面向矿井巷道变形监测的自适应递进点云滤波算法研究*

王磊[1],张晶晶[2],齐俊艳[2],任助理[3]

(1.河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作市 454003;
2.河南理工大学 软件学院, 河南 焦作市 454003;
3.河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作市 454003)

摘要:三维激光扫描获取的矿井巷道点云数据往往伴有噪声干扰,现有滤波方法难以兼顾点云数据精简与巷道几何特征精准保留,而自适应滤波可根据原始数据特征动态调整滤波参数,能够为后续巷道变形监测提供高质量数据基础。提出一种自适应递进式点云滤波算法,融合改进自适应体素滤波和分层约束动态半径滤波实现点云精准去噪。其中,改进体素滤波可根据巷道几何复杂程度自适应调节体素网格尺寸,在高效精简点云的同时更好保留巷道几何特征;分层约束动态半径滤波通过分层约束模型优化动态半径参数,实现残余噪声的精准剔除。试验结果表明,与传统体素滤波、改进体素滤波及其常规组合方法相比,所提算法的点云简化率超92%,同时将点云体积变化率、表面积变化率控制在3%以内,可为矿井巷道变形监测提供可靠的数据预处理技术支撑。

关键词:巷道变形;点云去噪;自适应体素滤波;点云切片;分层约束

中图分类号:TD326;TN958.98 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)06-0218-07

Research on an Adaptive Progressive Point Cloud Filtering Algorithm for Deformation Monitoring of Mine Roadways

Wang Lei[1], *Zhang Jingjing*[2], *Qi Junyan*[2], *Ren Zhuli*[3]

(1.School of Computer Science and Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
2.School of Software, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China;
3.School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: Point cloud data of mine roadways acquired by three-dimensional laser scanning often contain noise interference. Existing filtering methods struggle to balance point cloud data simplification with the accurate preservation of roadway geometric features. In contrast, adaptive filtering can dynamically adjust filtering parameters based on the characteristics of the original data, thereby providing a high-quality data foundation for subsequent roadway deformation monitoring. An adaptive progressive point cloud filtering algorithm was proposed, which integrated an improved adaptive voxel filter and a layer-constrained dynamic radius filter to achieve precise point cloud denoising. Specifically, the improved voxel filter can adaptively adjust voxel grid sizes according to the geometric complexity of the roadway, effectively simplifying the point cloud while better preserving its geometric features. The layered constraint dynamic radius filter optimized the dynamic radius parameters through a layered constraint model, enabling the accurate elimination of residual noise. Experimental results show that, compared with traditional voxel filtering, the improved voxel filter, and their conventional combinations, the proposed algorithm achieves a point cloud simplification rate exceeding 92% while controlling the change rates of point cloud volume and surface area within 3%. It can provide reliable data preprocessing technical support for mine roadway deformation monitoring.

Key words: Roadway deformation, Point cloud denoising, Adaptive voxel filtering, Point cloud slicing, Layered constraint

0 引言

巷道是连接井筒与坑底的核心通道,被称为矿山生产的"咽喉",是矿井安全生产的生命线,其稳定性直接决定了矿山能否开采安全[1]。随着矿产资源开采强度与开采深度的持续增加,巷道围岩受到地

* **收稿日期**:2025-07-04
基金项目:国家自然科学基金青年资助项目(52204168);河南省重点研发与推广专项(科技攻关)资助项目(252102321101)
作者简介:王磊(1977—),男,河南焦作人,博士,教授,主要从事矿山安全方面的研究工作。E-mail:wlqjy@hpu.edu.cn
通信作者:张晶晶(1999—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事矿井巷道变形监测方面的研究工作。E-mail:zhangjj08252023@163.com

应力、强开采扰动等因素影响极易发生变形;同时,巷道本身处于高应力环境,且巷道应力集中效应显著,进一步加剧围岩失稳风险[2-3]。因此,随着矿井开采深度和范围不断拓展,巷道围岩的稳定性问题日益突出,精准的巷道变形监测已成为矿山安全管理的核心环节[4-6]。

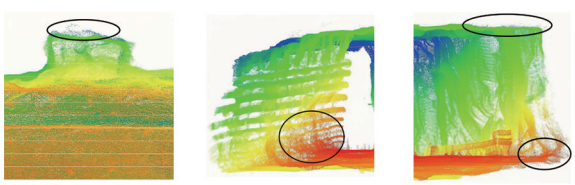
三维激光扫描技术具有非接触、高分辨率、高采样率的优势,可高效获取井下复杂表面和危险区域的三维空间信息,突破了传统单点测量的技术局限,是当前矿井巷道变形监测中常用的技术手段[7-11]。由于井下环境复杂,采集的激光点云数据普遍存在密度不均、噪声干扰严重等问题,会显著降低后续变形解算的精度和效率,因此,必须对噪声点进行滤波处理[12]。王海军等[13]通过基于多尺度噪声滤波的点云预处理技术实现点云去噪,但该方法易造成复杂曲面几何特征失真等缺陷。郑理科等[14]提出一种基于局部最优邻域法向量估算的巷道点云去噪方法,结合自适应邻域半径主成分分析算法优化特征提取,但该方法存在巷道高曲率区域适应性不足等缺陷。景宁波等[15]针对传统动态半径滤波方法在处理激光点云数据时存在近场噪声过多和远场有效数据丢失的问题,提出一种改进动态半径的矿井激光雷达点云滤波算法,但该算法的去噪目的是降低矿井尘雾环境的影响。陈登红等[16]深入分析了巷道点云噪声类型,针对性地优化了基于密度的聚类(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise,DBSCAN)算法与双边滤波算法,并实现两种算法的参数自适应调整机制,虽然在特定场景下实现了高精度去噪,但存在算法复杂度高等局限。

综合来看,上述去噪方法均不适合巷道变形分析前的去噪处理。基于此,本研究提出了一种递进式滤波算法:首先,通过改进的自适应体素滤波,创新性地通过法线方差动态调整体素尺寸,实现点云数据的均匀化分布;其次,通过分层约束的动态半径滤波算法,对点云切片分层构建约束模型,针对局部点云密度自适应调整滤波参数,在精准去除噪声的同时避免有效特征误删,最大化保护巷道原生几何结构。

1 矿井巷道噪声分析

巷道承担了矿井运输、通风、排水、供电、人员逃生等核心功能,其空间结构主要由巷道顶底板、两帮构成,内部常布设带式输送机、通风管网、水管、线缆等附属设施。三维激光扫描获取到的数据在煤矿井下应用中面临多源噪声的干扰[17],噪声来源主要有两类。一是系统误差,在煤矿井下环境作业中,三维激光扫描系统自身的位姿必须通过惯性测量单元和里程计确定,由于组成惯性测量单元的陀螺仪存在漂移问题,长时间累积计算会产生较大误差,破坏点云空间一致性。二是环境噪声,复杂环境引发的噪声具有多源性特征,孤立噪声点(见图 1(a))主要由传感器误报、井下粉尘散射干扰产生,呈零散分布,虽占比低,但会严重干扰点云数据几何特征的精准计算;扫描设备振动引发的规律性伪影(见图 1(b))呈条带状且具有明显周期性特征,这类噪声虽具有规律性,但其并非巷道真实结构信息,产生的干扰信号会掩盖巷道真实结构特征。

综上所述,本研究重点关注两类巷道点云噪声:一类是由井下复杂环境和传感器误差导致的异常点及孤立点、扫描边界噪声(见图 1(c));另一类是巷道两帮的高密度冗余噪声,这些噪声显著增加了数据处理的计算复杂度,降低了变形监测的效率与精度。



(a)孤立噪声点 (b)规律性伪影 (c)扫描边界噪声

图 1 巷道点云噪点

Fig.1 Noise in point cloud of the roadway

2 改进的巷道变形点云去噪算法

2.1 改进的自适应体素滤波

三维激光扫描获取的大规模点云数据给数据存储、传输和处理带来了极大的挑战,因此,点云精简与去噪预处理是必不可少的环节。体素滤波算法是点云处理中常用的精简与去噪算法之一,其核心原理是将点云空间划分为三维体素网格,并用每个体素内的代表点(如体素中心或平均值)替换体素内的所有点,这种方法能在保持点云整体结构的同时显著减少数据量[18]。改进后的自适应体素滤波算法创新性地以法线方向方差量化局部几何复杂度,依据法线方向方差动态调整体素网格尺寸:在巷道平直等低几何复杂度区域,采用大尺寸体素栅格,快速剔除孤立噪点;在巷道几何结构复杂区域,采用小尺寸体素保留细节特征,同时识别并滤除扫描设备振动产生的规律性伪影;针对巷道表面及两帮的高密

度冗余噪声,利用法线方向方差与表面复杂度的映射关系设置特征保留阈值,实现冗余点云的高比例压缩。

该算法在确保巷道点云完整性的前提下,可大幅降低数据冗余度,为后续处理奠定良好基础,算法流程示意如图 2 所示。

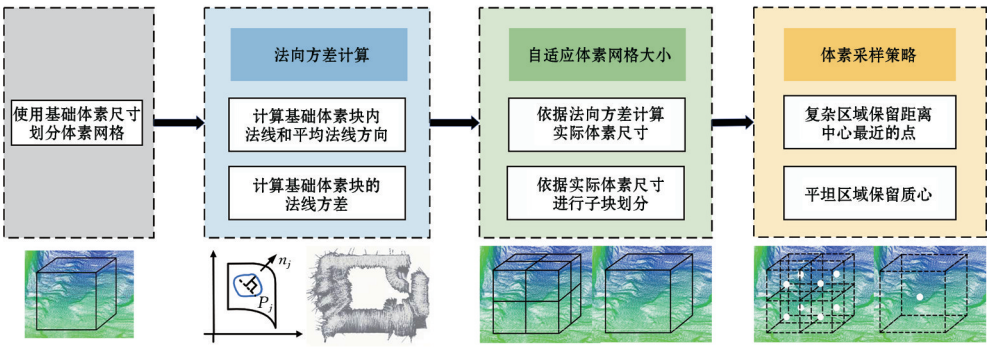


图 2 自适应体素滤波算法流程示意

Fig.2 Schematic of adaptive voxel filtering algorithm process

首先采用基础体素网格将点云划分为立方体体素块,计算单个体素块内的平均法线方向 n,如式(1)所示,其中 n_j 为体素网格内每个点 p_j 的法线,其方向为单位向量;m 为每个体素块内点的个数。

$$n=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}n_j \tag{1}$$

法线方差 σ^2 实际为法线方向与平均方向夹角正弦平方的平均值,$\sigma^2\in[0,1]$,计算如式(2)所示。其中,$1-(n_j\cdot n)^2=\sin^2\theta_j$,$\theta_j$ 为 n_j 与 n 的夹角,rad。

$$\sigma^2=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}(1-(n_j\cdot n)^2) \tag{2}$$

σ^2 能够直接反映表面复杂度。当法线方差趋近于 0 时,表示体素内法线方向一致,即表面较平坦;当法线方差趋近于 1 时,表示体素内法线方向混乱,即表面复杂。

依据法线方差自适应调整实际体素尺寸,划分子块数量随法向方差增大而增加。同时,依据实际情况设置一个体素尺寸最小值,避免在遇到极端复杂情况时因体素过小导致计算量激增,计算如式(3)所示。

$$v_i=v_{\text{base}}\cdot\frac{1}{1+\alpha\cdot\sigma^2} \tag{3}$$

式中:v_{base} 为基础体素尺寸,m;v_i 为第 i 个区域的自适应体素尺寸,m;α 为敏感系数,其大于 0 时,控制体素尺寸对复杂度的响应强度,α 越大,体素尺寸对复杂度变化越敏感。

当 v_i 减小时,原体素被划分为 $\left(\frac{v_{\text{base}}}{v_i}\right)^3$ 个子体素。例如,当 $\sigma^2=0.7$ 时,可能划分为 3×3×3 子块;当 $\sigma^2=0$ 时,$v_i=v_{\text{base}}$,不划分子块,采用最大体素尺寸快速压缩,以降低计算复杂度;当 $\sigma^2=1$ 时,$v_i=\frac{v_{\text{base}}}{1+\alpha}$,对块内点云按 v_i 重新体素化,以保留细节。

当点云局部区域法线方向一致时,直接求解体素质心作为代表点,可完整保留平面几何特征,质心计算公式如式(4)所示。其中,c_e 为第 e 个平坦块的体素采样点;g 为当前平坦块中的总点数;h_d 为平坦块内第 d 个点的三维坐标。

$$c_e=\frac{1}{g}\sum_{d=1}^{g}h_d \tag{4}$$

在高曲率复杂区域,需先完成细分体素,再对每个子体素求解代表点;遍历子体素内所有点,选择到子体素中心欧氏距离最小的点作为体素采样点,该方式可更好地捕捉局部细节,避免特征丢失,计算公式如式(5)所示。

$$p_1^*=\underset{s\in S_{k,b}}{\operatorname{argmin}}\|s-c_{k,p}\| \tag{5}$$

式中:$s_{k,b}$ 为第 k 个复杂区域细分后的网格单元的第 b 个子体素;$c_{k,p}$ 为子体素 $s_{k,b}$ 的中心坐标;s 为子体素 $s_{k,b}$ 内的点坐标;p_1^* 为选中的采样点,即子体素内离中心最近的点。

该算法通过基于法向量方差的体素尺寸自适应优化,在实现点云数据精简的同时,能够更精准地保留几何结构特征。

2.2 分层约束的动态半径滤波算法

分层约束的动态半径滤波算法以平行薄层解构三维点云数据,通过点云密度与结构特征,实现噪声识别与处理。其中,点云切片技术是一种通过分析空间中分散的点云数据与一系列切割平面的交集,以获得规划路径信息的方法[19]。

动态半径滤波算法执行于平面切割之后,核心是依据各切片层的点云密度动态调整滤波半径。针对高密度边界噪声,利用其与正常区域的密度差异实现精准去除;针对巷道两帮脱离主体轮廓的伪噪声点,适度扩大滤波半径,在保障巷道主体结构完整性的同时实现有效分离;同时,根据点云稀疏程度动态调整滤波半径,清除重复扫描残留噪声与脱离主体的伪点。另外,为解决切片重叠区域易引发的几何畸变与误删问题,通过点云删除白名单控制机制抑制分割面切换导致的结构失真,更好地保护真实巷道结构信息。算法具体实现过程如下。

实际井下巷道的延伸方向多为曲线形态,因此,需要提取巷道中轴线,表征巷道整体延伸方向并作为巷道切片的提取基准。本方法采用三维点云数据双向投影的方法提取巷道中轴线,该方法将空间三维点云投影到 XOY 以及 YOZ 平面中,提取投影点云中的上下边界点,然后求取边界点均值中心线,拟合得到的平滑曲线即为巷道中轴线,如图 3 所示。

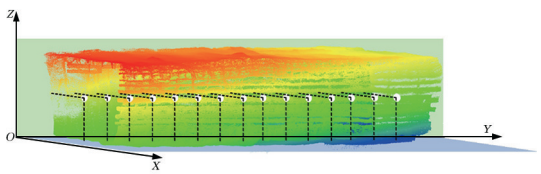


图 3 三维点云中轴线投影

Fig.3 Axial projection in 3D point clouds

中轴线提取完成后,采用平行于该点法平面的切割平面对点云在中轴线方向进行分层截取。已知空间曲线 Γ 的参数方程形式如式(6)所示。

$$\begin{cases} x=\varphi(t) \\ y=\psi(t) \\ z=\omega(t) \end{cases} \tag{6}$$

式中:t 为曲线参数;$\varphi(t)$、$\psi(t)$、$\omega(t)$分别为描述曲线在 X、Y、Z 坐标轴上的投影。将参数方程化为向量形式,如式(7)、式(8)所示。

$$\boldsymbol{r}=x\boldsymbol{i}+y\boldsymbol{j}+z\boldsymbol{k} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{r}(t)=\varphi(t)\boldsymbol{i}+\psi(t)\boldsymbol{j}+\omega(t)\boldsymbol{k} \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{r}$ 为空间任意点(x,y,z)的位置向量;$\boldsymbol{i}$、$\boldsymbol{j}$、$\boldsymbol{k}$均为单位向量;$\boldsymbol{r}(t)$为曲线上随参数 t 变化的位置矢量。

点 $M(x_0,y_0,z_0)$为空间曲线 Γ 上的点,$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{r}'(t_0)=(\varphi'(t_0),\psi'(t_0),\omega'(t_0))$,为曲线 Γ 在点 M 处(即 $t=t_0$)的切向量,则空间曲线 Γ 在点 M 处的切线方程如式(9)所示。

$$\frac{x-x_0}{\varphi'(t_0)}=\frac{y-y_0}{\psi'(t_0)}=\frac{z-z_0}{\omega'(t_0)} \tag{9}$$

过点 M 且与切线垂直的平面即为曲线在点 M 处的法平面,该平面以点 M 为原点,以 $\boldsymbol{T}$ 为法向量,因此法平面的方程如式(10)所示。

$$\varphi'(t_0)(x-x_0)+\psi'(t_0)(y-y_0)+\omega'(t_0)(z-z_0)=0 \tag{10}$$

根据法平面方程,以当前点沿巷道走向前后 w 宽度为范围进行点云的截取,如图 4 所示。

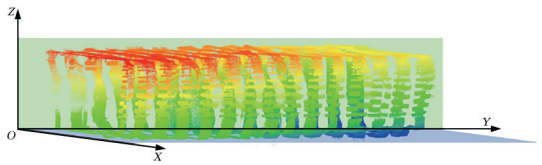


图 4 三维点云分层切片

Fig.4 Layered slicing for 3D point clouds

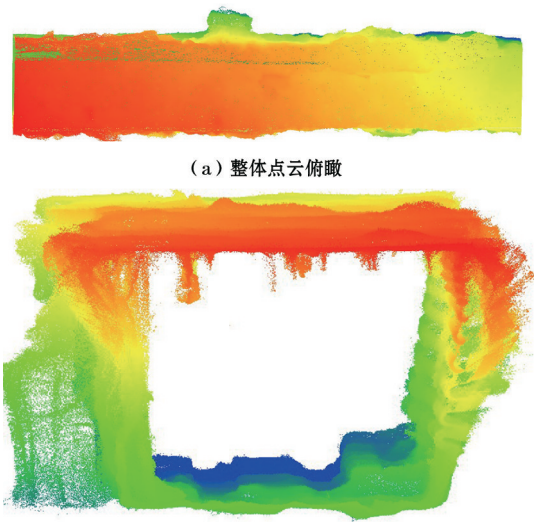
切片处理后,三维点云被分解为一系列连续的薄层单元,此时采用动态半径滤波,可依据各薄层内点云的局部密度分布自适应调整滤波半径,既能有效处理扫描近场密集区域的噪声点,又能完整保留扫描远场稀疏区域的几何特征,为后续精准去噪提供更精确的数据基础。此外,首轮切片滤波仅对拟删除点进行标记,不直接修改或删除原始点云;针对同时归属于多个切片的重叠区域点云,采用多切片联合仲裁机制,仅当该点在所有关联切片中均被判定为噪声时,才执行最终删除操作,可有效避免因切片重叠问题导致的巷道畸变。

3 试验结果及分析

3.1 数据来源

为保障试验结果的工程适用性,本研究综合考量地质条件、开采工艺及工程实际需求,确定某煤矿 21309 工作面巷道为研究对象,原始点云如图 5 所示。

试验采用 GoSLAM RS100i 三维激光扫描仪,对巷道开展周期性监测,完整获取了巷道变形前后不同阶段的高精度点云数据,为井下巷道变形演化规律研究奠定了坚实的数据基础。该巷道长约 29.94 m,宽约 7.65 m,高约 6.43 m,整体点云密度为 4 884.37 点/m^3。巷道采用单巷布置形式,结构呈现明显非对称特征:巷道一侧分布有椭圆形硐室(见图 5(a)中上方凸起区域);巷道顶部系统布设锚杆支护应力传感器,以实时监测支护结构受力状态;巷道另一侧密集排布水管、电线等功能性管线。



(a) 整体点云俯瞰

(b) 内部结构

图 5 原始巷道点云数据

Fig.5 Point cloud data of original roadway

3.2 降噪效果对比与分析

本研究系统评估了多种点云降噪算法的综合性能,通过消融试验与组合滤波方案的对比分析,明确了不同方法在数据简化率、几何保真度及密度均衡性上的优劣。

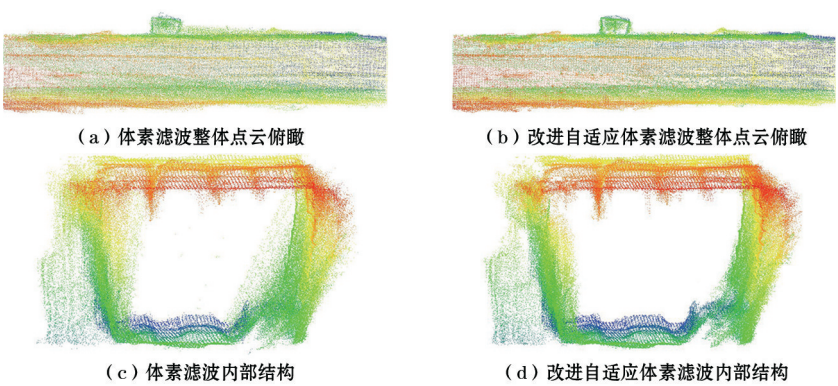
消融试验结果(见表 1)显示,体素滤波虽能实现高达 97.21% 的简化率,将点云密度从原始的 4 884.37 点/m^3 降至 208.82 点/m^3,但严重牺牲了几何保真度,其体积变化率达 8.51%,表面积变化率达 9.21%,均远高于改进自适应体素滤波算法(体积变化率为 5.33%,表面积变化率为 6.72%)。在点云密度方面,改进自适应体素滤波算法将点云密度降低至 225.33 点/m^3,虽相较于体素滤波提高了16.51 点/m^3,表明该方法在精简过程中能更有效地保留关键区域的信息密度。

表 1 算法性能对比分析

Table 1 Comparative analysis of algorithm performance

算法	简化率/%	密度/(点/m^3)	体积/m^3	体积变化率/%	表面积/m^2	表面积变化率/%
原始点云	—	4 884.37	1 470.71	—	940.26	—
体素滤波	97.21	208.82	1 345.55	8.51	853.66	9.21
改进自适应体素滤波	96.87	225.33	1 392.32	5.33	877.07	6.72

体素滤波与改进自适应体素滤波点云处理可视化对比如图 6 所示。可视化分析结果显示,固定体素滤波处理后的整体点云呈现出显著的稀疏化特征;图 6(c)显示,巷道左上角出现轮廓畸变,右下角存在噪点增生现象,凸显了固定参数易导致局部几何失真的缺陷。相比之下,图 6(b)显示,改进自适应体素滤波在整体俯瞰视角下保留了更多点云细节;图 6(d)表明,该方法通过基于法线方差的动态体素划分,将点云密度提升至 225.33 点/m^3,有效抑制了边角模糊问题,实现了点云密度分布与几何结构的精准适配。



(a) 体素滤波整体点云俯瞰

(b) 改进自适应体素滤波整体点云俯瞰

(c) 体素滤波内部结构

(d) 改进自适应体素滤波内部结构

图 6 体素滤波与改进自适应体素滤波点云处理可视化对比

Fig.6 Visual comparison of point cloud processing between voxel filtering and improved adaptive voxel filtering

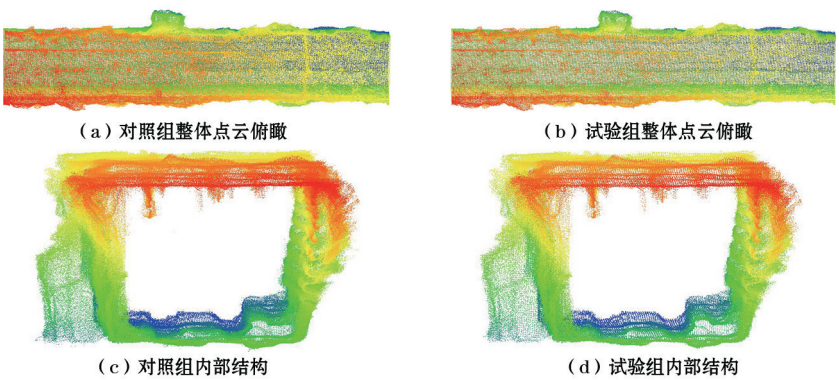
在改进自适应体素滤波的基础上,为验证分层约束策略在动态半径滤波中的有效性,本研究设置“改进自适应体素滤波及动态半径滤波”对照组、“改进自适应体素滤波及分层约束的动态半径滤波”试验组,开展组合滤波方案对比试验。试验结果(见表 2)显示,对照组虽然实现了 89.12%的简化率,将点云密度优化至 295.37 点/m^3,但是几何保真度存在明显不足,体积变化率达4.71%,表面积变化率达 3.23%,显著高于试验组(体积变化率为 2.42%,表面积变化率为 2.38%)。同时,试验组点云密度为 285.89 点/m^3,构建了更合理的空间分布体系。

表 2 组合滤波方案性能对比分析

Table 2 Comparative analysis of the performance of combined filtering schemes

滤波算法	简化率/%	密度/(点/m³)	体积/m³	体积变化率/%	表面积/m²	表面积变化率/%
原始点云	—	4 884.37	1 470.71	—	940.26	—
改进自适应体素滤波及动态半径滤波(对照组)	89.12	295.37	1 401.43	4.71	909.88	3.23
改进自适应体素滤波及分层约束的动态半径滤波(试验组)	92.53	285.89	1 435.12	2.42	917.88	2.38

组合滤波方案点云处理可视化对比如图 7 所示。由图 7 可以看出,对照组的动态半径滤波简化率更低,且巷道侧壁残留离散噪点,直观揭示了固定半径参数引发几何失真的缺陷;试验组结果显示,分层约束策略有效抑制了顶板变形,且通过切片平面约束清除了侧壁孤立噪点,实现了噪声消除与几何特征保留的双重优化,充分验证了分层约束策略的有效性。



(a) 对照组整体点云俯瞰 (b) 试验组整体点云俯瞰

(c) 对照组内部结构 (d) 试验组内部结构

图 7 组合滤波方案点云处理可视化对比

Fig.7 Visual comparison of point cloud processing with different combined filtering schemes

本研究通过消融试验与组合滤波方案的对比分析,证实自适应体素滤波在简化率、几何保真度及密度均衡性上显著优于固定体素滤波,可有效避免巷道局部几何失真;同时,所提"改进自适应体素滤波及分层约束的动态半径滤波算法"依托点云切片投影机制,在维持高简化率的前提下,可大幅降低点云体积变化率与表面积变化率,优化点云密度,实现了高效去噪与几何特征保留。

4 结论

针对现有滤波算法在矿井巷道点云处理中易因过度平滑细节特征造成变形信息丢失,以及全局固定参数难以适应巷道复杂几何形态变化的局限性,本文提出了一种融合改进自适应体素滤波与分层约束的动态半径滤波的协同预处理算法。研究结果表明,自适应空间采样与分层特征约束的动态滤波机制,是平衡矿井巷道点云数据简化率与几何特征保真度的有效技术路径。该算法解决了变形敏感几何特征在精简过程中的保留难题,大幅降低了后续变形分析所需的存储空间和计算复杂度,可为矿井巷道变形监测提供更可靠的数据基础,具有重要的工程实用价值。

本研究仍存在一定局限性:算法中部分关键参数的设置仍依赖人工经验调优,其自适应性和普适性有待进一步优化。后续研究将致力于参数自适应优化方法研究,进一步提升算法在复杂工况下的鲁棒性与工程适用性。

参考文献(References):

[1] 樊金虎.深部高应力巷道围岩支护技术研究与实践[J].煤矿现代化,2025,34(5):125-128+133.
Fan Jinhu. Research and practice of perimeter rock support technology for deep high-stress roadway[J]. Coal Mine Modernization,2025,34(5):125-128+133.

[2] 朱友恒,丁自伟,刘江,等.深部高应力软岩巷道围岩变形机理及控制技术研究[J].煤炭工程,2023,55(10):98-104.
Zhu Youheng, Ding Ziwei, Liu Jiang, et al. Deformation mechanism and control technology of surrounding rock in deep high stress soft rock roadway[J]. Coal Engineering, 2023,55(10):98-104.

[3] 张寅,尹立冬,张季平,等.动力扰动下高应力巷道钻孔消能机制的数值研究[J].中国安全生产科学技术,2023,19(9):61-68.

Zhang Yin, Yin Lidong, Zhang Jiping, et al. Numerical study on energy dissipation mechanism of high stress tunnel borehole under dynamic disturbance[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(9):61-68.

[4] 于振建,龚永超,廖敦霞,等.深部大规模矿山岩体质量评价与巷道支护技术研究[J].矿业研究与开发,2025,45(6):1-11.
Yu Zhenjian, Gong Yongchao, Liao Dunxia, et al. Research on rock mass quality evaluation and roadway support technology in deep large scale mines[J]. Mining Research and Development,2025,45(6):1-11.

[5] 冯云贵,严红,李生亚,等.深部高应力巷道注锚喷支联合控制技术研究[J].煤炭工程,2023,55(06):50-53.
Feng Yungui, Yan Hong, Li Shengya, et al. Combined control technology of grouting, bolting, shotcreting and supporting in deep high stress roadway [J]. Coal Engineering,2023,55(6):50-53.

[6] 赵明洲,方娟,辛程鹏.深部高应力半煤岩巷变形机理及跨界高强支护技术[J].煤矿安全,2023,54(6):113-122.
Zhao Mingzhou, Fang Juan, Xin Chengpeng, et al. Deformation mechanism of deep high stress semi coal rock roadway and cross-border high-strength support technology [J]. Safety in Coal Mines,2023,54(6):113-122.

[7] 王耀东,苏广思,方恩权,等.基于激光雷达的隧道轮廓三维点云重构与形变检测研究[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(6):2393-2403.
Wang Yaodong, Su Guangsi, Fang Enquan, et al. Research on three-dimensional point cloud reconstruction and deformation detection of tunnel contours based on LiDAR [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2024,55(6):2393-2403.

[8] 张会峰,韩国国,郗燕杰,等.基于激光雷达的井下巷道形变量监测算法[J].煤矿安全,2023,54(1):205-209.
Zhang Huifeng, Han Guoguo, Xi Yanjie, et al. Underground roadway shape variable monitoring algorithm based on laser radar[J]. Safety in Coal Mines,2023,54(1):205-209.

[9] 王腾,查剑锋,张民,等.基于三维激光扫描的矿区道路沉陷监测研究[J].煤炭工程,2021,53(3):161-165.
Wang Teng, Zha Jianfeng, Zhang Min, et al. Monitoring of mining area road subsidence based on 3D laser scanning[J]. Coal Engineering,2021,53(3):161-165.

[10] 张琰,孔祥思,徐西桂.基于移动三维激光扫描的隧道结构监测方案研究与应用[J].矿山测量,2021,49(1):20-25.
Zhang Yan, Kong Xiangsi, Xu Xigui. Application and research of tunnel structure monitoring solution based on moving 3D laser scanning system[J]. Mine Surveying,2021,49(1):20-25.

[11] 邰长明,连舒婷.三维激光扫描在矿山巷道快速建模与变形分析中的应用[J].世界有色金属,2025(7):166-168.
Kuai Changming, Lian Shuting. Application of 3D laser scanning in rapid modeling and deformation analysis of mining tunnels[J]. World Nonferrous Metals,2025(7):166-168.

[12] 吴姝,王涛,崔英花,等.一种参数自适应的统计滤波降噪算法[J].应用激光,2024,44(9):124-132.
Wu Shu, Wang Tao, Cui Yinghua, et al. A statistical filtering noise reduction algorithm based on parameter adaptive[J]. Applied Laser,2024,44(9):124-132.

[13] 王海军,刘再斌,雷晓荣,等.煤矿巷道三维激光扫描关键技术及工程实践[J].煤田地质与勘探,2022,50(1):109-117.
Wang Haijun, Liu Zaibin, Lei Xiaorong, et al. Key technologies and engineering practice of 3D laser scanning in coal mine roadways[J]. Coal Geology & Exploration,2022,50(1):109-117.

[14] 郑理科,王健,李志远,等.一种局部最优邻域法向量估算的巷道点云去噪方法[J].测绘科学,2023,48(4):140-148+171.
Zheng Like, Wang Jian, Li Zhiyuan, et al. A denoising method of roadway point cloud based on local optimal neighborhood normal vector estimation [J]. Science of Surveying and Mapping,2023,48(4):140-148+171.

[15] 景宁波,马宪民,郭卫,等.改进动态半径的矿井激光雷达点云滤波算法[J].西安科技大学学报,2023,43(2):406-413.
Jing Ningbo, Ma Xianmin, Guo Wei, et al. Point cloud filtering algorithm of mine LiDAR using improved dynamic radius[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2023,43(2):406-413.

[16] 陈登红,庞宁,聂闻,等.巷道点云分类去噪及三维重建技术[J].煤田地质与勘探,2025,53(5):54-64.
Chen Denghong, Pang Ning, Nie Wen, et al. Classification-based point cloud denoising and 3D reconstruction of roadways [J]. Coal Geology & Exploration,2025,53(5):54-64.

[17] 廉博翔,弥浪涛,李尚杰,等.煤矿井下巷道三维建模研究[J].工矿自动化,2025,51(5):147-154.
Lian Boxiang, Mi Langtao, Li Shangjie, et al. Research on 3D modeling of underground roadways in coal mines[J]. Journal of Mine Automation,2025,51(5):147-154.

[18] 王冕,颜康,罗鑫,等.基于三维点云数据的预处理技术研究与应用[J].电力大数据,2024,27(9):61-68.
Wang Mian, Yan Kang, Luo Xin, et al. Research and application of preprocessing techniques based on 3D point cloud data[J]. Power Systems and Big Data,2024,27(9):61-68.

[19] 王志鹏,季民,宋鹏飞,等.基于点云切片的露天采场坡面顶底线自动提取算法研究[J].应用激光,2026,46(2):117-131.
Wang Zhipeng, Ji Min, Song Pengfei, et al. Research on an automatic extraction algorithm for top and bottom lines of open-pit mine slopes based on point cloud slices[J]. Applied Laser,2026,46(2):117-131.