

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.004

基于无人机倾斜摄影技术和三维点云技术的 碎裂松动岩体结构面识别研究

杨成龙¹, 缙慧娟²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 贵州水利水电职业技术学院, 贵州 贵阳 551416)

摘要: 为高效实现对复杂地质环境的高陡边坡岩体的测量与识别, 选取澜沧江某水电站拌合站碎裂松动岩体边坡为研究对象, 使用无人机倾斜摄影技术和三维点云技术对研究区碎裂松动岩体进行航测调查, 构建研究区碎裂松动岩体边坡的三维实景模型, 并从中提取三维点云数据对碎裂松动岩体优势结构面进行识别与分析。分析结果表明: 该方法重现了研究区真实地形地貌特征, 能获取高陡边坡碎裂松动岩体高精度的三维空间数据, 掌握其优势结构面的分布特征。识别结果可为数值模拟分析中碎裂松动岩体离散裂隙网络 DFN 的设置提供依据, 对传统手段难以实现的高陡边坡地质调查具有方法上的借鉴作用。

关键词: 碎裂松动岩体; 三维点云; 无人机倾斜摄影; 结构面识别

中图分类号: P231

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0024-06

Identification of Fractured Loose Rock Mass Structural Surfaces Based on UAV Oblique Photography and 3D Point Cloud Technology

YANG Chenglong¹, GOU Huijuan²

(1. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. Guizhou Vocational and Technical College of Water Resources and Hydropower, Guiyang, Guizhou 551416, China)

Abstract: The engineering geological survey of slope rock mass by traditional technical means has the characteristics of tedious process, workload and difficulty. In order to efficiently measure and identify high steep slope rock mass in complex geological environment, by fully combining and applying the advantages of UAV oblique photography and 3D point cloud technology, this work selects the fractured loose rock slopes at a concrete mixing station of the Lancang River hydropower station as the research object. UAV oblique photography is employed to conduct aerial surveys of the fractured loose rock masses in the study area. A three-dimensional realistic model of the fractured loose rock slopes is constructed, and 3D point cloud data is extracted to identify and analyze the dominant structural surfaces of the fractured loose rock masses. This approach reconstructs the real terrain and morphological features of the study area, obtaining high-precision three-dimensional spatial data for steep slopes with fractured loose rock masses. The distribution characteristics of dominant structural surfaces are determined, which can provide reliable reference for setting up Discrete Fracture Network (DFN) in numerical simulation analysis. This research lays a geological foundation for the construction and long-term safe operation of the hydropower station, and provides a scientific basis for the investigation and prevention of fractured loose rock masses. This research can be used for reference in geological survey of high and steep slope which is difficult to realize by traditional means.

Keywords: fractured loose rock mass; 3D point cloud; unmanned aerial vehicle oblique photography; structural surface identification

收稿日期: 2024-06-03

修稿日期: 2024-07-01

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目“HNKJ22-H108 高海拔长负温期高碾压混凝土坝重大技术研究”资助

作者简介: 杨成龙(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事水利水电工程地质工作。E-mail: lsycl1988@qq.com

通讯作者: 缙慧娟(1986—), 女, 副教授, 主要从事水利工程测量教学及研究工作。E-mail: 770957752@qq.com

传统的边坡岩体工程地质调查方法为人工现场调查,即要求人工到达、接触岩石,使用地质罗盘等工具对其结构面产状、空间分布及发育特征等信息进行手动测量及记录,其优点是测量方法简单直接、测量结果准确有保障。但在实际工程中,野外调查的工作量巨大,传统方法的数据采集、核实、录入过于繁复,特别是在地形险峻且地质条件复杂的区域,调查人员的安全无法完全保障,进行人工地质调查面临着巨大的困难,如何高效准确地对高陡边坡岩体进行工程地质调查,已经成为进行边坡岩体结构分析需要解决的重要问题。

三维点云技术是指生成、处理、分析和利用三维点云数据的技术。点云是由在三维空间中分布的大量点组成的集合,这些点带有三维坐标数据,可以精确地表示物体的外形和空间位置。点云数据可以通过多种方式获取,包括但不限于三维激光扫描、立体视觉、结构光扫描、无人机摄影等。Slob S^[1]、陈娜等^[2]和郭登上等^[3]研究探讨了利用三维点云技术测量岩体结构面的方法,详细分析了三维点云技术在岩体结构面特征精确识别方面的应用效果和潜力;黄润秋团队^[4-5]将三维激光扫描技术引入高边坡岩体的地质调查研究中,在国内率先开辟了使用三维点云与地质、岩土工程领域相结合的先河;胡武婷等^[6]、徐俊等^[7]、王梓龙等^[8]结合工程实例,探讨了在识别岩体、获取岩体结构面方面运用三维激光扫描技术的具体步骤和方法;Adriá N R 等^[9]在研究中使用密度簇算法并结合邻点共面检验的方法对岩体进行识别与分组,并去除三维点云的噪点;牛阳^[10]利用 MATLAB、Riscan Pro 等点云处理工具,设计并实现了一种利用三维点云快速识别危岩区域的方法。近年来,基于无人机与运动恢复结构法获取边坡岩体点云模型并开展分析评价的方法在矿山地质勘察等领域也被广泛应用^[11-12]。

根据已有文献可知,传统的人工调查方法难以实现对复杂地质环境的高陡边坡岩体的测量与识别,尤其难以实现对高寒山谷高陡边坡发育的成因机理复杂、稳定性差的碎裂松动岩体的精细调查^[13-14],因此本文将三维点云技术与无人机倾斜摄影技术结合,使用无人机航测的方法对研究区高陡边坡的碎裂松动岩体进行调查,以获取地质模型数据;再量化提取地质模型中具有碎裂松动岩体典型几何特征的三维点云,尽可能直观、准确地还原研究区拌合站碎裂松动岩体边坡的地形地貌与岩体结构特征,最终进行碎裂松动岩体的识别与其优势结构面的解译,以期对碎裂松动岩体边坡调查分析提供

参考。

1 无人机倾斜摄影图像的获取

无人机倾斜摄影技术是指利用无人机在预定飞行高度下以垂直及倾斜角度多方位捕获目标区域的数字图像技术(见图 1),其涉及了 Structure from Motion(SFM)三维重构技术及多种跨学科领域(包括计算机视觉、数字图像处理、影像匹配及模式识别)的理论与方法。无人机倾斜摄影的关键内容是对获得的多视角二维数字影像进行精确的分析处理,以重建出目标区域的高精度三维模型。相较于传统正射摄影,无人机倾斜摄影技术通过多角度观察、捕获地物纹理细节,有效解决了正射摄影在捕获目标对象细节方面的局限,并能够基于图像中同名点定位与无人机 GPS 数据,精确计算出拍摄目标的高度、角度等信息,具有广泛的行业应用潜力。无人机倾斜摄影技术的测量原理是基于摄影测量学中的共线性条件,即像点、镜头中心与物点间的几何对应关系,结合先进的多视角技术和数字图像处理能力,进而从多个倾斜视角获取的二维影像中恢复出目标区域的精确三维实体景观。因此无人机倾斜摄影技术重建的地质三维模型不仅信息丰富、结构完整,而且能非常准确地反映拍摄目标的几何与物理属性,为专业解译提供了多角度观测的便利。



图 1 无人机多角度拍摄获取影像数据

通过无人机影像对研究区碎裂松动岩体边坡三维模型的构建实际上是利用超高密度的点云来建立网格面,形成网格面模型。这些点云数据不仅包括位置信息,也蕴含高程信息,在构网过程中可选用规则格网(Regular Grid)或不规则三角网(Triangular Irregular Network)等方法。通过应用区域增长、八叉树等表面重建算法,将密集点云转化为三角形面片,能够有效地表现任意地形地貌信息。所有这些三角形面片共同组成一个完整的三角网格模型(见图 2),最终依托软件的自动纹理赋予功能,生成精确

反映研究区边坡地貌的三维模型(见图 3)。

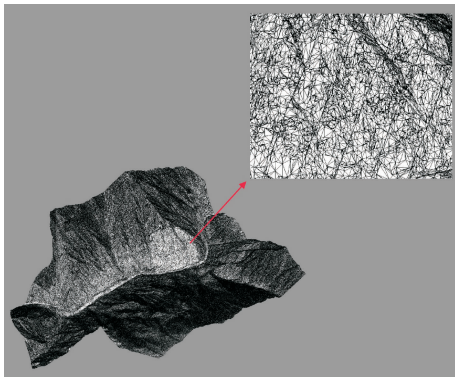


图 2 研究区三角网格模型

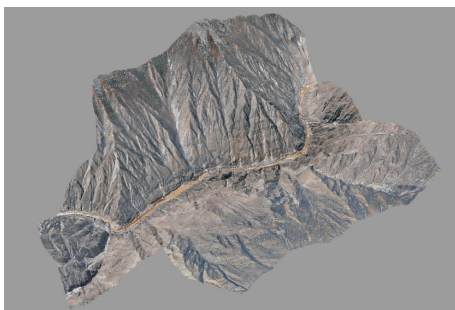


图 3 研究区三维地质模型

2 碎裂松动岩体三维点云的提取与预处理

2.1 三维点云提取

搭载了惯性导航系统的无人机能够捕获飞行区域内多幅重叠的影像数据及对应的 POS 数据和控制点的坐标数据。无人机拍摄得到的影像需要通过 POS 数据进行初始定位,继而运用区域网联合平差技术实现影像的相对定向和绝对定向。相对定向生成的点云数据只能代表点云之间的相对位置,而不能代表这些点云在现实大地坐标系中的真实坐标。而绝对定向则会根据导入的控制点坐标和 POS 数据,将相对定向的点云数据坐标进行调整校正,最终生成带有真实坐标的高密度三维点云。目前人们普遍接受和认可的利用倾斜摄影影像数据获取密集点云的方法为多层次的双向密集匹配和多视密集匹配。但是直接使用研究区倾斜摄影的影像数据提取三维点云的工作量巨大,且无法保证从海量点云数据中精确地筛选出代表研究区碎裂松动岩体的三维点云。因此将从研究区整体的三维地质模型中筛选能够反应碎裂松动岩体结构特征的瓦片集(见图 4),逆向提取碎裂松动岩体的三维点云数据(见图 5、图 6),然后进行研究区碎裂松动岩体优势结构面

的解译。

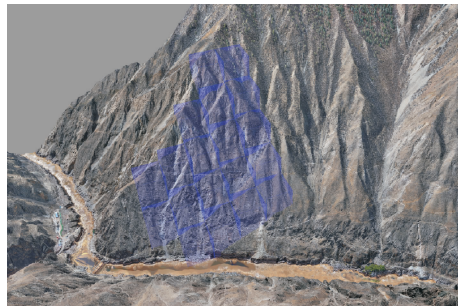


图 4 从整体地质模型中筛选碎裂松动岩体数据瓦片集

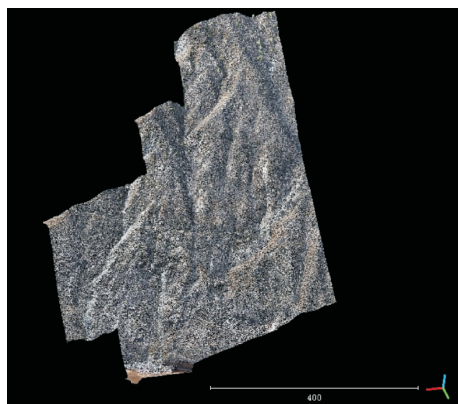


图 5 从瓦片集中提取出的碎裂松动岩体三维点云



图 6 研究区碎裂松动岩体点云

2.2 点云二次采样

无人机倾斜摄影技术所获取的地形点云数据量非常大,数以千万计的海量数据点会直接影响点云数据的存储、传输、可视化、人机交互和后期处理(如滤波、分类、特征提取和建模等)的效率。前文已经通过人为筛选部分瓦片集来提取三维点云,剔除了非研究区的点云数据,大大的降低了数据量。但获得的点云密度仍然超出了点云成图软件的处理能力,密集点云携带的大量坐标数据必然会导致计算机运行困难,而且过于密集的点云会导致生成模型的表面过于粗糙。因此,必须对三维点云数据进行二次采样(抽稀处理),但如果采样点过于稀疏,点云数据将难以真实地反应地质边坡的几何特征和

结构特征,所以二次采样处理过程中既要考虑到软件和计算机的算力,同时也要保证点云的细节和精度。图7为点云数据二次采样前后对比图。

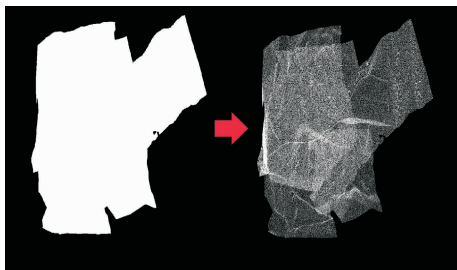


图7 点云二次采样前后对比图

2.3 点云降噪处理

获得的点云数据经常受到环境因素、设备限制及外部干扰的影响,而导致数据中包含众多非目标对象的噪声点,例如现场施工车辆、施工人员走动形成的噪声等。碎裂松动岩体点云的噪声点主要表现为地表以下的异常点和点群、地面以上的异常极高点 and 点群,及在某个特定空间区域分布的异常点和点群,这些噪声点云会对数据处理和分析结果造成明显的不利影响。为减少噪声对后续处理的干扰,采取有效的噪声滤除措施十分重要,降噪的主要方法包括利用自动化算法或手动编辑手段从数据中剔除噪声。对极低的点或点群、极高的点或点群,可以在较大的区域上集中过滤。值得注意的是,对其它点或点群,比如与分析不相关的边坡地表植物的点云,也可以作为噪声点去除。

使用的滤波方法^[15]是CSF布料模拟滤波(Cloth Simulation Filter),它是将真实测量获得的点云数据进行翻转后,将一块模拟布料覆盖于点云上,将模拟布料的起伏变化视为真实地表的起伏变化从而提取出近似的地表点云(见图8)。

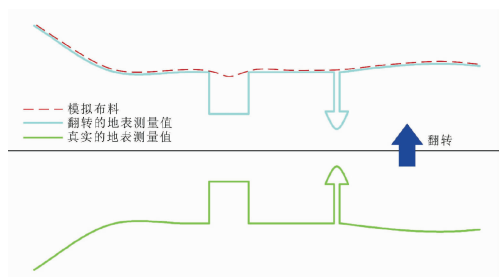


图8 布料模拟滤波原理示意图

布料模拟滤波的关键点在于对布料每个节点的受力情况进行详细分析,确定其在重力作用下的确切位置坐标,布料节点位置坐标与其受力的关系如式(1),滤波完成后效果图见图9。

$$m \frac{\partial P(t)}{\partial t^2} = F_{\text{ext}}(P, t) + F_{\text{int}}(P, t) \quad (1)$$

式中: m 为布料节点的质量,一般设为常数1; P 为 t 时刻布料节点所处的位置; F_{ext} 为重力对布料节点的影响; F_{int} 为相临布料节点在 P 位置与 t 时刻相互作用的内力。

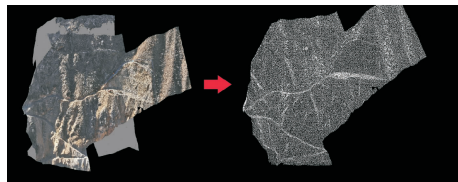


图9 点云降噪前后对比图

3 碎裂松动岩体结构面信息解译

3.1 彩色信息贴图

通过无人机倾斜摄影不仅能够获得点云数据的三维空间坐标,也能将无人机数码相机拍摄采集的彩色影像的像素点与三维点云数据相互匹配,从而使得三维点云数据获取真实的色彩(RGB)。从图10中可以看到,着色后的点云数据表现出了现实碎裂松动岩体边坡的真实颜色。



图10 点云彩色信息贴图前后对比图

3.2 点云配准与拼接

前文提到,在无人机倾斜摄影中为获得高质量数据集和确保三维模型构建的精度,一般要设计图像的航向重叠度与旁向重叠度。因此从三维地质模型中选取瓦片进行提取三维点云,不可避免的要涉及不同瓦片三维点云的拼接与配准处理。点云的拼接以目标对象点云的自动拼接为主,主要通过软件自动识别目标对象点云的几何特征来实现,对于部分软件难以自动识别、拼接的点云,也可以人工操作实现点云数据的拼接。软件识别地物几何特征从而实现自动拼接的原理是在待拼接的点云图块上(图11中红色图块)选定的三个及以上的不共线的点,同时在已锁定的参考点云图块上(图11中黄色图块)选定同名的特征点,软件系统会自动将未被锁定的点云图块进行平移旋转等几何变换,达到将两个点云图块上的同名点云重合的目的,最后软件在

一定范围内进行数值计算使得拼接误差值达到最小,至此点云数据的自动拼接完成。

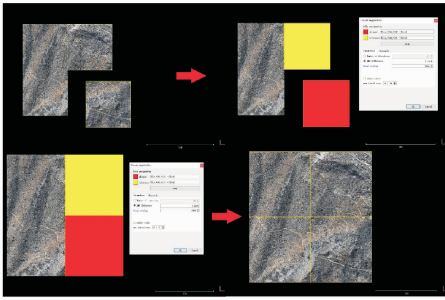


图 11 点云数据的自动拼接

点云配准实际就是点云的坐标变换,即点云从软件坐标系通过坐标变换公式转化为到大地坐标系中。在无人机图像处理流程中,将数据导入相关的无人机图像处理软件后需要设置模型的空间参考系统(CGCS2000),CGCS2000 坐标系的 X 轴起始于地球质心指向 Terrestrial Time(TT)2000.0 时刻定义的零子午面与地球赤道的交汇点;而 Y 轴和 Z 轴分别与 X 轴垂直,构成标准的右手正交坐标系。所以根据无人机三维地质模型提取的三维点云的坐标也和三维地质模型基本保持一致,都属于 CGCS2000 国家大地坐标系,满足识别和研究的标准,不需要再进行另外的坐标变换。

3.3 碎裂松动岩体优势结构面解译

在数学几何中,一个平面可以由不共线的三个点确定。而在地质学中岩体结构面的定义为在岩体内部发育的、具有一定规模、方向和特征的面。基于此定义,三维点云识别岩体结构面的原理为:首先对点云进行 Delaunay 三角剖分,即根据不共线的三个点云创建三角网格,但需避免生成细长而失真的三角形;在生成的碎裂松动岩体边坡的表面网格模型中,每个由 Delaunay 三角剖分生成的三角形平面都可以将其当做一个小结构面,于是岩体真实的结构面可以认为是具有一定规模的、方向特征相近的(由平面的法向量定义)、在相邻范围内的(满足一定的起伏限制)、相互连通的三角网格平面的集合。

如图 12 所示, $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ 为空间坐标系中不共线的三点,其构成的三角形 ABC 平面可视为一个结构面,面 ABC 的法向量为 $\vec{n} = (a, b, c)$ 也代表着结构面的法向量,那么 $\vec{n}' = (a, b, 0)$ 就代表其在水平面上的投影,从地质学的角度,其方向为该结构面的倾向(Y 轴为正北方向); \vec{n} 和水平面的夹角为该结构面的倾角。

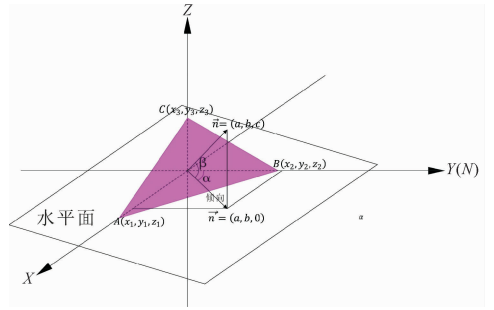


图 12 结构面空间关系示意图

根据不共线三个点云的坐标 $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ 和面 ABC 的法向量 $\vec{n} = (a, b, c)$,该结构面的空间平面方程表达式为:

$$ax + by + cz + D = 0 \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 、 D 为法向量的值,具体可由以下公式计算得到:

$$a = z_2y_1 + z_1y_3 + y_3z_3 - z_2y_3 - z_3y_1 - z_1y_2 \quad (3)$$

$$b = z_2x_3 + z_3x_1 + z_1x_2 - z_2x_1 - z_1x_3 - z_3x_2 \quad (4)$$

$$c = x_1y_2 + x_3y_1 + x_2y_3 - x_3y_2 - x_1y_3 - x_2y_1 \quad (5)$$

$$D = z_1y_2x_3 + z_2y_3x_1 + z_3y_1x_2 - z_3y_2x_1 - z_2y_1x_3 - z_1y_3x_2 \quad (6)$$

结构面的倾向 α 、倾角 β 计算公式如下:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) + Q \quad (7)$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) \quad (8)$$

式中: a 、 b 、 c 为结构面法向量的代数值; α 为结构面的倾向值,计算结果为弧度制; β 为结构面的倾角值,计算结果为弧度制; Q 为根据 a 、 b 数值而变化的常量。

由于倾向 α 的计算结果值为弧度制,在换算为角度制后其范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 或 $0^\circ \sim -90^\circ$,而真实地理坐标值位于 0° 到 360° ,所以添加常量 Q 来对其校准,其对应关系如下:

当 $a \geq 0$, 且 $b \geq 0$ 时, $Q = 0^\circ$

当 $a \geq 0$, 且 $b < 0$ 时, $Q = 360^\circ$

当 $a < 0$, 且 $b < 0$ 时, $Q = 180^\circ$

当 $a < 0$, 且 $b \geq 0$ 时, $Q = 180^\circ$

软件计算时,每一个点云生成的表面三角网格都有其各自确定的产状计算结果,但是一组结构面是由大量产状相近的三角网格组合而成(见图 13),它需要一个较为综合的值来表示该组结构面的产状。碎裂松动岩体识别优势结构面等密图如图 14 所示,最终识别获得的碎裂松动岩体三维点云结构面有 456 个,其中优势结构面有三组:①中陡倾坡内结构面,其产状为 $N30^\circ \sim 60^\circ W/SW \angle 45^\circ \sim 60^\circ$;②中

缓倾坡外结构面,其产状为 $S45^{\circ}\sim 65^{\circ}W/SE\angle 30^{\circ}\sim 45^{\circ}$;③中陡倾坡内结构面,其产状为 $N15^{\circ}\sim 25^{\circ}E/NW\angle 40^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。

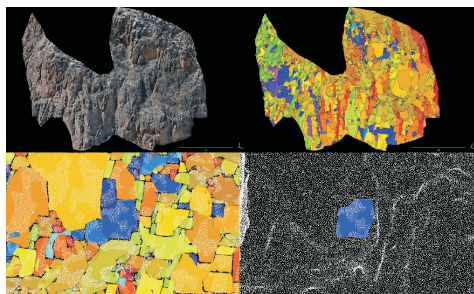


图13 碎裂松动岩体点云结构面产状识别

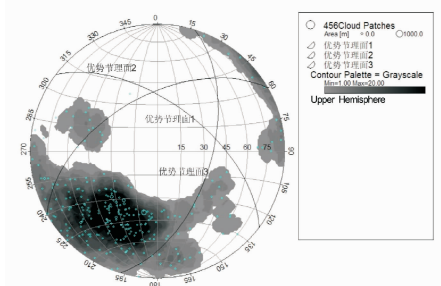


图14 碎裂松动岩体识别优势结构面等密图

4 结论

对于研究区碎裂松动岩体的调查,基于无人机倾斜摄影得到的边坡影像数据,使用相关的无人机图像处理软件重构出研究区三维地质模型。通过人为筛选出碎裂松动岩体的影像瓦片集,提取出研究区碎裂松动岩体的三维点云,随后使用软件计算分析,识别得到碎裂松动岩体的优势结构面,结论如下:

(1) 研究区边坡三维地质模型的构建实际上是利用超高密度的点云来建立网格面,形成网格面模型。通过使用区域增长、八叉树等表面重建算法,将密集点云转化为三角形面片,能够有效地表现任意地形地貌信息,三维重构出的模型可以准确地表达出真实拌合站碎裂松动岩体边坡的地质特征。

(2) 基于无人机倾斜摄影测量重构三维模型的基本原理,根据三维模型反向提取带有空间坐标的三维点云,再对提取的点云进行一系列精细化处理来分析碎裂松动岩体的结构面信息,无论是理论层面还是实际操作层面都具有可行性。

(3) 最终识别获得的碎裂松动岩体三维点云结构面有456个,其中优势结构面有三组:①中陡倾坡内结构面,其产状为 $N30^{\circ}\sim 60^{\circ}W/SW\angle 45^{\circ}\sim 60^{\circ}$;②中缓倾坡外结构面,其产状为 $S45^{\circ}\sim 65^{\circ}W/SE\angle 30^{\circ}\sim 45^{\circ}$;③中陡倾坡内结构面,其产状为 $N70^{\circ}\sim 85^{\circ}E/NW\angle 40^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。

利用无人机倾斜摄影数据并结合三维点云处理,可以快速、高效和精确的实现高陡边坡三维模型重构及岩体结构面信息识别,对于实际工程具有应用价值,对于人工地质调查难以实现的高陡边坡地质调查具有方法上的借鉴意义。

参考文献:

- [1] Slob S, Van Knapen B, Hack R A Method for automated discontinuity analysis of rock slopes with three-dimensional laser scanning[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005,1913(1):187-194.
- [2] 陈娜,蔡小明,夏金梧,等.基于三维激光点云技术的岩体结构面智能解译[J].地球科学,2021,46(7):2351-2361.
- [3] 郭登上,谢谟文,刘卫南,等.基于三维点云的边坡岩体结构面提取方法与应用[J].矿业研究与开发,2022,42(5):197-202.
- [4] Huang Runqiu, Dong XiuJun. Application of three-dimensional laser scanning and surveying in geological investigation of high rock slope[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008,19(2):184-190.
- [5] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描测量在汶川地震后都汶公路快速抢通中的应用[J].工程地质学报,2008,16(6):774-776.
- [6] 胡武婷,刘昶,董秀军.基于三维激光扫描的岩质边坡结构面自动识别方法[J].成都理工大学学报(自然科学版),2023,50(3):351-360.
- [7] 徐俊,谢礼明,刘宇,等.基于三维激光扫描的岩体结构面识别与块体分析[J].人民长江,2021,52(S1):309-312.
- [8] 王梓龙,裴向军,董秀军,等.三维激光扫描技术在边坡地质编录中的应用[J].人民黄河,2018,40(5):111-121.
- [9] Adriá N R, Abellá N A, Tomá S R, et al. A new approach for semi-automatic rock mass joints recognition from 3D point clouds[J]. Computers and Geo-sciences, 2014,68:38-52.
- [10] 牛阳.基于三维激光扫描的危岩体快速识别方法研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [11] 赵彬,狄广礼.无人机倾斜摄影技术在矿山地质勘查中的应用[J].能源与环保,2022,44(8):132-136.
- [12] 沙鹏,孔德珩,王绍亮,等.高陡边坡岩体结构信息无人机识别与离散元数值模拟[J].工程地质学报,2022,30(5):1658-1668.
- [13] 黄鹏,张咪,乔鹏.高原寒区碎裂松动岩体成因机制研究[J].人民珠江,2018,39(12):44-53.
- [14] 吴述斌,李鹏飞,陈占恒.高寒峡谷地区碎裂松动岩体工程特性研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1250-1257.
- [15] 王鹏,辛佩康,刘寅,等.基于改进布料模拟滤波算法的施工场地倾斜摄影点云地面提取[J].测绘通报,2023(10):85-90,100.