

激光扫描数据的密集噪声剔除方法

陈世超¹, 戴华阳¹, 王成², 习晓环^{2*}, 管力¹

¹中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

²中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094

摘要 为了有效剔除地面激光扫描数据中的大范围密集噪声,同时保留建筑物边缘特征,提出了一种基于距离变化并融合点云强度与密度信息的去噪方法。分析了噪声空间分布特征和点云强度分布,基于水平角和竖直角建立空间四叉树索引,在叶子节点内基于点前后间距特征实现局部点的快速聚类 and 孤立噪声剔除,在同类点集中基于不同类别强度点数的比值剔除大范围密集噪声。研究表明,所提算法能够有效剔除地面激光扫描数据中存在的大范围密集噪声,精度达 90% 以上。

关键词 遥感; 地面激光扫描数据; 点云去噪; 密集噪声; 噪声空间分布; 强度分布

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.062801

Method for Filtering Dense Noise from Laser Scanning Data

Chen Shichao¹, Dai Huayang¹, Wang Cheng², Xi Xiaohuan^{2*}, Guan Li¹

¹College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing),
Beijing 100083, China;

²Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China

Abstract To remove the large-scale and dense noise from the terrestrial laser scanning data and keep the edge features of buildings, a filtering method fusing intensity with density of points is proposed based on the varied distance of the points to the scanning stations. The spatial distribution of noise and the intensity distribution of point clouds are analyzed comprehensively. The spatial quadtree index is established based on the horizontal and vertical angles. The fast clustering of local points and the removal of isolated points are realized based on the account of the distance before and after points in the leaf nodes, and the large-scale and dense noise is filtered out according to the ratio among different types of intensity point numbers in the same point set. The research results show that the proposed method can be used to effectively filter out the large-scale and dense noise involved in the terrestrial laser scanning data with an accuracy of above 90%.

Key words remote sensing; terrestrial laser scanning data; denoising of point clouds; dense noise; spatial distribution of noise; intensity distribution

OCIS codes 280.3640; 030.4280; 100.3008

1 引言

地面三维激光扫描(TLS)技术已经成为获取地物目标三维空间信息的重要手段,并在各行业发挥着重要作用^[1-3]。在实际应用中,每次扫描获取的点云数据往往数以亿计,其中不可避免地会存在各种

噪声^[4],且噪声密度越大,对点云质量的影响越大,因此,亟需采取合适的算法加以剔除。

国内外学者在点云去噪方面开展了大量的研究^[5],基于噪声的空间分布可将其分为 3 类:1) 偏离主体点云较远的点,一般为空气中稀疏的离散点或者孤立的小而密集的点;2) 距离点云主体较近或

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-09-24; 录用日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(41628101,41871264)

* E-mail: xixh@radi.ac.cn

与有效点云混在一起的噪点;3)大范围的密集噪声。第1类噪声通常可采用统计滤波、半径滤波、网格去噪和基于点密度去噪等算法^[6]进行滤除。第2类噪声可采用运动稳健主成分分析(MRPCA)算法^[7]、基于偏微分方程的曲面逼近算法^[8]和双边滤波算法及其改进后的算法^[9-11]等进行滤除,其主要思想是对点云进行平滑处理,而对于大范围的高密度噪点,仍需手工剔除。第3类噪声大多采用手工剔除的方法。基于点的空间位置信息,文献[12-13]通过局部拟合曲面将偏离拟合曲面较远的点视为噪点进行剔除。曹爽等^[14]采用栅格去噪和改进的双边滤波算法分步剔除噪点,但剔除大范围高密度噪声的效果不佳。Shao等^[15]采用网格滤波剔除第1类噪声,对于含有第2类噪声的点云将其投影到平面后,采用离散小波阈值(DWT)算法进行去噪。Haque等^[16]采用法向量偏差和点到其近邻点的距离识别噪点。基于点的强度信息,Zhang等^[17]提出了一种基于点云强度的扩散滤波方法,对小尺度噪声进行了处理。赵凯等^[18]提出了一种基于体素栅格的快速密度聚类算法,在处理大规模噪声上取得了较好的效果,但当噪声与有效点云混在一起时,去噪效果不理想。TLS系统通常以预设固定的角度分辨率进行等角扫描,在进行全方位长距离扫描时,因周围

地物、地貌的空间分布的差异,距离扫描仪越远点密度越低,距离变化越大,点云整体密度越不均匀。因此,仅依赖点的位置信息或点的强度信息很难去除大范围的密集噪声。

本文以剔除大范围密集噪声和保留建筑物边缘特征为目的,提出一种基于距离变化并融合点云强度与密度信息的去噪算法,最后利用实际扫描数据,验证了所提方法的去噪效果和精度。

2 方法原理

2.1 噪声点空间分布特征

传统去噪算法基于点密度、点间关联性等特征实现,对于含有大范围密集噪声的情况,噪声点密度与周围有效点云相差较小,且分布较广,无法基于局部点密度或关联性实现去噪,但其空间分布和强度与非噪声数据具有一定差异。某一扫描站点获取的点云数据的噪声空间分布如图1所示,红色为噪声点,其空间分布特征为:1)点由扫描仪向四周沿径向发散,且竖直角在 90° 附近;2)大范围的密集噪声位于扫描仪的近距离端,一般噪声位于扫描仪的远距离端;3)扫描仪近端的噪点密度与其附近真实点云的密度差值小,而与远端的噪点密度相差大。

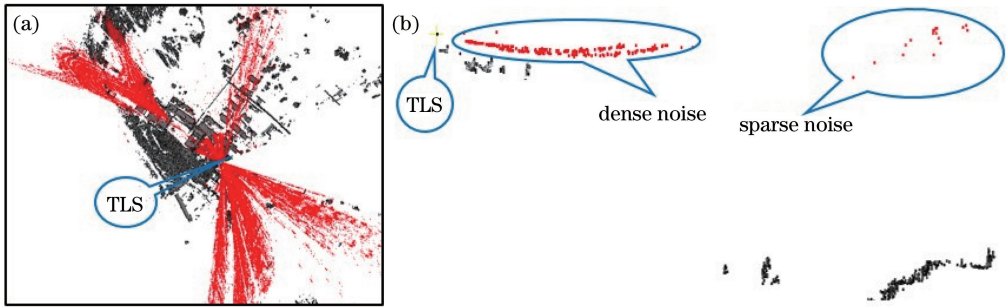


图1 噪声空间分布。(a) TLS附近点云数据;(b)某方向垂直剖面

Fig. 1 Spatial distribution of noise. (a) Point clouds data nearby TLS; (b) vertical profile along one direction

2.2 噪声强度分析

点云中反射强度高的点可视为有效点云,反射强度较低的点既包含远距离点、建筑物和植被边缘等有效点云,也包含了大量的噪声。点云的强度值近似服从高斯正态分布,可采用不同倍数的强度标准差 σ 作为高低强度点的临界值。由于原始点云对象复杂,实验选取半径20 m范围内的点云,采用不同临界值去除低强度点并比较去噪效果。当临界值不低于 2σ 时,能够剔除大范围的密集噪声,但剔除

噪声点的同时,也删除了远距离点和对象边缘点,点云强度图如图2所示,蓝色为低强度点,绿色为高强度点。临界值越大,误删的点越多,故采用 2σ 作为高低强度点的临界值。

对点云噪声的分析可知,大范围的密集噪声在空间上沿径向分布,其密度随距离增加逐渐减小,与周围真实点云密度的差异性逐渐变大,且其强度小于点云强度高斯分布的 2σ 。因此,在近距离区域,基于强度差异实现去噪;在远距离区域,基于密度差异实现去噪。

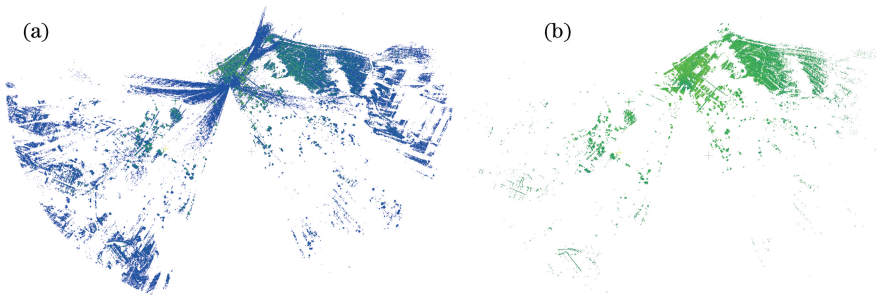


图 2 点云强度图。(a)全部点云；(b)剔除强度低于 2σ 的点后的点云

Fig. 2 Intensity map of point cloud. (a) All point clouds; (b) point clouds after points with intensity less than 2σ removed

2.3 噪声剔除算法

基于上述分析,本研究提出了基于距离变化并融合强度和密度信息的点云去噪算法,点云去噪算法流程如图 3 所示。总体来讲,包括以下 3 步。首

先,将点云的坐标转换为极坐标格式,计算点云强度分布的标准差。接着,基于四叉树建立空间索引。最后,对每个叶子节点根据距离的不同采取不同的方法剔除噪声。

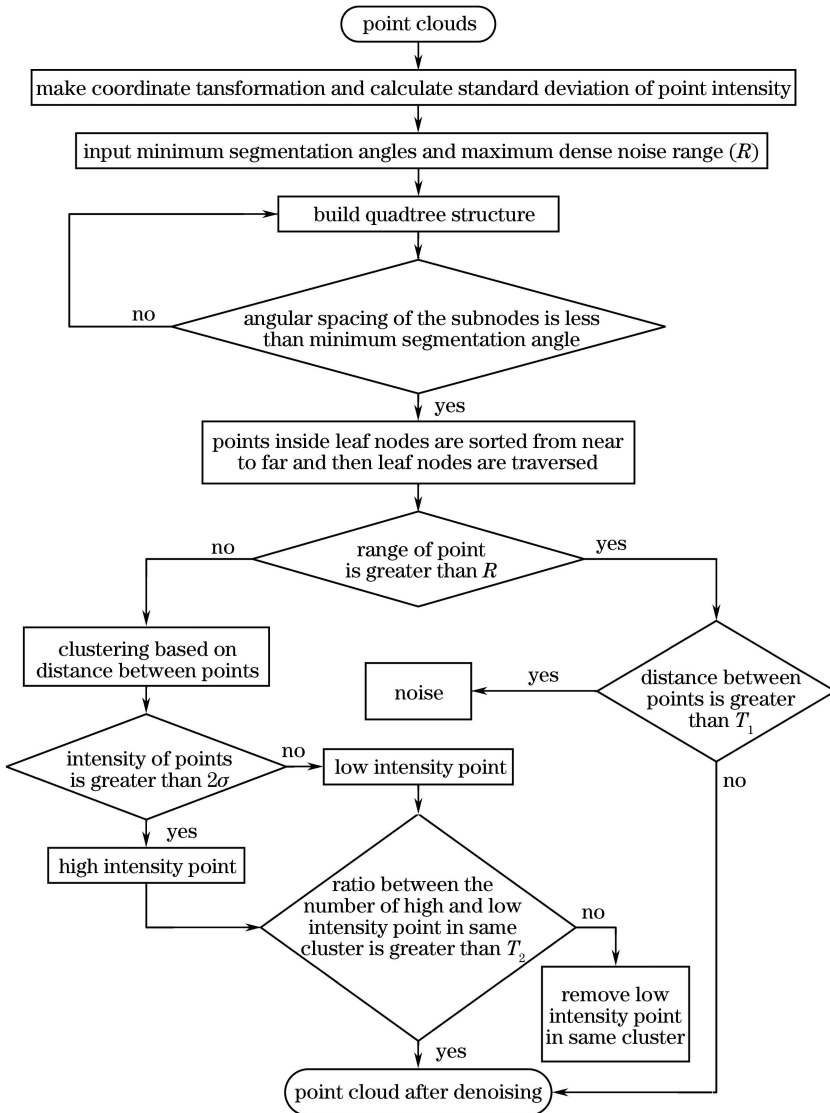


图 3 点云去噪算法流程

Fig. 3 Flow chart of point cloud denoising algorithm

具体步骤如下。

第1步:建立点云空间索引。点云空间划分的方法有八叉树^[19]、格网和Kdtree^[20]等。八叉树和格网常用于划分密度均匀的点云,Kdtree常用于近邻点搜索,但当点云体量非常大时,近邻搜索的速度较慢。由于地面激光扫描数据量大、密度变化大且噪声沿径向分布,采用空间极坐标法进行空间划分,基于水平角和竖直角建立空间四叉树索引。由于扫描仪以预设的角度分辨率(水平角 H_a 和竖直角 V_a)进行扫描,在划分点云空间时,可采用 $4H_a \sim 6H_a$ 和 $20V_a \sim 30V_a$ 作为最小分割角度来终止空间划分。

第2步:远近距离的划分。近距离区域内的噪声主要是大范围的密集噪声,远距离区域的噪声主要是空气中稀疏的离散点,不同距离区域内的噪声密度和强度差异不同。为了剔除大范围密集噪声同时又保持远距离区域内的地物、地貌,应依据大范围高密度噪声的最远距离来划分远近距离。

第3步:噪声剔除。点云中的孤立点可视为噪点。在叶节点内,基于点到扫描仪的距离由小到大进行排序。设置点前后间距的阈值 T_1 ,小于 T_1 的归为一类,大于等于 T_1 的视为孤立点,遍历一次叶节点即可实现节点内点云的快速聚类 and 孤立点的删除。

通常孤立噪点的点间距较大,可采用局部点密度进行剔除^[21]。对于地面点云,点的理论平均点间距 d 可表示为

$$d = 2r \sin \sqrt{\frac{\theta\varphi}{2}}, \quad (1)$$

式中: r 为点到扫描仪的距离; θ 和 φ 分别为竖直和水平方向的扫描角度分辨率。由于孤立点的前后点间距要远大于该点的理论平均点间距,可设置阈值 $T_1 = 10d$ 。

聚类后的同类点集中可能包含噪声、边缘点和非边缘点。用 a 表示非边缘点个数, b 表示边缘点个数, c 表示噪点个数, l 表示低强度点数, h 表示高强度点数,则

$$\begin{cases} h = a \\ l = b + c \end{cases} \quad (2)$$

通常非边缘点个数 a 大于边缘点个数 b ,即 $a/b > 1$ 。若同类点集中高强度点数 h 与低强度点数 l 的比值较低,说明 c 值较大,即点集中出现大量噪点。因此,设置阈值为 T_2 ,若 h 与 l 的比值低于 T_2 ,则删除点集中的低强度点。由于 c 值的随机性,很难实现阈值 T_2 的自适应设置,因此设置 T_2

为某一常数,即 $T_2 = 0.1$ 。

3 实验结果与分析

实验数据来自于奥地利Rigel公司的VZ 4000扫描仪,选用两站点云数据,其中1号数据点数为29404265个,2号数据点数为41947191个。分别使用所提算法、开源软件Cloud compare中的noise filter^[22]和统计滤波联合半径滤波^[23]进行去噪实验。Noise filter定义一个搜索半径 R ,如果每个点的 R 邻域内的点数小于3,将被视为噪点;反之将拟合局部平面,距离拟合平面较远的邻域点被视为噪点。统计滤波对搜索点到邻域点的距离进行统计分析以剔除统计范围外的噪点,半径滤波通过查询点在指定半径内的近邻点个数剔除其近邻点个数较少的点。所提算法和Cloud compare软件采用的参数如表1所示,Cloud compare、统计滤波联合半径滤波和所提算法的去噪效果如图4~6所示。Noise filter和统计滤波联合半径滤波在密集的噪声区域均存在去噪不充分的问题,而在远距离处均存在过度去噪的问题,原因在于不同距离的点密度分布不同,若仅采用某点半径范围内的点数判别该点是否为噪点,则会对远距离处稀疏的真实点云造成误删,同时也会将密集的噪点视为真实的点云。由图5和图6可知,在保持建筑物边缘方面所提方法优于noise filter和统计滤波联合半径滤波,但对部分电线存在过度去噪,原因在于电线的反射强度较低而引起误删。仅从去噪效果图上看,所提算法明显优于noise filter和统计滤波联合半径滤波。

为了量化去噪精度,根据文献^[24]的滤波误差评价方法,将点云 N 分为噪声 N_n 和非噪声 N_s 。对点云去噪后,剔除的噪声 N_a 即包含真实的噪声 N_b ,也包含非噪声 N_c ;保留的点云 S_a 即包含真实的点云 S_b ,也包含噪声 S_c 。采用 K_N 表示噪声识别精度,即 $K_N = N_b / N_n \times 100\%$; K_R 表示将非噪声识别精度,即 $K_R = S_b / N_s \times 100\%$; K 表示去噪精度,即 $K = (N_b + S_b) / N \times 100\%$ 。由于点云体量大,很难统计点云中的全部噪声数据。采用随机抽样的方法,在存在特征噪声的水平方向上随机选择4个方向,分别计算4组点云的 K_N 、 K_R 、 K ,将其均值视为整体点云的 K_N 、 K_R 、 K 。所提算法、统计滤波联合半径滤波和Cloud compare去噪精度如表2所示,运行效率和去噪后点数与原始点数占比如表3所示。对于2组点云,所提算法和统计滤波联合半径滤波的运行效率远大于Cloud compare,但所提算

法的噪声识别精度分别为 92.7% 和 92.9%，非噪点 94.9% 和 96.2%，明显高于滤波联合半径滤波和识别精度分别为 96.8% 和 97.4%，去噪精度分别为 Cloud compare。

表 1 所提算法和 Cloud compare 软件采用的参数

Table 1 Parameters for proposed method and Cloud compare software

Test data	Proposed method				Statistical filter & radius filter					Cloud compare
	Minimum segmentation angle		Intensity critical	Range critical	T_1	T_2	Number of neighboring points	Multiple of standard deviations	Search radius /m	R /m
	$\varphi /(^{\circ})$	$\theta /(^{\circ})$	value /dB	value /m						
1	0.10	0.5	1186	460	10d	0.1	40	3	0.5	0.5
2	0.08	0.4	1162	538	10d	0.1	40	3	0.5	0.5

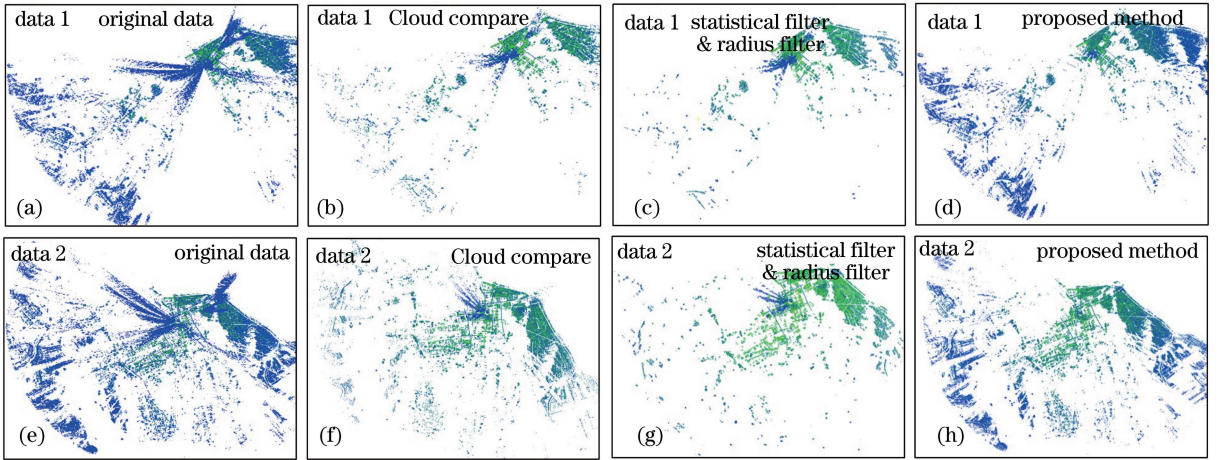


图 4 全部点云的去噪效果。(a)数据 1,原始数据;(b)数据 1,Cloud compare;(c)数据 1,统计滤波联合半径滤波;(d)数据 1,所提算法;(e)数据 2,原始数据;(f)数据 2,Cloud compare;(g)数据 2,统计滤波联合半径滤波;(h)数据 2,所提算法

Fig. 4 Denoising results for all point clouds. (a) Data 1, original data; (b) data 1, Cloud compare; (c) data 1, statistical filter & radius filter; (d) data 1, proposed method; (e) data 2, original data; (f) data 2, Cloud compare; (g) data 2, statistical filter & radius filter; (h) data 2, proposed method

表 2 所提算法、统计滤波联合半径滤波和 Cloud compare 的去噪精度

Table 2 Denoising accuracy of proposed method, statistical filter & radius filter and Cloud compare

Data	Horizontal direction / ($^{\circ}$)	$K_N / \%$			$K_r / \%R$			$K / \%$		
		Proposed method	Statistical filter & radius filter	Cloud compare	Proposed method	Statistical filter & radius filter	Cloud compare	Proposed method	Statistical filter & radius filter	Cloud compare
1	72-73	90.4	55.8	52.3	98.7	59.6	62.3	95.6	58.4	60.3
	146-147	92.3	57.3	59.8	95.5	66.8	69.7	94.4	63.8	65.8
	271-272	94.9	65.2	50.1	96.5	65.1	65.1	95.3	61.1	61.6
	332-333	93.3	56.3	55.7	96.3	59.6	60.3	94.4	57.6	57.0
	Average	92.7	58.7	54.5	96.8	62.78	64.4	94.9	60.2	61.2
2	40-42	93.9	62.9	73.8	96.0	66.4	81.3	95.1	63.2	78.3
	159-161	93.5	64.9	67.6	96.3	66.7	80.2	95.4	66.1	77.6
	215-217	91.7	67.5	61.7	98.7	62.1	75.2	97.2	60.7	71.4
	323 - 325	92.5	58.2	60.9	98.7	73.8	75.6	96.9	71.1	69.3
	Average	92.9	61.1	66.0	97.4	67.2	78.1	96.2	65.3	74.2

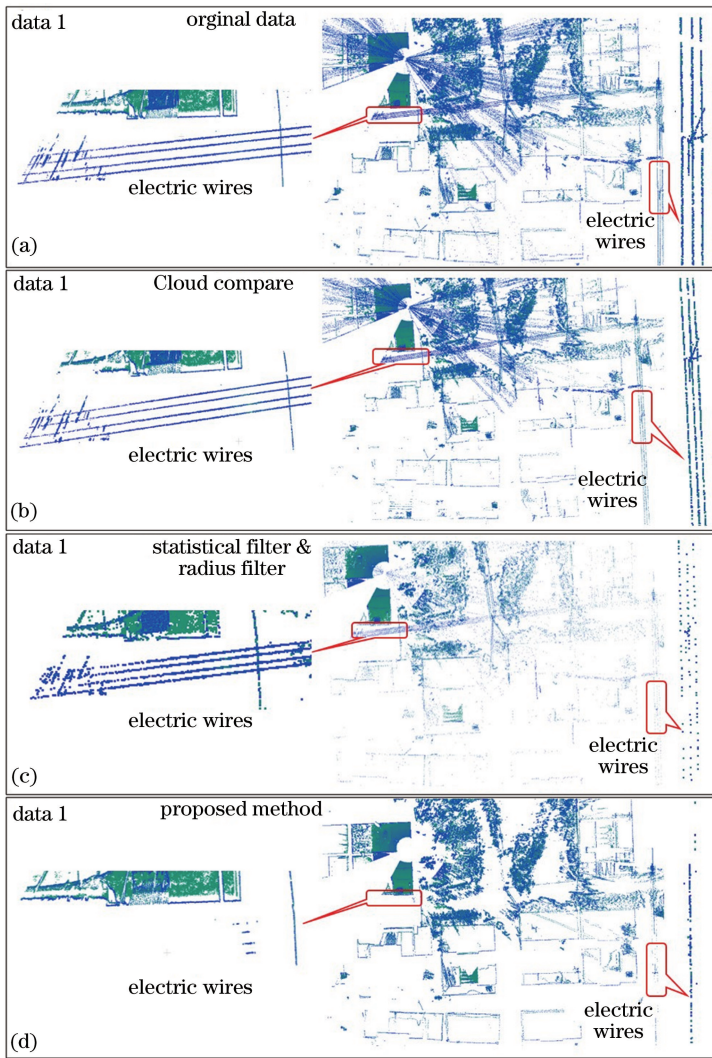


图 5 数据 1 局部建筑物边缘和电线点云的去噪效果。

(a)原始数据;(b) Cloud compare;(c)统计滤波联合半径滤波;(d)所提算法

Fig. 5 Denoising results for edges of partial buildings and partial electric wires from data 1. (a) Original data;

(b) Cloud compare; (c) statistical filter & radius filter; (d) proposed method

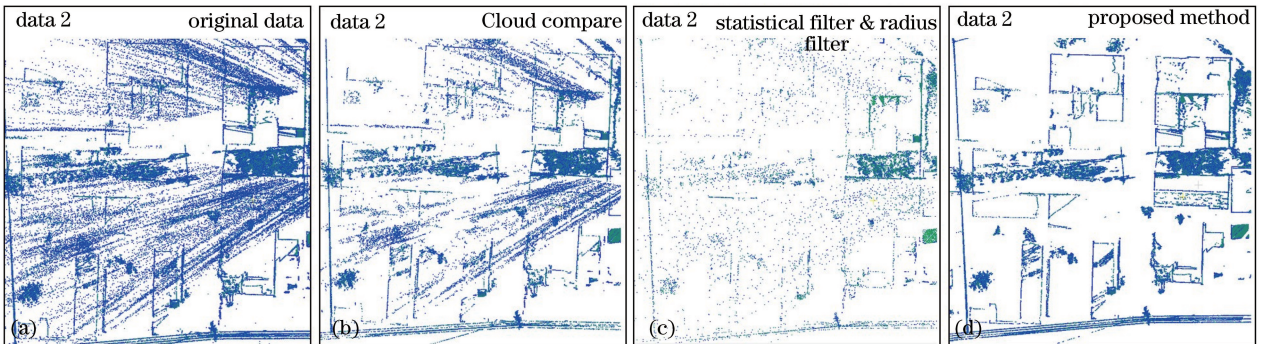


图 6 数据 2 局部建筑物边缘和电线点云的去噪效果。

(a)原始数据;(b) Cloud compare;(c)统计滤波联合半径滤波;(d)所提算法

Fig. 6 Denoising results for edges of partial buildings and partial electric wires from data 2. (a) Original data;

(b) Cloud compare; (c) statistical filter & radius filter; (d) proposed method

表3 所提算法、统计滤波联合半径滤波和 Cloud compare 的运行效率和去噪后的点数占比

Table 3 Operation efficiency and ratio of number of denoised points to original points of proposed method, statistical filter & radius filter and Cloud compare

Data	Operation efficiency			Ratio of number of denoised points to original points /%		
	Proposed method /min	Statistical filter & radius filter /min	Cloud compare /min	Proposed method	Statistical filter & radius filter	Cloud compare
1	1.5	1.2	>30	97.4	61.3	72.2
2	2.4	2.0	>30	97.5	62.7	70.6

4 结 论

提出了一种 TLS 点强度和密度相结合的点云去噪算法,解决了大范围密集噪声的快速高精度去噪问题,同时又保持了点云中建筑物边缘信息,最后通过实验验证了所提算法的有效性,为点云的后续处理供了高质量的基础数据。不足之处在于远近距离的划分不能自适应,而且会对部分电线等反射强度较低的点造成误删,因此还需进一步开展深入研究。

参 考 文 献

[1] Zhang L S, Cheng X J. Tunnel deformation analysis based on lidar points[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0404004.

张立朔,程效军. 基于激光点云的隧道形变分析方法[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0404004.

[2] Zhang T, Chen X J. Bridge amplitude monitoring with three-dimensional laser scanning technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 051409.

章涛,陈西江. 利用三维激光扫描技术监测桥梁振幅[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051409.

[3] Cai Y, Xu W B, Liang D, *et al.* Distinguishing phyllostachys edulis age based on laser scanning intensity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0110003.

蔡越,徐文兵,梁丹,等. 基于激光回波强度判别毛竹年龄[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0110003.

[4] Landa J, Procházka D, Štátný J. Point cloud processing for smart systems[J]. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 2013, 61(7): 2415-2421.

[5] Han X F, Jin J S, Wang M J, *et al.* A review of algorithms for filtering the 3D point cloud[J]. Signal Processing: Image Communication, 2017, 57: 103-112.

[6] Zaman F, Wong Y P, Ng B Y. Density-based denoising of point cloud [C] // 9th International

Conference on Robotic, Vision, Signal Processing and Power Applications, February 2-3, 2016, Penang, Malaysia. Singapore: Springer Singapore, 2016: 287-295.

[7] Mattei E, Castrodad A. Point cloud denoising via moving RPCA [J]. Computer Graphics Forum, 2017, 36(8): 123-137.

[8] Xiao C X, Miao Y W, Liu S, *et al.* A dynamic balanced flow for filtering point-sampled geometry [J]. The Visual Computer, 2006, 22(3): 210-219.

[9] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising[J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 950-953.

[10] Moorfield B, Haeusler R, Klette R. Bilateral filtering of 3D point clouds for refined 3D roadside reconstructions [M]. Cham: Springer International Publishing, 2015: 394-402.

[11] Li W L, Xie H, Zhang G, *et al.* Adaptive bilateral smoothing for a point-sampled blade surface [J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(6): 2805-2816.

[12] Zhao C, Shi Y L, Cheng J T. A new near point denoising algorithm for point cloud [J]. Advanced Materials Research, 2012, 479/480/481: 2152-2156.

[13] Smítka V, Štroner M. 3D scanner point cloud denoising by near points surface fitting [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8791: 87910C.

[14] Cao S, Yue J P, Ma W. Bilateral filtering denoise algorithm for point cloud based on feature selection [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(S2): 351-354.

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.

[15] Shao Q, Xu T, Yoshino T, *et al.* Classified denoising method for laser point cloud data of stored grain bulk surface based on discrete wavelet threshold [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 123-131.

[16] Haque S, Govindu V M. Robust feature-preserving

- denoising of 3D point clouds[C]//IEEE International Conference on 3D Vision, October 25-28, 2016, Stanford, CA, USA. New York: IEEE, 2016: 83-91.
- [17] Zhang Y, Lyu X Q. A three-dimensional diffusion filtering model establishment and analysis for point cloud intensity noise[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2017, 17(1): 011010.
- [18] Zhao K, Xu Y C, Li Y L, *et al.* Large-scale scattered point cloud denoising method based on VG-DBSCAN algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1028001.
赵凯, 徐友春, 李永乐, 等. 基于 VG-DBSCAN 算法的大场景散乱点云去噪[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1028001.
- [19] Sveier A, Kleppe A L, Tingelstad L, *et al.* Object detection in point clouds using conformal geometric algebra[J]. Advances in Applied Clifford Algebras, 2017, 27(3): 1961-1976.
- [20] Zhang K, Qiao S Q, Gao K. A new point cloud reconstruction algorithm based-on geometrical features[C]// 2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), December 18-20, 2015, Sousse, Tunisia. New York: IEEE, 2015: 297-302.
- [21] Li P F, Wu H E, Jing J F, *et al.* Noise classification denoising algorithm for point cloud model [J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(20): 188-192.
李鹏飞, 吴海娥, 景军锋, 等. 点云模型的噪声分类去噪算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(20): 188-192.
- [22] Giradeau M D, Bougacha S, Bey A, *et al.* Cloud compare [CP/OL]. (2018-02-04) [2018-02-05]. <http://www.cloudcompare.org/>.
- [23] Li R Z, Yang M, Ran Y, *et al.* Point cloud denoising and simplification algorithm based on method library [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011008.
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.
- [24] Zhu X X, Wang C, Xi X H, *et al.* Hierarchical threshold adaptive for point cloud filter algorithm of moving surface fitting [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 153-160.
朱笑笑, 王成, 习晓环, 等. 多级移动曲面拟合的自适应阈值点云滤波方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 153-160.