

提取桥梁点云的组合滤波算法

谷帆¹, 张长伦^{1*}, 郭志光², 王恒友¹, 何强¹, 安彤¹

¹北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044;

²中国建筑土木建设有限公司, 北京 100071

摘要 在土木桥梁施工场景中,点云数据包含大量植被、地面和桥梁建筑点云。现有滤波算法对桥梁建筑的提取完整度仍存在一些问题,因此提出一种基于组合滤波的桥梁点云提取算法。首先,该算法根据植被点云分布发散这一特征运用分散度法对植被进行粗滤除;其次,基于半径滤波与充分利用颜色与高程特征思想进行半径滤波算法的改进,对剩余植被点云进行精细滤除;最后,利用法向滤波模型对地面点云进行滤除。实验结果表明,所提算法提取桥梁点云的完整率为 99.3%,误差为 0.73%,对比现有滤波算法,可更完整地提取桥梁点云,准确率更高。

关键词 成像系统;桥梁建筑提取;分散度;半径滤波;法向滤波

中图分类号 P2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212709

Combined Filtering Algorithm for Extracting Bridge Point Cloud

Gu Fan¹, Zhang Changlun^{1*}, Guo Zhiguang², Wang Hengyou¹, He Qiang¹, An Tong¹

¹Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

²China Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100071, China

Abstract The point cloud data in the civil bridge construction scene includes a large number of vegetation, ground, and bridge construction point clouds. The extraction integrity of bridge buildings is still an issue for the existing filtering algorithms. This study proposes a bridge point cloud extraction algorithm based on combined filtering. First, the proposed algorithm applies the dispersion method to coarsely filter the vegetation by the feature of dispersion of vegetation point cloud distribution. Second, the radius filtering algorithm is improved to finely filter the residual vegetation point clouds based on the idea of radius filtering and making full use of color and elevation features. Finally, the ground point cloud is filtered using the normal filtering method. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm for extracting bridge point clouds has a 99.3% integrity rate and 0.73% error rate. When compared to existing filtering algorithms, the proposed algorithm extracts the bridge point cloud more completely and accurately.

Key words imaging system; bridge building extraction; dispersion; radius filtering; normal filtering

1 引言

随着三维激光扫描技术的飞速发展,利用激光扫描仪可直接快速地获取具有一系列特征的点云数据。在土木施工作业中,激光扫描技术也被大量使用,获取的数据将用于三维建模等。本文基于土木施工工地扫描的点云数据展开对桥梁的提取研究,该数据具有范围广、数据量大、非目标点云分布不规则等特点。因此,需要采用合适的滤波算法对颜色、形状、范围大小

各不相同的非目标点进行滤除。

当前算法大都基于聚类、统计、起伏变化、密度等特征提取目标点云。陈光洲等^[1]提出一种基于强度信息和地形信息的滤波算法,运用渐进三角网滤波算法设置不同的构网优先级,但算法的计算量较大,并不适用于处理大型点云。陈宇^[2]采用基于高程统计绘制地物点云的高程频率直方图确定植被高程阈值,剔除植被点云,该方法虽易操作,但只适用于较平坦和植被点云高程较为统一的地区。魏硕等^[3]采用基于密度空间

收稿日期: 2021-10-11; 修回日期: 2021-11-04; 录用日期: 2021-11-16; 网络首发日期: 2021-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(62072024)、北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心资助项目(UDC2017033322, UDC2019033324)、北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金项目(X20084, ZF17061)

通信作者: *zclun@bucea.edu.cn

聚类 and 统计滤波的点云去噪方法,该方法无法有效地去除距离近且密度大的团状点云。焦亚男等^[4]运用并行的点云去噪方法解决了不同尺度噪声去除困难的问题。曹雄等^[5]提出基于颜色聚类的点云去噪算法,该算法利用色差对点云进行聚类,在每一簇中对噪声进行去除。朱滨等^[6]利用主成分分析法估计样点表面的法线方向,提取建筑物表面,同时植被的边界也会被提取出,但无法明确区分建筑物与植被。毛亚纯等^[7]使用渐进式形态学滤波算法分割地面点与非地面点,但该方法对倾斜地面点云的分割效果不佳。马东岭等^[8]利用高差信息和扫描线方向的二次导数来判断相邻点云是否连续,进而区分建筑物与植被,但粗壮的树干的表面也较为规则、连续,故无法准确区分。余和顺等^[9]针对建筑物提取不完整问题,提出EXG(过绿指数)模型对植被点云进行滤除,但该颜色模型只适用于颜色区别明显的无人机点云,对颜色特征混合的点云并不适用。陈朋等^[10]提出基于点云均匀度的植被剔除方法,该方法可有效去除分布散乱点云,但分布密集均

匀的非目标点会被错误保留。

通过对实际数据进行计算发现上述算法的提取效果并不理想,为此本文提出一种基于组合滤波的桥梁点云提取算法。为有效剔除植被与地面点云,所提算法利用点云的分散度、颜色特征、高程特征和统计特征对植被点云进行滤除,之后进一步分析地面与桥梁点云的分布特征,建立法向滤波模型滤除地面点云,从而更加精确地提取桥梁点云。

2 算法原理与流程

基于组合滤波的桥梁建筑提取流程如图 1 所示。通过观察实验点云数据发现,根据分布特点可分为散乱、线状和面状点云。所提算法先根据点云的分布特点,运用分散度对散乱植被点云进行滤除;其次依据线状植被点云局部邻域点数较少的特点,运用组合半径滤波算法进行滤除,但结果中仍存在少量粗壮树干点云,可应用统计方法对其进行滤除;最后运用法向滤波模型对面状地面点云进行滤除,得到最终的桥梁建筑点云。

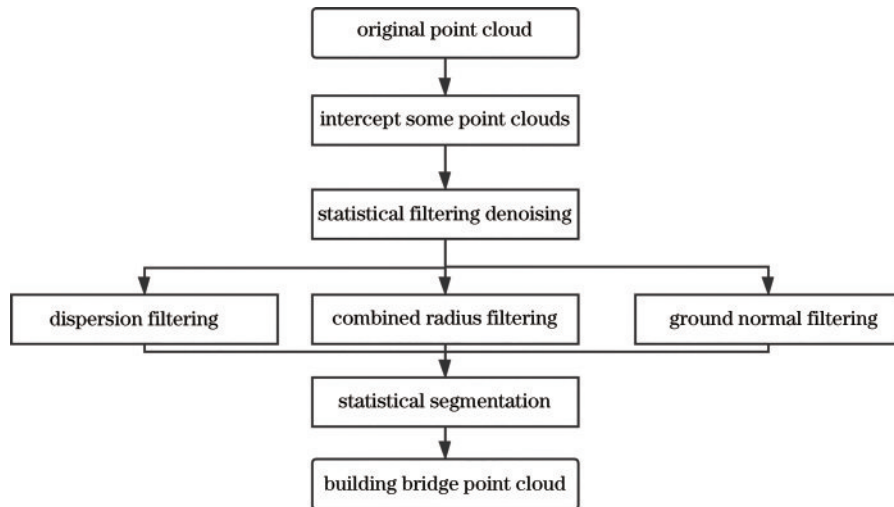


图 1 桥梁建筑点云提取流程图

Fig. 1 Flow chart of bridge construction point cloud extraction

2.1 原始点云的预处理

以土木建筑工地扫描的桥梁建筑作为研究对象,由于点云数据巨大,截取部分点云作为实验数据,该点云数据量是 11804344。实验点云数据最终以 (x, y, z, R, G, B, I) 的格式输出,其中 x, y, z 表示数据的几何位置信息; R, G, B 表示颜色信息; I 表示回波强度信息。在处理过程中,利用 Cloud Compare 软件对实验数据进行可视化,如图 2 所示。

由于扫描设备和环境等多种因素的影响,实验点云中会产生稀疏的离群噪声点^[11]。此时,计算法向量^[12]等局部点云特征时运算复杂,会导致错误的数值,进而影响后期的桥梁建筑提取的准确率。因此,进行滤除植被和地面等非目标点云操作之前,需要对实验点云数据运用统计去噪法去除噪声点。统计去噪的思

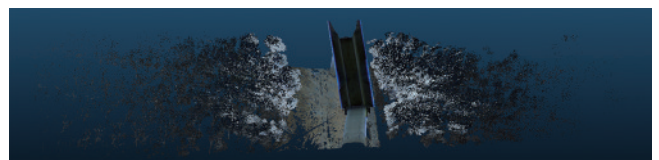


图 2 实验点云数据

Fig. 2 Experimental point cloud data

想是基于 KD-Tree 的 k 邻域搜索,确定查询点与邻域点的平均距离,再由平均距离的统计特征确定截断阈值,对离群噪声点进行去除。去除噪声后的点云数据的数量是 11256372。效果如图 3 和图 4 所示。

2.2 滤除植被点云

为了提取完整的桥梁建筑点云,需分析植被点云与桥梁建筑点云的分布差异,依据差异特征滤除非目标点云。

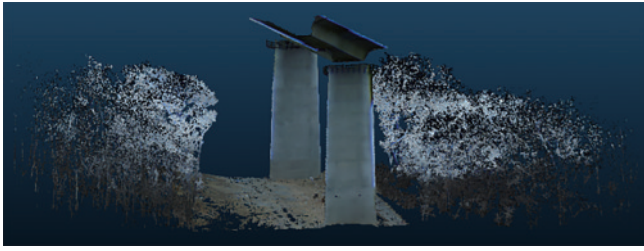


图 3 去噪后点云数据(侧视图)

Fig. 3 Point cloud data after denoising (side view)

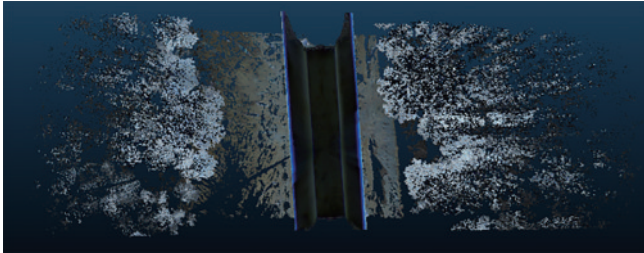


图 4 去噪后点云数据(俯视图)

Fig. 4 Point cloud data after denoising (vertical view)

2.2.1 基于分散度的点云滤波算法

桥梁建筑点云分布均匀且邻域的密度相近,而散乱的植被点云具有分布参差、邻域密度差异大^[13]等特点,因此利用分散度信息可以区分桥梁建筑点云与散乱的植被点云^[10]。由于点的密度不同,不同点的局部邻域构成的最大包围体也不同,但必然存在一个能包含该局部邻域的最小包围体,如图 5 所示。基于分散度的点云滤波算法首先构建以点 k 邻域的最大坐标差为边长的最大包围体和包围该局部点的最小包围体,然后计算体积比来判别植被点。

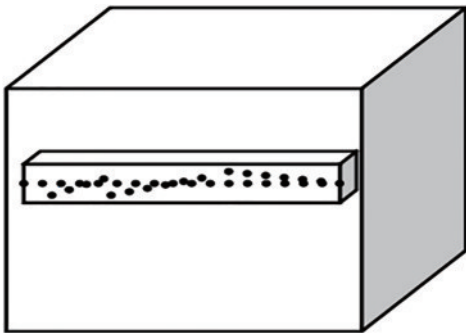


图 5 包围体

Fig. 5 Enclosure

算法具体操作如下:首先,对点云数据构造 KD-Tree,建立点云的拓扑关系,并构建点云中所有点的 k 邻域;任选其中一个 k 邻域,计算该邻域 x, y, z 三个方向上的最大坐标差,以其为边长构建最大包围体,并计算出体积为 V_{\max} ;接着计算 x, y, z 三个方向上的坐标差分别作为最小包围体的长宽高,并计算出体积为 V_{\min} 。如图 6 所示,植被点云分布发散, V_{\min}/V_{\max} 较大,占用的空间范围较大,而桥梁建筑点云都集中在一个



图 6 植被点云与桥梁点云

Fig. 6 Vegetation point cloud and bridge point cloud

平面内, V_{\min}/V_{\max} 较小,分布较均匀。令 D 为最小包围体与最大包围体的体积之比,根据统计法得到滤除阈值 α ,若 $D > \alpha$,则认为该点是植被点,若 $D < \alpha$,则认为该点是非植被点。重复上述步骤,直至点云中所有点都处理完毕,完成散乱植被点云的滤除操作。

基于分散度滤波模型对实验点云进行粗滤除,滤除后的点云数据量是 10631083,滤除结果如图 7 和图 8 所示。

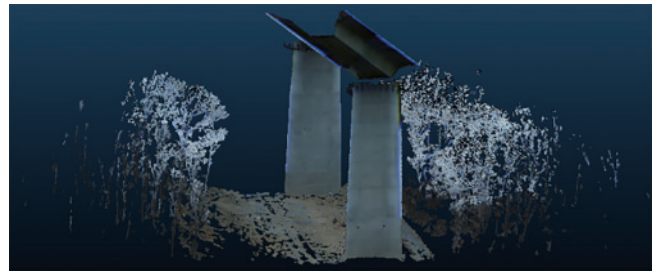


图 7 基于分散度的滤除结果(侧视图)

Fig. 7 Filtering result based on dispersion (side view)

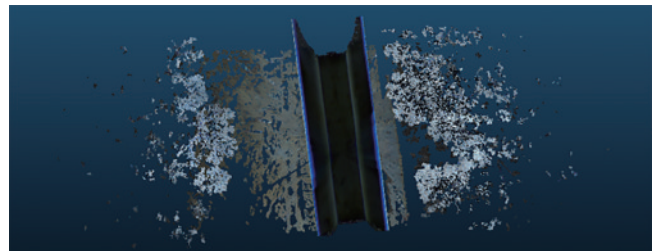


图 8 基于分散度的滤除结果(俯视图)

Fig. 8 Filtering result based on dispersion (vertical view)

2.2.2 组合半径滤波算法

分散度滤波模型得到的剩余点云中包含着线状的植被点云。其特点是以任一点为中心的球邻域点的个数相较于桥梁建筑点云邻域个数要少得多,因此可以利用半径滤波算法对线状植被点云进行滤除。但若只依据局部邻域点云的个数进行滤除,会将大量的桥梁建筑点云误判为植被点云从而被错误滤除。

针对上述问题,现有滤波算法基于高程信息^[2]对传统的半径滤波算法进行改进,解决了桥面点云被错误滤除的问题。此外,利用颜色模型^[9]剔除植被点云

的思想,将颜色模型与半径滤波相结合,对植被点云进行双约束滤除,解决桥梁点云被误判为植被点云的问题。为充分利用本文数据的几何位置和颜色信息,提出一种组合半径滤波算法。该算法首先利用高程信息分割点云,依次判断每一部分是否包含植被点云,对包含植被点云的部分利用改进的半径滤波算法去除植被点。组合半径滤波算法的具体过程如下。

1) 基于高程统计的方法,将待处理点云分割成 6 部分,依次计算各个部分点云的分布广度,据此判断各部分是否包含植被点云。

2) 将只包含桥梁建筑的全部点云标记为非植被可疑点,对植被与桥梁建筑点云同时存在的点云运用颜色模型判断是否为植被可疑点。

颜色模型的建立需要统计分析红、绿、蓝三个波段的特征均值与方差。利用 K-MEANS 聚类算法^[14-16]将实验点云聚为 9 类,选取其中只包含植被与桥梁建筑的点云进行统计分析,统计结果如表 1 所示。

表 1 不同地物红绿蓝波段特征统计值

Table 1 Characteristic statistical value of different ground features at red, green, and blue bands

Object	Red band		Green band		Blue band	
	Mean value	Variance	Mean value	Variance	Mean value	Variance
Building	29.92	0.012	39.03	0.019	46.58	0.041
Vegetation	74.88	0.005	89.44	0.008	106.36	0.029

由表 1 可知,桥梁建筑与植被的红、绿、蓝三种颜色特征均值均相差较大,因此可以利用单波段进行区分。通过表 1 数据可知,蓝色波段的特征均值相差最大,方差也最大,说明蓝色波段虽更易于区分桥梁建筑与植被点云,但较不稳定。基于以上考虑,最终选择红色波段特征作为颜色模型。

3) 获取植被与桥梁点云的红色波段特征 I , 当 $I > T$, 被标记为植被可疑点, 否则为非植被可疑点。至此,全部点云数据都被标记处理。

4) 根据获取点云中任意球邻域的邻近点,计算邻域点云个数,若邻域点云总个数大于阈值 M_1 或邻域内植被可疑点所占比例小于 M_2 , 则被认为是非植被点,予以保留,否则认为是植被点予以滤除。

5) 重复步骤 1)~4),直至点云中的所有点都处理完毕。

对滤除后的点云进行整合,得到滤波后的点云,滤除后的点云数据量是 9749609,滤除结果如图 9 和图 10 所示。

改进的半径滤波算法滤除后的剩余点云中只留下了少量粗壮树干点云。沿 x 轴的方向发现粗壮树干点云稀疏地分布在桥梁建筑的两侧。依据此特点,通过统计单位长度点云数目,计算出相应区间点云的分布概率,确定分割阈值,并由此分割植被点云与桥梁建筑



图 9 组合半径滤波结果(侧视图)
Fig. 9 Combined radius filtering result (side view)

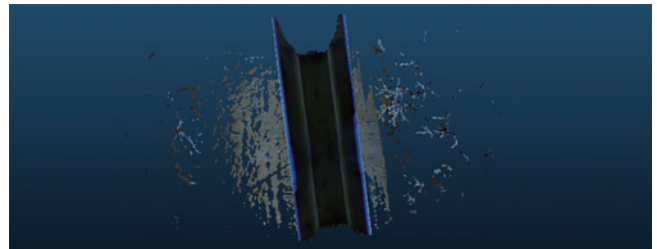


图 10 组合半径滤波结果(俯视图)
Fig. 10 Combined radius filtering result (vertical view)

点云,滤除结果如图 11 和图 12 所示。



图 11 基于统计的滤波结果(侧视图)
Fig. 11 Filtering result based on statistics (side view)



图 12 基于统计的滤波结果(俯视图)
Fig. 12 Filtering result based on statistics (vertical view)

2.3 滤除地面点云

经过一系列处理后植被点云已被大量滤除,为准确提取桥梁建筑点云,现需对地面点进行滤除。现有布料模拟滤波(CSF)能有效滤除地面点云,但该算法会将与地面相连的桥墩部分点错误滤除。针对此问题,提出一种法向滤波算法。该算法通过计算地面与桥墩的法向量,将高程与法向信息^[17]相结合滤除地面点云。

该滤波算法首先对点云数据构建 KD-Tree, 建立拓扑关系, 获取点云中所有点的球邻域。任选其中一球邻域, 拟合出局部平面, 基于局部表面拟合的方法进行法向量估计。其中法向量的估计过程为: 任取一点 p , 搜索其最相邻的 k 个点, 计算中心点与其邻域点最小二乘意义上的局部平面 P 。此平面的计算公式为

$$P(\mathbf{n}, d) = \operatorname{argmin}_{(\mathbf{n}, d)} \sum_{i=1}^k (\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_i - d)^2, \quad (1)$$

式中: \mathbf{n} 为平面 P 的法向量; d 为 P 到坐标原点的距离。将局部平面 P 的法向量当作当前点 p 的法向量。平面 P 的法向量可以由主成分分析得到, 由运算知 P 经过其 k 邻域点的质心 \mathbf{p}_0 , 且法向量 \mathbf{n} 满足 $\|\mathbf{n}\|=1$ 。对协方差矩阵 \mathbf{M} 进行特征值分解, 表达式为

$$\mathbf{M} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0)(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_0)^T. \quad (2)$$

\mathbf{M} 的最小特征值对应的特征向量即 P 的法向量。其次计算法向量与向量 $(0, 0, 1)$ 的余弦值, 将高程与余弦信息相结合, 根据统计方法计算出阈值^[18], 滤除地面点云。应用法向滤波模型对地面点云进行滤除, 得到最终的桥梁点云, 如图 13 和图 14 所示。



图 13 基于法向滤波的结果(侧视图)
Fig. 13 Result of normal filtering (side view)

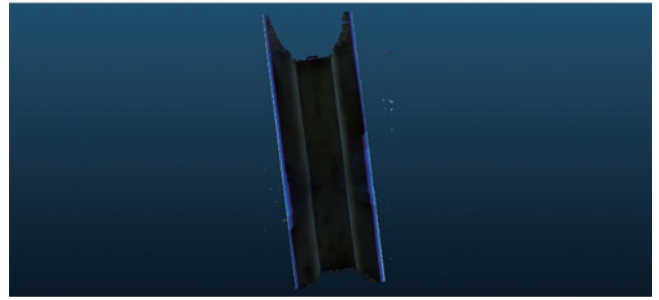


图 14 基于法向滤波结果(俯视图)
Fig. 14 Result of normal filtering (vertical view)

3 实验结果与对比分析

为了定量分析评估所提滤波算法的性能, 根据曹雄等^[5]的滤波误差评价方法, 将原始点云 O 分为目标点云 O_t 和非目标点云 O_n 。对点云进行滤波后, 保留的点云包含目标点云 R_t 和非目标点云 R_n , 滤除的点云包括目标点云 D_t 和非目标点云 D_n 。定义第 I 类误差: 将非目标点云误判为目标点云, 即 $E_a = R_n/O_n \times 100\%$ 。第 II 类误差为总误差: 将非目标点云误判为目标点云和将目标点云误判为非目标点云, 即 $E_b = (D_t + R_n)/O \times 100\%$ 。定义桥梁点云的提取完整度: 保留的目标点云与目标点云的比值, 即 $I = R_t/O_t$ 。为验证所提算法的可行性, 采用部分替换的方式进行效果对比。文献[9]主要采用半径滤波、颜色滤波和布料模拟滤波等算法对非目标点云进行滤除, 将其中的布料模拟滤波替换成法向滤波, 可进一步看出法向滤波的滤除效果。文献[2]主要采用半径滤波、高程滤波和布料模拟滤波等算法对非目标点云进行滤除, 即将文献[9]的颜色滤波替换成高程滤波, 可进一步看出高程滤波的滤除效果。根据上述评价方法, 计算其他滤波算法以及所提算法的误差与完整度, 结果如表 2 所示。

表 2 不同算法的对比结果

Table 2 Comparison results of different algorithms

Algorithm	R_t	D_t	R_n	D_n	$E_a / \%$	$E_b / \%$	$I / \%$
Radius+colour+CSF ^[9]	4281579	102100	373736	7046929	5.04	4.03	97.7
Radius+altitude+CSF ^[2]	4318881	64798	419295	7001370	5.65	4.10	98.5
Radius+colour+normal filtering	4314881	68798	282049	7138616	3.80	2.97	98.4
Radius+altitude+normal filtering	4347682	35997	301097	7119568	4.06	2.86	99.2
Propose algorithm	4352017	31662	54390	7366275	0.733	0.729	99.3
Number of original point clouds	Target point cloud: 4383679		Non target point cloud: 7420665		Total: 11804344		

从表 2 可以看出: 所提算法提取桥梁点云的完整度比其他四种滤波算法更高; 利用颜色信息改进的半径滤波算法^[9]在桥梁的边缘处会出现误滤除问题且大量地面点被错误保留, 桥梁提取完整度为 97.7%; 为了更多地滤除地面点, 使用法向滤波算法替换 CSF 算法, 桥梁提取完整度提高了 0.7 个百分点; 基于高程信

息改进的半径滤波算法^[2]可以有效解决桥梁边缘被错误滤除的问题, 相比利用颜色信息改进的半径滤波算法^[9], 桥梁提取完整度提高了 0.8 个百分点, 但更多的植被点云被保留, 导致第 I、II 类误差较高; 所提算法充分利用了点云的几何^[19]、颜色、统计^[20]等特征, 对于不同分布特点的非目标点云采用不同的滤除方法, 具

有针对性,故所提算法提取桥梁建筑的准确率为 99.3%,相对较高,同时第 I、II 类误差处于较低水平。为了更加清晰地看出 5 种算法的对比效果,对滤波算法的结果进行可视化,结果如图 15~19 所示。



图 15 所提算法的结果
Fig. 15 Result of proposed algorithm

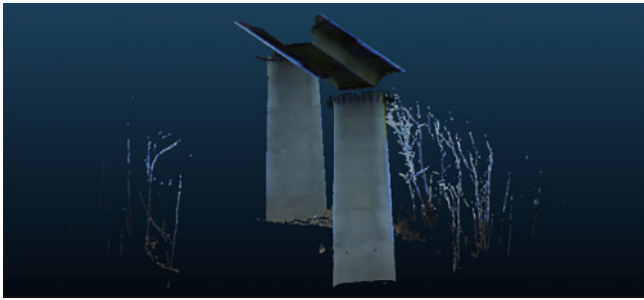


图 16 半径+颜色+CSF 的滤波结果
Fig. 16 Filtering result of radius+colour+CSF

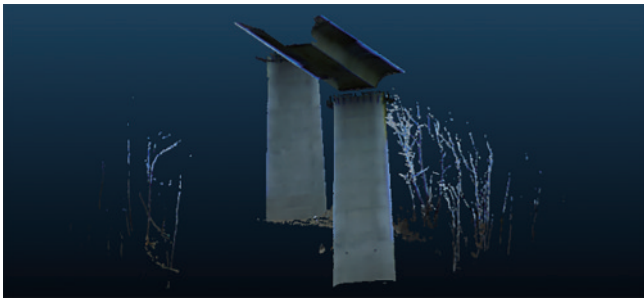


图 17 半径+高程+CSF 的滤波结果
Fig. 17 Filtering result of radius+altitude+CSF



图 18 半径+颜色+法向的滤波结果
Fig. 18 Filtering result of radius+colour+normal

图 16 是基于颜色改进的半径滤波算法对桥梁建筑进行提取的效果图,从效果图看出,该算法可以有效

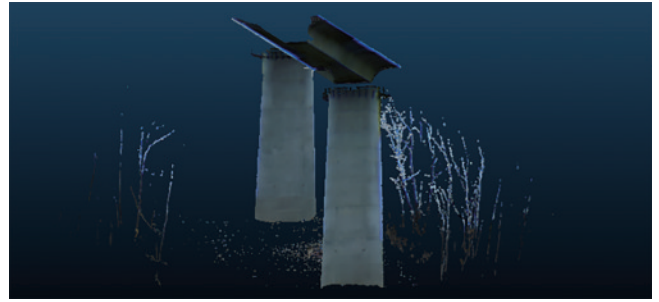


图 19 半径+高程+法向的滤波结果
Fig. 19 Filtering result of radius+altitude+normal

去除大量植被点云,但大量的桥梁建筑边缘点云也被错误滤除,更多的地面点云却被错误保留。图 17 是基于高程信息改进的半径滤波算法对桥梁点云进行提取的效果图,从效果图可以看出,相比于图 16,该算法更为完整地保留了桥梁建筑点云,同时更多的植被与地面点云也被错误保留。针对图 16 出现的地面点云被过多保留的问题,使用法向滤波对布料模拟滤波进行替换,从图 18 可以看出,法向滤波更多地滤除了地面点云,但仍有大量桥梁建筑边缘点云被错误滤除。针对图 18 出现的大量桥梁建筑边缘点云被错误滤除的问题,使用高程滤波对颜色滤波进行替换,从图 19 可以看出,该算法更好地保留了桥梁边缘处的点云。图 15 是所提算法的效果图,可以看出,所提算法虽仍存在少量植被点云与地面点云,但综合来看效果是最佳的。

4 结 论

通过实验分析点云数据的几何、颜色等多方面的特征信息,提出了一种综合的点云滤波算法。先分析植被点云的分布特征,利用分散度对散乱植被进行滤除;其次利用改进的半径滤波算法对线状植被进行滤除;最后采用法向滤波模型将面状地面点云滤除,从而完整保留桥梁建筑。实验结果表明:联合点云的密度、分散度、颜色及统计等特征的算法对桥梁建筑点云的提取效果均优于单一滤除算法,提取完整率为 99.3%。但所提算法仍存在很多不足之处,主要表现在提取目标点云时,采用硬阈值的方法,而阈值的设置更依赖统计分析。改进的半径滤波算法的滤波半径的选取具有鲜明的经验性与先验性,对半径的自适应选取还需进一步研究,以后希望通过设计自适应算法解决滤波半径的选取问题。从提取结果看仍存在着少量植被与地面点云未被滤除,还需进一步深入研究,希望通过建立更完备的目标提取模型提高对桥梁点云的提取精度。

参 考 文 献

- [1] 陈光洲,岳东杰,王亚芹.顾及强度信息和地形信息的南方丘陵区机载 LiDAR 数据滤波研究[J].甘肃科学学报,2021,33(3):55-60.
Chen G Z, Yue D J, Wang Y Q. Research on airborne LiDAR data filtering considering intensity information

- and terrain information[J]. Journal of Gansu Sciences, 2021, 33(3): 55-60.
- [2] 陈宇. 基于倾斜影像密集匹配点云的建筑物单体化提取技术研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017: 23-36.
Chen Y. Monomeric building extraction research on dense matching point clouds from oblique images[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2017: 23-36.
- [3] 魏硕, 赵楠翔, 李敏乐, 等. 结合改进DBSCAN和统计滤波的单光子去噪算法[J]. 激光技术, 2021, 45(5): 601-606.
Wei S, Zhao N X, Li M L, et al. Single photon denoising algorithm combined with improved DBSCAN and statistical filtering[J]. Laser Technology, 2021, 45(5): 601-606.
- [4] 焦亚男, 马杰, 钟斌斌. 一种基于尺度变化的点云并行去噪方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(3): 277-282.
Jiao Y N, Ma J, Zhong B B. Point cloud parallel denoising algorithms based on scale change[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(3): 277-282.
- [5] 曹雄, 林兆祥, 宋沙磊, 等. 基于颜色聚类的多光谱激光雷达点云去噪[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1228002.
Cao X, Lin Z X, Song S L, et al. Multispectral LiDAR point cloud denoising based on color clustering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1228002.
- [6] 朱滨, 程小龙, 刘绍龙, 等. 基于PCA法矢估计的建筑点云立面边界提取[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 38-40.
Zhu B, Cheng X L, Liu S L, et al. Building point cloud elevation boundary extraction based on PCA normal vector estimation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 38-40.
- [7] 毛亚纯, 伏雨文, 曹旺, 等. 基于无人机点云数据的露天采场矿车提取方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 842-848, 863.
Mao Y C, Fu Y W, Cao W, et al. Extraction method of open pit mine car based on UAV point cloud data[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(6): 842-848, 863.
- [8] 马东岭, 王晓坤, 李广云. 一种基于高度差异的点云数据分类方法[J]. 测绘通报, 2018(6): 46-49.
Ma D L, Wang X K, Li G Y. Research on the classification method of point cloud based on elevation difference[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(6): 46-49.
- [9] 余和顺, 刘荣. 基于倾斜影像颜色信息的建筑物点云提取[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(2): 168-173.
Yu H S, Liu R. Building point cloud extraction based on color information of oblique image[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2021, 44(2): 168-173.
- [10] 陈朋, 李亮, 胡大贺. 基于点云均匀度的植被点剔除方法[J]. 中国矿业, 2016, 25(5): 138-140, 145.
Chen P, Li L, Hu D H. The elimination of vegetation based on the uniformity of point cloud[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(5): 138-140, 145.
- [11] Leal E, Sanchez-Torres G, Branch J W. Sparse regularization-based approach for point cloud denoising and sharp features enhancement[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3206.
- [12] Ji Y, Kang Z, Zhang C. Two-stage gradient-based recursive estimation for nonlinear models by using the data filtering[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2021, 19(8): 2706-2715.
- [13] 杨振, 鲁欣宇, 武永斌, 等. 结合城区道路特征与点云回波信息的道路标识线提取[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(11): 193-196.
Yang Z, Lu X Y, Wu Y B, et al. Extraction of road marks based on urban road characteristics and point cloud echo information[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(11): 193-196.
- [14] 苗长龙, 李世东, 陈宝林, 等. 面向围岩结构面提取的快速采集设备与分域聚类方法[J]. 计算机应用, 2021, 41(S1): 336-340.
Miao C L, Li S D, Chen B L, et al. Fast acquisition equipment and domain clustering method for extracting surrounding rock discontinuities[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(S1): 336-340.
- [15] 史红霞, 王建民. 基于法向量区域聚类分割的点云特征线提取[J]. 中国机械工程, 2021, 32(21): 2552-2561.
Shi H X, Wang J M. Feature line extraction for point cloud based on normal vector region clustering segmentation[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(21): 2552-2561.
- [16] 黄慧敏, 朱雪辉. 古建筑点云模型几何特征要素提取技术研究[J]. 地矿测绘, 2020, 36(2): 13-15, 41.
Huang H M, Zhu X H. Study on extraction technology of geometric feature elements of ancient architecture point cloud model[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2020, 36(2): 13-15, 41.
- [17] 李明辉. 机载LIDAR系统点云处理算法的研究与实现[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 44-61.
Li M H. Research and implementation of point cloud processing algorithm for airborne LIDAR system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 44-61.
- [18] 王祝, 王智, 张旭, 等. 基于二维激光雷达的自适应阈值聚类分割方法[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1610005.
Wang Z, Wang Z, Zhang X, et al. Adaptive threshold clustering segmentation method based on two-dimensional lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1610005.
- [19] 尚鹏飞, 陈义, 吕伟嘉, 等. 一种考虑法矢量的点云语义分割网络[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1610011.
Shang P F, Chen Y, Lü W J, et al. A point cloud semantic segmentation network considering normals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1610011.
- [20] 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.
Zhang J M, Chen F J, Long J L. Point cloud filtering algorithm based on image processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0610015.