

# 基于双边滤波改进的点云平滑算法

廖中平,白慧鹏,陈立  
(长沙理工大学,湖南长沙 410114)

**摘要:**针对目前传统双边滤波算法存在的不适应平滑孤立点及多次迭代易导致过度光顺点云特征等缺陷,提出在原有算法的基础上通过异向法矢平滑处理修正法向量以提高算法后续处理的精确性。根据点云孤立点的特性,通过预先删除孤立点以提高双边滤波算法的效率。根据近邻点法向趋于连续性分布的特点,计算待光顺点与其近邻点的法向夹角并与所设阈值进行比较从而确定近邻点对待平滑点的双边滤波因子,进而提高算法对点云几何特征的保持程度。通过模拟的规整点云以及实地采集到的点云数据进行试验分析,与传统的双边滤波算法对比给出评价结论。实验结果表明,以上改进方法相对于传统的双边滤波算法在提高效率的同时不仅增强了算法的抗噪性,而且提高了特征保持度。

**关键词:**点云;法向改进;双边滤波;平滑;特征保留

**中图分类号:**TP391.41

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2019)11-0042-05

**doi:**10.3969/j.issn.1673-629X.2019.11.009

## Improved Denoising of Point-sampled Model Based on Bilateral Filtering

LIAO Zhong-ping, BAI Hui-peng, CHEN Li  
(Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the current bilateral filter algorithm such as unadaptive smoothing outliers and excessive smoothing of the point cloud after multiple iterations, we propose to modify the normal based on the original algorithm to improve the accuracy of the subsequent processing of the algorithm. According to the characteristics of outliers, the efficiency of bilateral filtering algorithm is improved by removing outliers in advance. According to the characteristics of the close-to-continuity distribution of the nearest neighbors, the normal angles between the nearest neighbors are calculated and compared with the thresholds to determine the factor of bilateral filtering, which to improve the retention of the features. The experimental analysis is carried out by simulated point cloud and real point cloud data, and the evaluation conclusion is given by comparing with the traditional bilateral filtering algorithm. The results show that the above improved method not only enhances the anti-noise performance of the algorithm, but also improves the feature retention compared with the traditional bilateral filtering algorithm.

**Key words:** point cloud; normal improvement; bilateral filtering; smoothing; features retention

### 1 概述

在获取点云数据时,由于扫描设备的精度、操作者的经验、环境因素等带来的影响,以及电磁波衍射特性、被测物体表面性质变化和 数据拼接配准操作过程的影响,点云数据中将不可避免地出现一些噪声点,从而严重影响点云配准、特征提取、曲面重建、可视化等后续应用处理。因此,对点云进行降噪、光顺预处理是点云数据处理过程中十分重要的环节,是后续数据处理的基础与关键。

激光点云数据中的噪声具有多样性,主要分为以

下四类:毛刺点、孤点、离群点以及非测量对象表面的无用数据。毛刺点噪声主要是由于设备的精度引起的,其存在的规律主要表现为依附于扫描物体表面而呈现规律性的跳动,但是与扫描对象表面相去不远,跳动幅度的大小视扫描仪器的精度而定,它的存在主要影响其所在局部表面的光滑性。孤点一般不能明确知道是有哪种因素引起的,其特性表现为与目标表面最近点的距离远大于扫描目标表面点云的平均点间距。离群点一般成簇出现,其距离目标点云也是远大于主体点云平均点间距,它与孤点的区别主要在于孤点都

收稿日期:2019-01-09

修回日期:2019-05-13

网络出版时间:2019-06-27

**基金项目:**湖南省科技创新计划(重点研发计划)(2018SK2011);国家自然科学基金(41671446);湖南省教育资助科研项目(17B004);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2017SS03)

**作者简介:**廖中平(1972-),男,博士,讲师,研究方向为三维激光扫描与建模;白慧鹏(1993-),男,硕士,研究方向为三维激光点云数据处理。

**网络出版地址:**<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190627.1115.088.html>

是单个出现,单个的离群点即可视为孤点。非测量目标表面的无用点云数据主要是由于外界的环境因素引起的,如路上的行人、树木、房屋及靠近扫描目标的遮挡物体等,通常这种噪声的数量都比较庞大。文中主要将点云平滑作为研究重点。

国内外的许多学者对此进行了深入研究。Vollmer 等<sup>[1]</sup>将 Laplacian 算子应用到点云模型上,该方法是通过多次迭代将数据点移向局部点云数据的重心处。但是拉普拉斯算法仅适合点云分布比较均匀的模型,对于分布不均匀的点云,其邻域重心大多不会与其邻域结构的中心点重合,这势必导致该点向点云密度大处偏移而无法保持其原有特征,经过多次迭代会使得点云模型扭曲变形。由于拉普拉斯滤波会造成顶点漂移,Desbrun 等<sup>[2]</sup>随后提出了一种基于平均曲率流的方法,将顶点的移动方向限制在每个点的法向量方向上,解决了顶点漂移问题,但是这种方法是各向同性的,对噪声和模型的尖锐特征不能加以区分,在去除噪声的同时,尖锐特征不能得到保持。为了避免各向同性所产生的问题,Clarenz 等<sup>[3]</sup>提出了各向异性点云数据滤波算法,该算法设计了一个离散的各向异性扩散方程,通过解这个方程实现点云数据滤波,但是该方法计算量较大,耗时较多。随后,Flieschman 等<sup>[4]</sup>将图像滤波领域的双边滤波思想运用到三维点云滤波中,通过在顶点法向上迭代调整顶点位置。这种方法速度快,但是点云特征部分易被平滑,并且该算法比较依赖点云法向的质量并且不适合去除噪声大的点云。虽然三维激光扫描技术在国内发展的较晚,但是国内学者在点云处理方面的研究也取得了显著成果。崔鑫等<sup>[5]</sup>提出了一种将模糊 C 均值(FCM)聚类算法与双边滤波方法相结合的方法,分别处理三维点云数据的离群点和毛刺点。梁新合等<sup>[6]</sup>提出了基于自适应最优邻域阈值的散乱点云降噪技术,采用三边滤波算法根据点云实际特征选取最优邻域并且自适应的降噪滤波,该算法取得了很好的滤波效果,但是参数选取不合适的时候顶点会发生漂移。孙正林等<sup>[7]</sup>将 Mean-Shift 算法运用到点云滤波中,将散乱点云沿着法向量方向“漂移”到核密度估计函数的最大值点,强制顶点漂移和过度体积收缩,在收敛过程中使点均匀扩散到聚类邻域,这种算法适用于高频噪声,但是该算法没法快速自适应的选取参数。苏志勋等<sup>[8]</sup>对传统的法向量修正方法进行改进,提出基于 L1 中值滤波<sup>[9]</sup>的点云平滑方法。但是该算法不适合处理噪声和离群点污染较严重的点云。刘彬等<sup>[10]</sup>利用移动最小二次曲面思想提出了一种基于正交投影约束的点模型去噪算法,但是该方法计算量大,耗费时间多。张毅等<sup>[11]</sup>针对点云强度进行滤波,根据地面激光扫描点云的数据特点,研

究建立了点云强度三维扩散滤波方程,深入分析扩散尺度在扩散滤波中的作用。曹爽等<sup>[12]</sup>利用邻域点判断该点属于特征点还是非特征点,然后根据不同范围的点云来计算特征点和非特征点的双边滤波因子,实现基于特征选择的双边滤波点云去噪。袁华等<sup>[13]</sup>针对不同类型的噪声采用不同的滤波方法进行滤波,并对双边滤波算法进行了改进,取得了较好的效果。李明磊等<sup>[14]</sup>在双边滤波的基础上通过精确计算法向量等措施来提高滤波精度,但仍没解决双边滤波处理高频噪声效果差的问题。林洪彬等<sup>[15]</sup>提出一种各向异性扩散滤波的三维散乱点云平滑去噪算法,该算法对于小尺度的噪声处理效果较好。

从目前的研究来看,针对散乱点云的滤波,主要存在以下问题:(1)对于海量点云的滤波耗时较多,效率慢;(2)点云法矢、曲率的求取在许多点云滤波算法中往往是比较重要的一步,而目前大部分算法使用的是 PCA 算法,容易受制于噪声点的影响,最后导致平滑效果有所下降;(3)许多算法没有较强的自适应能力,只在处理某些特定的模型和特定的噪声时取得了较好的效果,但无法彻底摆脱几何模型的多样性和噪声复杂性的困扰。针对以上算法存在的不足,文中对效率较高的双边滤波算法进行了改进,使之在保持算法原有优点的基础上,提高对点云的特征保持能力以及抗噪性。

## 2 算法及实现

在各种点云去噪方法中,双边滤波算法具有良好的特征保持与平滑性能,可以通过控制三维点云数据中各点邻域的大小来保持模型的特征,但不能够处理尺度较大的噪声,并且存在着一定的特征被过度平滑的可能。另外,仅采用双边滤波对具有复杂表面几何特征的三维点云数据进行去噪时,很难做到在三维点云数据模型特征丰富区域保持特征,同时在特征欠缺的平坦区域高度光滑。

算法改进主要分为两个步骤:首先估计并提高点云的法向量质量,其次运用双边滤波的思想并结合点云的位置信息及局部几何信息平滑点云。点云法矢信息作为点云曲面最重要的几何要素之一,是多数点云平滑以及重建算法所必需的数据之一,而法向量质量的高低往往直接关系到最终处理效果的好坏。文中对传统方法求取的法向量进行修正,并在此基础上结合双边滤波的思想,从近邻点所包含的位置信息和几何信息对待光滑点的影响程度求取滤波因子,进而对噪声点的位置进行调整,使之达到更好的平滑和特征保持效果。

## 2.1 法向量估计并改进

双边滤波算法需要用到点云的法向量属性之一,而法向量估计质量的好坏会直接影响后续算法的平滑效果。目前通用的散乱点云法向量估计方法是基于点云局部协方差的分析的主成分分析法(principal component analysis, PCA),文中在传统的方法中加入高斯权重,然后再将求得的法向量进行异向法矢平滑,最终得到良好的法矢信息。具体方法如下:

给定散乱点云中采样点  $p_j \in S$  及其最近  $k$  邻域  $N(p_i)$ , 对以下的协方差矩阵  $C$  进行特征跟分解:

$$C = \frac{1}{k} \sum_{p_j \in N(p_i)} (p_j - \bar{p})(p_j - \bar{p})^T \quad (1)$$

其中,  $\bar{p} = \frac{1}{k} \sum_{p_j \in N(p_i)} p_j$ , 得到的三个特征根记为  $0 \leq \lambda_0 \leq \lambda_1 \leq \lambda_2$ , 其对应的特征向量为  $v_0, v_1, v_2$ , 将最小特征根  $\lambda_0$  对应的特征向量  $v_0$  作为  $p_i \in S$  的法向量的一个近似估计。法向量的一致定向可以通过最小生成树的方法得到。以上为传统的 PCA 均匀权法向量估计方法, 将均匀权换为高斯权得到:

$$C = \sum_{p_j \in N(p_i)} e^{-\frac{\|p_j - \bar{p}\|^2}{\sigma^2}} \cdot (p_j - \bar{p})(p_j - \bar{p})^T \quad (2)$$

其中, 参数  $\sigma$  可以选择跟点云密度相关的参数, 特征值分解如上初步得到法矢信息。因为仅仅靠这一步, 鲁棒性还不够, 部分区域尤其是尖锐特征部分的点云法矢呈现散乱性分布。因此根据邻近点云法向量应趋于方向一致性的特性构造式 3, 对初步得到的法向量依据式 3 迭代进行异向法矢平滑处理, 最终可得到质量较高的法矢信息。

$$n \leftarrow \frac{\sum_{p_j \in N(p_i)} e^{-\frac{\|p_j - \bar{p}\|^2}{\sigma^2}} \cdot e^{-\left(\frac{1-\cos\theta_{ij}}{1-\cos\sigma_n}\right)} \cdot n_j}{\sum_{p_j \in N(p_i)} e^{-\frac{\|p_j - \bar{p}\|^2}{\sigma^2}} \cdot e^{-\left(\frac{1-\cos\theta_{ij}}{1-\cos\sigma_n}\right)}} \quad (3)$$

其中  $\sigma_n$  为角度阈值(一般默认选择  $15^\circ$ ), 一般迭代次数选择 2 至 5 次合适。文中选取 Leica C10 三维激光扫描仪采集的房屋墙面散乱点云数据以及使用 MATLAB 软件生成的圆锥体规整点云进行点云法矢修正实验, 最后的法矢异性平滑结果如图 1 所示。

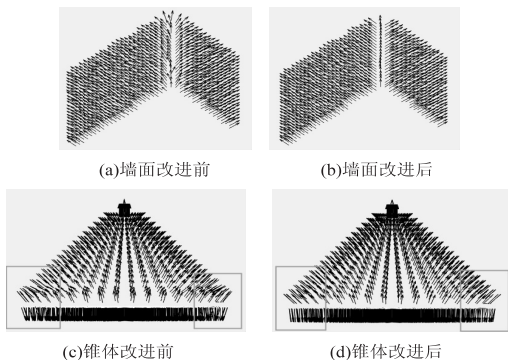


图 1 点云法矢改进前后效果对比

从图 1 中可以看出, 改进前法向量在墙面相交的拐角处以及圆锥体侧面与圆底面的相接处存在明显的散乱现象, 而在改进之后, 散乱现象明显减弱, 邻近点的点云法矢更加趋于一致性分布。由此表明, 改进后的法向量估计算法对点云拐角等易出现法矢散乱现象的区域有一定的抑制作用, 为后续的点云平滑处理提供了良好的基础。

## 2.2 点云平滑算法

双边滤波算法是通过取近邻采样点的加权平均来修正当前采样点的位置, 从而达到滤波效果。其表达式为:

$$p'_i = p_i + \alpha \cdot n \quad (4)$$

其中,  $p'_i$  为滤波后的点;  $p_i$  为原数据点;  $\alpha$  为双边滤波因子;  $n$  为点  $p_i$  的法矢。

$\alpha$  的表达式如下:

$$\alpha =$$

$$\frac{\sum_{p_j \in N(p_i)} W_c(\|p_j - p_i\|) W_s(\|p_j - p_i, n_i\|) \langle p_j - p_i, n_i \rangle}{\sum_{p_j \in N(p_i)} W_c(\|p_j - p_i\|) W_s(\|p_j - p_i, n_i\|)} \quad (5)$$

其中,  $N(p_i)$  为数据点  $p_i$  的邻域点;  $W_c = e^{-\frac{x^2}{2\sigma_c^2}}$ 、 $W_s = e^{-\frac{x^2}{2\sigma_s^2}}$  均为高斯核函数, 表示近邻点对  $p_i$  的影响权重;  $\sigma_c$  为  $p_i$  到每个近邻点的距离对该点的影响因子, 一般取值为邻域半径;  $\sigma_s$  为每个近邻点在  $p_i$  法矢上的投影距离对该点的影响因子, 一般取值为近邻点的标准偏差; 当  $\sigma_c$  确定后, 点云在法向上的平滑距离与  $\sigma_s$  的取值成正比;  $\|p_j - p_i\|$  表示点  $p_j$  到  $p_i$  的空间距离;  $\|p_j - p_i, n_i\|$  表示  $p_j$  在  $p_i$  法向上的投影;  $\langle p_j - p_i, n_i \rangle$  表示向量积。  $W_c$ 、 $W_s$  均会随着两点之间空间距离以及投影距离的增大而缩小。它们的作用是保证邻域特征的相似性。但是双边滤波算法存在以下缺陷, 如图 2 所示。

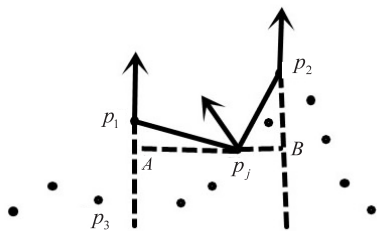


图 2 双边滤波算法说明示意

假设  $p_1$  为包含噪声较大的点, 其原本的位置应靠近  $p_3$  附近。  $p_2$  为特征点,  $p_j$  为  $p_1$ 、 $p_2$  的近邻点。当待光顺点为  $p_1$  时, 如果依据点  $p_j$  来调整  $p_1$  的位置, 按照传统算法  $p_1$  调整后位置应在 A 点附近, 并不能达到良好的平滑效果, 需要多次迭代才能达到较好的光顺效果,



而多次迭代的后果就会使得整体的效率比较低下。当待光顺点为  $p_2$  时,同理根据近邻点  $p_j$  的位置,  $p_2$  会下移到点  $B$  附近,这就会导致某些特征点被过度光顺。针对以上存在的问题,提出如下改进方法:

第一步分别计算待光顺点  $p_i$  与其近邻点  $p_j$  的平均距离及近邻点的标准偏差,然后确定全局点云近邻点平均距离及标准偏差的取值范围,在此基础上分别设置 1 至 2 倍的全局平均距离阈值及标准偏差阈值,若点  $p_i$  的这两个属性参数均小于这两个阈值,则判定其为可平滑点,否则判定其为孤立点并删除。第二步计算  $p_i$  的法向  $n_i$  与  $p_j$  的法向  $n_j$  的夹角  $\beta_i$ ,此时设定角度阈值  $\gamma_1$  (一般取  $15^\circ$  至  $30^\circ$ ),若  $\beta_i \geq \gamma_1$ ,则不考虑  $p_j$  对  $p_i$  位置调整的影响,即不计算  $p_j$  对  $p_i$  的影响权值;若  $\beta_i < \gamma_1$ ,则判定  $p_j$  对  $p_i$  的位置调整有一定的影响,需计算  $p_j$  对  $p_i$  的影响权值。在所有的近邻点被判定计算之后,滤波因子在此基础上依据式 5 进行计算得到,最后通过式 4 确定待平滑点的位置。例如在图 2 中,  $p_j$  的法矢与  $p_i$  的法矢夹角过大,则不考虑  $p_j$  对  $p_i$  的影响权值,即  $W_c, W_s$  为 0。

3 实验设计与实例应用

文中算法是在配置为 Intel(R)Core(TM)i5-

3 210 M CPU,主频 2.50 GHz,内存 4 G,Windows 7 64 位系统的 PC 机上运行,使用 Matlab R2015b 实现。为了更好地验证算法的适应性及优越性,使用 MATLAB 软件拟合的锥体规整点云来设计对比实验并以实际点云数据验证最后的点云平滑效果。主要原因有以下两点:(1)锥体包含平面、曲面、尖锐特征等几何要素,更能验证实验效果;(2)对加入高斯噪声的规整点云进行平滑处理,并与原始的规整点云比较,平滑的效果会更加直观地显示出来。锥体规整点元实验数据如图 3 所示。

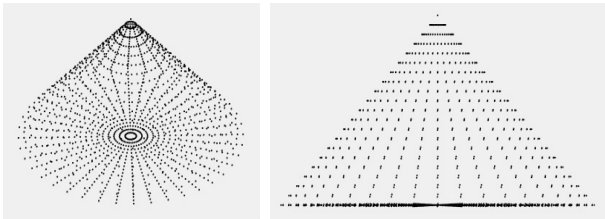
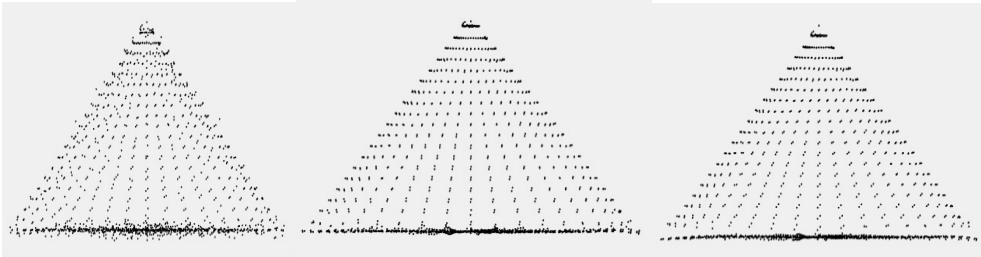


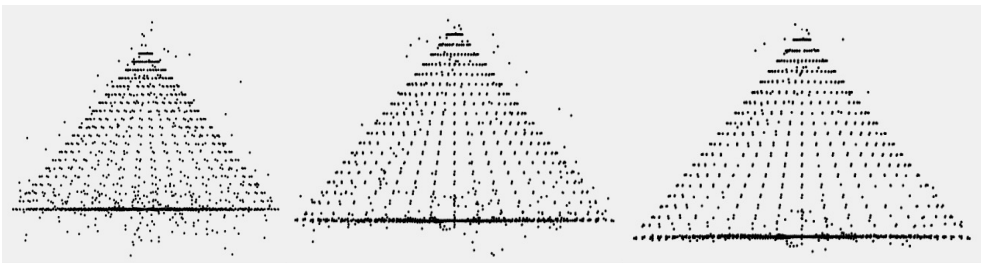
图 3 规整锥体点云

实验一:规整点云锥体共计 1 641 个点,在原始规整点云的基础上,沿点法向方向分别加入均值为 0,中误差分别为  $2\sigma$  的低频高斯噪声及  $6\sigma$  的高频高斯噪声,其中  $\sigma$  为原始点云点间距中误差,然后对其做平滑处理,处理结果如图 4 和图 5 所示。



(a)低频噪声点云 (b)改进前平滑效果 (c)改进后平滑效果

图 4 低频噪声平滑效果对比



(a)高频噪声点云 (b)改进前平滑效果 (c)改进后平滑效果

图 5 高频噪声平滑效果对比

从图 4 可以看出,双边滤波算法对于低频噪声可以达到良好的平滑效果,但也暴露出该算法的固有缺点,如从图 4(b)中可以看到锥体尖锐特征部分明显被平滑掉,但是从图 4(c)可以看出,改进的双边滤波算法在对噪声进行平滑的同时可以有效保持锥体点云的尖锐特征。从图 5(b)可以看出,传统的双边滤波算法对于高频噪声的处理并没有达到理想的效果。从图 5

(c)可以看出,文中算法相比于传统算法抗噪性大大提高,但对于成簇离群点的处理效果也并不是很好。

实验二:使用 Leica C10 三维激光扫描仪采集的洗衣液瓶子数据,共计 19 181 个点。利用改进后的双边滤波算法进行平滑点云实验。采用 Geomagic Studio 软件并对滤波后的点云模型进行曲面重建。结果如图 6 所示。

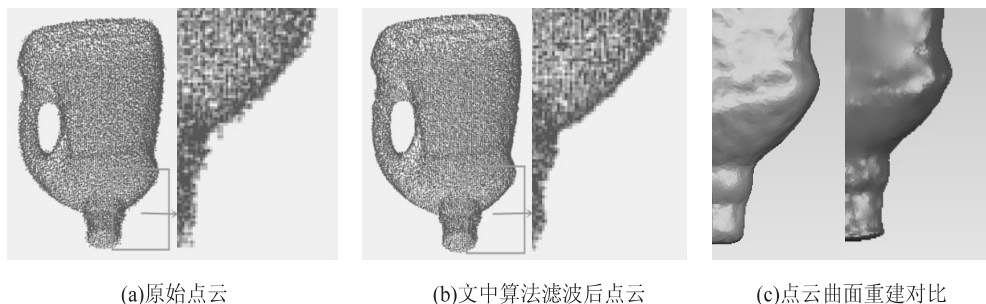


图 6 改进的双边滤波噪声平滑效果

传统双边滤波耗时 13.417 s,改进算法滤波后点云共计 18 629 个点,耗时 10.247 s。如图 6(c)所示,前者为传统算法滤波后重建效果,后者为文中算法滤波后重建效果。通过对比可以看出,洗衣液瓶子点云在经过改进后的算法平滑后,瓶口和瓶身的凸起等细节特征都得到了较好的保持,并且在曲面重建后显得比较清晰。以上实验结果表明,文中改进的双边滤波算法无论在细节特征保持方面还是在孤立点的去除方面均优越于传统的双边滤波算法,具有实际应用价值。

#### 4 结束语

点云法向量是点云最重要的基本信息之一,其质量的好坏往往对后续的点云处理工作有着重大影响。文中利用近邻点法向量趋于一致性的特点,用加入高斯权的 PCA 算法求取法向量并对其进行异向法矢平滑处理,较大地提高了点云法矢质量。针对传统双边滤波算法的固有缺点,文中算法首先根据近邻点的平均距离及标准偏差与全局点云平均距离及标准偏差的比较来去除孤立点,从而提高算法效率。其次,在传统算法的基础上根据近邻点法矢与待平滑点法矢夹角的大小分别确定近邻点对待平滑点的双边滤波因子,从而提高了算法的特征保持能力。但是,改进后的算法对呈现点云簇出现的群点去除效果并不理想,这是因为离群点的平均距离及标准偏差和全局点云的相差不大。另外,由于激光扫描效率的日益增高,获取的数据量也越来越大,而现有的点云去噪光滑方法一般基于计算机的内存,在点云数据量十分庞大时处理难度较大,因此如何将离群点行之有效的去除以及针对海量激光点云的光顺去噪算法将是后续的研究重点。

#### 参考文献:

- [1] VOLLMER J, MENCL R, MÜLLER H. Improved Laplacian smoothing of noisy surface meshes[J]. Computer Graphics Forum, 1999, 18(3): 131-138.
- [2] DESBRUN M, MEYER M, BARR A. Implicit fairing of ar-

bitrary meshes using Laplacian and curvature flow [C]//ACM Siggraph'99 proceedings. [s. l.]: ACM, 1999: 317-324.

- [3] CLARENZ U, DIEWALD U, RUMPF M. Anisotropic geometric diffusion in surface processing[C]//Proceedings visualization 2000. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2000: 397-405.
- [4] FLEISHMAN S, DRORI I, COHENOR D. Bilateral mesh denoising[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953.
- [5] 崔鑫, 闫秀天, 李世鹏. 保持特征的散乱点云数据去噪[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3169-3178.
- [6] 梁新合, 梁晋, 郭成, 等. 基于自适应最优邻域的散乱点云降噪技术研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(6): 639-643.
- [7] 孙正林, 邹峥嵘, 吴爱琴. 一种改进的 Mean Shift 点云数据滤波[J]. 测绘工程, 2011, 20(5): 57-59.
- [8] 苏志勋, 栗志扬, 王小超. 基于法向修正及中值滤波的点云平滑[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(11): 1892-1898.
- [9] 屈正庚, 牛少清. 一种改进的自适应加权中值滤波算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(12): 86-90.
- [10] 刘彬, 李梦瑞, 林洪彬, 等. 基于正交投影约束的点模型去噪[J]. 计算机工程, 2012, 38(20): 264-267.
- [11] 张毅, 闫利. 地面激光点云强度噪声的三维扩散滤波方法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 568-573.
- [12] 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.
- [13] 袁华, 庞建铨, 莫建文. 基于噪声分类的双边滤波点云去噪算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(8): 2305-2310.
- [14] 李明磊, 张蕊, 李广云. 激光扫描点云法矢精确计算与表面光滑方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(7): 1153-1161.
- [15] 林洪彬, 付德敏, 王银腾. 基于参数自适应各向异性高斯核的散乱点云保特征去噪[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(12): 2583-2592.