

# 激光点云孤岛数据高精度滤波算法研究

郭晓锐<sup>1,2</sup> 章智涵<sup>1,2</sup> 张弛<sup>1</sup> 李红军<sup>1,2</sup>

(1. 武汉纺织大学 机械工程与自动化学院 武汉 430073; 2. 工业雷管智能装配湖北省工程研究中心 武汉 430073)

**摘要:** 针对车载激光雷达线性测量数据中由于遮挡造成的远离主体点云且成簇状分布的孤岛数据滤除困难问题,提出一种与数字信号处理技术相结合的点云滤波方法。通过对点云数据帧中相邻数据点构造高差序列,采用离散傅里叶变换求解高差序列的幅频响应。经过频域信号的低通滤波与反傅里叶变换,还原出孤岛数据被极大修正的比较信号。通过比较信号对点云数据帧中数据点进行阈值判断,从而滤除孤岛区域点信息。通过实验验证算法性能,结果表明,该滤波方法实现了孤岛数据的全部滤除,同时,一类误差与三类误差均低于1%,滤波对主体点云特征影响较小。满足中大型测量场中对点云滤波的使用要求,具有良好的工程应用价值。

**关键词:** 点云滤波;孤岛数据;数字信号处理;离散傅里叶变换;孤点查找

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.1040

## Research on high precision filtering algorithm for isolated data of LiDAR point cloud

Guo Xiaorui<sup>1,2</sup> Zhang Zhihan<sup>1,2</sup> Zhang Chi<sup>1</sup> Li Hongjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China;

2. Industrial Detonator Intelligent Assembly Hubei Engineering Research Center, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulty of filtering the clustered and isolated data far away from the main point cloud caused by occlusion in the linear measurement data of LiDAR, a point cloud filtering method combined with digital signal processing technology was proposed. The height difference sequence is constructed for the adjacent points in the data section, the discrete Fourier transform was used to solve the amplitude frequency response of the height difference sequence. After low-pass filtering and inverse Fourier transform of frequency domain signal, the comparison signal with greatly modified isolated data was restored. By comparison signal, we can find the location of isolated points in the point data section, so as to filter the point information of isolated area. The performance of the algorithm is verified by experiments. The results show that the filtering method can filter all the isolated data. At the same time, the class I error and class III error are less than 1%, and the filtering has little impact on the characteristics of the main point cloud. It meets the application requirements of point cloud filtering in medium and large measurement fields, and has good engineering application value.

**Keywords:** point cloud filtering; isolated data; digital signal processing; discrete Fourier transform; isolated point search

## 0 引言

激光雷达(light detection and ranging, LiDAR),一种新型主动三维空间信息采集传感器,通过检测光脉冲或调制脉冲确定激光源与目标之间的距离信息<sup>[1]</sup>,具有时效性强、精度高的优势。在堆料测量、水文建模、隧道工程<sup>[2]</sup>等领域应用广泛。同时车载激光雷达获取的点云数据有数据量大、空间分布不规则的特点。由于空间信息的复杂性,不可避免地会在点云数据中引入噪声。因此对点云数据进行曲

面重构等后续处理前将噪声滤除至关重要。

孤岛数据噪声作为噪声的一种类型,是受扫描仪自身局限性,如扫描盲区、障碍物、以及环境遮挡等,产生的偏离主体点云的点<sup>[3]</sup>。其典型特征是与被测目标主体在物理空间中相互独立,无任何连接且分布没有规律,滤除相对复杂且严重影响后续点云处理。现有研究成果中,研究人员对孤岛数据的主流滤除方法大致可分为3类:多标准综合法、图像处理法以及聚类法。多标准综合法是依照点云的空间关系,结合统计滤波、半径滤波以及k近邻滤波等方法,逐

层达到滤波效果<sup>[4-6]</sup>,此类处理方法可以有效地滤除孤立的离群点,但对于成簇状分布孤岛点集处理效果不佳。其中在使用直通滤波时,需先进行人工判定主体点云数据位置,人工干预性较强。张建民等<sup>[7]</sup>提出基于图像处理了点云滤波算法,将点云数据映射到二维图像上,通过网格划分提取最大连通域内数据实现孤岛数据的滤除。但该方法只适用于孤岛数据点之间分布离散的情况;将二维图像处理中的双边滤波算法通过改进滤波因子<sup>[8-10]</sup>引入到三维点云模型处理也是当前流行的处理方式,该类方法在小尺度孤岛数据上应用效果明显。在聚类点云滤波算法中,杨雨薇等<sup>[11]</sup>采用距离与聚类相结合的方法,通过欧氏距离和改进K-means聚类,实现孤岛点的滤除;密度聚类<sup>[12-15]</sup>算法可以通过选择合适的阈值将目标点与孤岛点分离,但由于对象点必须与数据集中其他对象点进行比较,执行时间成本高。采用随机采样一致性(random sample consensus, RANSAC)<sup>[16-19]</sup>算法聚类处理原始点云,从中提取出主体点云目标,结合双边滤波算法与K近邻平均算法完成点云滤波。该类方法能有效去除远离主体点云的孤岛点云数据,但由于结合多种方法进行处理,算法复杂度较高。

综上所述,针对多标准综合法与图像处理法对点云孤岛数据滤除效果不佳,聚类算法复杂度高,处理效率低且对主体点云存在一定影响,直通滤波可以有效去除孤岛数据到需要进行人工标定等问题,如何在不影响主体点云的前提下实现对成簇状不规则分布的孤岛数据的快速、准确滤除是本算法解决的主要任务。本算法根据机载激光雷达采集的线性点云数据特点,与数字信号处理理论相结合,对点云数据帧求取比较信号,通过比较信号查找滤除点云数据帧中孤岛数据。最终得到一个满足后续点云处理要求的滤波结果。

## 1 算法原理

### 1.1 算法框架

本算法根据二维机载激光雷达采集点云数据集中每条数据帧具有相同X坐标值的特点,将点云数据帧中相邻数据高度差组成的序列作为一段离散非周期时域信号,利用傅里叶变换对其进行频域转换,低通滤波后反求解比较信号。通过比较信号查找原数据中的孤岛点位置。算法主要分为4个步骤:点云预处理、频域滤波、信号还原、比较去孤。总体处理流程如图1所示。

步骤1:点云预处理。从点云数据文件中按相同X坐标提取点云数据帧;使用冒泡排序法对Y坐标值从小到大重新排序,Z坐标值与原Y坐标值对应;以第1个数据为基点,计算前后相邻数据点高度差,设置数据索引。

步骤2:频域滤波。将高度差数据集 $\Delta z_{(n)}$ 作为离散采样序列,设置采样频率后作为时域信号进行离散傅里叶变换,转换为频域信号;构建巴特沃斯滤波器;将频域中高频信息滤除。

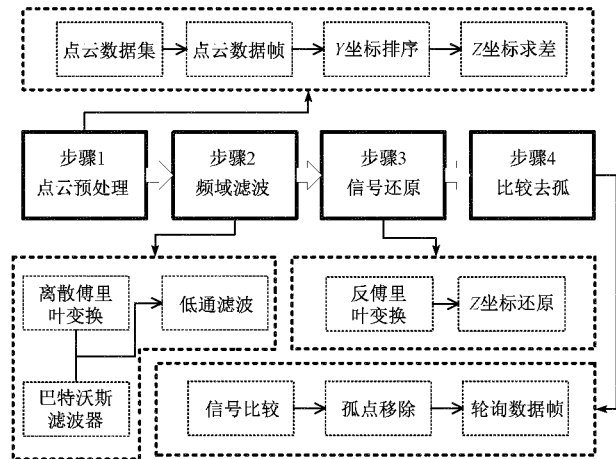


图1 孤岛数据滤波处理流程

步骤3:信号还原。经反傅里叶变换将步骤2中频域信号还原为时域信号 $\Delta z_{(n)}$ ,即滤波后高度差数据序列;经基点Z坐标值反推出比较信号中全部数据点Z坐标值。

步骤4:比较去孤。将步骤3中求出的比较信号与原数据帧中数据按索引作差,查找原数据帧中孤岛点位置;差值超过设定阈值,视作孤岛点;原数据中滤除索引号对应孤岛区域点信息,完成单帧点云数据去孤。

### 1.2 点云预处理

车载激光雷达测量过程中,单次扫描数据具有相同X坐标值特点。通过检索数据中相同X坐标值即可提取出单帧点云数据。由于实际测量过程中遮挡物的存在,造成数据存储顺序未能按照Y坐标值变化方向进行如图2(a)所示,若直接进行后续操作将造成比较信号中存在孤点信息无法修正,故从点云数据集中提取出第i帧数据后,先对其n点按Y坐标值进行排序如图2(b)所示,获得点云数据帧 $P_i = (x_i, y_{(n)}, z_{(n)})$ ,以第1个Z坐标值 $z_{(1)}$ 为计算基点,计算相邻数据点高度差如图2(c)所示,得出高差序列如式(1)所示。

$$\Delta z_{(m)} = z_{(m+1)} - z_{(m)}, 1 \leq m \leq n-1 \quad (1)$$

### 1.3 频域滤波

将傅里叶变换应用于数字信号处理,一是要解决输入信号从数学中的连续信号转换为计算机可以处理的数字信号;二是要解决计算机只进行有限次计算。这种受限制的傅里叶变换即为离散傅里叶变换。由于点云数据离散特性,经过步骤1完成数据预处理后,将点云高度差数据集作为长度为N的采样序列 $\Delta z_{(n)}$ ,根据式(2):

$$X_{(k)} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{(n)} e^{-\frac{2\pi}{N}kn}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

对 $\Delta z_{(n)}$ 进行离散傅里叶变换得复数集 $\Delta Z_{(k)}$ 。拟定采样频率 $F_s$ <sup>[20]</sup>,则 $\Delta Z_{(k)}$ 相应的振动频率为 $kF_s/N$ 。

输入信号由时域信号转换为频域信号后,低频部分描述信号趋势,高频部分描述信号细节,故而采用巴特沃斯低

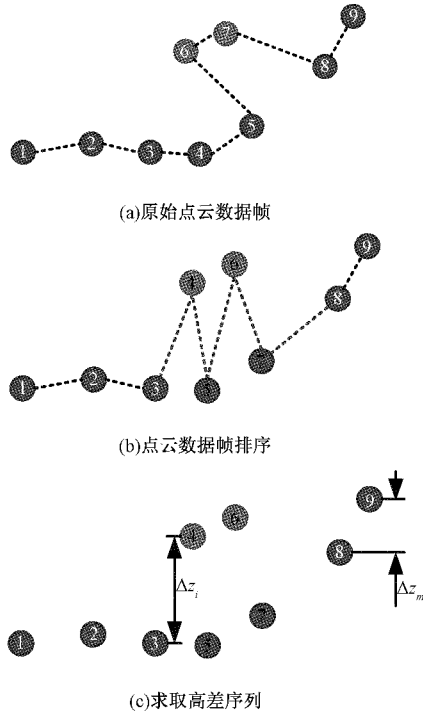


图 2 点云预处理

通滤波器进行滤波处理。巴特沃斯滤波器特点是通带内的频率响应曲线最大限度平坦,而在阻带内趋近于 0<sup>[21]</sup>,且由于过渡带的存在使信号转换到时域时保持信号趋势的同时保留部分细节。

1.4 信号还原

根据反傅里叶变换公式:

$$x_{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{(k)} e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, 0 \leq k \leq N-1 \quad (3)$$

对  $\Delta Z_{(k)}$  进行计算,将经过滤波后的频域信号还原为时域信号  $\Delta z_{(m)}$ ,代入式(1)中反求出比较信号  $z_{(n)}$ 。由于滤除高频信号而只保留低频信号,  $\Delta z_{(m)}$  只保留了信号波动趋势,故而比较信号中孤岛数据点高度信息被极大修正如图 3(a)所示。反推滤波后的比较信号如式(4)所示。

$$z_{(n)} = \begin{cases} z_{(1)}, & n = 1 \\ z_{(1)} + \Delta z_{(n-1)}, & n > 1 \end{cases} \quad (4)$$

1.5 比较去孤

比较序列  $z_{(n)}$  虽然修正孤岛数据点高度信息,但与原始点云数据帧相比,存在数据点一定范围内的失真。因此,按照索引号计算比较序列与原数据对应点 Z 坐标差值如图 3(b)所示,与设定高度差阈值 K 进行比较,如式(5)所示。

$$K = |z_{(n)} - z_{(p)}| \quad (5)$$

当第 a 个数据高度距离差超过阈值 K 时,则认定  $z_{(a)}$  为  $P_i$  中孤岛点的高度信息。将  $P_i$  高度数据集  $z_{(n)}$  中全部不满足阈值要求的孤岛数据点滤除后得到高度数据序列  $z_{(p)}$ 。  $P_i$  中与  $z_{(p)}$  对应的  $y_{(p)}$  以及固定 X 坐标值构成滤波

点云数据帧  $\bar{P}_i = (x_i, y_{(p)}, z_{(p)})$ , 如图 3(c)所示。轮询原始点云数据集中全部数据帧完成最终孤岛数据滤波处理。

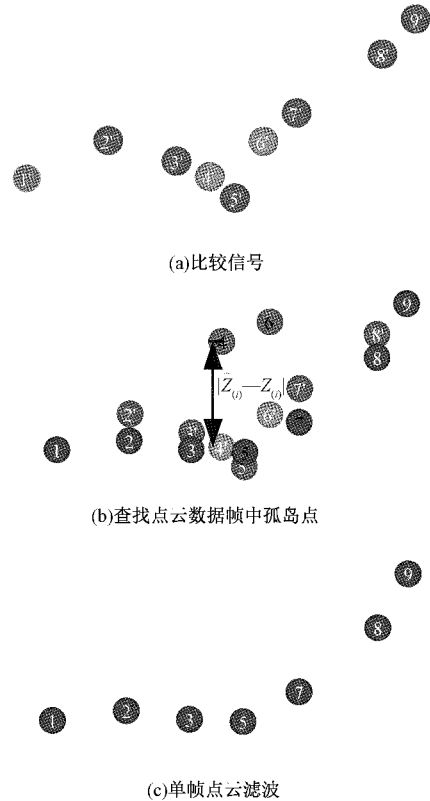


图 3 比较去孤

2 实验验证

为验证本算法对远离主体点云且成簇状分布的孤岛数据有效滤除,选取由于遮挡形成孤岛数据的实测沙堆点云如图 4(a)所示进行验证,其中点云数共 41 帧 6 517 个数据点,孤岛数据点 36 个。从中抽取一帧数据如图 4(b)所示,按照 Y 坐标值排序后构造高差序列如图 4(c)所示,其中,由于孤岛点 Z 坐标突变,造成高差序列相应索引处的信号尖峰噪声。

拟定信号采样频率  $F_s$  为 1 000 Hz,将高差序列作为时域信号进行离散傅里叶变换,转换后的幅频响应如图 4(d)所示。经过试验计算,主体数据高差分部区间在  $[-500, +500]$  时, 10 Hz 即可实现还原比较信号后,孤岛点 Z 坐标值的修正。因此,构建巴特沃斯低通滤波器带通边缘频率为 10 Hz,带阻边缘频率为 30 Hz。低通滤波效果如图 4(e)所示。

通过算法处理步骤 3 对低通滤波后的频域信号进行反傅里叶变换求取比较信号如图 4(f)所示,与经过 Y 坐标排序的点云数据帧按照索引号进行阈值判断如图 4(g)所示,实现单帧点云数据中孤岛点的滤除如图 4(h)所示。轮询全部数据帧,完成数据集 1 的孤岛数据滤除。最终效果如图 4(i)所示。

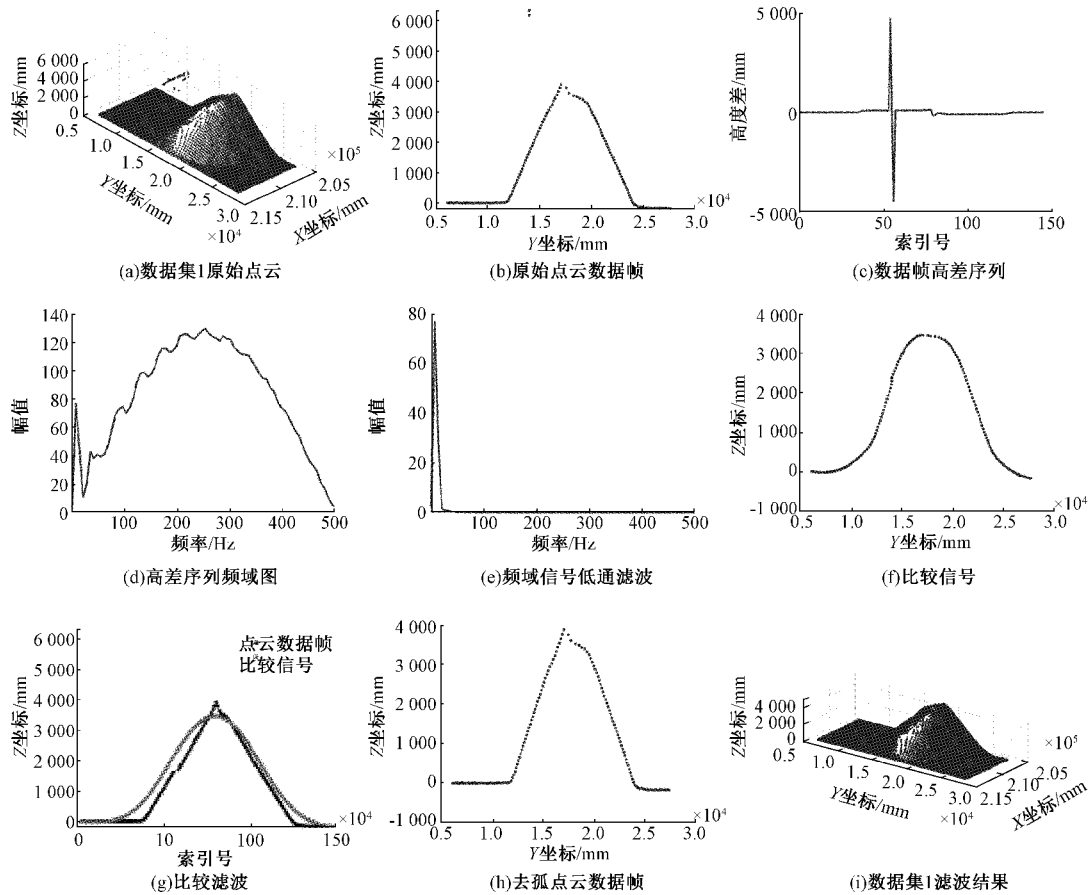


图 4 点云数据集 1 滤波处理

另外选取两组点云数据进行试验,其中,如图 5(a)所示点云数据集 2 共 16 帧 3 615 个数据点,孤岛数据点 239 个,滤波

效果如图 5(b)所示;如图 5(c)所示点云数据集 3 共 50 帧 8 197 个数据点,孤岛数据点 46 个,滤波效果如图 5(d)所示。

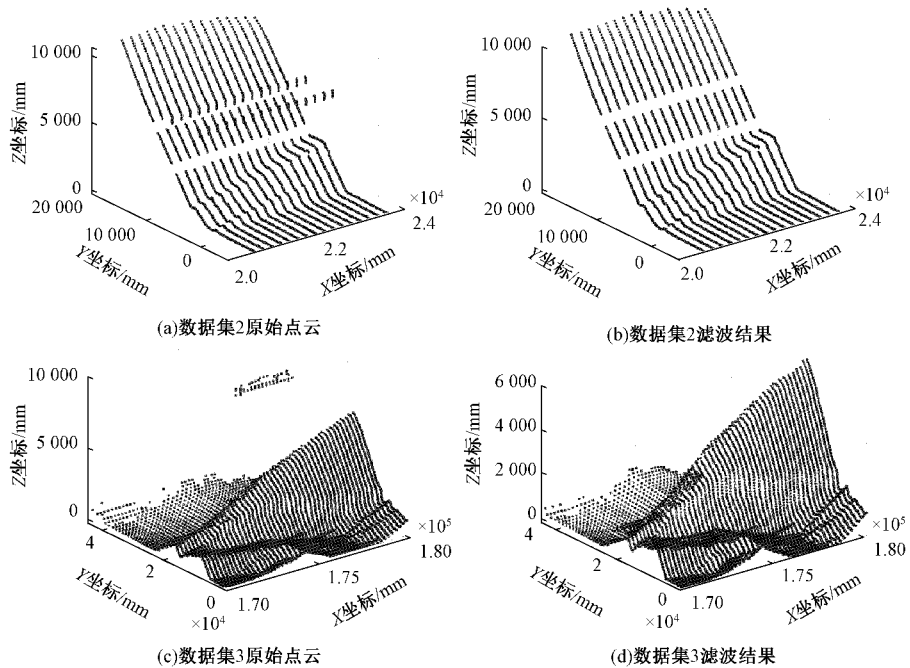


图 5 算法滤波效果

为对滤波结果进行有效评定,构建评估交叉表<sup>[22]</sup>,如表 1 所示。评估参数为:滤波后目标点云点数 a;滤波后目标点被错误滤除的点数 b;是孤岛点但未被滤除的点数 c;孤岛点中正确滤除的点数 d;e 和 f 分别表示原始数据集中目标点数和孤岛数据点数;g 和 h 分别表示滤波后目标点数与孤岛点数。

表 1 交叉表

参数	滤波数据		
	目标点	孤岛点	总和
目标点	a	b	c=a+b
孤岛点	c	d	f=c+d
总和	g=a+c	f=b+d	n=e+f

将点云误差分为 3 类:

1) 目标点云数据中被错误滤除的概率:

$$E_I = \frac{b}{c}$$

2) 孤岛数据未被滤除的概率:

$$E_{II} = \frac{c}{f}$$

3) 反应滤波结果与原始数据不一致概率的总误差:

$$E_{III} = \frac{b+c}{n}$$

对以上 3 组点云处理数据进行实验统计,其中,3 组数据实验结果如表 2 所示,算法滤波误差统计如表 3 所示。

表 2 滤波实验数据

参数	a	b	c	d
点云集 1	6 456	25	0	36
点云集 2	3 370	6	0	239
点云集 3	8 113	38	0	46

表 3 滤波误差统计

参数	$E_I$	$E_{II}$	$E_{III}$	耗时/s
点云集 1	0.003 8	0	0.003 8	0.580
点云集 2	0.001 8	0	0.001 7	0.218
点云集 3	0.004 7	0	0.004 6	0.716

本算法运行 CPU 为 i5-6200U,16 G 内存, MATLAB 2018a。3 组数据处理结果中:表示滤波后目标点云数据中存在孤岛数据概率的第 2 类误差  $E_{II}$  为 0,实现点云数据集中孤岛数据的全部滤除;第 1 类误差  $E_I$  中,目标点云数据中被错误滤除的概率低于 0.01,极大地保证了目标点云的完整性。造成目标点云错误滤除的点数 b 不为 0 的原因有两点:1) 为方便进行离散傅里叶变换,数据帧中点数 n 为偶数时将末端点滤除,此为系统误差;2) 阈值 K 设置较小时,在步骤 4 孤点查找过程中将个别目标数据点错误删除。

### 3 结 论

本文将点云数据处理与数字信号处理方法相结合,实现对远离主体点云的孤岛数据的滤除。该方法在最大限度保持主体目标点云特征的前提下,完成对孤岛数据的全部滤除,  $E_{III}$  总误差保持在 1% 以内。该方法不仅仅局限于对线性扫描数据的处理,通过对其他类型扫描点云数据切片划分仍可适用,为点云数据滤波处理提供了新的研究思路。本算法改进方向在于步骤 4 中比较去孤的阈值是试验值,后续推广到其他测量样本使用时,将深入研究该阈值的自适应性。

### 参考文献

- [1] 黄作维,刘峰,胡光伟.基于多尺度虚拟网格的 LiDAR 点云数据滤波改进方法[J].光学学报,2017,37(8):0828004.
- [2] 余乐文,战凯,张达.地下空间三维激光扫描分辨率方法研究[J].仪器仪表学报,2018,39(1):68-74.
- [3] 焦晨,王宝锋,易耀华.点云数据滤波算法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(11):18-22.
- [4] 李仁忠,杨曼,冉媛,等.基于方法库的点云去噪与精简算法[J].激光与光电子学进展,2018,55(1):011008.
- [5] 李绕波,袁希平,甘淑,等.综合多种算法的点云精简优化策略与实验研究[J].激光与光电子学进展,2020,57(23):231402.
- [6] 陈世海,李俊明,王雯.基于 3D 点云的电缆自适应多尺度去噪算法研究[J].国外电子测量技术,2020,39(10):115-118.
- [7] 张建民,陈富健,龙佳乐.基于图像处理的点云滤波算法[J].激光与光电子学进展,2021,58(6):0610015.
- [8] 曹爽,岳建平,马文.基于特征选择的双边滤波点云去噪算法[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(S2):351-354.
- [9] 肖国新,于辉,周晓辉.一种自适应双边滤波点云去噪算法[J].信息技术,2017,28(10):118-120.
- [10] 廖中平,白慧鹏,陈立.基于双边滤波改进的点云平滑算法[J].计算机技术与发展,2019,29(11):42-46.
- [11] 杨雨薇,李幸刚,张亚萍.基于图像的重建点云离群点检测算法[J].数据采集与处理,2018,33(5):928-935.
- [12] 陈逍遥,任小玲,夏邢,等.基于标记的多状态离群点去除算法[J].国外电子测量技术,2020,39(1):39-43.
- [13] XU Z X, ZHANG Z X, ZHONG R F, et al. Content-sensitive multilevel point cluster construction for ALS point cloud classification[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3):342-360.
- [14] WANG X H, CHEN H W, WU L S. Feature extraction of point clouds based on region clustering segmentation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79: 11861-11889.



- [15] 杨永涛,张坤,黄国言,等.邻域密度约束的动态标准差阈值三维点云数据离群点检测方法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2018,30(6):1034-1045.
- [16] LI L, YANG F, ZHU H H, et al. An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells[J]. Remote Sensing, 2017, 9(5): 433-448.
- [17] ADAM A, CHATZILARI E, NIKOLOPOULOS S, et al. H-RANSAC: A hybrid point cloud segmentation combining 2D and 3D data [J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, 4(2): 1-8.
- [18] 郭宁博,陈向宁,何艳华.基于RANSAC分割的点云数据K-近邻去噪算法研究[J].电子测量技术,2017,40(12):209-213.
- [19] 毕雪婷,刘小军,邵文远.基于聚类方法的自动驾驶场景下的三维目标检测[J].电子测量技术,2021,44(6):103-107.
- [20] 彭钰钦,涂亚庆,杨辉跃. DFT 算法频率和相位差测量不确定度评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 17-22.
- [21] 宋锡文,董业鹏,杨世飞.基于FPGA的振动信号处理参数寻优试验研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(2):101-108.
- [22] 黄思源,刘利民,董健,等.车载激光雷达点云数据地面滤波算法综述[J].光电工程,2020,47(12):190688.

#### 作者简介

郭晓锐,硕士研究生,主要研究方向为点云数据处理与嵌入式软件开发。

E-mail:1272055603@qq.com

章智涵,硕士研究生,主要研究方向为点云数据处理。

E-mail:1051093701@qq.com

张弛,副教授,主要研究方向为图形图像处理与人工智能等。

E-mail:czhang1@wtu.edu.cn

李红军(通信作者),教授,主要研究方向为网络激光控制技术、特种高危智能装备等。

E-mail:lhj@wtu.edu.cn