三维扫描点云重构下高陡边坡危岩体识别方法①

赵彦旭[1]，张扬[1]，郭太堂[2]，李涛[1]
（1.河南省地震局，河南 郑州 450000；2.中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心，云南 昆明 650100）

摘　要：为解决扫描设备获取的高陡边坡潜在危岩体点云数据不连续、不完整导致边坡曲率特征挖掘误差大、危岩体与稳定岩体边界模糊的问题，提出一种基于三维扫描点云重构的高陡边坡危岩体识别方法。该方法使用克里金插值法处理稀疏或分布不均的点云数据，通过考虑空间相关性增加数据点密度，得到更连续和完整的点云数据，以准确反映边坡的真实形状。采用局部表面拟合方法和 k-邻域搜索算法，估算点云数据的法向量和曲率，挖掘边坡的几何特征，以揭示边坡形态和潜在不稳定区域。利用不一致性指标分析点云数据的几何特征变化，设定阈值筛选边缘点，从而清晰界定危岩体与稳定岩体的边界，准确划分危岩体范围。基于 Voronoi 图的增量法建立危岩体边缘轮廓内的点云数据，构建危岩体三维扫描点云数据模型，并运用 Slide 软件分析危岩体风险等级，完成高陡矿山边坡危岩体识别。工程应用结果表明，本文所提方法计算的边坡曲率估计误差小于 0.3%，各组边坡危岩体识别的 F1 值一直保持在 0.99 以上，危岩体识别质量高。

关键词：高陡边坡；危岩体；识别技术；点云重构；克里金插值法；k-邻域搜索算法；Voronoi 图
中图分类号：TD854　　**文献标志码：**A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.009
文章编号：0253-6099(2026)02-0060-06

Identification of Unstable Rock Mass in High and Steep Slopes Based on Point Cloud 3D Reconstruction

ZHAO Yanxu[1], ZHANG Yang[1], GUO Taitang[2], LI Tao[1]
(1.*Henan Earthquake Agency*, *Zhengzhou* 450000, *Henan*, *China*; 2.*Kunming Comprehensive Survey Center of Natural Resources*, *China Geological Survey*, *Kunming* 650100, *Yunnan*, *China*)

Abstract: Due to discontinuousness and incompleteness of point cloud data of potential unstable rock mass in high and steep slopes acquired from scanning equipment, there exist large errors in the extracted curvature feature of slopes and boundaries between unstable and stable rock mass are also blurred. To address those problems, a method for identifying unstable rock mass in high and steep slopes based on point cloud 3D reconstruction is proposed. Kriging interpolation is used in processing sparse or unevenly distributed point cloud data. More continuous and complete point cloud data can be obtained by increasing the density of data points in consideration of spatial correlation, so as to accurately reflect the real geometrical configuration of the slope. The normal vectors and curvatures of the point cloud data are estimated by adopting local surface fitting and k-neighborhood search algorithm, so as to extract the geometric features of slope and reveal the slope morphology and potential unstable areas. The inconsistency index is used to analyze the changes in the geometric features of point cloud data, and a threshold is set to screen edge points, thereby the region with unstable rock mass can be accurately delineated after the boundary between unstable and stable rock mass is clearly defined. The point cloud data within the boundary of the unstable rock mass are obtained by incremental Voronoi diagram, and then a 3D model of point cloud data is constructed for the unstable rock mass, and the risk level of the unstable rock mass is also analyzed with the Slide software. This is the whole identification process for unstable rock mass in high and steep mine slopes. The practical engineering application of this identification method shows that the slope curvature can be estimated with an error less than 0.3%, and the calculated F1 scores in identification of unstable rock mass in each group of slope all remain above 0.99, indicating that such method can bring high quality identification of unstable rock mass.

① **收稿日期：**2025-08-26
基金项目：河南省科技攻关项目(232102320018)；河南省科技攻关项目(242102320043)
作者简介：赵彦旭(1991—)，男，河南郑州人，助理工程师，主要从事工程抗震工作。E-mail:zhaowp518@sina.com

Key words: high and steep slope; unstable rock mass; identification technology; point cloud reconstruction; Kriging interpolation; k-neighborhood search algorithm; Voronoi diagram

危岩体识别技术是防治危岩体灾害极为有效的手段[1-2]。然而,在高陡边坡危岩体识别过程中,受边坡复杂地质条件的影响,危岩体识别难度增加。此外,这些边坡通常位于高山地区,自然灾害如滑坡、泥石流等频发,可能会掩盖或改变危岩体的原有特征,从而进一步加大识别难度。为了有效预防地质灾害、保障矿山的安全生产,众多学者对高陡边坡的危岩体识别方法[3-6]进行了研究,主要采用无人机倾斜摄影、构建识别模型、构建地质地形空间模型以及无人机摄影测量等方法,聚焦于确定危岩体是否存在、识别其潜在风险、判定危岩体等级以及确定危岩体所在位置等方面。然而,这些方法均存在一定不足,包括受环境因素影响导致信息提取受限、数据获取困难影响识别结果可靠性、数据更新成本高且时效性差、数据量大导致识别效率低等。

针对以上问题,本文提出一种基于三维扫描点云重构下的高陡边坡危岩体识别方法。该方法能够结合 k-邻域搜索算法、主成分分析法等各类算法,深度挖掘边坡的倾斜方向、弯曲程度等几何特征,精确获取边坡表面的三维空间信息,完整呈现边坡的地形地貌;此外,利用 Voronoi 图的增量法对扫描得到的点云数据进行重构,能够清楚展现危岩体各点间内部关系,进而显著提升对危岩体及其风险等级的准确识别能力。

1　三维扫描点云数据内插处理

在高陡边坡的三维扫描中,受扫描角度、距离、精度等因素影响,设备生成的点云数据存在稀疏或分布不均的问题。这严重影响了对边坡真实形状的精确描述,无法精准展现边坡的细微特征与整体结构。为了增加数据点的密度,使点云数据在空间分布上更加连续和完整,更准确地反映矿山边坡的真实形状,采用考虑空间相关性且插值精度高的克里金插值法处理点云数据[7-8]。

克里金插值法的核心在于深入探究高陡边坡区域变化量的空间相关性。基于统计学理论,空间中某已知点云 x_i 位置上的属性值 $Z(x_i)$ 可视为其位置上随机变量的一个具体实现[9]。将已知点位置上的随机变量集合起来,便构成随机函数 $Z(x)$。当 $Z(x)$ 以 x、y、z 轴向坐标作为自变量时,将其定义为边坡区域变化量。

变差函数是表征高陡边坡区域变化量的有效方式之一,其数学表达式为:

$$\gamma(x,h)=\frac{A[Z(x)-Z(x+h)]^2}{2}-\frac{B[Z(x)-Z(x+h)^2]}{2} \tag{1}$$

式中:B 为方差;$Z(x)$、$Z(x+h)$ 分别为点 x、$x+h$ 处的属性值;A 为期望函数。

为精准把握高陡边坡区域变化量在不同条件下的性质,设立二阶平稳假设与本征假设条件。

1) 二阶平稳假设条件:

$Z(x)$ 存在数学期望且为常数,即 $Z(x)E[Z(x)]=m$,对任意 x 均成立。

$Z(x)$ 的协方差 M 存在且相同,即:

$$M[Z(x),Z(x+h)]=A\{Z(x)Z(x+h)-A[Z(x)]A[Z(x+h)]\}$$

特殊情况:$h=0$ 时,$M[Z(x),Z(x+0)]=B[Z(x)]$。

2) 本征假设条件:

$A[Z(x)Z(x+h)]=0$,对任意 x 和 h 都成立。

$B[Z(x)-Z(x+h)]$ 存在且平稳,即:

$$B[Z(x)-Z(x+h)]=A[Z(x)-Z(x+h)^2]-\{A[Z(x)-Z(x+h)]\}^2$$

当高陡边坡区域变化量满足任一假设条件时,$A[Z(x)-Z(x+h)]=0$,此时式(1)变为:

$$\gamma(h)=\frac{B[Z(x)-Z(x+h)^2]}{2} \tag{2}$$

高陡边坡的三维扫描点云数据内插具体计算过程如下。

1) 变差函数的计算。在实际应用中,通常只能获得 x 和 $x+h$ 处的单次实测值,所以必须对区域变化量 $Z(x)$ 作出假设。在满足假设条件下,利用空间中的已知样本点来估计 $\gamma(h)$,对每个 h 计算满足假设条件的高陡边坡区域变化量 $\gamma^*(h)$,计算公式为:

$$\gamma^*(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \tag{3}$$

式中 $N(h)$ 为计算 $\gamma^*(h)$ 时距离间隔 h 的样本点对量。

2) 变差函数的拟合。根据研究变量的属性特征及得到的实验变差函数图形的基本形状,采用直接拟合方式对实验变差函数进行拟合,并通过变异性分析得到一个统一的变差函数。

3) 插值函数的确定。以待插值点 (x_0,y_0,z_0) 坐标为中心,依据变差函数的变程与已知高陡边坡点云

的分布情况确定 x、y、z 轴向的半径,以构建一个椭球体。将处于该椭球体内的点视作此待插值点的邻域点[10],通过式(4)来估计待插值点的值。

$$Z^*(x_0)=\sum_{i=1}^{n}\eta_i Z(x_i) \tag{4}$$

式中:$Z^*(x_0)$为待插值点的估计值;η_i 为定权系数,其需要满足无偏条件以及方差最小条件。

$$\begin{cases}A[Z(x_0)-Z^*(x_0)]=0\\ B[Z(x_0)-Z^*(x_0)]=\min\end{cases} \tag{5}$$

采用矩阵运算的方法求解 η_i 的方程组,计算过程为:

$$\begin{bmatrix}C_{11}&\cdots&C_{1n}&1\\ \vdots&\ddots&\vdots&\vdots\\ C_{n1}&\cdots&C_{nn}&1\\ 1&\cdots&1&0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\eta_1\\ \vdots\\ \eta_n\\ \overline{\omega}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\gamma(x_1-x_0)\\ \vdots\\ \gamma(x_n-x_0)\\ 0\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中 $\overline{\omega}$ 为拉格朗日乘数。

通过式(6)确定 η_i 值,然后结合式(4)实现高陡边坡三维扫描点云数据的插值处理,得到完整的高陡边坡三维扫描点云数据 n_i,提高了数据的密度和完整性。

2 高陡边坡危岩体识别策略

2.1 高陡边坡几何特征挖掘

虽然克里金插值法在一定程度上填补了数据空缺,但由于高陡边坡地形的复杂性和不规则性,内插结果往往难以达到与原始数据相同的精度。这种精度损失可能会影响后续的数据分析和几何特征提取。为了进一步揭示边坡相关情况及潜在不稳定区域,挖掘完整的高陡边坡三维扫描点云数据 n_i,形成三维扫描点云图像的几何特征。

针对高陡边坡点云图像中某一点云 P_i(i 为点位置序号)[11],使用 k-邻域搜索算法,定位与 P_i 极其接近的 k 个点,并采用最小二乘法求解这 k 个点的局部平面 E(P_i 的近似相切平面),求解中需要满足以下条件:

$$\sigma=\min\sum_{i=1}^{k}(h_{P_i}n_i)^2 \tag{7}$$

式中:σ 为 E 与 P_i 法向量残差平方和的最小值;h_{P_i}为点 P_i 到平面 E 的垂直距离。通过式(7)计算可找到一个在局部区域内能较好拟合这些点,且近似与这些点所在局部几何形状相切的平面,也就是局部平面 E。由此可解决高陡边坡上“一点法线”的问题。

为了分析 P_i 的协方差矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的特征矢量及其特征,对 $\boldsymbol{C}$ 进行主成分分析。求解每一个点 P_i 的 $\boldsymbol{C}$:

$$\boldsymbol{C}=\frac{\sum_{i=1}^{k}H_{P_i}^{1+T}}{k} \tag{8}$$

式中:H_{P_i}为点 P_i 到最邻近点三维质心的垂直距离;T 为迭代次数。点云 P_i 的该协方差矩阵的特征值 v_m 和特征向量 $\boldsymbol{\lambda}_m$ 满足以下关系:

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{\lambda}_m v_m \tag{9}$$

式中 m 表示空间维数,$m\in1,2,3$。

在满足式(9)关系的基础上,进一步计算高陡边坡上点 P_i 的曲率 H_i,用以表征该点的几何特征。H_i 计算公式为:

$$H_i=\frac{\lambda_1}{\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3} \tag{10}$$

通过以上过程,能够挖掘出高陡边坡危岩体的几何特征,了解高陡边坡形态。

2.2 高陡边坡危岩体边缘检测

尽管几何特征挖掘能够提取边坡的坡度、坡向等关键信息,但在复杂的地质环境中,危岩体与稳定岩体之间的边界往往模糊且不规则[12]。这种模糊性可能导致在几何特征挖掘过程中难以准确区分危岩体和稳定岩体,从而影响对边坡稳定性的准确评估。边缘检测可清晰界定危岩体与稳定岩体边界,以准确划分危岩体范围。因此,设定合适的不一致性指标阈值可精准筛选出危岩体边缘点。

具体而言,先确定各点的邻域信息。以 n_i^* 表示 P_i 的 k 个邻域点的法向量均值,θ_i 表示 n_i 与 n_i^* 的夹角,则 P_i 的不一致性指标 $\Gamma(P)$计算公式为:

$$\Gamma(P)=H_i\frac{\sum_{i=1}^{k}\theta_i^2}{k} \tag{11}$$

综合考虑高陡边坡的法向量分布特点以及曲率变化规律,经过一系列分析与试验,设定不一致性指标阈值为 τ,当点云的 $\Gamma(P)\geqslant\tau$ 时,表明该点云属于高陡边坡危岩体的边缘点。对所有点云数据逐一完成不一致性指标阈值判定后,将 $\Gamma(P)\geqslant\tau$ 的点云所对应的点连接起来,即可识别出边坡危岩体的边缘轮廓。

2.3 危岩体点云数据重建及风险评估

危岩体稳定性受到多种因素的共同影响,包括岩体的物理力学性质、地质构造条件、地下水状况、人类活动等。Voronoi 图的增量法具有算法简单的优势,并能清晰展现点与点之间的空间邻近关系,基于此,可构建危岩体三维扫描点云数据模型。对边坡危岩体的边缘轮廓内点云数据进行重建,清晰明确危岩体的形状、体积等关键信息,从而实现对危岩体的精准识别。

增量法的核心思路[13-14]在于,针对危岩体边缘线内的点云数据集合 $Q=\{q_i \mid i=1,2,\cdots,g\}$,先构建其子集 $Q_{g_1}=\{q_{g_1} \mid i=1,2,\cdots,g_1\}(g_1<g)$ 的 Voronoi 图。随后,在已构建的 Voronoi 图中,逐个添加点 q_{g_1+1},并对 q_{g_1+1}所在的 Voronoi 单元实施局部调整。通过以上步骤,逐步创建出点云集 $q_{g_1+1}=\{q_i \mid i=1,2,\ldots,g_1,g_1+1\}$ 的 Voronoi 图。当添加完最后一个点云后,便成功构建出完整的危岩体三维扫描点云集合 Q 的 Voronoi 图,如图 1 所示。

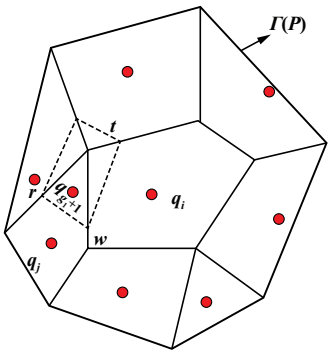


图 1　危岩体三维扫描点云集合局部修改示意图

Fig. 1　Schematic diagram of local modification of 3D point cloud data of unstable rock mass

鉴于点 q_i 的 Voronoi 单元代表空间中距离点 q_i 最近的区域,所以在定位点 q_{g_i+1}所在的 Voronoi 单元时,只需分别计算点 q_{g_i+1}与 $q_1,q_2,\ldots,q_{g_1}$的距离,找出距离点 q_{g_i+1}最近的点 q_j,那么 V_{q_j}(V 表示空间点集)即为点 q_{g_i+1}所在的 Voronoi 单元。接着进行局部调整,从 V_{q_j}开始,绘制线段 $q_jq_{g_1+1}$的中垂线,使其与 V_{q_j}的边相交于点 t 和 w。通过计算可知,点 w 位于点 q_i 的 Voronoi 单元的边界上,然后绘制线段 $q_wq_{g_1+1}$的中垂线,使其与 V_{q_j}的边相交于点 w 和 r。用点 r 替换点 w,重复以上过程,直至有一条中垂线与 V_{q_j}的边再次相交于点 t[15-16]。此时,按顺序连接各个交点,就得到点 q_{g_1+1} 的 Voronoi 单元。

构建危岩体点云数据的 Voronoi 图后,运用 Slide 软件对重构后的图像进行分析,由此可得出危岩体的风险等级,完成高陡边坡危岩体识别。

3　工程应用

3.1　工程背景

某露天矿高陡边坡坡度普遍大于 55°,部分区域坡度甚至超过 60°。借助 AG-X plus 100 kN伺服式刚性试验机、长江-500 型三轴压力机以及 DZJ-30 型多功能应力应变控制式直剪单剪两用仪,精确采集岩石的抗压强度、抗剪强度等关键力学参数。同时,采用 Maptek I-Site 8810 三维激光扫描仪获取高陡边坡的激光点云图像,并分别采用本研究所提出的方法、遥感综合解译方法以及定量概率模型对获取的点云图像进行危岩体识别。

遥感综合解译方法是在图像信息提取过程中,设置图像分辨率为原始图像的分辨率(7 000 万像素对应的分辨率参数),采用常规的图像增强处理参数,对比度调整系数设为 1.2,亮度调整系数设为 0.8,以优化图像显示效果便于解译。同时,在落石轨迹模拟环节,依据当地地质资料和经验,设定落石初始速度为5 m/s,模拟步长为 0.1 s。

定量概率模型是采用相关标准试验方法测量岩石性能指数,使用符合国家计量标准的岩石力学测试设备,其测量误差控制在±5%以内;采用烘干法测量岩体含水率,测量样本数量根据边坡区域大小确定为 20 个,以确保数据的代表性,这些样本均匀分布在边坡的不同位置,涵盖各种地质条件区域。在模型计算过程中,设定风险概率阈值为 15%,以此判断危岩体的潜在风险等级,即当计算得到的风险概率大于 15% 时,认为该危岩体具有较高的潜在风险。

3.2　高陡边坡危岩体识别效果分析

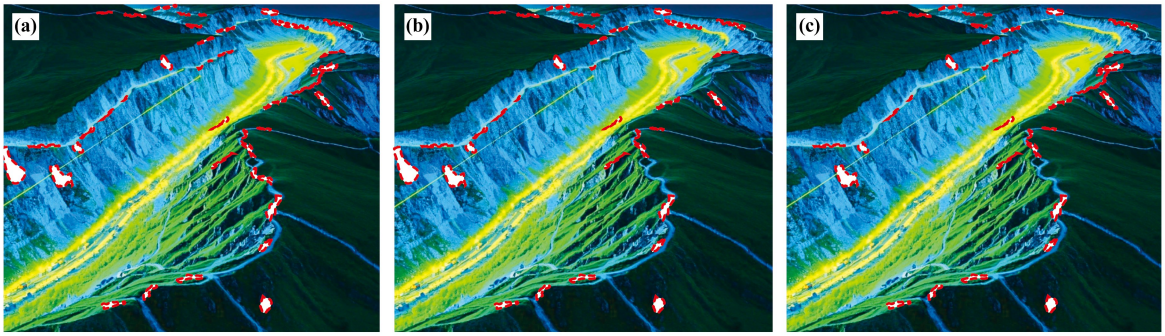
3 种方法的高陡边坡危岩体识别效果如图 2 所示,图中标记点位为识别的危岩体。从图 2 可以看出,本文提出的方法识别的危岩体数量最多,在危岩体识别上表现更突出。该方法采用克里金插值法来补充危岩体的点云数量,有效解决了在危岩体图像采集过程中,因设备角度、精度等因素导致的点云数据分布不均的问题,显著提升了危岩体识别精度。

3.3　高陡边坡危岩体识别性能分析

3.3.1　曲率估计误差

曲率估计误差是指采用某种方法估算的曲率值与真实曲率值之间的偏差。在本工程中,通过高精度测量与理论模型计算相结合的方式获取真实曲率。对于选取的边坡点云数据所在区域,先使用精度可达微米级的三维坐标测量机对边坡表面进行密集测量,获取大量精确的三维坐标点,形成高精度的点云数据集。然后,基于这些高精度数据,利用基于微分几何的理论模型,精确计算出每个点对应的真实曲率值,以此作为 3 种方法曲率估计误差对比的参考基准。

在高陡边坡危岩体识别任务中,点云数据的曲率估计误差是衡量识别方法性能的一个关键指标。曲率估计误差越小,意味着该方法在挖掘点云数据特征方面的精度越高,能更准确地反映边坡的实际情况,从而



(a) 本文方法；(b) 遥感综合解译方法；(c) 定量概率模型

图 2 危岩体识别效果

Fig. 2 Identification of unstable rock mass

得出更高的危岩体识别精度。为了确保样本具有足够的代表性，经过对边坡点云数据分布特点和数据量的综合评估，随机选取了 1 400 个边坡点云数据，3 种方法的曲率估计误差结果如 3 所示。由图 3 可以看出，本文所提方法的边坡曲率估计误差最小(低于 0.3%)，表明该方法能够精确捕捉危岩体边界、裂缝等关键几何特征，可保证危岩体识别质量。本文所提方法优势在于能够准确找到点云数据的邻域拟合平面，并通过协方差矩阵和主成分分析技术精确提取特征值，从而有效降低各点云的曲率估计误差。

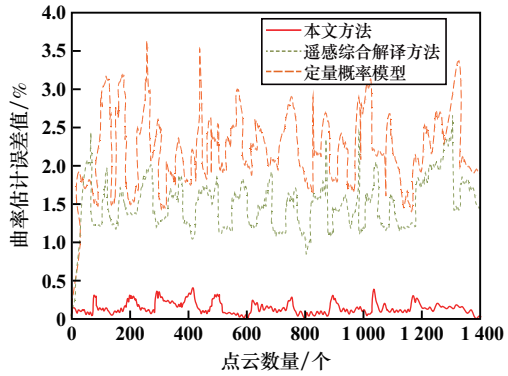


图 3 各方法的曲率估计误差

Fig. 3 Errors in curvature estimation by different methods

3.3.2 F1 值

F1 值(F1 Score)是用于危岩体识别方法的指标，它结合了精确率和召回率。实验中，使用设备采集了 14 组边坡的点云图像，并采用 3 种方法对这些图像进行危岩体识别，对比分析各方法的识别结果，并计算 F1 值，结果如图 4 所示。由图 4 可知，本文提出的方法得到的各组边坡危岩体识别的 F1 值一直保持在 0.99以上，显著高于另外 2 种方法。这一优越性能主要归因于本文所提方法采用了 Voronoi 图的增量法来重构点云数据，能够显著增强危岩体的结构特征，从而使得识别结果的 F1 值较大。

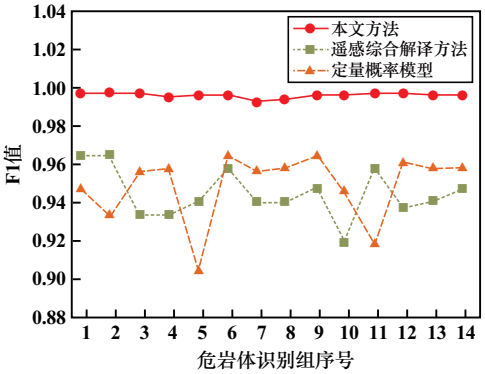


图 4 各方法计算的 F1 值

Fig. 4 F1 scores calculated by different methods

4 结论

1) 针对高陡边坡潜在危岩体点云数据不连续、不完整的问题，提出基于三维扫描点云重构的识别方法。该方法使用克里金插值法处理点云数据，增加数据点密度；采用局部表面拟合方法和 k-邻域搜索算法估算法向量和曲率，挖掘边坡几何特征；利用不一致性指标分析几何特征变化，设定阈值筛选边缘点，界定危岩体与稳定岩体边界；基于 Voronoi 图的增量法重建危岩体边缘轮廓内的点云数据，构建三维扫描点云数据模型，并运用 Slide 软件分析风险等级。

2) 采用克里金插值法处理高陡边坡三维扫描点云数据，通过变差函数计算、变差函数拟合和插值函数确定等步骤，得到完整的高陡边坡三维扫描点云数据，提高了数据的密度和完整性。

3) 通过 k-邻域搜索算法和最小二乘法求解局部平面，主成分分析计算曲率，挖掘高陡边坡几何特征；设定不一致性指标阈值，精准筛选危岩体边缘点，识别边坡危岩体边缘轮廓。

4) 以某露天矿高陡边坡为例,分别采用本文方法、遥感综合解译方法和定量概率模型进行危岩体识别,结果显示,本文方法识别的危岩体数量最多,曲率估计误差最小,各组边坡危岩体识别的 F1 值一直保持在 0.99 以上,识别质量高。

参考文献(References):

[1] 贺铮,谢谟文,吴志祥,等. 应用微芯桩传感器的拉裂型边坡危岩体临崩倾斜变形特征现场实测研究[J]. 岩土力学, 2024,45(11):3399-3415.
HE Zheng, XIE Mowen, WU Zhixiang, et al. Field measurement study on the pre-collapse inclination deformation characteristics of tension-cracking slope rock mass using micro-core-pile sensor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024,45(11):3399-3415.

[2] 李祥庆,吴顺川,刘兴雷,等. 基于断裂力学的高寒地区边坡危岩体稳定性分析[J]. 计算力学学报, 2023,40(6):955-962.
LI Xiangqing, WU Shunchuan, LIU Xinglei, et al. Stability analysis of slope dangerous rock mass in alpine region based on fracture mechanics[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2023, 40(6):955-962.

[3] 陈富强. 无人机倾斜摄影技术在高陡边坡危岩体识别及稳定性评价中的应用[J]. 测绘通报, 2024(10):132-137.
CHEN Fuqiang. Application of drone tilt photography technology in identification and stability evaluation of high and steep slope dangerous rock bodies[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024(10):132-137.

[4] LI X, WU L J, WANG Y J, et al. A data driven real-time perception method of rock condition in TBM construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024,61(5):1018-1034.

[5] 杨绪波,程强,袁进科,等. 基于无人机倾斜摄影的危岩识别及数值模拟分析[J]. 人民长江, 2023,54(6):112-119.
YANG Xubo, CHENG Qiang, YUAN Jinke, et al. Identification and numerical simulation analysis of unstable rock mass based on UAV tilt photography[J]. Yangtze River, 2023,54(6):112-119.

[6] 付德荃,王珊珊,吴彬,等. 基于无人机摄影测量技术的高陡边坡危岩体特征构建与分析[J]. 地球学报, 2024,45(1):53-62.
FU Dequan, WANG Shanshan, WU Bin, et al. Construction and analysis of dangerous rock mass characteristics of high and steep slope based on UAV photogrammetry technology[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024,45(1):53-62.

[7] 夏雄彬,谯立家,许万忠. 基于机载 LiDAR 及无人机影像的高位危岩体调查和成因分析[J]. 长江科学院院报, 2023,40(9):188-194.
XIA Xiongbin, QIAO Lijia, XU Wanzhong. Investigation and cause analysis of dangerous rock masses on high and steep slope based on airborne LiDAR and UAV imagery[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023,40(9):188-194.

[8] 张玉涛,王仕富,孙保燕,等. 面向边坡危岩的旋翼机环绕航摄处理与分析[J]. 遥感信息, 2023,38(2):119-126.
ZHANG Yutao, WANG Shifu, SUN Baoyan, et al. Processing and analysis of rotorcraft surrounding aerial photography facing dangerous rocks on slopes[J]. Remote Sensing Information, 2023,38(2):119-126.

[9] 杨泽至,舒清态,邱霜,等. 基于 ICESat-2/ATLAS 数据结合克里格插值进行区域尺度森林 LAI 估测[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023,45(5):1157-1170.
YANG Zezhi, SHU Qingtai, QIU Shuang, et al. Regional-scale forest LAI estimation based on ICESat-2/ATLAS data combined with Kriging interpolation[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2023,45(5):1157-1170.

[10] 叶爽怡,扈晓翔,司小胜,等. 采用滑动窗口与克里金插值算法的复杂系统可靠性评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2023,57(4):171-179.
YE Shuangyi, HU Xiaoxiang, SI Xiaosheng, et al. Reliability assessment method for complex systems using sliding window and Kriging interpolation algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023,57(4):171-179.

[11] 崔微,高德宇,王轩毫,等. 基于航空影像的高陡边坡突岩识别方法[J]. 地球科学, 2023,48(9):3378-3388.
CUI Wei, GAO Deyu, WANG Xuanhao, et al. Identification of rocky ledge on steep and high slopes based on aerial photogrammetry[J]. Earth Science, 2023,48(9):3378-3388.

[12] 冯治国,余颂,张伟,等. 高山峡谷区某顺层边坡地质特征及稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2023,67(5):13-19.
FENG Zhiguo, YU Song, ZHANG Wei, et al. Study on geological characteristics and stability of a bedding slope in alpine canyon area[J]. Railway Standard Design, 2023,67(5):13-19.

[13] 张晓贺,桑会勇,翟亮,等. 一种异质空间下加权 Voronoi 图的栅格生成算法[J]. 测绘科学, 2023,48(5):231-238.
ZHANG Xiaohe, SANG Huiyong, ZHAI Liang, et al. A raster-based algorithm of weighted Voronoi diagram in heterogeneous space[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023,48(5):231-238.

[14] 段新桥,葛咏,张彤,等. 离散地形曲面上的精确 Voronoi 图直接生成算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(5):799-806.
DUAN Xinqiao, GE Yong, ZHANG Tong, et al. Direct algorithm for the exact Voronoi diagram on discrete topographic space[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(5):799-806.

[15] 肖艳阳,李渭,徐少平. 三维精确 power 图的 GPU 并行计算[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023,35(12):1958-1965.
XIAO Yanyang, LI Wei, XU Shaoping. Parallel computation of 3D accurate power diagrams on GPU[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2023,35(12):1958-1965.

[16] 卢海军,于宁. 基于邻近数据查询算法的街区路网规划仿真[J]. 计算机仿真, 2024,41(3):119-122.
LU Haijun, YU Ning. Simulation of block road network planning based on neighboring data query algorithm[J]. Computer Simulation, 2024,41(3):119-122.

引用本文:赵彦旭,张扬,郭太堂,等. 三维扫描点云重构下高陡边坡危岩体识别方法[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):60-65.

ZHAO Yanxu, ZHANG Yang, GUO Taitang, et al. Identification of unstable rock mass in high and steep slopes based on point cloud 3D reconstruction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):60-65.