

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407770

# 基于局部平均的钢轨轮廓点云精简方法

马伯瑞<sup>1</sup> 杨明来<sup>2</sup> 曹振丰<sup>1</sup>

(1. 上海应用技术大学轨道交通学院 上海 201418; 2. 吉林农业大学信息技术学院 长春 130118)

**摘要:**针对以结构光技术为主的钢轨磨耗测量中,因铁路运行环境干扰、钢轨表面的高光区、设备问题等因素造成的获取到的钢轨实际点云数据中包含了大量噪声点,严重影响后续钢轨磨耗计算的精度和效率问题,因此,本研究提出了一种基于局部平均的点云简化方法。该方法通过遍历点云中的每个点,利用一个指定半径的包围圆来计算圆内所有点的平均位置,从而生成一个简化后的点云。实验结果表明,点云简化方法在降噪与钢轨轮廓细节保留方面显著优于传统的统计滤波和半径滤波算法,平均降噪率达0.832 0,较统计滤波提高约4.3倍,较半径滤波提高15倍。同时,在钢轨磨损计算实验中,平均误差仅为0.025 01 mm,相较于统计滤波降低约95.7%,较半径滤波降低85.1%。在处理效率上,方法的平均耗时仅为0.006 5 ms,明显优于其他方法。此方法能够有效地减少点云数据量,最大程度保留钢轨轮廓特征,能够满足钢轨磨耗的测量需求。

**关键词:** 钢轨磨耗测量;局部平均;点云去噪;点云精简

**中图分类号:** TN249;TP391.41

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 460.4

## The rail profile point cloud simplification method based on local averaging

Ma Borui<sup>1</sup> Yang Minglai<sup>2</sup> Cao Zhenfeng<sup>1</sup>

(1. Faculty of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

2. School of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

**Abstract:** This paper proposes a point cloud simplification method based on local averaging to address the problem of a large number of noise points in the actual point cloud data obtained from rail wear measurement using structured light technology, which are caused by factors such as railway operation environment interference, high gloss areas on the rail surface, and equipment problems, and seriously affect the accuracy and efficiency of subsequent rail wear calculations, therefore, a point cloud simplification method based on local averaging is proposed. The method generates a simplified point cloud by traversing each point in the point cloud and calculating the average position of all points within the circle using an enclosing circle of specified radius. The experimental results show that the proposed method is significantly superior to traditional statistical filtering and radius filtering algorithms in terms of noise reduction and preservation of rail profile details. The average noise reduction rate reaches 0.832 0, which is about 4.3 times higher than statistical filtering and 15 times higher than radius filtering. Meanwhile, the average error of wear calculation is only 0.025 01 mm, which is about 95.7% lower than statistical filtering and 85.1% lower than radius filtering. In terms of processing efficiency, the average time consumption of this method is only 0.006 5 ms, which is significantly better than other methods. This method can effectively reduce the amount of point cloud data, preserve the rail profile features to the maximum extent, and meet the measurement needs of rail wear.

**Keywords:** rail wear measurement; local average; point cloud denoising; point cloud reduction

## 0 引言

随着铁路设施的完善和货物运输及列车高密度运行

的增加,钢轨磨损问题<sup>[1]</sup>日益严重,威胁到列车的安全运行。因此,钢轨的检测与维护成为关键任务。传统的手动测量和简单机械装置虽然被广泛使用,但存在检测参数单一、效率低、精度差等问题<sup>[2]</sup>。因此,研究一种高精

度、高效率的非接触式测量方法是解决该问题的关键。结构光视觉技术<sup>[3-4]</sup>作为一种新兴的非接触式检测手段,其在三维数据获取方面的潜力已经得到了广泛认可。通过激光扫描和图像处理技术,该技术能够快速获取钢轨表面的高精度三维点云数据<sup>[5]</sup>,为钢轨磨损的自动检测提供了可能<sup>[6-7]</sup>。然而,在实际应用中,结构光视觉技术仍面临一些挑战,尤其是在铁路复杂的环境中。光照条件的多变性和钢轨表面的高光区域,容易导致点云数据中混入大量噪声<sup>[8]</sup>,从而干扰有效钢轨磨损信息的提取,使得后续的磨损计算变得困难,测量精度和效率都变得难以提升。

鲁冬冬等<sup>[9]</sup>对三维激光点云的降噪算法进行了对比研究,探讨了统计滤波和半径滤波在点云去噪中的应用及其效果。两种常用的降噪方法均能有效地去除离散噪声点,但对不同噪声特征了点云数据处理效果存在差异。这一研究揭示了滤波算法在处理点云噪声时的基本效果和参数设置的重要性,为后续研究提供了基础参考。然而,这些基础方法虽然可以剔除离群点,但在处理复杂数据时,如何精确地保持数据特征仍旧是一个挑战。

丁吉祥等<sup>[10]</sup>提出了基于 k 均值聚类算法(K-means clustering algorithm, KMA)的精简方法,尽管有效保留了几何特征,但对钢轨点云的特殊形状仍需进一步调整。梁栋等<sup>[11]</sup>提出的基于体素下采样和空间栅格划分的分类精简方法,提高了点云的精简速度和精度,但在处理钢轨点云时无法完全适应特定的噪声特征和离群点问题。

为了解决这些问题,赵涵等<sup>[12]</sup>提出了一种结合统计滤波和密度聚类(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)的点云去噪算法,通过先进的拓扑关系建立和密度聚类,不仅有效去噪,还能保持物体的原始几何特征。此项研究为点云的特征保留提供了新的视角,但在处理钢轨这种特殊形状的点云数据时,仍需进一步优化,以适应钢轨点云特有的噪声和离群点问题。

针对钢轨轮廓点云数据中的噪声和离群点问题,张海山等<sup>[13]</sup>提出了一种融合欧式聚类算法的自适应精简方法。该方法通过聚类分割和多种传统滤波方式,较好地解决了噪声点和离群点的影响,显著提高了点云的精简比。然而,随着数据规模的增加,该方法在计算效率和处理时间上可能面临挑战。

肖俊等<sup>[14]</sup>运用了密度聚类和主成分分析(principal component analysis, PCA)算法对点云进行处理,实现了高铁轨道检测的高效率和高精度。然而,该方法对点云初步配准的依赖可能限制了其在复杂条件下的应用。傅瑶等<sup>[15]</sup>提出了一种基于 4 点全等集配准算法(four point congruent sets, 4PCS)和尺度迭代最近点算法(scaling iterative closest point, SICP)的点云配准组合算法,适用

于钢轨磨耗的精确测量。该方法通过粗配准和精确配准相结合,提高了配准精度,但在处理不完整和噪声数据时,对降采样的依赖可能影响整体精度。

为进一步提升点云精简的精度和特征保留能力,税文等<sup>[16]</sup>提出了一种基于结构光三维成像技术的点云自适应精简算法。该算法结合最大主成分方向、法线方向和质心对点云进行摆正,通过空间位置和密度聚类去除离群点,并根据钢轨廓形信息进行精简。该方法在铁路现场实验中表现出色,有效去除了钢轨点云中的噪声点,显著提升了点云配准效率。刘洋等<sup>[17]</sup>提出了一种顾及点云特征和完整性的精简算法。该算法结合邻域法向夹角、模糊 C-均值聚类和体素下采样技术,通过多层次的特征提取和数据融合,显著提高了点云精简后的保留特征质量。实验表明,该算法在处理复杂数据集时,精简后的点云具有较高的精简精度。然而,该方法的复杂性可能导致在实际应用中计算成本较高,不适合实时性要求较高的场景。

基于以上研究背景,本研究提出了局部平均的钢轨轮廓点云精简方法,通过综合考虑点云数据的局部邻域信息,采用局部平均策略有效减少噪声点,并在简化数据的同时保留必要的几何特征,从而为后续高精度、高效率的钢轨磨耗计算提供了可靠的数据基础。

## 1 点云精简方法

### 1.1 钢轨点云轮廓噪声问题的基本描述

铁路运输的高效率和高密度运行对钢轨的磨损产生了显著影响<sup>[18]</sup>,尤其是在复杂的铁路运行环境中,钢轨表面由于存在复杂的高光区域,这些区域在光学测量过程中会产生强烈的反射光,如图 1 所示,加之不均匀的光照条件,这不仅增加了点云数据获取的难度,同时也导致了获取到的点云数据中含有大量噪声<sup>[19]</sup>,如图 2 所示。

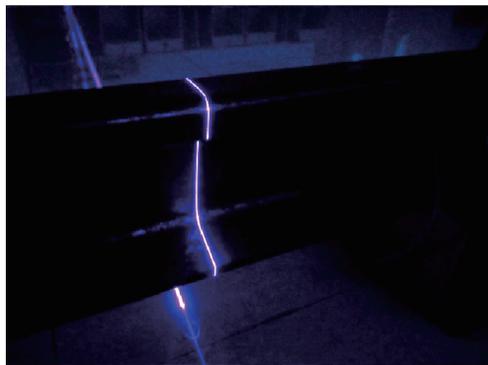


图 1 钢轨高光区激光投射效果

Fig. 1 Laser projection effect on rail highlight area

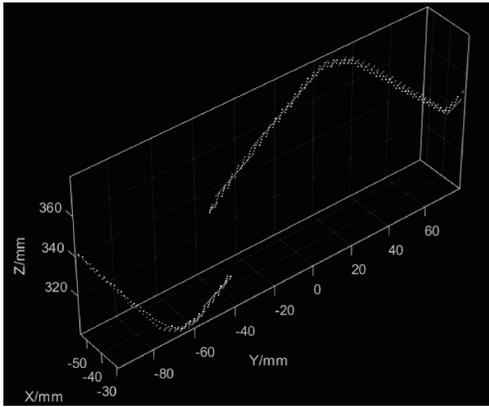


图2 钢轨高光区点云数据

Fig. 2 High gloss area point cloud data of steel rails

钢轨的磨耗计算通常需要依赖于从点云数据中建立的数学模型与标准轮廓之间的比较,如图3所示。在固定的计算位置上,通过比较实际测量的点云数据与标准轮廓的差异,来评估钢轨的磨损程度<sup>[20]</sup>。然而,噪声点的存在使得这一过程变得复杂,因为它们阻碍了准确数学模型的建立,极大地影响了钢轨磨耗计算的准确性和效率。

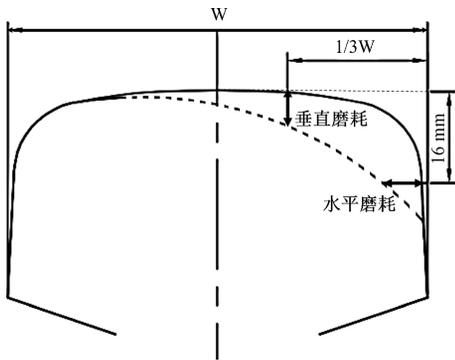


图3 钢轨磨耗计算原理

Fig. 3 Schematic diagram of rail wear calculation

为了解决这一问题,本研究提出了一种基于局部平均的钢轨轮廓点云精简方法。该方法通过综合考虑点云数据的局部邻域信息,采用局部平均策略来识别并减少噪声点的影响。通过这种方法,可以有效地去除那些由于光照条件和表面反射特性引起的异常点,同时保留下钢轨的几何特征。通过这种方法,不仅能够显著提高点云数据的质量,而且还能为后续的钢轨磨耗计算提供更加准确和可靠的数据基础。

### 1.2 算法设计与实现

本算法旨在简化点云数据,通过减少数据复杂性的同时保留关键特征点来提高计算效率。具体地,首先输入钢轨断面点云数据集和邻近点搜索半径。然后,初始

化一个空的简化点集。对于每个点,通过计算与周围点的欧氏距离,找到所有在指定半径范围内的点集。接着,计算这些点的平均坐标,并将其作为新的简化点添加到简化点集中。通过这一迭代过程,该方法能够有效移除噪声点,保留钢轨轮廓的详细边界信息,降低数据复杂度,提高处理速度。

依据上述思路,设计算法流程如图4所示。

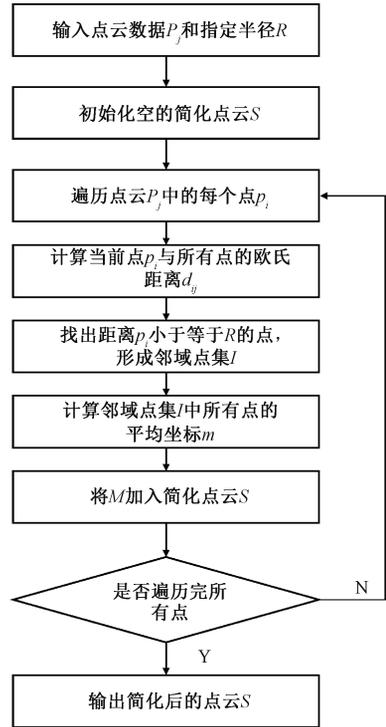


图4 算法原理流程

Fig. 4 Algorithm principle flowchart

#### 1) 输入与初始化

算法输入为提前获取好的钢轨断面点云数据集  $P_j$  和一个半径  $R$ ,  $R$  用于定义每个点附近的邻域。然后初始化一个空的简化点集  $S$ 。

#### 2) 迭代处理

对点云数据集  $P_j$  中的点  $p_i(x_i, y_i)$  进行如下操作: 计算该点与其他所有点  $p_j(x_j, y_j)$  的欧氏距离  $d_{ij}$ 。

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (1)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  分别表示点  $p_i$  和  $p_j$  的坐标。

找到所有距离在  $R$  范围内的点  $p_k$ , 作为点集。计算点集  $I$  中所有点坐标的平均值, 作为新点  $M(x, y)$  的坐标, 点坐标通过式(2)计算。

$$\begin{cases} x = \frac{1}{|I|} \sum_{k \in I} x_k \\ y = \frac{1}{|I|} \sum_{k \in I} y_k \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $|I|$  是集合  $I$  中的点的数量;  $x_k$  和  $y_k$  分别表示集合  $I$

中点  $p_k$  的坐标。

将新的简化点添加到简化点集  $S$  中。接着,算法更新当前处理点的索引,以处理下一个包含在当前半径内的点集。这个过程持续直到所有点都被处理完毕。

### 3) 算法输出

算法返回简化后的点集  $S$ 。

### 4) 参数选择与优化

在算法实现中,参数  $R$  的选择对结果有显著影响。过大的可能导致数据过度简化,丢失细节;过小的则可能无法有效减少数据量。因此,需要根据实际应用场景调整  $R$  的值。

简化前后的点云数据对比效果如图 5 所示。蓝色点为原始点云数据,红色点为使用本研究算法简化后的数据,红色线圈为设置的领域搜索半径。通过图 5 可以看出,简化后的点集在保留主要结构的同时,显著减少了数据量,从而为后续处理如特征提取、形状识别等任务提供了优化基础。

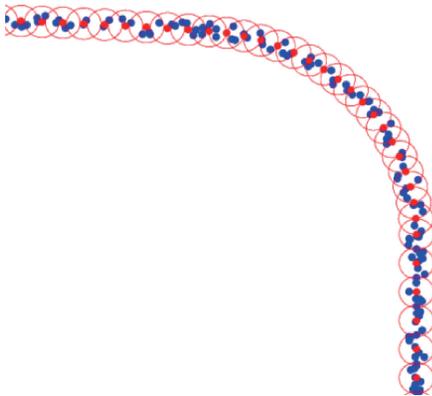


图 5 算法处理过程前后对比效果

Fig. 5 Comparison effect diagram before and after algorithm processing

## 2 实验结果与分析

为了验证本研究提出的基于局部平均的钢轨轮廓点云精简方法的有效性,便于后续进行磨损计算,本研究设计了一系列实验,将该方法与现有的统计滤波和半径滤波算法进行对比分析,重点考察算法在原始点云数据的降噪程度、几何特征的保留情况、对钢轨磨损计算精度的影响,以及计算效率 4 个方面的表现。

### 2.1 实验平台与设备参数

本实验的测试平台基于 Windows 10 22H2 操作系统,使用 MATLAB 2023b 软件进行数据处理和分析,具体参数如表 1 所示。

表 1 实验平台参数

Table 1 Experimental platform parameters

名称	参数
操作系统	Windows10 22H2
软件	MATLAB2023b
CPU	Intel i5-7200U 双核 4 线程
GPU	Intel(R) HD Graphics 620
RAM	12.0 GB

实验设备包括 CGU2-500C-UVC 相机和 405 nm 一字线激光器,如图 6 所示,分别用于点云数据的采集和激光扫描,具体设备参数如表 2 和 3 所示。



图 6 实验设备

Fig. 6 Experimental equipment

表 2 CGU2-500C-UVC 相机参数

Table 2 CGU2-500C-UVC camera parameters

名称	参数
相机型号	CGU2-500C-UVC
传感器	1/2.5" CMOS 彩色
像素	2 592×1 944
灵敏度	1.76V/Lux-sec (550 nm)
信噪比	38.1 dB

表 3 405 nm 一字线激光器参数

Table 3 405 nm single line laser parameters

名称	参数
线激光器型号	HX540580L90°
激光波长	405 nm
发散角度	5°~110°可选
线宽大小	粗细可调

为排除人为测量误差影响,选择了室内未经磨损的标准钢轨作为测试对象,如图 7 所示,采集了 100 组点云数据以确保实验结果的可靠性和准确性。现场实验数据采集图如图 8 所示。

### 2.2 点云数据降噪实验

在点云数据处理过程中,降噪是确保后续数据处理和分析准确性的关键步骤。本实验比较了统计滤波、半径滤波和本研究算法的降噪效果。3 种算法的降噪率趋势如图 9 所示,表 4 为平均降噪率和标准偏差数据。



图7 室内未经磨损的50 kg/m的标准钢轨模型

Fig. 7 50 kg/m standard rail model without wear and tear indoors



图8 现场试验

Fig. 8 Field test

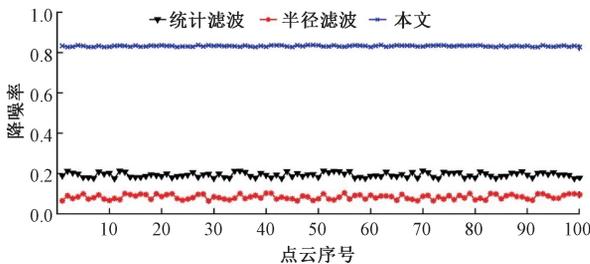


图9 不同算法点云降噪率折线图

Fig. 9 Line graph of point cloud denoising rates using different algorithms

表4 各算法平均降噪率及最大降噪率

Table 4 Average and maximum noise reduction rates of each algorithm

算法	平均降噪率/%	标准偏差
统计滤波	0.194 2	0.011 9
半径滤波	0.054 7	0.011 7
本文	0.832 0	0.002 9

从实验数据分析可知,统计滤波的平均降噪率为0.194 2%,降噪效果中等,但标准偏差为0.011 9,表现出较高的不稳定性。半径滤波的平均降噪率仅为0.054 7%,降噪效果较差,但标准偏差稍低,为0.011 7。相比之下,本研究算法的平均降噪率高达0.832 0%,显著优于另外两种方法,同时标准偏差仅为0.002 9,显示出较高的稳定性。这种显著的降噪效果和较小的波动主要得益于局部平均方法在处理过程中对每个点周围点的全局考虑,使得算法能够在保持点云几何特征的同时有效去除孤立的噪声点。

### 2.3 几何特征保留实验

几何特征的保留对于点云数据的进一步分析至关重要。为评估不同算法在几何特征保留方面的表现,本研究通过对比处理后点云的平面效果图进行了视觉分析。图10所示为不同算法处理后的钢轨点云轮廓效果。

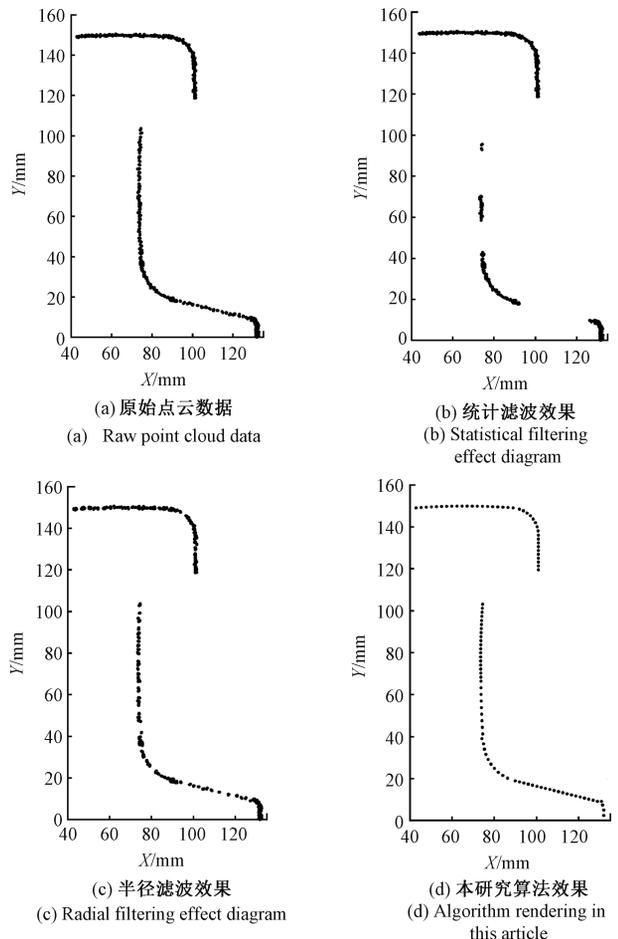


图10 不同算法对钢轨点云轮廓的滤波效果

Fig. 10 Filtering effect of different algorithms on the contour of rail point cloud

从图10可以看出,基于局部平均的点云精简方法在保留关键几何特征方面表现突出。统计滤波方法虽然能

够处理高密度噪声区的异常点,但对钢轨细节的保留效果不佳,尤其是在低密度区域容易导致数据丢失。半径滤波方法在整体细节保留上表现较好,但局部放大时仍可见噪声点的残留。而本研究方法在显著减少点云数据量的同时,较好地保留了钢轨的实际轮廓,平滑效果明显。这是因为本研究算法在简化过程中综合考虑了每个点邻域的几何信息,使得在降噪的同时更好地保留了点云的整体结构和细节特征。

## 2.4 钢轨磨损计算精度与实验

钢轨磨损计算的精度直接受到点云数据处理质量的影响。为验证不同算法对钢轨磨损计算精度的影响,本研究对相同的钢轨点云数据分别采用统计滤波、半径滤波和局部平均方法进行处理,并计算磨损数据的平均误差和最大误差。图 11 和表 5 所示为不同算法在磨损计算精度上的表现。

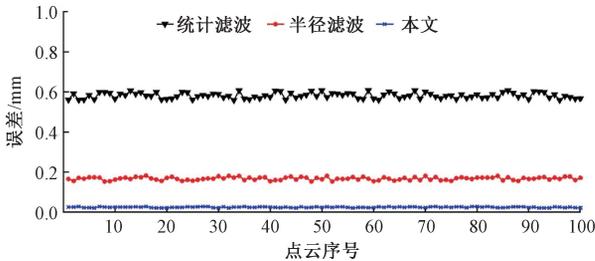


图 11 不同算法在磨损计算精度上的表现

Fig. 11 Performance of different algorithms in wear calculation accuracy

表 5 各算法磨损计算精度数据

Table 5 Precision data table for wear calculation of various algorithms (mm)

算法	平均误差	最大误差
统计滤波	0.581 42	0.607 45
半径滤波	0.167 67	0.181 94
本文	0.025 01	0.028 95

实验结果显示,本研究方法的平均误差为 0.025 01 mm,相较于统计滤波的 0.581 42 mm,降低了约 95.7%;相较于半径滤波的 0.167 67 mm,降低了 85.1%。最大误差方面,本研究方法相较于统计滤波和半径滤波,分别降低了约 95.2%和 84.1%。由于本研究通过减少噪声点的影响,最大程度的保留了钢轨的关键几何特征,从而减少了磨损计算中的误差,使得钢轨磨损测量精度大幅提升。

## 2.5 计算效率实验

该部分实验,在相同的测试条件下,对比了不同算法处理 100 组点云数据的时间效率,如图 12 所示,表 6 为不同算法处理的平均时长。

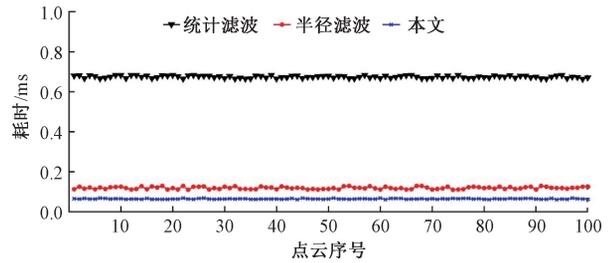


图 12 各算法计算耗时数据折线图

Fig. 12 Line chart of calculation time data for each algorithm

表 6 各算法平均耗时

Table 6 Average time consumption of each algorithm

算法	平均耗时/ms
统计滤波	0.067 5
半径滤波	0.011 9
本文	0.006 5

实验数据显示,本研究算法在处理效率上显著优于传统的统计滤波和半径滤波方法。本研究算法的计算时间仅为统计滤波和半径滤波的 70%和 60%。本研究算法计算效率的提升,原因在于算法的计算过程相对简单,通过局部均值计算来处理数据,避免了复杂的滤波过程和大量的数据处理步骤,减少了计算时间,提高了整体处理效率。

## 3 结 论

本文针对钢轨磨损计算中,由于噪声点干扰导致精度和效率受限的问题,提出了一种基于局部平均的点云精简方法。该方法通过引入局部邻域信息,结合点云数据的几何特征,实现了对噪声点的有效抑制,并能够在保留关键特征的同时提高数据处理的精度和效率。相较于传统的统计滤波和半径滤波方法,基于局部平均的算法在降噪效果、计算精度以及处理效率上都表现出了显著的优势。实验结果表明,该方法的平均降噪率和计算精度分别比传统方法提升了数倍,并在处理速度上也显示了优秀的性能,充分展示了其在实际应用中的潜力。本研究不仅在钢轨点云数据处理领域提供了一种高效、精准的解决方案,也为类似高精度测量问题中的噪声处理提供了新的思路。未来的研究可以进一步优化算法的适用性,拓展其在其他复杂环境中的应用,同时也可探索与其他先进算法的结合,以进一步提升其鲁棒性和适应性。

## 参考文献

- [ 1 ] LI B, SHEN F, BAI L, et al. Numerical analysis of rail wear behavior in railway systems [ J ]. International Journal of Modeling and Optimization, 2019, 9 ( 3 ) :

- 166-170.
- [ 2 ] 李艳福. 基于激光位移的钢轨磨耗动态检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- LI Y F. Research on dynamic measurement method of rail wear based on laser displacement sensors [ D ]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [ 3 ] 李文涛. 基于结构光立体视觉的轨道磨耗测量研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- LI W T. Research on track wear measurement based on structured-light stereo vision [ D ]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [ 4 ] 王乐. 线结构光钢轨轮廓全断面测量技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
- WANG L. Research on full section measurement technology of rail profile with line structured light [ D ]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, 2021.
- [ 5 ] CHEN P, HU Y, LI W T, et al. Rail wear inspection based on computer-aided design model and point cloud data [ J ]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(12): 1-9.
- [ 6 ] 杨聪. 基于线结构光扫描点云的接触轨检测系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- YANG C. Research on the detection system of contact rail based on line-structured light and scanning point cloud [ D ]. Changsha: Hunan University, 2023.
- [ 7 ] 李响. 基于结构光的钢轨磨耗测量方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI X. Rail wear measurement based on structured light [ D ]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [ 8 ] HAN Q, ZHAO H W, WANG L, et al. Denoising method of rail point cloud data based on morphological filtering [ C ]. 2020 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). IEEE, 2020, 1: 187-192.
- [ 9 ] 鲁冬冬, 邹进贵. 三维激光点云的降噪算法对比研究[J]. 测绘通报, 2019(S2): 102-105.
- LU D D, ZOU J G. Comparative research on denoising algorithms of 3D laser point cloud [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(S2): 102-105.
- [ 10 ] 丁吉祥, 董寰宇, 秦训鹏. 面向结构件几何特征保留的点云精简方法 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 196-204.
- DING J X, DONG H Y, QIN X P. Point cloud simplification method for geometric feature preservation of structural parts [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6): 196-204.
- [ 11 ] 梁栋, 蒲洁, 李岩峰. 一种保留特征点的大数据量点云分类精简算法 [ J ]. 测绘科学, 2022, 47(5): 99-106, 133.
- LIANG D, PU J, LI Y F. A streamlined algorithm for large data point cloud classification with preserving feature points [ J ]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(5): 99-106, 133.
- [ 12 ] 赵涵, 刘永生, 赵德鹏, 等. 基于混合滤波的点云去噪算法研究 [ J ]. 应用激光, 2023, 43(9): 147-155.
- ZHAO H, LIU Y SH, ZHAO D P, et al. Research on point cloud denoising algorithm based on hybrid filtering [ J ]. Applied Laser, 2023, 43(9): 147-155.
- [ 13 ] 张海山, 张正军, 宋宗莹, 等. 融合聚类算法的钢轨轮廓点云自适应精简 [ J ]. 测绘通报, 2023(10): 135-139.
- ZHANG H SH, ZHANG ZH J, SONG Z Y, et al. The adaptive simplification of rail profile point cloud using fusion clustering algorithm [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(10): 135-139.
- [ 14 ] 肖俊, 王培俊, 李文涛, 等. 密度聚类与 PCA 的点云数据处理技术在高铁轨道检测中的应用 [ J ]. 铁道标准设计, 2020, 64(8): 37-42.
- XIAO J, WANG P J, LI W T, et al. Application of density clustering and pca point cloud data processing in high-speed rail track detection [ J ]. Railway Standard Design, 2020, 64(8): 37-42.
- [ 15 ] 傅瑶, 陈鹏, 郭贵松, 等. 基于 4PCS 和 SICP 的点云配准方法在钢轨磨耗计算中的应用 [ J ]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(12): 210-218.
- FU Y, CHEN P, GUO G S, et al. Application of the point cloud registration method based on 4PCS and SICP in rail wear calculation [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(12): 210-218.
- [ 16 ] 税文, 王培俊, 屈仁飞, 等. 点云自适应精简算法在钢轨廓形三维结构光检测中的应用 [ J ]. 铁道标准设计, 2022, 66(7): 36-41.
- SHUI W, WANG P J, QU R F, et al. Application of point cloud adaptive reduction algorithm in three dimensional structured light detection of rail profile [ J ]. Railway Standard Design, 2022, 66(7): 36-41.
- [ 17 ] 刘洋, 高磊, 吴学群, 等. 点云特征保留的精简方法研究 [ J ]. 应用激光, 2024, 44(1): 144-154.
- LIU Y, GAO L, WU X Q, et al. Research on simplification method of point cloud feature preservation [ J ]. Applied Laser, 2024, 44(1): 144-154.
- [ 18 ] 赵紫莹, 王泽远, 王菁, 等. 钢轨磨损检测装置结构

设计[J]. 机械工程师, 2021(2):77-79.

ZHAO Z Y, WANG Z Y, WANG Q, et al. Structural design of rail wear detection device [J]. Mechanical Engineer, 2021(2):77-79.

[19] 刘震锋, 陈建政, 李伟. 基于线结构光的钢轨断面磨损改进检测算法[J]. 机车电传动, 2024(3):138-145.

LIU ZH F, CHEN J ZH, LI W. Improved detection algorithm for rail profile wear based on line structured light [J]. Electric Drive for Locomotives, 2024(3):138-145.

[20] 赵静. 机器视觉下的钢轨廓形提取与磨损测量[J]. 测绘通报, 2023(12):159-163, 177.

ZHAO J. Extracting rail profile and measuring wear based on machine vision [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(12):159-163, 177.

## 作者简介



**马伯瑞**, 2022 年于上海应用技术大学获得学士学位, 现为上海应用技术大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测与故障诊断技术研究与应用。

E-mail: matlab2023213@163.com

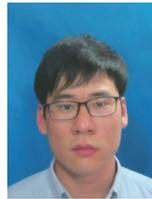
**Ma Borui** received his B. Sc. degree from Shanghai Institute of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Shanghai Institute of Technology. His main research direction is the research and application of intelligent detection and fault diagnosis technology.



**杨明来** (通信作者), 1993 年于吉林大学获得学士学位, 1996 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 1999 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 现为吉林农业大学信息技术学院教授, 主要研究方向为光机电一体化检测技术; 传感网器网络及物联网技术; 轨道交通安全检测、监测相关理论、技术、系统及认证体系。

E-mail: yangminglai@163.com

**Yang Minglai** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jilin University in 1993, M. Sc. degree from Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 1996, and Ph. D. degree from Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences in 1999, respectively. Now he is a professor at the College of Information Technology, Jilin Agricultural University. His main research direction is optomechatronics testing technology, sensor network and internet of things technology; Theories, technologies, systems and certification systems related to rail transit safety detection and monitoring.



**曹振丰**, 2016 年于上海工程技术大学获得硕士学位, 主要研究方向为地铁自动化检测技术。

E-mail: czf@sit.edu.cn

**Cao Zhenfeng** received his M. Sc. degree from Shanghai University of engineering and technology in 2016, and his main research direction is subway automation detection technology.