

无人机贴近摄影技术在高陡边坡的三维重建与结构面识别中的应用

王林峰, 蒋 辉, 唐 宁, 黄晓明, 谭国金

Three-dimensional reconstruction and structural surface identification of high steep slopes based on UAV close-range photogrammetry

WANG Linfeng, JIANG Hui, TANG Ning, HUANG Xiaoming, and TAN Guojin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309014>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

熊开治, 任志远, 赵亚龙, 杨忠平, 张黎健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 62–69

无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用

Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes

程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 侯赠, 陈娜 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 143–154

无人机载LiDAR和倾斜摄影技术在地质灾害隐患早期识别中的应用

The application of UAV LiDAR and tilt photography in the early identification of geo-hazards

贾虎军, 王立娟, 范冬丽 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 60–65

控制点布设方案对无人机精度测量的影响及其应用

Influence of control point number on UAV low-altitude photogrammetry and its application: A case study in subsidence monitoring of a tailing dam area in northwestern China

戴嵩, 魏冠军, 梁斌 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 113–120

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91–100

危岩体精细调查与崩塌过程三维场景模拟

Comprehensive analysis of hazardous rock mass and simulation of potential rockfall processes using 3D terrain model: A case study of the high cut slope near damsite of a hydropower station in southern China

王明辉, 曹熙平, 谯立家 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 86–96



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202309014

王林峰, 蒋辉, 唐宁, 等. 无人机贴近摄影技术在高陡边坡的三维重建与结构面识别中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 92-100.

WANG Linfeng, JIANG Hui, TANG Ning, et al. Three-dimensional reconstruction and structural surface identification of high steep slopes based on UAV close-range photogrammetry[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 92-100.

无人机贴近摄影技术在高陡边坡的三维重建与结构面识别中的应用

王林峰^{1,2}, 蒋辉^{1,2}, 唐宁^{1,2}, 黄晓明³, 谭国金⁴

(1. 重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市高校市级重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 东南大学交通学院, 江苏南京 211189;

4. 吉林大学交通学院, 吉林长春 130022)

摘要: 地质灾害调查可及时发现隐患、发出预警, 避免生命财产损失。为解决高陡边坡调查风险高、效率低等问题, 提出了基于无人机贴近摄影的高陡边坡三维重建与结构面识别方法。以重庆南川甄子岩为例, 首先通过无人机贴近摄影和航线补充摄影获取高清航拍图, 利用 SFM-MVS 算法构建精细三维模型和三维点云; 然后提出自适应 KNN 算法, 提高点云共面性检测通过率, 通过最小二乘法拟合最佳平面方程, 利用遗传退火模糊 C 算法实现点云聚类; 最后根据点云协方差矩阵特征值和特征向量反算点云平面参数和法向量, 并完成结构面识别和结构面产状参数提取。结果表明点云共面性检测通过率达 99.6%, 识别产状最大差值仅为 4.82°。研究成果可为高陡边坡地质信息快速获取、稳定性评价及防灾减灾提供思路。

关键词: 无人机贴近摄影; 高陡边坡; 共面性检测; 三维重建; 结构面

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)01-0092-09

Three-dimensional reconstruction and structural surface identification of high steep slopes based on UAV close-range photogrammetry

WANG Linfeng^{1,2}, JIANG Hui^{1,2}, TANG Ning^{1,2}, HUANG Xiaoming³, TAN Guojin⁴

(1. Key Laboratories of Mountainous Area Highway Transportation and Transportation Geological Disaster Reduction in University of Chongqing, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Hehai, Chongqing

Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu

211189, China; 4. School of Transportation, Jilin University, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: Geological disaster investigations enable timely detection of hazards, issuance of early warnings, and prevention of loss of life and property. To address the challenges of high risk and low efficiency of high steep slopes investigation, this study proposes a method of three-dimensional reconstruction and structural plane identification of high steep slope based on UAV close-range photogrammetry. Using Zengziyan in Nanchuan, Chongqing as a case study, the process begins with acquiring high-definition aerial photographs through UAV close-range and supplemental route photogrammetry. The SFM-MVS

收稿日期: 2023-09-09; 修订日期: 2024-01-26

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20600); 国家重点研发计划课题项目(2021YFB2600604; 2021YFB2600600); 重庆交通大学研究生科研创新项目(2022B0005)

第一作者: 王林峰(1983—), 男, 重庆合川人, 工学博士, 教授、博导, 主要从事地质灾害减灾理论与技术研究。

E-mail: wanglinfeng@cqjtu.edu.cn

algorithm is utilized to construct detailed 3D models and point clouds. An adaptive KNN algorithm is introduced to enhance the coplanarity detection passing rate in point clouds, while optimal planar equations are fitted using the least squares method. Point cloud clustering is achieved using a genetic annealing fuzzy C algorithm. Finally, according to the point cloud covariance matrix eigenvalues and eigenvectors, the point cloud plane parameters and normal vectors are inverted, and the structural surface identification and structural surface yield parameters extraction are completed. The results indicate a 99.6% passing rate for point cloud coplanarity detection, with a maximum deviation in identified orientation parameters of only 4.82° . This research provide insights for rapid acquisition of geological information, stability evaluation, and disaster prevention and mitigation for high steep slopes.

Keywords: UAV close-range photogrammetry; high steep slopes; coplanarity detection; three-dimensional reconstruction; structural surfaces

0 引言

结构面是随着地质历史发展在岩体内部形成的特殊面,包括层面、节理面等,岩体结构面是影响岩体质量和稳定性的关键因素。但野外边坡岩体往往由于坡体较高、坡角较陡等问题,使得结构面信息难以获取^[1]。目前,结构面信息的获取方法主要依靠传统接触式测量,测量结果不够准确,局限性较大,且主观性较强^[2-4]。为了满足高效精细化测量的测量,非接触式测量方法受到广大地质工作者的推崇,代表方法有干涉雷达^[5]、卫星遥感^[6]等,但这些方法也存在各自的局限性。干涉雷达造价昂贵,受地形限制较大;卫星遥感仅适用于大范围、近平面的滑坡调查,精度较低。

近年来无人机摄影测量发展迅速,高效、低价、适用性强的特点使其受到越来越多的关注。结合日益成熟的运动恢复结构算法(structure from motion, SFM)和多视图立体匹配算法(multi view stereo, MVS),通过无人机摄影测量构建的三维模型平面精度为 ± 3.4 cm,高程精度为 ± 1.5 cm^[7],非常适合复杂地形的测量^[8]。基于此,国内外学者开展了基于无人机摄影测量的边坡灾害调查研究。Yan 等^[9]基于无人机摄影测量生成岩质边坡表面模型,提出了一种新的半自动危岩块提取方法。Cui 等^[10]基于三维点云对滑坡边界结构特征进行研究。对于高陡边坡而言,无人机摄影测量也逐渐成为重要调查手段之一。熊开治等^[11]基于无人机航测对高陡破碎岩坡表生节理面开展了快速识别和高精度图像建模。周成凯等^[12]基于小型无人机和遥感信息技术,实现了高陡边坡危岩体快速调查与稳定性分析。康尘云^[13]基于倾斜摄影技术,对位观音山危岩带进行识别、几何特征提取以及稳定性分析。可见,无人机倾斜摄影技术在高陡边坡调查研究中的应用逐渐增多。

不同于激光雷达依靠激光脉冲获取目标点云,无人

机贴近摄影利用高分辨率图像得到三维点云,且贴近摄影通过更细致的航线规划,可获得比倾斜摄影更精准的点云模型。因此,本文基于多视角无人机贴近摄影技术,通过改进飞行方法和飞行路径,获取更加全面的目标信息,建立了高陡边坡高质量三维点云模型。结合三维模型,提出基于自适应 KNN 的岩体结构面自动识别方法,并成功应用于重庆市甄子岩高陡边坡结构面识别。研究成果可为高陡边坡快速调查、结构面提取提供新的思路。

1 边坡三维点云建模

1.1 多视角无人机贴近摄影

在进行无人机摄影测量前,需要先对无人机摄影测量的各个参数进行控制,无人机摄影测量参数主要包括无人机影像的地面分辨率(GSD)、飞行高度、重叠率和倾斜角度。在确定地面分辨率前,需要充分考虑当地的地形环境条件,工程对影像精度的要求,选择适合的地面分辨率。飞行高度(h)是无人机拍摄时与地面的高差,如图 1 所示。重叠率主要包括航向重叠率和旁向重叠度,对于重叠率的设置一般为 60%~80%。倾斜角度是无人机飞行拍摄时搭载相机的倾斜角度,是相机光轴与垂直方向上的夹角,一般设置为 30° ~ 60° ,且 45° 为最佳。

面对边坡坡面起伏较大、存在多组不同方向结构面的情况时,无人机贴近摄影在某些结构面上存在视野盲区,影响三维点云建模质量和结构面识别。因此,本文提出了一种多视角无人机贴近摄影测量方法,在常规贴近摄影航线的基础上,拍摄距离不变,结合拍摄坡体起伏和结构面发育情况,对部分结构面进行多视角补偿拍摄,增加短航线和不同拍摄角度的补偿拍摄点,清除视野盲区,获取多视角边坡岩体照片,如图 2 所示,为建立更高精度的边坡三维点云模型打下坚实基础。

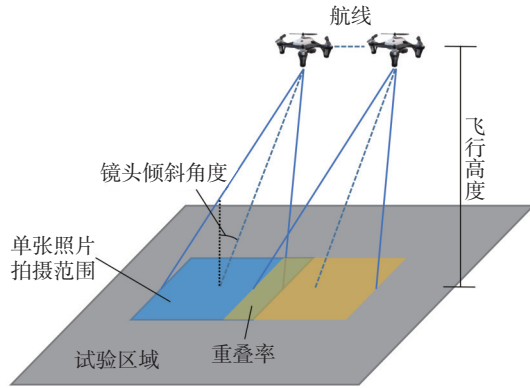


图 1 无人机倾斜摄影技术

Fig. 1 UAV tilt photography technique

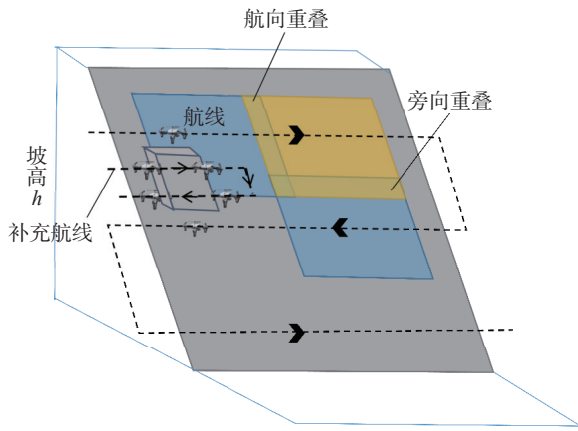


图 2 多视角无人机贴近摄影测量技术

Fig. 2 Multi-view UAV close-range photogrammetry technique

1.2 基于 SFM-MVS 算法三维模型重建

获得大量高分辨率照片后,通过尺度不变特征转换算法(SIFT)^[14]对不用照片的特征点进行提取和匹配,基于 SFM 算法建立边坡的稀疏点云模型,最后用 MVS 算法对边坡进行点云的密集重建,进而生成边坡的三维模型。

基于 SIFT 算法的特征点提取与匹配主要步骤包括:① 尺度空间极值检测;② 特征点定位;③ 特征点方向确定;④ 特征点描述;⑤ 特征点匹配。

基于 SFM 算法的稀疏点云重建基本流程包括:① 确定照片的内部参数和外部参数;② 确定特征点的三维坐标;③ 三维坐标优化。

基于 MVS 算法的密集点云重建基本流程为:① 面片生成;② 密集点云生成。

2 结构面自动识别

2.1 自适应 KNN 算法

为了准确识别结构面,需要计算点云模型中各点的法向量,最近邻搜索算法(k-nearest neighbors, KNN)^[15]

是计算点云法向量的基础。传统 KNN 算法因部分区域邻域共面性差导致点云模型信息缺失,基于此提出自适应 KNN 算法,保留 KNN 算法大幅度缩短检索时间的优点,同时提高目标点邻域的空间特征,提升法向量计算精度。采用自适应 K 值修正传统固定 K 值,根据所获取三维点云的最大和最小密度分布,确定邻域 K 值的最大值 $K_{\max}$ 和最小值 $K_{\min}$ 。

2.2 点云法向量计算

对于点云空间中的一个目标点 $p_i(x_i, y_i, z_i)$,与目标点邻域 $K-1$ 个点数据,形成点云集 $\{P\}=\{p_a, p_{a+1}, \dots, p_i, \dots, p_{a+K}\}$,点云集 $\{P\}$ 中心点云坐标 $p'=(x', y', z')$, 即:

$$p' = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K p_i \quad (1)$$

点云集中目标点邻域点云三维坐标构成矩阵 A , 即:

$$A = \begin{bmatrix} x_a & y_a & z_a \\ x_{a+1} & y_{a+1} & z_{a+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{a+K} & y_{a+K} & z_{a+K} \end{bmatrix}_{K \times 3} \quad (2)$$

点云集中目标点邻域点云中心点三维坐标构成矩阵 B , 即:

$$B = \begin{bmatrix} x' & y' & z' \\ x' & y' & z' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x' & y' & z' \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x' & y' & z' \end{bmatrix}_{K \times 3} \quad (3)$$

点云集中目标点邻域点云信息 $\{P\}$ 三维坐标构成的协方差矩阵 M 为:

$$M_{3 \times 3} = \frac{1}{K} (A - B)(A - B)^T \quad (4)$$

协方差矩阵 M 的特征值 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 和特征向量 $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$ 关系为:

$$\lambda \mu = M \mu \quad (5)$$

特征值反映了目标点邻域点云集 $\{P\}$ 在三维空间上的分布规律。

引入特征指数熵 E , 提高计算精准度。

$$E = L_\lambda \ln(L_\lambda) + P_\lambda \ln(P_\lambda) + S_\lambda \ln(S_\lambda) \quad (6)$$

其中, $L_\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2) / \lambda_1$ 、 $P_\lambda = (\lambda_2 - \lambda_3) / \lambda_1$ 、 $S_\lambda = \lambda_3 / \lambda_1$ 分别为线状指数、面状指数、分散指数,且 $S_\lambda + P_\lambda + L_\lambda = 1$ 。

假设平面方程为:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (7)$$

其中, a 、 b 、 c 为该平面对应单位法向量在各个坐标轴方向上的分量, d 代表原点到平面的距离, 且 $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ 。

为了使拟合的平面为最佳平面, 需要满足邻域点云集 $\{P\}$ 中 K 个点到平面距离的平方和 e 最小, 即:

$$e = \sum_{i=1}^K d_i^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

$$d_i = |ax_m + by_m + cz_m + d| \quad (9)$$

其中, d_i 是邻域点云集 $\{P\}$ 中的任一点 $p_m(x_m, y_m, z_m)$ 到平面的距离。

2.3 算法验证

为了验证方法的可靠性, 创建六面体点云模型如图 3 所示, 进行点云分析和结构面识别。六面体点云由 3 978 个散点组成, 包含 6 个表面, 共 3 组产状, 如表 1 所示。

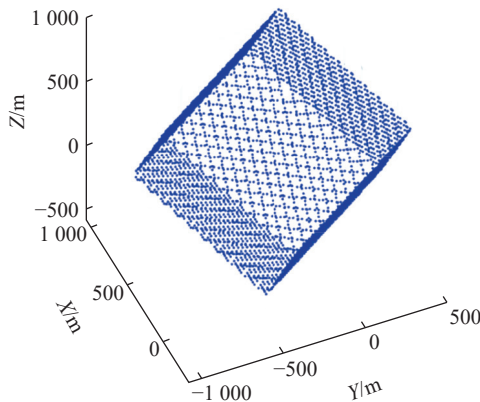


图 3 六面体点云形态

Fig. 3 Hexahedral point cloud morphology

表 1 六面体点云表面产状

Table 1 Hexahedral point cloud surface orientations

序号	倾向/(°)	倾角/(°)	点数/个
1	0	45	1 326
2	125	60	1 326
3	235	60	1 326

六面体点云分布均匀, 只需考虑一种密度下 K 值的最大与最小值, 故最大值取 50, 最小值取 5。每个点云的邻域 K 值从 5 开始, 步长为 5, 递增至 50 结束。共面性检测中偏差阈值 $\eta_{\max} = 0.2^{[16]}$, 点云数据小于 $\eta_{\max}$ 的点越多, 点云共面性越好。采用 5 组固定 K 值 ($K=10, 20, 30, 40, 50$) 与自适应 K 值作对比, 如图 4 所示。

由图 4(a)可以看出, 自适应 K 值通过共面检测的

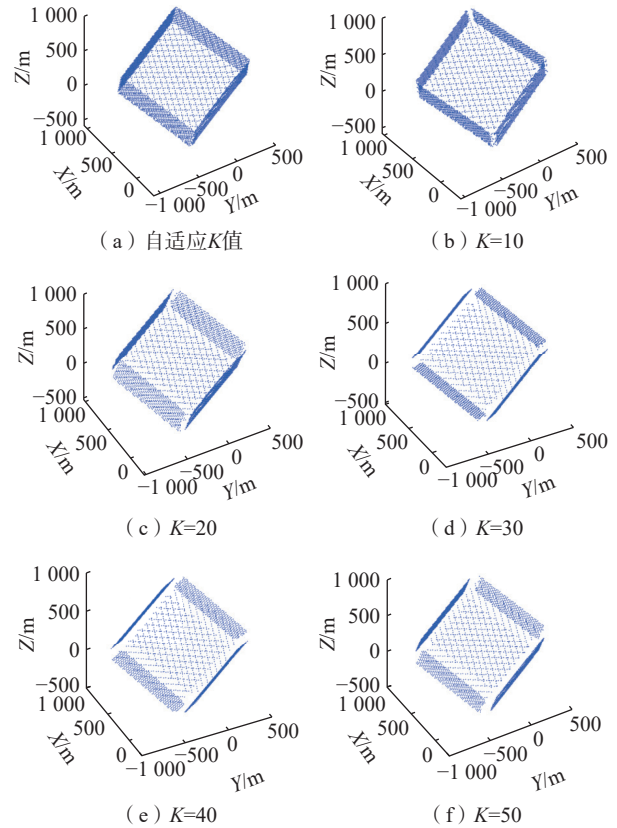


图 4 点云共面识别结果

Fig. 4 Point cloud coplanarity identification results

点云数量多, 边缘点云缺失少, 六面体点云数据的完整性较好; 在图 4(b)~(f) 中, 随着 K 值的增大, 点云数据缺失的越多, 表面相交位置点云缺失明显。图 5 则更加清晰表明两种方法的优劣。固定 K 值越大共面性检测点云数目越少, $K=50$ 时通过共面性检测的点云数目最少, 仅有 2 875 个点云, 点云通过率仅为 72.27%; $K=10$ 的最优情况下也只通过 3 573 个, 缺失点云 405 个, 点云通过率为 89.82%。自适应 K 值通过点云数目为 3 904

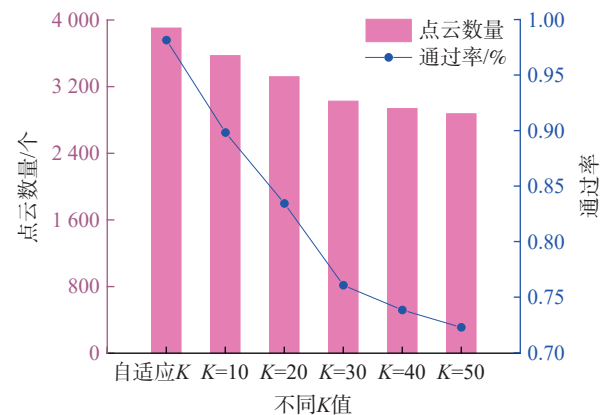


图 5 共面性检测结果对比

Fig. 5 Comparison of coplanarity test results

个,点云通过率高达 98.14%,远高于固定 K 值,对比固定 K 值最优情况($K=10$)通过率增加了 8.32%。

结合图 4、图 5 可知,传统固定 K 值算法在平面交界位置的点存在一定的识别误差,因为对于两平面的边界点,选取的 K 值越大,目标点云邻域共面性也就越差,法向量计算时缺失的点云就越多。但 K 值较小时,非边缘部位的法向量计算结果太敏感,影响法向量计算结果。而自适应 K 值很好地解决了固定 K 值下两两表面相交位置处的点云数据缺失问题,自适应 K 值的点云通过率明显高于固定 K 值。

在完成共面性检测后,基于最小二乘法计算目标点法向量,部分点云数据平面参数计算结果如表 2 所示。通过遗传退火模糊 C 均值算法(SAGA-FCM)对目标点法向量进行聚类分析。遗传退火模糊 C 均值算法是基于模糊 C 均值算法的缺点,利用遗传退火算法进行改进,从而实现全局最优的一种算法。各目标点对应的法向量分布图和极点图如图 6(a)(b)所示。计算各聚类中心产状,并与原六面体产状进行对比,如表 3 所示。

表 2 点云数据平面参数 a 、 b 、 c 、 d 的计算结果(部分)
Table 2 Calculation results for point cloud plane parameters a , b , c , d (partial)

序号	a	b	c	d
1	0.051 252 697	-0.547 643 24	0.835 140 71	664.388 98
2	0.051 252 544	-0.547 643 54	0.835 140 59	664.859 25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 879	0.500 000 18	0.707 106 71	-0.500 000 00	500.000 12
1 880	0.500 000 06	0.707 106 65	-0.500 000 00	500.000 06
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2 525	0.707 106 77	-1.0955361e-9	0.707 106 83	500
2 526	0.707 106 71	1.5848286e-8	0.707 106 89	499.999 94
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

从图 6 可知,点云产状主要集中于三个点位,与六面体点云 3 组结构面一致。按聚类结果将点云数据分为红、绿和蓝三种。红色代表第 1 组结构面,蓝色代表第 2 组结构面,绿色代表第 3 组结构面,如图 7 所示。通过自适应 KNN 算法处理点云数据,不仅解决了表面交界位置的点存在的识别误差,极大程度的保障了结构面边界的完整性,还提高了结构面识别结果的准确性。

3 工程应用

3.1 工程背景

为了进一步验证上述方法在实际工程应用的有效性,将算法应用于甑子岩的局部结构面识别。甑子岩位于重庆南川金山镇玉泉村,如图 8 所示,分为两级陡崖,Ⅰ级陡崖由栖霞组和茅口组一段的石灰岩组成,Ⅱ级陡

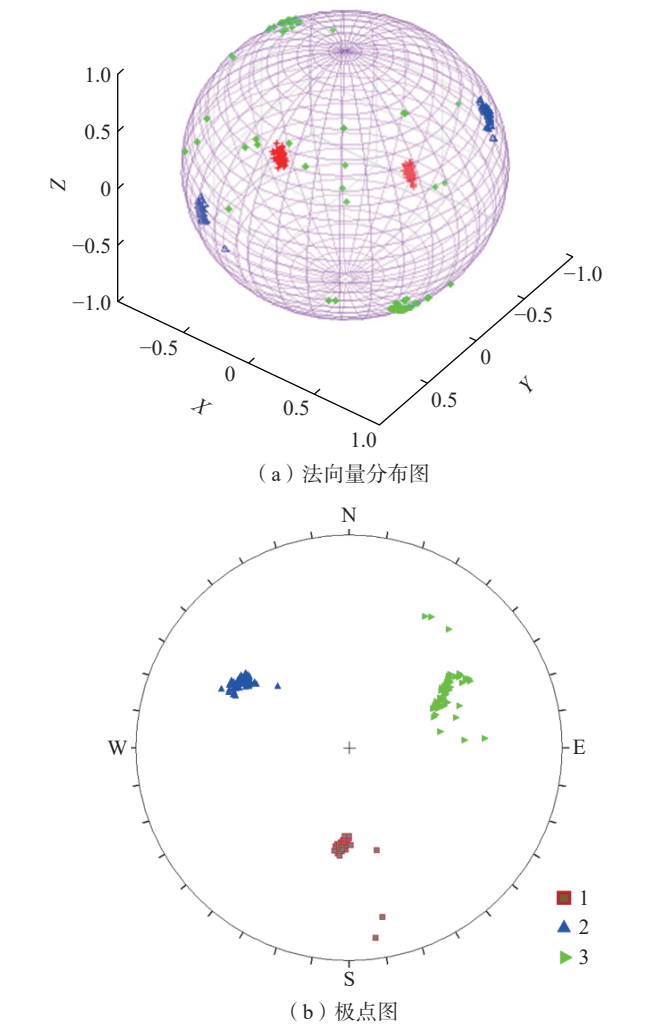


图 6 各目标点聚类结果
Fig. 6 Clustering results for each target point

表 3 六面体点云表面产状与聚类结果产状对比
Table 3 Comparison of hexahedral point cloud surface occurrence with clustering result occurrence

序号	聚类中心	倾向/(°)	差值/(°)	倾角/(°)	差值/(°)
1	已知	0		45	
	聚类结果	0.09	0.09	45.19	0.19
2	已知	125		60	
	聚类结果	124.92	0.08	60.30	0.30
3	已知	235		60	
	聚类结果	234.80	0.2	60.69	0.69

崖由茅口组三、四、五段的石灰岩组成。由于甑子岩地形高陡,落石不断,导致甑子岩地质调查不仅难度大,且危险性较高。

3.2 高陡边坡三维模型重建

选取甑子岩Ⅰ级陡崖区局部区域进行研究。为建立高精度三维模型,无人机起飞前,航向重叠率设置为 80%,旁向重叠率设置为 70%,相机倾斜角度为 45°,对

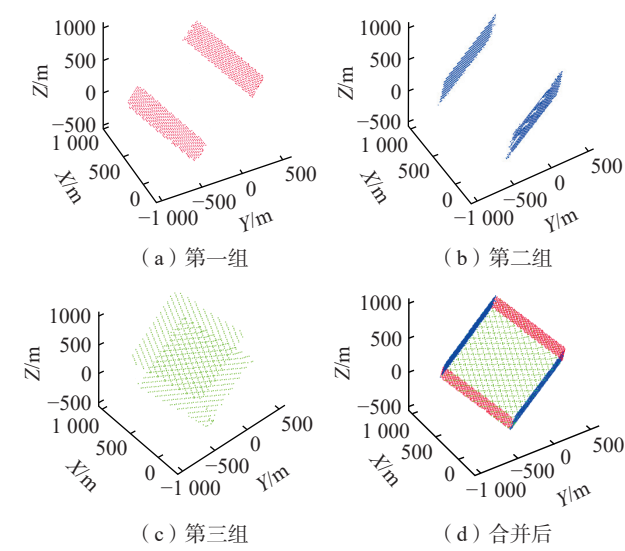


图 7 自适应 KNN 聚类结果
Fig. 7 Adaptive KNN clustering results

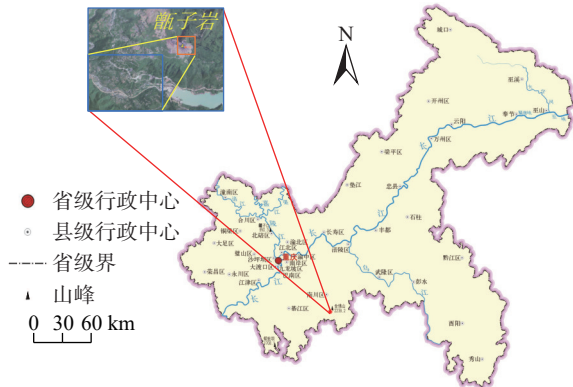


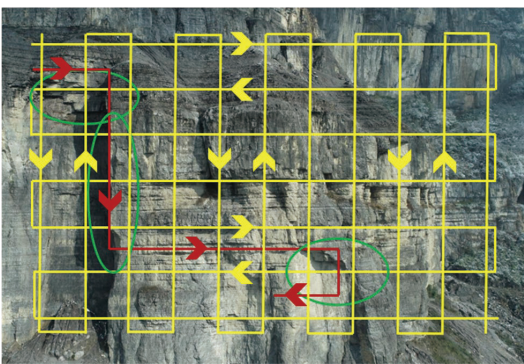
图 8 研究目标位置
Fig. 8 Research target location

甌子岩进行多视角贴近摄影测量。无人机航线如图 9(a) 所示,其中黄线代表自动飞行航线,红线代表补充拍摄航线,绿圈代表自动飞行盲区。共计获得 422 张照片,通过 Pix4dmapper 完成照片特征点的提取与匹配,稀疏点云和稠密点云的构建,生成 207 m,宽 50 m,高 124 m 的研究区域三维模型,如图 9(b)(c)所示。

为检验三维点云模型的还原度,选取陡崖上的复杂区域和结构面发育部位进行现场照片与点云模型的对比,如图 9(d)所示。可以看出,选取的三处区域生成的点云模型与原图近乎一致,结构面纹路清晰,满足后续结构面识别和信息提取工作的需要。

3.3 结构面识别

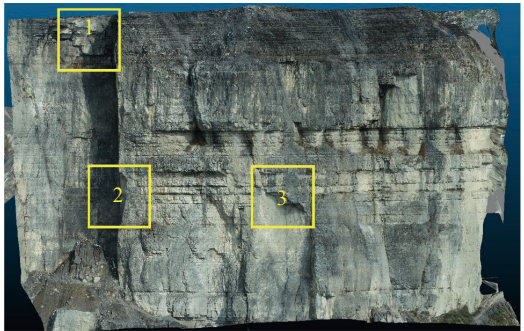
为验证结构面信息提取算法的可靠性和有效性,以图 9(d)中的区域 3 为例开展验证分析。首先开展前处理过滤点云中的起伏点和误差点,然后进行结构面识别



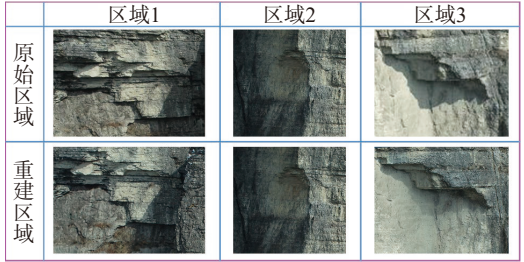
(a) 无人机航线图



(b) 照片筛选



(c) 三维模型重建



(d) 局部区域对比

图 9 三维建模流程

Fig. 9 Three-dimensional modeling process

和产状计算。对点云集进行邻域共面性检测,检测结果如图 10 所示。从图 10(a)(d)可知,在固定 K 值的算法下,点云缺失明显,随着 K 值增大,点云缺失的也越多。从图 10(e)可知,区域 3 点云总数为 46 233,自适应 K 值检测点云数量为 46 066,点云通过率达到了 99.6%;

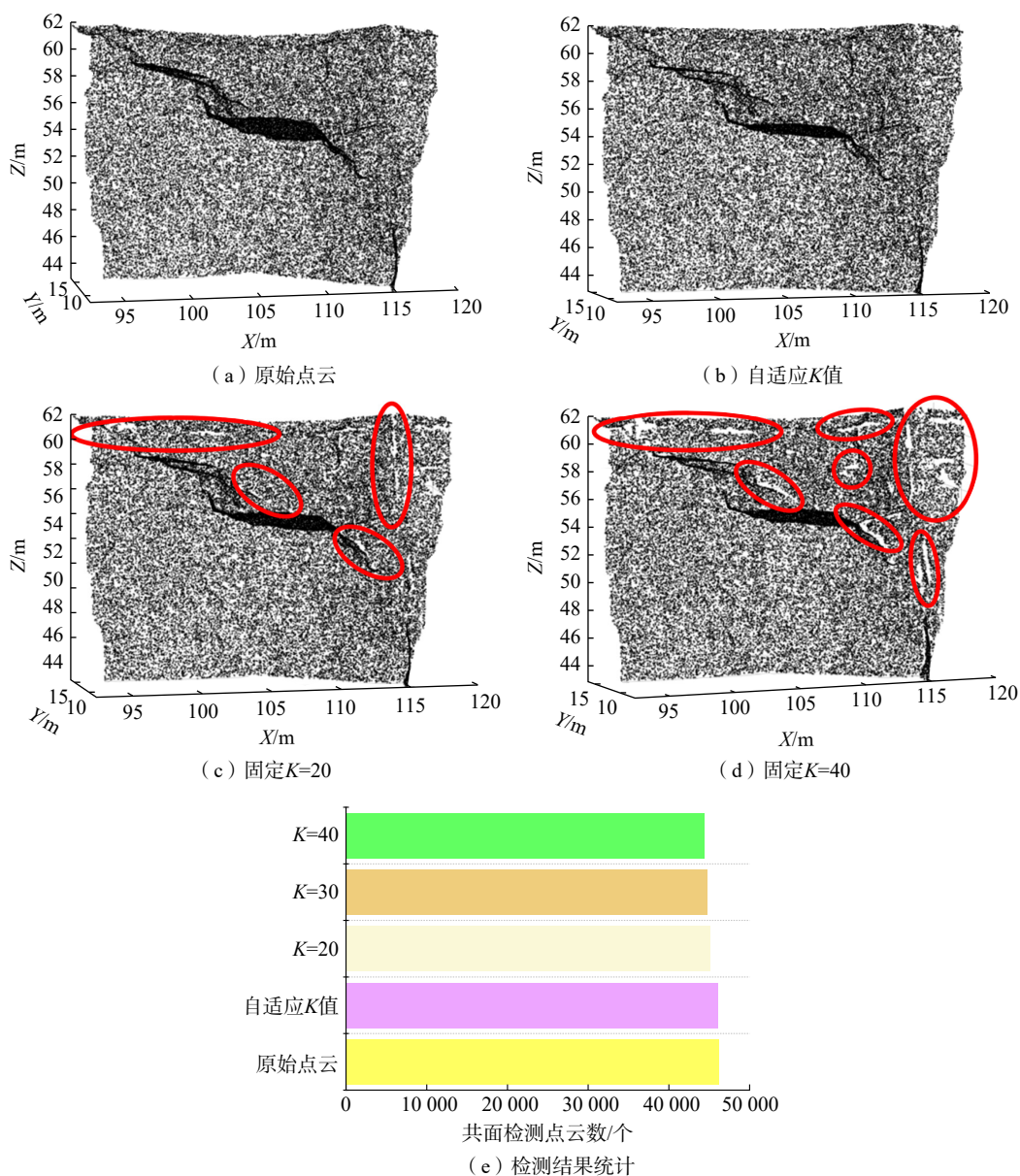


图 10 邻域共面性检测结果

Fig. 10 Neighborhood coplanarity detection results

固定 $K=20$ 、 $K=40$ 对应的点云通过率分别为 97.7%、96.0%，效果均不如自适应 K 值。

完成邻域共面性检测后，开展法向量计算，并采用 SAGA-FCM 算法对点云进行聚类分析，得到结构面最优分组数为 5。区域 3 结构面识别结果如图 11、图 12 所示，结构面产状信息如表 4 所示。

从图 11、图 12 和表 4 可知，通过自动识别算法将点云数据划分为 5 组，分别对应 J1—J5 结构面。J1 为一组水平断裂面，倾向为 176.45° ，倾角为 5.10° ，由岩块体沿岩体的水平层面发生断裂后形成。J2、J4 结构面为两组切割面，其中，J2 结构面倾向 330.18° ，倾角

88.36° ，J4 结构面倾向 210.86° ，倾角 89.05° 倾角均大于 80° ，为陡倾结构面，位于岩体表面。J3 结构面为岩体表面两相邻陡倾结构面间的过渡带，倾向为 188.53° ，倾角为 67.67° 。J5 为一组倾斜断裂面，倾向为 62.57° ，倾角为 50.30° 。与人工辨识出 4 组较为明显的结构面，自动识别结果与人工识别结果基本一致。

为了进一步验证识别结果的准确性，将识别产状与实测产状进行对比，如表 5 所示。根据文献^[17]数据可知，甄子岩主要发育两组陡倾结构面，产状为 $210^\circ \angle 89^\circ$ ， $325^\circ \angle 89^\circ$ ，与识别的结构面 J4、J2 相对应。由表 5 看出主要发育的两组陡倾结构面，识别产状与实测产状间差

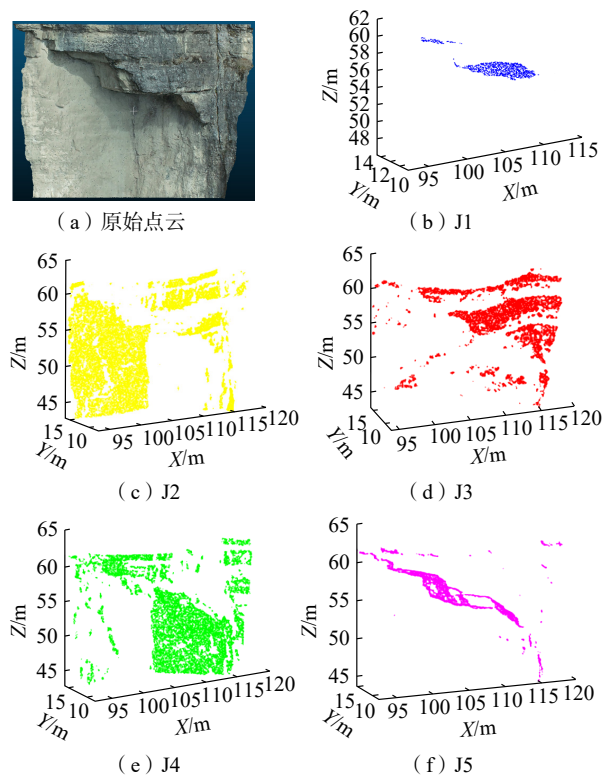


图 11 结构面识别结果

Fig. 11 Discontinuity plane identification results

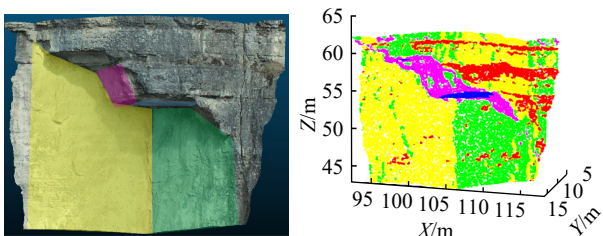


图 12 人工识别与自动识别结果对比

Fig. 12 Comparison of manual and automatic recognition results

表 4 结构面产状信息

Table 4 Discontinuity plane orientations information

结构面	识别倾向/(°)	转换后倾向/(°)	倾角/(°)
J1	273.55	176.45	5.10
J2	119.82	330.18	88.36
J3	261.47	188.53	67.67
J4	239.14	210.86	89.05
J5	27.43	62.57	50.30

表 5 结构面产状识别

Table 5 Discontinuity plane orientation identification

分组	识别结构面	倾向/(°)	倾向差值/(°)	倾角/(°)	倾角差值/(°)
陡倾结构面1	实测产状	210		89	
	识别产状	210.86	0.86	89.05	0.05
陡倾结构面2	实测产状	325		89	
	识别产状	330.18	4.82	88.36	0.64

值最大值为 4.82°,在工程容许差值范围内,说明了两组结构面为长大结构面,在上下陡崖均有分布,也验证了提出的算法在工程实例应用上的准确性和可靠性,为块体稳定性分析等工作提供了数据支撑。

4 结论

(1)基于多视角无人机贴近摄影测量方法和 SFM-MVS 算法,通过补充航线、多视角补偿拍摄,实现了甄子岩一级陡崖三维重建,对比发现模型结构面纹路清晰、局部特征明显,建模效果良好。

(2)提出了一种基于自适应 KNN 结构面识别算法,通过特征指数熵放大点云空间特征,提高点云共面性检测通过率,然后利用遗传退火模糊 C 聚类算法实现点云聚类 and 结构面产状识别。通过六面体点云模型验证发现,自适应 KNN 算法相比传统固定 K 值,点云缺失率仅为 1.9%,三维点云模型更加完整,结构面识别产状与试验产状最大差值仅为 0.69°,在可接受范围内。

(3)以重庆南川甄子岩为例,基于无人机多视角倾斜摄影,重建了陡崖三维模型。选取出露较多和关键结构面进行对比,结果表明自适应 KNN 结构面识别算法在结构面边界处的识别更准确,点云通过率达到了 99.6%,识别出的结构面产状与实测值对比最大差值为 4.82°,识别效果好,可为后续工程应用提供参考。

参考文献(References):

[1] NESBIT P R, HUBBARD S M, HUGENHOLTZ C H. Direct georeferencing UAV-SfM in high-relief topography: Accuracy assessment and alternative ground control strategies along steep inaccessible rock slopes [J] . Remote Sensing, 2022, 14(3): 490.

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

[3] 于海明,张熠斌,方向辉,等.综合 InSAR 技术和多源 SAR 数据在滑坡变形监测中的应用——以吉林治新村滑坡为例 [J] .中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 155-162. [YU Haiming, ZHANG Yibin, FANG Xianghui, et al. Application of multiple InSAR techniques and SAR data from multisources to landslide deformation monitoring: A case study of the Zhixincun landslide in Jilin Province [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 155-162. (in Chinese with English abstract)]

[4] 王猛,何德伟,贾志宏,等.基于多源遥感数据的高位滑

- 坡特征分析——以广元市利州区荣山镇岩窝村滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 57 – 68. [WANG Meng, HE Dewei, JIA Zhihong, et al. Analysis of high-position landslide characteristics based on multi-source remote sensing data: A case study of the Yanwo Village landslide in Rongshan Town, Lizhou District, Guangyuan City [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 57 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张本浩, 魏云杰, 杨成生, 等. 西藏然乌地区地质灾害隐患点 InSAR 识别与监测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 18 – 26. [ZHANG Benhao, WEI Yunjie, YANG Chengsheng, et al. InSAR identification and monitoring of geological hazards in Ranwu region of Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 18 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 卫童瑶, 殷跃平, 李滨, 等. 西藏笨多高位变形体遥感解译与危险性预测分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 17 – 24. [WEI Tongyao, YIN Yueping, LI Bin, et al. Remote sensing interpretation and risk prediction analysis of Benduo high deformation body in Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 17 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈仁朋, 吴熠文, 余加勇, 等. 基于无人机影像序列的城市精细化三维模型精度评估 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2019, 46(11): 172 – 180. [CHEN Renpeng, WU Yiwen, YU Jiayong, et al. Method accuracy evaluations of building urban detailed 3D model based on the unmanned aerial vehicle image sequences and its accuracy evaluations [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 172 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 余加勇, 薛现凯, 陈昌富, 等. 基于无人机倾斜摄影的公路边坡三维重建与灾害识别方法 [J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 77 – 86. [YU Jiayong, XUE Xiankai, CHEN Changfu, et al. Three-dimensional reconstruction and disaster identification of highway slope using unmanned aerial vehicle-based oblique photography technique [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 77 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [9] YAN Jianhua, CHEN Jianping, ZHANG Yansong, et al. Semi-automatic extraction of dangerous rock blocks from jointed rock exposures based on a discontinuity trace map [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 156: 105265.
- [10] CUI Shenghua, LIANG Yufei, PEI Xiangjun, et al. Structural characteristics of landslide failure boundaries using three-dimensional point clouds: A case study of the Zhaobiyan landslide, China [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(4): 127.
- [11] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周成凯, 李远耀, 王宁涛, 等. 基于小型无人机的高位危岩快速调查与稳定性评价 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 3920 – 3928. [ZHOU Chengkai, LI Yuanhao, WANG Ningtao, et al. Application of micro unmanned aerial vehicle in a quick investigation and stability assessment of high dangerous rock mass [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 3920 – 3928. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 康尘云. 基于倾斜摄影的高位危岩特征获取和稳定性评价——以重庆万州观音山危岩带为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(5): 66 – 75. [KANG Chenyun. Feature acquisition and stability evaluation of high dangerous rock mass based on oblique photography: A case study at Guanyinshan in Wanzhou, Chongqing Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(5): 66 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [14] KONG Deheng, SAROGLU C, WU Faquan, et al. Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 141: 104729.
- [15] ADHIKARY S, BANERJEE S. Introduction to distributed nearest hash: On further optimizing cloud based distributed kNN variant [J]. Procedia Computer Science, 2023, 218: 1571 – 1580.
- [16] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 周福川, 唐红梅, 王林峰. 缓倾角塔柱状危岩压裂损伤-突变失稳预测 [J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1341 – 1352. [ZHOU Fuchuan, TANG Hongmei, WANG Linfeng. Catastrophe prediction of compression-induced fracturing and failure for a tower-shaped unstable rock mass with gentle dip angle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1341 – 1352. (in Chinese with English abstract)]