节理、层理不同的出露特点,创新性地提出了结构面分级识别与分析方法,实现了岩体由表及里兼具复杂空间结构、几何形态及地理坐标等属性的三维裂隙网络模型构建,并融合复杂空间多源数据开展了地质模型的一体化管理和三维可视化分析工作^[51].但是目前架站式三维激光扫描技术耗时长,所用设备价格昂贵,高精度的三维激光扫描仪依赖进口,且配套的点云数据处理软件价格不菲,给工程实际应用带来了困难^[24],三维激光扫描仪采集现场如图5所示.

与移动受限和只具备有限视野的静态架站式激光扫描仪相比,移动式激光扫描仪(MLS)可以高效高机动性地实现多视图数据收集.考虑到静态架站式激光扫描仪在一个视点需几分钟到几十分钟才能完成扫描,移动式激光扫描仪可以动态扫描,覆盖面积大,减少了盲区,提高了扫描效率.虽然精度较架站式有所下降,但可通过多组扫描的方式提高点云密度,在后期处理中进行噪声的数字滤波以提高精度. Singh等^[52]使用移动式激光扫描仪在手持模式下对澳大利亚新南威尔士州的1处岩石露头进行了2组往返扫描(图6^[52]),获取了该段岩石露头的三维模型并进行了结构面识别工作.移动式扫描拥有更少的盲区,并且通过点云处理算法进行了2组点云的合并以及地面植被的剔除,证明了在复杂环境中移动式激光扫描仪的性能鲁棒性.非接触测量法对比见表1.



图5 三维激光扫描系统现场作业照片
Fig.5 Schematic diagram of on-site operation of 3D laser scanning system

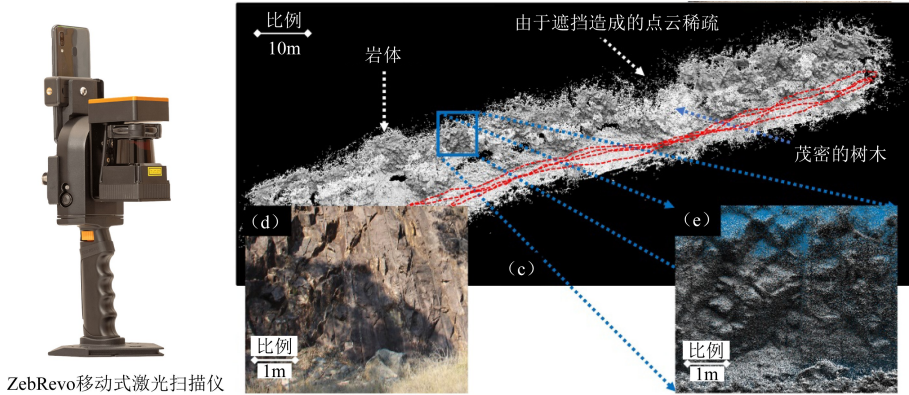


图6 移动式激光扫描仪采集设备及采集结果

Fig.6 Mobile laser scanner equipment and collection results

表1 非接触测量法对比

Table 1 Comparison of non-contact measurement methods

非接触测量法	优点	缺点
摄影测量法	采集迅速	对现场光照条件有要求,二维信息有限
双目三维重建	采集效率较高,成本低	对现场光照条件有要求,操作较复杂
多目三维重建	采集效率高,操作简便	对现场光照条件有要求,效果依赖重建算法
架站式	精度高,范围大	耗时长,设备价格昂贵,测区有限,存在盲区
移动式	精度较高,动态扫描,盲区小	后续点云融合处理耗时

有学者关注到摄影测量法和三维激光扫描法各自的不足,采用摄影测量法获取的颜色纹理信息能力强,但是精度欠佳;采用三维激光扫描法测量精度高,但测区有限,易存在盲区,从而提出了结合以上两种方法获取点云的方法^[53-54],以便进行结构面的识别等. Salvini 等^[55]将传统的地质、地貌和地球工程调查结果与地面激光点云、摄影测量获得的数据相结合,建立了边坡的数字模型,得出了边坡的几何和结构特征,例如节理姿态、间距和连贯性以及块体体积. Pan 等^[51]提出了一种多源复杂空间数据有效融合和分析的集成处理方法.该方法将海量点云模型与数字高程模型相结合,成功应用在深埋矿山的 3D 建模场景和露天矿山的地质施工模型建立中. 司垒等^[56]为了解决煤岩识别中由于煤层与岩层对激光的反射强度不同造成的激光点云分割的欠分割或过分割问题,提出基于图像和激光点云融合的煤岩识别方法,将基于三维重建的图像点云与激光点云使用改进 ICP 方法进行配准融合,获取精细完整的煤岩点云模型后进行煤岩识别. Ismail 等^[57]为了分析高边坡的稳定性,分别使用地面三维激光扫描仪与无人机获取激光点云和图像点云,进行融合后获取了从底到顶的边坡点云,为分析边坡稳定性提供了完整数据. 张荣春等^[58]针对柱状玄武岩边坡,利用相机进行拍摄并进行三维重建,同时使用三维激光扫描仪获取对应区域的点云数据,将两者的点云进行融合,取得较好的效果.

2 岩体结构面识别方法研究进展

国际岩石力学学会 (ISRM) 曾建议使用产状、组数、间距、延续性等 10 个指标^[59]描述结构面. 在岩体结构研究领域,结构面的几何特性描述是一个至关重要的问题,是选取岩体力学参数、评价工程岩体稳定性、确定工程施工方案的重要依据. 为了解决传统方法所面临的问题,在非接触测量法获取的信息基础上,众多学者经过对点云数据的预处理,对结构面产状和分组识别、间距计算、迹线(延续性)获取等方面展开了深入研究.

2.1 结构面产状和分组识别

以三维点云数据为基础,国内外学者对结构面产状识别进行了深入研究. 较为简单的方法是通过在人工判定的结构面点云上选取至少 3 个点,根据这些点进行平面拟合,从而计算平面法向量等,获取结构面产状^[21,44,60-61]. 目前诸多学者利用 Sirovision、ShapeMetriX3D 等双目系统配套软件基于上述方法实现了岩体结构面的快速识别^[7,20,22-23,62-64]. 但是采用此方法识别结构面需大量的人工交互工作,效率低. 为了高效、自动化地进行岩体结构面产状的识别,学者们进行了自动化结构面产状和分组算法的研究. 目前利用三维点云进行结构面产状和分组识别的研究主要采用基于特征聚类方法、依据生长准则的区域生长法以及神经网络等方法.

2.1.1 基于聚类的方法 聚类算法按照某个或某些特征,依据相似性将数据分割成不同的类或者簇. 在结构面分组中,通常依据的是点法向量,可以通过指定半径内所有点的拟合平面的法向量来近似表示,也可以通过 k 最邻近算法 (KNN) 获取指定数目的最近邻点来拟合平面的法向量来表示. 通过最小二乘法拟合法向量将获得沿 Z 轴距离平方和最小的平面^[65],而采用主成分分析的方法 (PCA)^[66] 可以获取点到拟合平面距离平方和最小的平面,拟合效果更好. 考虑到可能存在的噪声点或者不属于该平面的近邻点的情况, Yazdanpanah 等^[67] 提出一种选择性 DetMM 算法,剔除马氏距离大于阈值的噪声点后再进

行平面拟合,相比主成分分析法计算点法向量更准确,但是计算效率慢了 10 倍.由法向量到结构面倾向、倾角的转换可通过式(1)~式(3)实现.Singh 等^[52,68]考虑到点法向量的局限性,先后提出了使用点特征描述符和基于正弦波的振幅相位分解特征来表征点云,丰富了点特征的信息.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{m}{l}\right) + D \quad (1)$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{n}{\sqrt{l^2 + m^2}}\right) \quad (2)$$

式中: θ 为倾向(即独立结构面倾向线在隧道开挖面平面上与正方向的夹角); δ 为独立结构面的倾角; l 、 m 、 n 为法向量; D 为倾向计算的角度系数,定义如下

$$D = \begin{cases} 0^\circ & 1 \geq 0 \text{ 且 } m \geq 0 \\ 180^\circ & 1 \geq 0 \text{ 且 } m < 0 \\ 360^\circ & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

通过相似性判断(通常为点法向量的距离),依据不同的聚类算法可实现对岩体点云所有点的分组.常用的聚类算法可以分为基于划分的聚类、基于层次的聚类、基于密度的聚类、基于图论的聚类等^[69].以 K 均值算法^[70-72]为代表的基于划分的聚类方法可以简便地将岩体点云分成 k 组,但是这种硬划分为每个点直接指定了组别,没有考虑到边界的分组问题.Slob 等^[42]提出了通过模糊 K 均值聚类实现结构面的自动识别,引入了模糊理论,通过隶属度的计算较好地解决了边界分组问题,模糊 C 均值算法也在结构面点云分组中得到广泛应用^[73-75].但是一般情况下聚类簇数 k 值需要预先设定,为此有学者分别采用了轮廓系数 SI^[69]、XB^[76]等来进行最优分组数的判定.此外,初始聚类中心的选择也将影响到聚类的效果.Riquelme 等^[65]提出了使用核密度估计的方法,可以根据密度峰值决定聚类簇数,并且开发了 Discontinuity Set Extractor(DSE)软件,得到了较为广泛的应用^[77-79].Wu 等^[6]使用快速 k -means++ 算法,引入了基向量,通过基向量密度确定初始聚类中心,在面对大规模点云时计算效率有了显著提高.考虑到存在的大量的非结构面随机点云会影响到聚类中心选择的问题,Kong 等^[80]通过结合快速搜索、发现密度峰值(CFSFDP)算法和 Fisher's K 指数对非结构面噪声点进行进一步的剔除,以提高聚类中心的准确性.基于层次的聚类方法将点云分割成众多单元后,再进行凝聚.Dewez 等^[81]在开源软件 CloudCompare 中设计了 Facets 插件,将点云分割成子单元后,根据平面阈值判断凝聚生成多边形.Yan 等^[82]提出改进的凝聚嵌套(MAGNES)算法并且结合了不同的连接标准(单一、完整和平均)来合并两个最接近的聚类.基于密度的聚类常用来在分好组的结构面点云中进一步提取独立结构面^[6,70],以便进行平面拟合计算产状.张化进等^[83]结合 DBSCAN 算法与层次聚类,使用基聚类器,采用多组不同聚类参数进行 H 次聚类后将结果进行筛选、融合以获取结果.考虑到 DBSCAN 算法基于点云密度的单一性,王述红等^[31]混合加入了方向相似性判据、HSI 颜色距离判据及马氏距离判据,以提高算法对点云数据聚类的鲁棒性和准确性.Liu 等^[69]使用基于图论的亲合力传播(AP)算法,该算法具有更快的收敛速度和更强的全局搜索能力,并且对初始聚类中心也不敏感,但是容易受到噪声点云的影响,还需要结合其他聚类方法.

2.1.2 基于区域生长的方法 不同于使用聚类方法进行的结构面分组识别,区域生长法通过选取种子点,依据生长准则对相邻点进行判断,当没有相邻点满足生长准则时即停止生长.在岩体结构面点云识别中,生长对象可以是基于 TIN 三角形网格^[84],也可以基于 KNN 算法获取的近邻点^[85-86],通过法向量的差异性判断进行生长,从而直接获取独立结构面.需要注意的是,初始种子点的选取将影响到计算效率以及生长的效果.Drews 等^[87]按照点云曲率对种子点进行排序,优化了初始种子点的选择,同时结合候选点到平面的距离、候选点和拟合平面的标准差等生长判断准则,提高了区域生长的准确性和精度.此外,区域生长法另一大问题是在面对大规模点云时计算耗时过长,为了缩短在高分辨率大型点云下使用区域生长法的计算时间,Ge 等^[88]将原始点云转化为具有均匀间隔的网格数据,其中每个点均可以通过行和列索引进行访问,依据点云索引仅需使用 4 个近邻点来估计法向量,生长过程中节省了点云的数据检索和处理时间,同时也增加了更多相邻点作为种子点的生长准则.Hu 等^[89-90]在区域生长的原理上采用体素单元,首先在体素单元内利用区域生长法寻找平面,而后基于体素单元进行生长,在生长得到的结果中再进行生长以剔除非平面点云,结合体素的三阶段区域生长法(图 7^[90])提高了计算效率以及独立结构面识别的准确性,但是算法参数需要通过不断测试来确定.区域生长法的结构面识别效果较聚类算法更好,但是目前广泛依赖于参数的精确选择,面对不同粗糙度的岩体点云需根据测试结果进行调整,识别结构面后还需联合聚类方法进行分组处理.

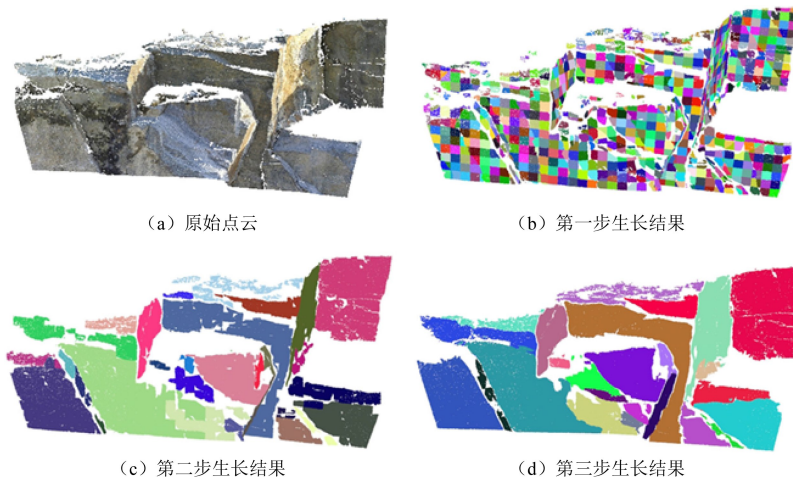


图 7 结合体素的三阶段区域生长法

Fig.7 The triple-region growing method combined with voxel

2.1.3 基于神经网络的方法 神经网络作为机器学习的一个分支,由于其在解决岩石力学和地质灾害感性评估领域的复杂问题方面的有效性,在岩体研究中的应用有了显著增加^[88],Xu 等^[91-92]将机器学习与传统地质学充分结合,提出基于深度学习的岩性智能识别方法,创新性地利用神经网络深度融合图像与光谱数据^[93],构建了多源信息融合识别框架,开发了轻量化快速识别模型^[94],实现了现场岩性快速、准确识别,为岩体感知奠定了地质基础.与基于统计或者回归的方法相比,使用人工神经网络不需要建立模式识别、

分类以及数据聚类的精确标准,可以通过学习训练数据提取特征,从而建立预测模型来预测新数据.Ge 等^[95]训练了一个前馈神经网络对边坡点云进行识别分组,开发了 DisDetANN 软件,采用了 3 层的网络结构,将点云坐标、法向量、曲率、密度 4 个特征作为输入,通过选取几十个标记好分组的点作为训练集,对模型进行训练,获得了整个点云的识别分组结果(图 8^[95]).经过训练的神经网络相比改进的区域生长法有明显的计算效率优势,但是考虑到针对该点云训练集的选取、标记用时,优势并不明显。

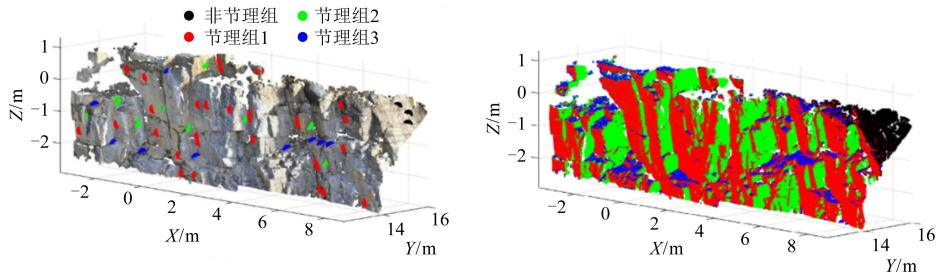


图 8 人工神经网络的训练集及输出结果

Fig.8 Training set and output results of the artificial neural network method

2.2 迹线识别

结构面与岩体出露面的交线表现为线性特征,视为迹线.二维图像处理技术率先被应用在提取结构面出露的迹线.1998 年 Fitton 等^[96]提出优化的霍夫变换法,通过选择两个参数达到了较好的岩体裂隙识别效果.Reid 等^[11]首先将拍摄照片转化为灰度图像,得到图像的立体灰度高程图,将迹线以三维沟渠形式展现出来.2003 年 Lemy 等^[12]分别利用 Sobel、Canny 边缘检测算法和 3 种线检测算法对不同条件的岩体图像进行几何特征识别.2004 年范留明等^[13]采用基于边缘法和区域法的图像分割技术以及基于 Hough 变换的特征提取与分类实现了岩体裂隙图像的智能解译.2009 年周春霖^[97]结合神经网络利用图像分割算法实现二维图像上的迹线提取与测量.2013 年冷彪等^[17]采用数字图像处理技术对隧道掌子面图像进行了比例缩放、亮度和对比度调节,采用 Canny 算子进行边缘检测与提取,通过统计分析得到节理组数、平均裂隙间距等,同时经处理还实现了隧道三维模型的建立,基于模型进行了开挖面前方的预测.2016 年宋珺敏^[98]采用“像素骨架”的骨架提取法从二维图像中获取迹线,在配准的点云中进行映射,从而实现了空间迹线特征的识别提取.2018 年王诗言^[9]利用改进的 Hough 变换以及 Livewire 算法对掌子面裂隙进行线性成组提取和磁性追踪提取,得到了清晰明确的结果,解决了因隧道环境差造成图像不清的问题.2021 年冷彪等^[16]实现了掌子面裂隙边界线自动识别算法以及自动分组算法,提高了掌子面二维信息提取的自动化程度.尽管目前通过二维图像进行迹线提取的研究较成熟,具备处理快、自动化程度较高的优势,但对岩体的纹理颜色、光照条件等具有较高的要求.随着人工智能技术的飞速发展,诞生了诸多用于图像领域的图像分类、语义分割和目标检测等任务的深度学习算法.通过在隧道掌子面图像信息提取任务中引入卷积神经网络等算法,能够提高图像处理的精度和速度.杨舒好^[99]使用深度学习 VGG_UNet++ 网络模型进行岩体裂隙图像的分割,运用骨架提取、形态学操作等传统图像处理手,提取裂

隙长度、宽度、方位等几何信息.刘克强^[100]采用带有改进空洞卷积的 deeplab V3+框架进行围岩裂隙图像的分割处理,根据图像结果进行裂隙参数的表征.张紫杉等^[101]采用空洞卷积算法对传统的 U-net 分割识别网络进行了改进,同时还引入高斯混合模型-最大期望 (GMM-EM)算法,对裂隙的迹长、方位角等参数进行了标定.Chen 等^[102]提出了基于 CNN 的 FraSegNet 模型,集成了骨架提取算法和基于链代码的折线近似算,进行岩体裂隙的自动分割与迹线识别(图 9^[102]),相比其他深度学习方法和传统方法有更强的像素级迹线提取能力以及降噪能力.

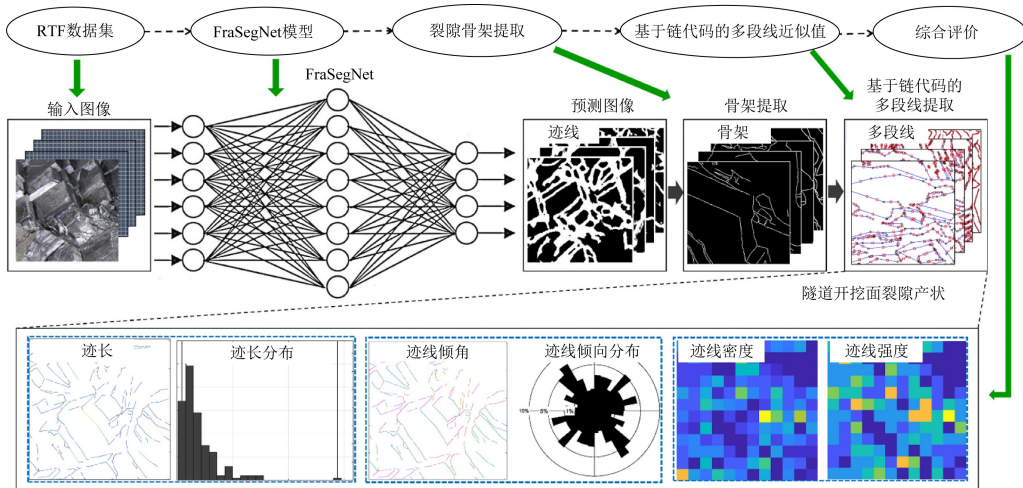


图 9 FraSegNet 迹线提取方法流程

Fig.9 Workflow of the FraSegNet trace extraction method

近年来,随着三维技术的发展,许多学者开始研究从岩体三维点云模型中识别提取迹线,采用三维点云技术可以利用空间位置信息来进行提取识别,且能获得迹线的三维走向信息.一些学者通过人工交互的方式提取迹线^[23,103],该方式工作量大且没有实现自动化.也有学者将识别出的结构面点云的最远两点的连线视为迹线^[38,104],该方法简单直接,实现了迹线与结构面的一一对应,但是与实际可能相差较大.目前较为准确的两种主要方法:①将迹线看做相邻结构面的交线,先进行结构面的识别,然后取相邻结构面的公共点集即为迹线;②根据岩体表面三维模型的顶点的主曲率值的变化来检测组成迹线的点.Li 等^[105]基于张量投票理论结合生长法对三维点云中的迹线进行了提取(图 10),实现了迹线提取的自动化,具备较高精度.Zhang 等^[106]对基于张量投票理论的方法做了改进(图 10),效率得到显著提升,迹线识别更加平滑,能够很好地识别出连续迹线.相较于较为成熟的二维图像识别技术,采用基于三维点云的方法可以获取真实的迹线三维信息,但考虑到三维点云数据量庞大、处理较复杂的特征,将基于二维图像与三维点云的方法结合使用,可以充分发挥两种方式的优点.

2.3 间距计算

根据 ISRM^[59]的规定,间距为相邻的两个不连续面之间的垂直距离,目前计算的方法主要可以分成两种.第一种方法需要提取出独立结构面点云,并且获得其平面方程,此时

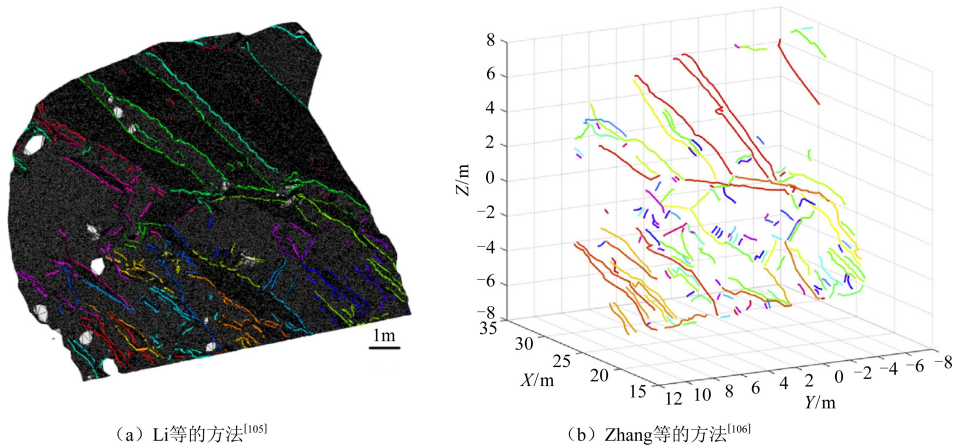
(a) Li等的方法^[105](b) Zhang等的方法^[106]

图 10 三维迹线提取结果对比

Fig.10 Comparison of 3D trace extraction results

可以在三维空间中对拟合的平面进行分析,从而导出间距,具有较好的准确性.同一组内的结构面大部分相互平行,可以将该组的平均法向量赋予每个结构面,在平行状态下通过计算相邻平面的距离从而获取间距^[80,107],此外还可以使用虚拟圆柱体,圆柱体以结构面为底部,在与圆柱体相交的同一组的结构面之间计算平均、最大、最小间距^[108].第二种方法使用迹线的二维投影.利用聚类算法将投影迹线划分为 k 组,将各组内所有投影迹线延伸方向的平均值分别作为各组迹线的平均方向.创建垂直于每组迹线平均方向的测线,通过统计计算测线被迹线分割成的线段长度来获取间距^[24,109].

3 岩体结构面识别应用

3.1 岩体块度识别

纵横交错的结构面相互切割可以构成单独的块体,通常单个块体由3组及以上的结构面构成,其中块体的块度是重要的岩体分级参数,与此同时在爆破设计、地下隧道开挖稳定性计算中也是重要的输入参数.常用的指数估计法和模拟法建立在估计和模拟的基础上,得到的块度信息不精确.陈娜^[110]在结构面识别的基础上提出了基于点云的全自动块体识别方法,利用空间平面相交理论寻找交线,从而获取候选块体,经过过滤后得到真实块体并且计算得到块度,在公路边坡点云中的应用得到较好的效果.Kong等^[111]开发了半自动程序,使用PCMDN方法根据结构面的相交关系进行全尺寸暴露块体的重建(图11^[111]),揭示了岩石表面结构的复杂性.Li等^[112]创新性地提出改进的Persson网格生成算法,解决了裂隙及其近场网格细化与光滑化过渡难题,实现了岩体裂隙与孔隙双重介质网格划分的智能优化,为岩体裂隙建模、块体稳定性分析及渗流计算分析奠定了基础.

3.2 边坡稳定性分析

岩石边坡由层理或节理等结构面和结构体组成.考虑到结构面的存在增强了岩体的各向异性从而导致岩石边坡破坏的复杂性显著增加,如何利用现场采集获取的结构面信息准确表征判断边坡稳定性就显得尤为重要.Wang等^[113]利用无人机进行高陡边坡的摄

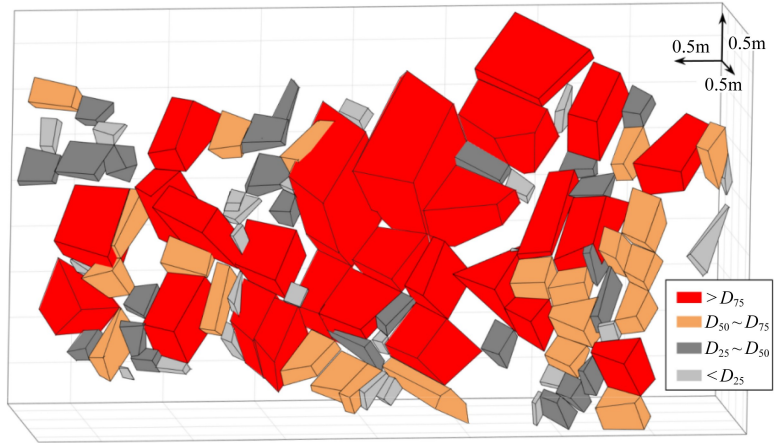


图 11 使用 PCMDDN 方法提取的岩块

Fig.11 Rock blocks extracted using the PCM-DDN method

影测量,建立了厘米级的三维边坡数字露头模型,结合使用二维图像与三维点云对岩体结构面进行了识别,随后,通过运动学分析确定了各种失效模式,基于边坡质量评级(SMR)值和参数岩体空洞率(RCR)来确定岩石边坡的稳定性.Xu 等^[79]通过结构面识别算法提取结构面产状分组以及间距后,在极点图中进行了岩体破坏模式的分析,随后通过开源算

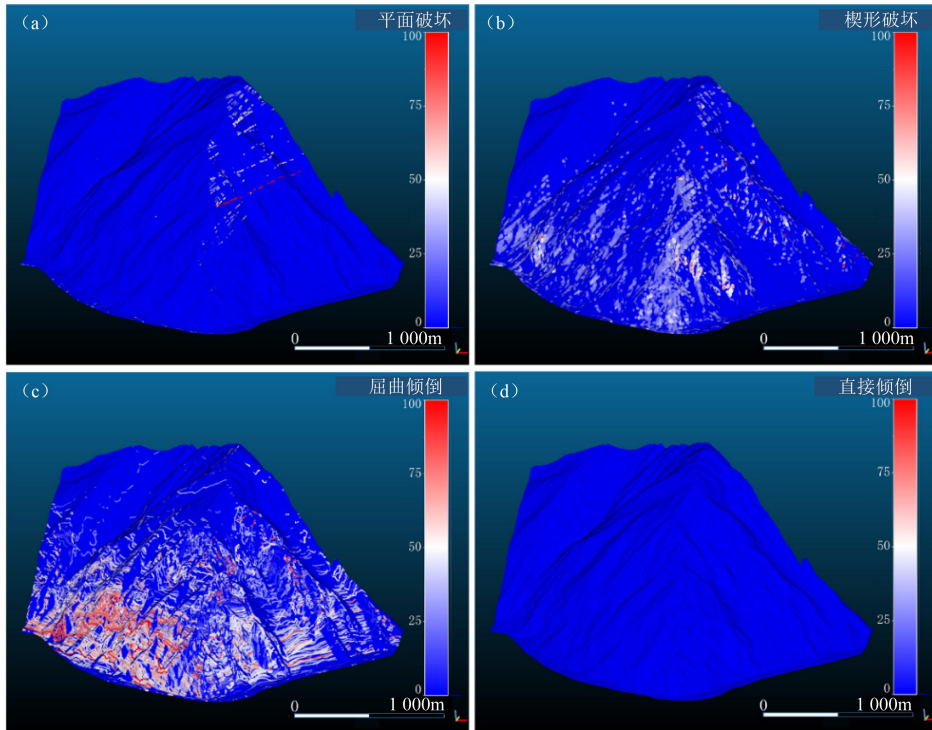


图 12 潜在可能破坏模式的 ROKA 运动学分析结果

Fig.12 Results of ROKA kinematic analysis of possible failure modes

法 ROKA 对大面积区域进行了运动学分析(图 12),可以为大规模的边坡风险评估提供有效的参考。

3.3 隧道围岩智能分级及动态支护设计

支护结构作为岩体隧道施工与运营安全的核心,需要承受各种地质作用及可能的工程灾害.但是在岩体隧道实践中支护设计-施工脱节严重,难以实现一体化动态设计施工,同时现有支护设计技术难以全面满足复杂地质条件隧道建设的安全、经济和工期要求.钻爆法隧道又面临着只有约 1h 的信息采集窗口时间.为实现隧道围岩等级自动判别及动态支护设计,笔者采用了以手持移动设备为核心的平台,基于结构面提取算法,实现了钻爆法隧道支护智能动态设计方法.具体而言,使用手持移动设备拍摄获取隧道掌子面图像,采用多目成像技术进行三维岩体重构以获取掌子面点云.在云端通过快速 k -means++ 算法^[6],利用基向量实现结构面的快速自动识别与分组,提出了快速轮廓系数^[6]以寻找最优分组数,相关计算见式(4).三维迹线的识别先后通过 5 步得以实现:①正则张量投票理论检测迹线特征点;②迹线特征点的收缩算法;③迹线特征点的连接;④迹线段的线性化;⑤迹线段连接(图 13).现场采集掌子面动力回弹数据进行计算,得到岩体质量指标,进而实现自动匹配支护设计图纸,并且及时反馈到现场移动终端,以供施工人员参考(图 14).

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (4)$$

式中: $S(i)$ 为第 i 个基向量的快速轮廓系数; $a(i)$ 为第 i 个基向量和该分组其余所有基向量距离的平均值; $b(i)$ 为第 i 个基向量与其他所有分组中基向量的平均距离的最小值.轮廓值为 $-1 \sim 1$,越大则表示聚类质量越好.

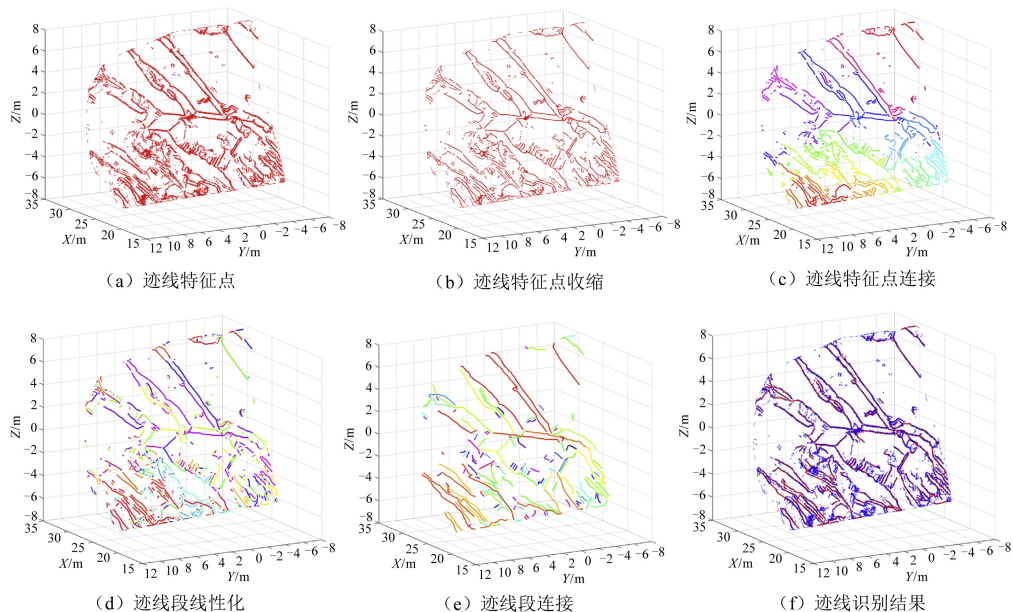


图 13 三维迹线识别流程

Fig.13 The workflow of 3D trace recognition

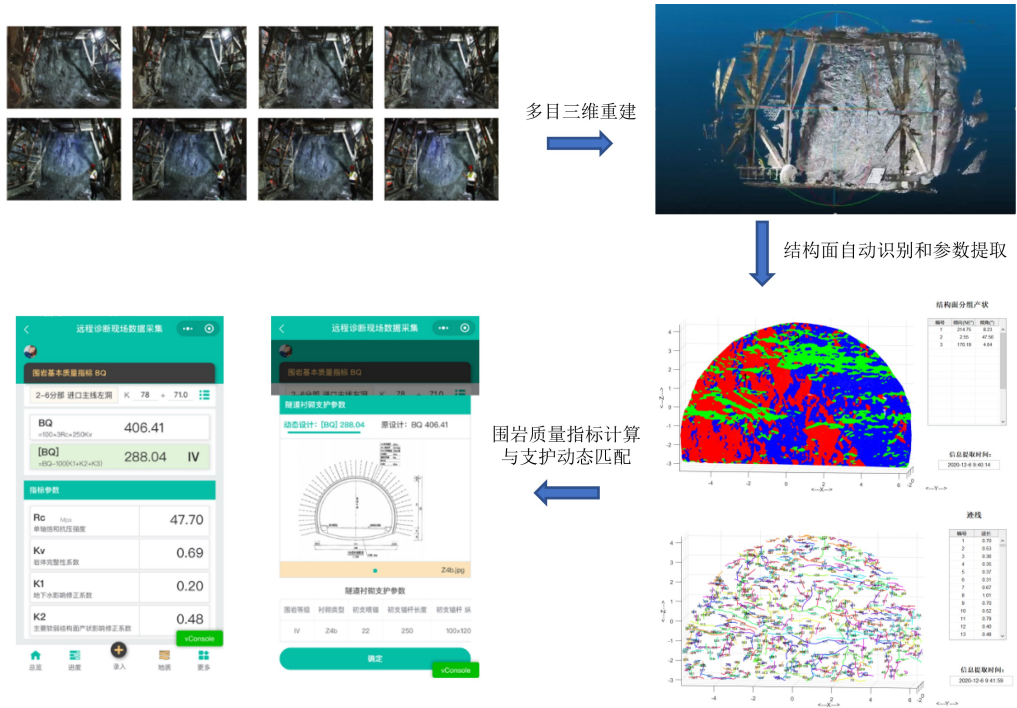


图 14 隧道围岩智能分级及动态支护设计全过程

Fig.14 The entire process of automatic classification of surrounding rock quality and dynamic support design

4 结论与展望

近年来,岩体结构面信息采集技术与识别算法飞速发展,由于其高度智能化,节约了大量人力且实现了信息的充分采集,在边坡稳定性分析、隧道稳定性预测、工程岩体质量分级、隧道支护设计等领域有着广阔的应用空间.但是目前仍然受限于采集技术的工程适用性、算法研究、系统开发等方面的问题,应用还有很大的发展空间,具体表现为:

(1) 对于岩体结构面信息采集技术,目前广泛使用的摄影测量法和三维激光扫描法各有利弊,摄影测量法采集速度快、但是精度较低,三维激光扫描法精度高、但采集速度慢,如何根据应用场景选择合适的信息采集技术以及新兴采集技术的发展将是之后关注的重点;

(2) 对于岩体结构面识别算法的研究,目前主要采用的识别方法注重基于三维点云的几何信息,尚未真正结合岩体构造信息,如何将地质构造知识融入结构面识别算法中,实现对点云中结构面的精准识别仍将是之后研究的重点;

(3) 对于岩体结构面信息采集与识别系统的建设,目前在信息采集技术中,采用开源或商业软件进行摄影测量法的三维重建,或者采用激光扫描仪配套的软件进行点云处理,随后结合算法进行编程识别,但全流程的自动化、智能化尚未实现,需要对信息采集与处理、结构面识别等后续算法进行整合,从而建立起智能化自动化的系统.

参 考 文 献

- [1] 邹先坚,王川婴,宋欢.全景钻孔图像自动识别技术在工程实践中的应用研究[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(1):246-256
Zou Xianjian,Wang Chuanying,Song Huan.Application of automatic recognition technique for the panoramic borehole images obtained in engineering practice[J].Journal of Basic Science and Engineering,2022,30(1):246-256
- [2] Xu Z,Liu F,Lin P, et al.Non-destructive, in-situ, fast identification of adverse geology in tunnels based on anomalies analysis of element content[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2021,118:104146
- [3] Xu Z,Yu T,Lin P, et al.Adverse geology identification through mineral anomaly analysis during tunneling: methodology and case study [J/OL]. Engineering, 2023 [2023-12-12]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809923000061>
- [4] Xu Z,Yu T,Lin P, et al.Integrated geochemical, mineralogical, and microstructural identification of faults in tunnels and its application to TBM jamming analysis[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2022,128:104650
- [5] 李术才,石少帅,李利平,等.山岭隧道塌方风险评价的属性识别模型与应用[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(1):147-158
Li Shucai,Shi Shaoshuai,Li Liping, et al.Attribute recognition model and its application of mountain tunnel collapse risk assessment[J].Journal of Basic Science and Engineering,2013,21(1):147-158
- [6] Wu W,Zhang K,Zhu H.A fast automatic extraction method for rock mass discontinuity orientation using fast k-means++ and fast silhouette based on 3D point cloud [C]. IOP Conference Series; Earth and Environmental Science. IOP Publishing,2020,570(5):052075
- [7] 张延欢,李利平,刘洪亮,等.隧道围岩结构面数字识别及完整性评价方法[J].隧道建设,2016,36(12):1471-1477
Zhang Yanhuan,Li Liping,Liu Hongliang, et al.Digital identification of evaluation of tunnel surrounding rocks discontinuity[J].Tunnel Construction,2016,36(12):1471-1477
- [8] Lane S N,Richards K S,Chandler J H.Developments in photogrammetry; the geomorphological potential[J].Progress in Physical Geography,1993,17(3):306-328
- [9] 王诗言.基于数字图像的隧道掌子面裂隙提取算法的研究和实现[D].济南:山东大学,2018
Wang Shiyang.Research and implementation of tunnel face crack extraction algorithm based on digital image[D].Jinan: Shandong University,2018
- [10] 吴志勇,聂德新,李雪峰,等.基于数码图像的岩体结构面信息采集处理研究[J].岩石力学与工程学报,2003,(增2):2568-2571
Wu Zhiyong,Nie Dexin,Li Xuefeng, et al.Information interpretation of rockmass structure based on digital image[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,(S2):2568-2571
- [11] Reid T R,Harrison J P.A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2000,37(7):1073-1089
- [12] Lemy F,Hadjigeorgiou J.Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2003,40(6):903-917
- [13] 范留明,李 宁.基于模式识别技术岩体裂隙图像的智能解译方法研究[J].自然科学进展,2004,(2):118-122
Fan Liuming,Li Ning.Research on intelligent interpretation method of rock fracture image based on pattern recognition technology[J].Progress in Natural Science,2004,(2):118-122
- [14] 周春霖,朱合华,李晓军.新奥法施工隧道掌子面红外照相及图像处理[J].岩石力学与工程学报,2008,(增1):3166-3172
Zhou Chunlin,Zhu Hehua,Li Xiaojun.Application of infrared photography and image processing to tunnel construction with new Austrian tunneling method[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,(S1):3166-3172
- [15] 冷彪.基于数码成像的隧道掌子面地质信息系统研究[D].成都:西南交通大学,2009
Leng Biao.Research of tunnel face geology information system based on digital image[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009
- [16] 冷彪,张毅,杨辉,等.隧道掌子面岩体裂隙快速识别方法[J].西南交通大学学报,2021,56(2):246-252+322
Leng Biao,Zhang Yi,Yang Hui, et al.Rapid recognition of rock mass fractures in tunnel faces[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2021,56(2):246-252+322

- [17] 冷彪,仇文革,王刚,等.数字图像处理在隧道工程地质分析中的应用研究[J].铁道标准设计,2013,(11):77-81
Leng Biao, Qiu Wenge, Wang Gang, et al. Research on digital image processing technology used in geological analysis of tunnel engineering[J]. Railway Standard Design, 2013, (11): 77-81
- [18] Roberts G, Poropat G V. Highwall joint mapping in 3-D at the Moura Mine using SIROJOINT[R]. Pullenvale; CSIRO Exploration and Mining Technology Court, 2000
- [19] 于天亮.岩体结构面信息数字识别及强度评价[D].沈阳:东北大学,2009
Yu Tianliang. Digital identification of the discontinuities information and strength evaluation of the rockmass [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009
- [20] 杨天鸿,于庆磊,陈仕阔,等.范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2482-2489
Yang Tianhong, Yu Qinglei, Chen Shikuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fanggezhuang coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(12): 2482-2489
- [21] 王述红,张靖杰,杨勇,等.基于数字摄像测量法岩体开挖过程空间模型及其应用[C].第三届全国水工岩石力学学术会议论文集.上海:同济大学出版社,2010:101-104
Wang Shuhong, Zhang Jingjie, Yang Yong, et al. Spatial model of rock excavation process based on digital photogrammetry and its application [C]. Proceedings of the 3rd National Conference on Hydraulic Rock Mechanics. Shanghai: Tongji University Press, 2010: 101-104
- [22] 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 Xingdong, Liu Jie, Zhang Hongxun, 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
- [23] 李术才,刘洪亮,李利平,等.基于数码图像的掌子面岩体结构量化表征方法及工程应用[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):1-9
Li Shucai, Liu Hongliang, Li Liping, et al. A quantitative method for rock structure at working faces of tunnels based on digital images and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 1-9
- [24] 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
- [25] 郑太雄,黄帅,李永福,等.基于视觉的三维重建关键技术研究综述[J].自动化学报,2020,46(4):631-652
Zheng Taixiong, Huang Shuai, Li Yongfu, et al. Key techniques for vision based 3d reconstruction: a review [J]. Acta Automatica Sinica, 2020, 46(4): 631-652
- [26] Baillard C, Zisserman A. A plane-sweep strategy for the 3D reconstruction of buildings from multiple images [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B2;PART 2):56-62
- [27] 张培兴,李晓昭,章杨松,等.基于摄影测量的断裂探槽三维模型建立及应用[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(5):1161-1176
Zhang Peixing, Li Xiaozhao, Zhang Yangsong, et al. Three-dimensional model construction and application of fault trenching based on photogrammetry [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022, 30(5): 1161-1176
- [28] Westoby M J, Brasington J, Glasser N F, et al. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications [J]. Geomorphology, 2012, 179: 300-314
- [29] 许文涛,李晓昭,章杨松,等.基于摄影测量系统的岩体结构面精细识别表征及应用[J].测绘学报,2022,51(10):2093-2106
Xu Wentao, Li Xiaozhao, Zhang Yangsong, et al. Fine identification and characterization of rock mass discontinuities and its application using a digital photogrammetry system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2093-2106
- [30] 易小凯,武威,张可坤,等.基于无人机虚拟多目数字图像的高边坡结构面露头几何信息自动识别与聚类[J].土木工程学报,2022,55(增2):139-148

- Yi Xiaokai, Wu Wei, Zhang Keshen, et al. Automatic geometric information gathering and clustering of exposed discontinuities on high slopes based on virtual multi-vision images from drones[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(S2): 139-148
- [31] 王述红,魏 巍,陈 浩,等.基于 HDBSCAN 算法的岩体结构面产状识别及分组方法[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(6):888-896
Wang Shuhong, Wei Wei, Chen Hao, et al. Identification and grouping method of strike information of rock mass based on the HDBSCAN algorithm[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2022, 43(6): 888-896
- [32] 李 胜,熊自明,刘一鸣,等.基于改进 DBSCAN 算法的岩体结构面智能识别方法[J].隧道与地下工程灾害防治,2022,4(2):49-58
Li Sheng, Xiong Ziming, Liu Yiming, et al. Intelligent identification of rock discontinuities based on an improved DBSCAN algorithm[J]. Hazard Control in Tunneling and Underground Engineering, 2022, 4(2): 49-58
- [33] 韩 博.基于非接触式摄影测量的高陡斜坡结构面采集与几何特征描述[D].长春:吉林大学,2022
Han Bo. Structural plane acquisition and geometric feature description of high and steep slope based on non-contact photogrammetry[D]. Changchun: Jilin University, 2022
- [34] 符 锐.高陡裂隙岩质斜坡结构面非接触式测量与稳定性分析研究[D].长春:吉林大学,2022
Fu Rui. Research on non-contact measurement of discontinuities and stability of high and steep fractured rock slope [D]. Changchun: Jilin University, 2022
- [35] 董文川,张 文,李腾跃,等.高陡岩质斜坡坡表实景模型构建与岩体结构面自动解译方法及平台研发[J].地球科学与环境学报,2022,44(6):1066-1082
Dong Wenchuan, Zhang Wen, Li Tengyue, et al. Construction of 3D real scene model of high-steep rock slope surface and development of automatic interpretation method and platform of rock mass discontinuous [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 1066-1082
- [36] 陈昌富,何旷宇,余加勇,等.基于无人机贴近摄影的高陡边坡结构面识别[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(1):145-154
Chen Changfu, He Kuangyu, Yu Jiayong, et al. Identification of discontinuities of high steep slope based on UAV nap-of-the-object photography[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2022, 49(1): 145-154
- [37] 熊开治,任志远,赵亚龙,等.基于无人机航测的丹霞地貌区危岩结构面识别与三维裂隙网络模型——以重庆四面山景区为例[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(5):62-69
Xiong Kaizhi, Ren Zhiyuan, Zhao Yalong, et al. Identification of dangerous rock structural planes and fracture network model in Danxia landform based on UAV aerial survey: A case study at simianshan scenic area of Chongqing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 62-69
- [38] 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
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
- [39] 姚富潭,吴明堂,董秀军,等.基于贴近摄影测量技术的高陡危岩体结构面调查方法研究[J/OL].成都理工大学学报(自然科学版):1-14.[2023-05-12].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.n.20221223.0920.001.html>
Yao Futan, Wu Mingtang, Dong Xiujun, et al. Research on investigation method of discontinuities of dangerous rock mass based on nap-of-the-object photogrammetry[J/OL]. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition): 1-14. [2023-05-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1634.n.20221223.0920.001.html>
- [40] 谢 壮,陈宝林,傅金阳,等.基于机器视觉三维重建技术的隧道掌子面岩体结构数字识别方法及应用[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):1001-1007
Xie Zhuang, Chen Baolin, Fu Jinyang, et al. Digital identification and application of rock mass structure on tunnel excavation face based on computer vision 3D reconstruction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 1001-1007
- [41] Kocak D M, Caimi F M, Das P S, et al. A 3-D laser line scanner for outcrop scale studies of seafloor features[C]. Oceans'99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat.No.99CH37008). IEEE, 1999, 3: 1105-1114
- [42] Slob S, van Knapen B, Hack R, et al. Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning[J]. Transportation Research Record, 2005, 1913(1): 187-194

- [43] 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,(增2):3629-3635
Dong Xiujun,Huang Runqiu.Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,(S2):3629-3635
- [44] 何秉顺,丁留谦,孙平.三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,(1):43-48
He Bingshun,Ding Liuqian,Sun Ping.The application of 3-D laser scanning technology in rock joint sets identification[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2007,(1):43-48
- [45] 施星波.基于三维激光扫描数据的岩体结构面产状识别方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2010
Shi Xingbo.Research for identifying structural plane based on three-dimensional laser scanning data[D].Beijing:China University of Geosciences (Beijing),2010
- [46] 黄江,石豫川,吉锋,等.三维激光扫描技术在高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 Yuchuan, Ji Feng, et al. Discussion on the application of 3-D laser scanning technology to the investigation of high slop perilous rockmass[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2013,30(11):45-49
- [47] 宁浩.基于三维激光扫描的岩体结构面识别与信息提取[D].成都:成都理工大学,2020
Ning Hao. Recognition and information extraction of rock mass structural plane based on 3D laser scanning[D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2020
- [48] 李杰林,杨承业,彭朝智,等.三维激光扫描技术在地下巷道岩体结构面识别的应用[J].黄金科学技术,2021,29(2):236-244
Li Jielin, Yang Chengye, Peng Chaozhi, et al. Application of 3D laser scanning technology to identification of rock mass structural plane in roadway of underground mine[J].Gold Science and Technology,2021,29(2):236-244
- [49] 梁玉飞,裴向军,崔圣华,等.基于地面三维激光点云的滑坡破坏边界岩体结构特征分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(6):1209-1225
Liang Yufei, Pei Xiangjun, Cui Shenghua, et al. Analysis of rock mass structure characteristics of landslide failure boundary based on ground 3D laser point cloud[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(6):1209-1225
- [50] Pan D, Li S, Xu Z, et al. A deterministic-stochastic identification and modelling method of discrete fracture networks using laser scanning: Development and case study[J].Engineering Geology,2019,262:105310
- [51] Pan D, Xu Z, Lu X, et al. 3D scene and geological modeling using integrated multi-source spatial data: Methodology, challenges, and suggestions[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2020,100:103393
- [52] Singh S K, Raval S, Banerjee B P. Automated structural discontinuity mapping in a rock face occluded by vegetation using mobile laser scanning[J].Engineering Geology,2021,285:106040
- [53] Alshawabkeh Y, Baik A, Miky Y. Integration of laser scanner and photogrammetry for heritage BIM enhancement[J].ISPRS International Journal of Geo-Information,2021,10(5):316
- [54] Tong X, Liu X, Chen P, et al. Integration of UAV-based photogrammetry and terrestrial laser scanning for the three-dimensional mapping and monitoring of open-pit mine areas[J].Remote Sensing,2015,7(6):6635-6662
- [55] Salvini R, Francioni M, Riccucci S, et al. Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola-Iselle railway, the Italian Alps[J].Geomorphology,2013,185:110-122
- [56] 司垒,王忠宾,李嘉豪,等.基于图像和激光点云融合的智能采面煤岩识别[J].振动、测试与诊断,2023,43(2):254-262+407
Si Lei, Wang Zhongbin, Li Jiahao, et al. Coal-Rock recognition of intelligent mining face based on the fusion of image and laser point cloud[J].Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2023,43(2):254-262+407
- [57] Ismail A, Safuan A R A, Sa'ari R, et al. Application of combined terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle digital photogrammetry method in high rock slope stability analysis: A case study[J].Measurement,2022,195:111161
- [58] 张荣春,衣雪峰,李浩,等.多源数据多语义岩体结构面提取方法[J].测绘通报,2021,(11):76-80+105
Zhang Rongchun, Yi Xuefeng, Li Hao, et al. Rock surface extraction method with multi-semantic of multi-source data[J].Bulletin of Surveying and Mapping,2021,(11):76-80+105

- [59] ISRM. International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(6): 319-368
- [60] Abellán A, Vilaplana J M, Martínez J. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3-4): 136-148
- [61] Fernández O. Obtaining a best fitting plane through 3D georeferenced data [J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27(5): 855-858
- [62] 刘海建, 赵兴东, 姜元勇, 等. 九仗沟金矿岩体结构面数字识别及稳定性分级 [J]. *采矿技术*, 2013, 13(4): 52-55
Liu Haijian, Zhao Xingdong, Jiang Yuanrong, et al. Numerical identification and stability classification of rock mass discontinuities in Jiuzhanggou gold mine [J]. *Mining Technology*, 2013, 13(4): 52-55
- [63] Buyer A, Aichinger S, Schubert W. Applying photogrammetry and semi-automated joint mapping for rock mass characterization [J]. *Engineering Geology*, 2020, 264: 105332
- [64] Hou D, Zheng X, Zhou Y, et al. Analysis and application of surrounding rock mechanical parameters of jointed rock tunnel based on digital photography [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2022: 1-19
- [65] 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
- [66] Chen J, Huang H, Zhou M, et al. Towards semi-automatic discontinuity characterization in rock tunnel faces using 3D point clouds [J]. *Engineering Geology*, 2021, 291: 106232
- [67] Yazdanpanah M, Xu C, Sharifzadeh M. A new statistical method to segment photogrammetry data in order to obtain geological information [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 150: 105008
- [68] Singh S K, Banerjee B P, Lato M J, et al. Automated rock mass discontinuity set characterisation using amplitude and phase decomposition of point cloud data [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 152: 105072
- [69] Liu Y, Chen J, Tan C, et al. Intelligent scanning for optimal rock discontinuity sets considering multiple parameters based on manifold learning combined with UAV photogrammetry [J]. *Engineering Geology*, 2022, 309: 106851
- [70] Chen J, Zhu H, Li X. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud [J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 95: 18-31
- [71] 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 Yunfeng, Xia Ding, Tang Huiming, et al. Intellectual identification and geometric properties extraction of rock discontinuities based on terrestrial laser scanning [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(12): 3050-3061
- [72] 吴顺川, 李玉杰, 张化进, 等. 基于密度峰值改进的岩体结构面优势产状 K-means 聚类分析法 [J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(7): 137-143
Wu Shunchuan, Li Yujie, Zhang Huajin, et al. An improved K-means clustering algorithm for dominant occurrence of rock mass discontinuities based on density peaks [J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42(7): 137-143
- [73] Cui X, Yan E. A clustering algorithm based on differential evolution for the identification of rock discontinuity sets [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 126: 104181
- [74] 金鑫. 基于三维激光扫描的边坡岩体结构面智能识别 [D]. 绍兴: 绍兴文理学院, 2020
Jin Xin. Intelligent recognition of slope discontinuities based on 3D laser scanning [D]. Shaoxing: Shaoxing University, 2020
- [75] Xu W, Zhang Y, Li X, 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
- [76] 秦胜伍, 陈骏骏, 陈剑平, 等. 基于粗糙集理论的岩体结构面模糊 C 均值聚类分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(9): 3125-3130
Qin Shengwu, Chen Junjun, Chen Jianping, et al. Fuzzy C-means cluster analysis based on rough set for grouping of discontinuities [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(9): 3125-3130

- [77] Albarelli D, Mavrouli O C, Nyktas P. Identification of potential rockfall sources using UAV-derived point cloud[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(8): 6539-6561
- [78] Herrero M J, Pérez-Fortes A P, Escavy J I, et al. 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization[J]. *Computers & Geosciences*, 2022, 163: 105121
- [79] Xu Q, Ye Z, Liu Q, et al. 3D rock structure digital characterization using airborne LiDAR and unmanned aerial vehicle techniques for stability analysis of a blocky rock mass slope[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3044
- [80] Kong D, Wu F, Saroglou C. Automatic identification and characterization of discontinuities in rock masses from 3D point clouds[J]. *Engineering Geology*, 2020, 265: 105442
- [81] Dewez T J B, Girardeau-Montaut D, Allanic C, et al. FACETS: A CloudCompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds[J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2016, 41: 799-804
- [82] Yan J, Chen J, Zhan J, et al. Automatic identification of rock discontinuity sets using modified agglomerative nesting algorithm[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(6): 229
- [83] 张化进, 吴顺川, 韩龙强. 基于 DBSCAN 选择性聚类集成的岩体结构面优势产状分组方法[J]. *岩土力学*, 2022, (6): 1-12
Zhang Huajin, Wu Shunchuan, Han Longqiang. Dominant partitioning method of rock mass discontinuity based on DBSCAN selective clustering ensemble[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, (6): 1-12
- [84] 朱云福. 基于三维激光扫描数据的岩体结构面识别方法研究及系统研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012
Zhu Yunfu. The theory and system development of discontinuity identification based on 3D laser scanning data[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012
- [85] 李翠, 李杰林, 张良兵, 等. 基于无人机贴近测量的露天矿岩质边坡结构面自动识别[J]. *金属矿山*, 2023, (2): 146-153
Li Cui, Li Jielin, Zhang Liangbing, et al. Automatic identification of discontinuities of open-pit rock slope based on UAV nap-of-the-object photography[J]. *Metal Mine*, 2023, (2): 146-153
- [86] 王培涛, 覃拓, 黄正均, 等. 基于三维点云的岩体结构面信息快速化识别方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(3): 503-519
Wang Peitao, Qin Tuo, Huang Zhengjun, et al. Fast identification of geometric properties of rock discontinuities based on 3D point cloud[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(3): 503-519
- [87] Drews T, Miernik G, Anders K, et al. Validation of fracture data recognition in rock masses by automated plane detection in 3D point clouds[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 109: 19-31
- [88] Ge Y, Tang H, Xia D, et al. Automated measurements of discontinuity geometric properties from a 3D-point cloud based on a modified region growing algorithm[J]. *Engineering Geology*, 2018, 242: 44-54
- [89] Hu L, Xiao J, Wang Y. Efficient and automatic plane detection approach for 3-D rock mass point clouds[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2020, 79(1): 839-864
- [90] Hu L, Xiao J, Wang Y. An automatic 3D registration method for rock mass point clouds based on plane detection and polygon matching[J]. *The Visual Computer*, 2020, 36(4): 669-681
- [91] Xu Z, Ma W, Lin P, et al. Deep learning of rock images for intelligent lithology identification[J]. *Computers & Geosciences*, 2021, 154: 104799
- [92] Xu Z, Ma W, Lin P, et al. Deep learning of rock microscopic images for intelligent lithology identification: Neural network comparison and selection[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2022, 14(4): 1140-1152
- [93] Xu Z, Shi H, Lin P, et al. Integrated lithology identification based on images and elemental data from rocks[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 205: 108853
- [94] Shi H, Ma W, Xu Z H, et al. A novel integrated strategy of easy pruning, parameter searching, and re-parameterization for lightweight intelligent lithology identification[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 231: 120657
- [95] Ge Y, Cao B, Tang H. Rock discontinuities identification from 3D point clouds using artificial neural network[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(3): 1705-1720
- [96] Fitton N C, Cox S J D. Optimising the application of the Hough transform for automatic feature extraction from geoscientific images[J]. *Computers & Geosciences*, 1998, 24(10): 933-951

- [97] 周春霖.基于数字图像技术的岩体节理精细描述及应用研究[D].上海:同济大学,2009
Zhou Chunlin.Fine description and application of rock joints based on digital image technology[D].Shanghai:Tongji University,2009
- [98] 宋珺敏.基于多源数据的岩体结构面智能识别方法与信息解译研究[D].南京:南京师范大学,2016
Song Junmin.Intelligent recognition method and information interpretation of rock mass structure plane based on multi-source data[D].Nanjing:Nanjing Normal University,2016
- [99] 杨晓妤.基于图像的岩体裂隙识别及爆破块度预测研究[D].天津:天津大学,2020
Yang Xiaoyu.Research on rock mass fracture identification and blasting fragmentation prediction based on image[D].Tianjin:Tianjin University,2020
- [100] 刘克强.基于计算机视觉的隧道围岩复杂裂隙识别与表征[D].徐州:中国矿业大学,2021
Liu Keqiang.Identification and characterization of complex fractures in tunnel surrounding rock based on computer vision[D].Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021
- [101] 张紫杉,王述红,王鹏宇,等.岩坡坡面裂隙网络智能识别与参数提取[J].岩土工程学报,2021,43(12):2240-2248
Zhang Zishan,Wang Shuhong,Wang Pengyu, et al.Intelligent identification and extraction of geometric parameters for surface fracture networks of rocky slopes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(12):2240-2248
- [102] Chen J,Zhou M,Huang H, et al.Automated extraction and evaluation of fracture trace maps from rock tunnel face images via deep learning[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,142:104745
- [103] 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(地球科学版),2012,42(6):1839-1846
Wang Fengyan, Chen Jianping, Yang Guodong, et al. Solution models of geometrical information of rock mass discontinuities based on digital close range photogrammetry[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012,42(6):1839-1846
- [104] 赵佳斌.基于摄影测量三维点云的结构面识别及三维渗流管网模型研究[D].南京:南京理工大学,2018
Zhao Jiabin.Research on discontinuity identification and 3D seepage pipeline network model based on 3D point cloud obtained by photogrammetry[D].Nanjing:Nanjing University of Science and Technology,2018
- [105] Li X,Chen J,Zhu H.A new method for automated discontinuity trace mapping on rock mass 3D surface model[J].Computers & Geosciences,2016,89:118-131
- [106] Zhang K,Wu W,Zhu H, et al.A modified method of discontinuity trace mapping using three-dimensional point clouds of rock mass surfaces[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2020,12(3):571-586
- [107] Riquelme A J,Abellán A,Tomás R.Discontinuity spacing analysis in rock masses using 3D point clouds[J].Engineering Geology,2015,195:185-195
- [108] Gigli G,Casagli N.Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds[J].International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2011,48(2):187-198
- [109] Li X,Chen Z,Chen J, et al.Automatic characterization of rock mass discontinuities using 3D point clouds[J].Engineering Geology,2019,259:105131
- [110] 陈娜.基于三维激光扫描的边坡岩体结构信息提取和变形监测研究[D].武汉:武汉大学,2018
Chen Na.The structural information and deformation monitoring of rock slope based on 3D Laser Scanning technology [D].Wuhan:Wuhan University,2018
- [111] Kong D,Wu F,Saroglou C, et al.In-situ block characterization of jointed rock exposures based on a 3D point cloud model[J].Remote Sensing,2021,13(13):2540
- [112] Li S,Xu Z,Ma G, et al.An adaptive mesh refinement method for a medium with discrete fracture network: The enriched Persson's method[J].Finite Elements in Analysis and Design,2014,86:41-50
- [113] Wang W,Zhao W,Chai B, et al.Discontinuity interpretation and identification of potential rockfalls for high-steep slopes based on UAV nap-of-the-object photogrammetry[J].Computers & Geosciences,2022,166:105191

Review on Collection and Extraction Methods of Rock Mass Discontinuity Information

ZHU Hehua¹, PAN Bingyi¹, WU Wei¹, HUANG Yong²,
LIU Jian³, LI Huaming⁴

(1.Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, China; 3. Zhong Dian Jian Ji Jiao Expressway Investment Development Co.Ltd., Shijiazhuang 050090, China; 4. Sichuan Lehan Expressway Co.Ltd., Leshan 614099, China)

Abstract

The identification and acquisition of geometric information regarding discontinuities are essential for analyzing the structural characteristics of rock mass, which provides the foundational data for slope stability analysis, tunnel stability prediction, engineering classification of rock mass, tunnel support design, and related tasks. Due to the low efficiency, high risk, and low precision of conventional information collection methods, it is necessary to develop intelligent information acquisition and identification methods to capture the regularity of discontinuities. This paper presents an overview of the current application status of non-contact measurement information acquisition technologies, specifically 3D laser scanning and photogrammetry. Additionally, focusing on the orientation, cluster, trace, and spacing characteristics of discontinuities, the research progress of identification and extraction algorithms are discussed, such as cluster-based methods, region-based segmentation methods, and artificial neural network methods. Lastly, the application directions of the discontinuity information acquisition and identification methods are analyzed from three perspectives: block size identification, slope stability analysis, intelligent classification of rock mass, and dynamic support design. The findings demonstrate that achieving rapid and automatic analysis of rock structures relies on three key factors: Firstly, developing and implementing high-precision and high-efficiency information acquisition technology for engineering. Secondly, researching fine algorithms for structural discontinuities recognition combined with geological information, and thirdly constructing a comprehensive, full-process automatic system.

Keywords: discontinuities; intelligent identification; photogrammetry; 3D laser scanning; cluster; region growing; neural network