

冯晓楠, 熊文, 谢俊贤, 等. 基于三维点云模型的桥梁预制构件噪声处理方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 189-197.

FENG Xiaonan, XIONG Wen, XIE Junxian, et al. Noise treatment for precast bridge components based on 3D point cloud modelling[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 189-197.

基于三维点云模型的桥梁预制构件噪声处理方法

冯晓楠^{1,2,3}, 熊文³, 谢俊贤^{1,2}, 胡楷文³

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏南京 211112; 2. 长大桥梁安全长寿与健康运维全国重点实验室, 江苏南京 211112; 3. 东南大学, 江苏南京 210004)

摘要: 为了解决桥梁预制构件点云模型质量差、噪点多的问题, 对产生点云模型质量问题的原因进行分析。基于噪点产生原因, 提出了基于邻近点空间关系的高频噪声剔除算法与基于双边滤波的低频噪声平滑算法。以一根 25 m 长的混凝土 T 梁为对象进行算法验证。试验结果表明, 所提出的算法能够高效率地处理高频噪声与低频噪声, 显著提升模型质量。将算法结果与其他方法进行对比, 证明算法效率较高。

关键词: 三维点云; 点云数据; 噪声剔除; 双边滤波

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.036

中图分类号: U443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0189-09

Noise treatment for precast bridge components based on 3D point cloud modelling

FENG Xiaonan^{1,2,3}, XIONG Wen³, XIE Junxian^{1,2}, HU Kaiwen³

(1. Sujiaoke Group Co., Ltd., Nanjing 211112, Jiangsu, China; 2. National Key Laboratory of Safe Longevity and Healthy Operation and Maintenance of Growing Bridges, Nanjing 211112, Jiangsu, China; 3. Southeast University, Nanjing 210004, Jiangsu, China)

Abstract: To address the issues of poor quality and excessive noise in point cloud models of prefabricated bridge components, this study analyzes the underlying causes of these quality problems. Based on the identified sources of noise, a high-frequency noise removal algorithm utilizing the spatial relationships of neighboring points and a low-frequency noise smoothing algorithm based on bilateral filtering are proposed. A 25-meter-long concrete T-beam is used as a case study to verify the effectiveness of the proposed algorithms. Experimental result demonstrate that the proposed method can efficiently eliminate both high-frequency and low-frequency noise, significantly enhancing the quality of the point cloud model. Comparative analysis with existing method further confirms the superior efficiency and effectiveness of the proposed approach.

Keywords: 3D point cloud; point cloud data; noise removal; bilateral filtering

0 引言

随着现代桥梁工程的进步, 传统检测方法难以

适应大尺寸、大规模的预制构件检测需要, 因此有必要将三维激光点云技术引入桥梁预制构件质量检测领域。该技术能够快速、精确地获取物体或场景

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2022009)

作者简介: 冯晓楠(1992—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事装配式桥涵标准化施工及质量控制技术研究。E-mail: 1216732591@qq.com

的三维空间数据,生成包含海量点云数据的三维模型。

通过三维激光扫描获得的桥梁构件初始点云模型是由大量的坐标点组成的,这些三维坐标点中包含了大量的噪声点,对后续的尺寸提取等步骤会产生巨大的影响。因此,有必要对原始点云进行一定的分析和处理。在点云模型之中,噪声点的存在可归结为两类不同的状况:在噪声频谱中,少量的较大偏差属于高频部分,而大量的较小偏差则属于低频区域。针对这两类具有特定属性的噪声,来自国内外的研究人员已经开发出众多算法以实现降噪处理。

对于远离主体结构、非目标结构组成部分的杂乱高频噪声,常规的处理手段是对其进行定位后予以移除。李惠芬等^[1]采纳稳健统计学理论,并借此优化高斯滤波算法,引入稳健估计权函数。该优化有效避免了传统高斯滤波处理非正常数据时出现的失真现象,并缩小异常数据带来的影响范围。鲁东东团队^[2]则对半径滤波和统计滤波算法的适用性及其降噪效能进行详细的分析与对比。经过分析,可以看出三维点云处理中,统计滤波法表现出较强的适用性,通过适当修改参数,便能针对各类构件的点云模型达到理想的降噪水平。同时,在处理结构复杂的点云时,该方法能更有效地保持构件的原始细节特征。而在处理含有明显异常点的三维点云构件时,采用半径滤波法则更为合适。王振等^[3]提出一种新的点云数据降噪技术,该技术结合了随机测量误差的独特属性和噪声点的分布规律。此技术首先采用特征提取手段,把点云数据转换至特征维度空间,随后运用统计学中的分类方法来辨别异常噪声点。在确认噪声点之后,进一步依据其分布模式推算出采样点的准确坐标,以此达到对构件点云模型表面的平滑优化效果。郭进等^[4]利用 k -means 聚类技术,结合点云的密度分布,将点云数据中的异常点划分为较大尺度与较小尺度两类。通过调整邻域范围及点的数目,对聚类噪声进行高效筛选。采用类内与类间距离比值作为评估准则,以此判断最优聚类数量,并对规模较小的噪声点进行剔除处理。在建筑结构中,低频噪声通常指的是那些位于结构主体平面之上,却存在一定偏差和位移的点。对这些点位进行处理时,常用的手段是进行数据平滑化。学者陈崇帮^[5]介绍了一种新的点云降噪技

术,该技术基于最优邻域理论。通过分析点云中各点的法向量相似度,在 k -邻域的概念上进一步界定最优邻域。此外,他还引入改良版的空间影响权重函数及曲率权重函数,以此实现点云的多边形滤波处理。LIN 等^[6]将双边滤波图像处理技术成功引入到点云处理领域,创新性地将空间距离权重与属性特征权重相结合,对点云数据进行双边滤波处理,以此对点云中的低频噪声进行有效平滑。

吴晓庆团队^[7]创新性研发出一套点云数据降噪新方法,此方法基于移动最小二乘法原理,对邻近点云实施曲面重塑,通过曲面结构对噪声点实施平滑优化。而朱广堂等^[8-9]通过神经网络对点云进行降噪处理并生成网格;胡国飞^[10]提出了一种基于均值漂移的点云降噪算法。

综上所述,对构件点云模型的质量提升是三维激光扫描研究的关键。去噪算法对桥梁预制构件的适用性较低,预制构件的结构复杂性决定了去噪算法需对其结构特征进行优化,以满足工程精度需要。因此,本文结合预制梁场中的扫描环境,分析点云模型质量问题产生的原因。并基于该问题提出两种去噪算法。

1 点云模型质量评估

如图 1 所示,预制梁场地面较为平整,可选择的扫描地点较多,距离较近,可保障获得点云模型的密度。其限制在于,梁堆放的时候存在着叠放或距离较近等问题,可能导致扫描角度较偏,产生不可避免的误差。整体来说,预制梁场环境中获取的点云模型问题主要有边缘效应与长度效应。

1.1 边缘效应

桥梁预制梁段的表面是由多个连续的平面和圆柱面组成,激光反射的条件较好下,点云密度能够得到保证,但在结构边缘处的折射效应往往会生成一些偏离结构主体的离群点,如图 2 所示。



(a) 混凝土梁



(b) 钢梁

图 1 预制场环境

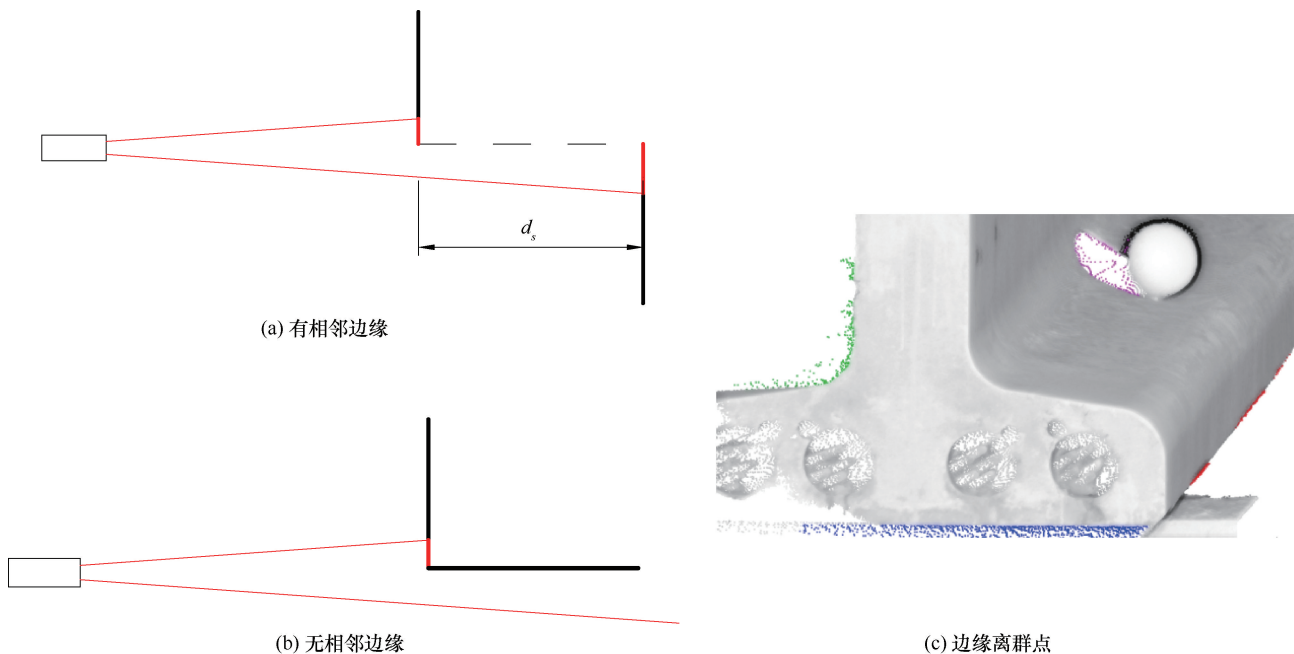


图 2 梁构件的边缘离群点

从图 2 中可以看出, 离群点的空间位置分布在结构尖锐边缘的周围, 尤其集中在梁端面的侧边和底边。离群点的密度远远低于结构主体, 这些离群点属于高频噪声的范围, 会对结构形态的提取产生巨大误差。

1.2 长度效应

预制构件普遍呈现出独特的几何形状, 其长度与宽度比例悬殊, 明显地指向一个拉伸轴线。在进行扫描作业时, 若扫描头沿着该轴线方向推进, 则会观察到扫描点分布的密集程度迅速减少。一旦点的密集度未能满足研究要求, 将对后续的数据处理与分析造成不良影响。

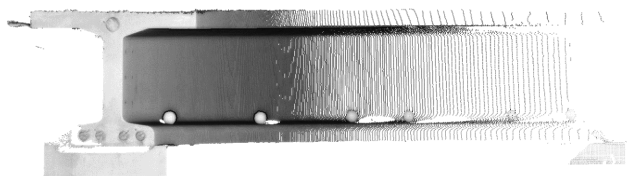


图 3 构件的长度效应

由图 3 可知, 针对细长构件, 激光扫描设备在各个角度均匀发射激光的行为, 会引起所谓的长度效应现象。假如被扫描的物体在某一方向上拉长, 那么在物体表面的相邻两道激光之间的距离也会随之增加。假定扫描仪与物体表面的垂直距离为 R , 那么在物体表面, 相邻激光束间的距离计算公式为

$$d_n = R \tan(n \cdot \alpha) - R \tan[(n - 1) \cdot \alpha] \quad (1)$$

式中, d_n 指的是自垂直照射至构件表面的激光光线

之间相邻两道的距离; α 则代表这两道激光光线之间的角度差。

由于长度效应的作用, 形成的点云模型中会涌现众多分布稀疏的点, 导致这区域的信息浓度极为低下。一旦某处的点数密度降至某个特定阈值以下, 不仅无法有效呈现该构件精细特征, 也会对点云拼接的精确度造成负面影响。

2 点云质量提升算法

针对点云模型普遍存在的三大难题: 高频率干扰、低频率干扰及数据缺失, 本研究提出了两种提高点云品质的新方法。对于高频率干扰, 本研究致力于开发检测与移除机制; 而对于低频率干扰, 则着重于实施平滑处理策略。

2.1 基于邻近点空间关系的高频噪声点滤除算法

利用激光扫描得到的点云数据相当于将目标表面的连续曲面进行离散处理。通过对点云内各个点与周边点的空间位置关系进行细致分析, 可以识别出与周围点联系不紧密的三维坐标点, 这些点被认为是高频干扰点, 进而将这些高频干扰点从数据中移除, 实现高频噪声的有效过滤。

桥梁结构中的各个组成部分, 其表层大多由曲率不大的曲面构成, 而在细节上则可以近似认为是平面或圆柱形状。基于此, 针对桥梁构件的点云模型, 采用对各个点与其周边点的平面或圆柱形状拟合度的检测, 以此判断是否属于高频噪声, 是一个恰当方法。

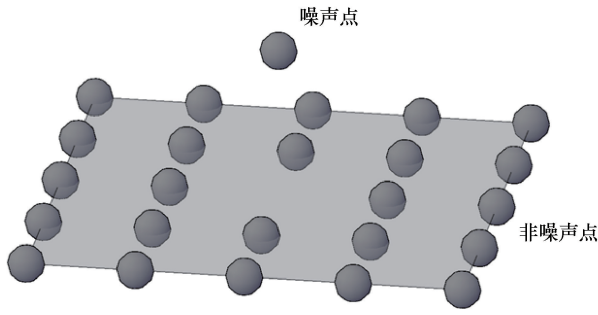


图4 平面点云与噪声点

执行高频噪声点的辨识, 涉及对邻近点空间排布的分析, 主要过程包含以下阶段。

第一步: 对点云数据集 P 实施全方位的网格化操作, 随后对每个网格中的数据执行二维平面检测。

第二步: 针对未能通过二维检测的网格区域, 逐一挑选出各个节点 P_i , 并依据三角网布局, 挑选与 P_i 最近的数个节点作为其邻近点集 P_{in} ($n=1, 2, \dots, m, m>7$), 作为该点的邻域点集, 以此来计算该点的法向量 N_i 。

第三步: 根据欧氏距离搜索点 P_i 最邻近的 8 个点 P_{iq} ($q=1, 2, \dots, 8$), 作为 P_i 的判定点集;

第四步: 借助点 P_i 的法向量 N_i 和其空间坐标, 形成一个新平面, 假定点 P_i 正位于该平面表面, 随后计算检测点 P_{iq} 与该平面的垂直距离。

第五阶段: 结合点 P_i 及其检测点 P_{iq} 的法向量, 描绘出一个圆柱体, 假定点 P_i 位于圆柱体之内, 随后计算检测点 P_{iq} 与圆柱体的间隔。

第六阶段: 通过检测点 P_{iq} 对于平面或圆柱体的适配度, 评估点 P_i 作为噪声点的潜在几率。

在初步处理阶段, 我们首先对原始的点云数据执行网格化处理, 针对每个网格中点集执行平面辨识操作。将那些通过辨识的网格内的点归类为非噪声点, 从而在后续分析中显著降低待处理点的总量。若在传统的三维笛卡尔坐标系中实施网格化, 可能会引发过度分割或分割不均的问题。然而, 若改用球坐标系构建球状网格, 则能确保各个网格中的点分布密度大体相同(见图 5)。

在栅格化点云模型后, 将栅格内的点云采用 PCA 算法, 通过每个点的最小特征向量上变化后的值 D 来判断能否较好地将其拟合为平面。

挑选桥梁各个部件中质量较高的二维点云数据, 对各点沿最小特征向量方向调整后的数值 D 进行求解, 并找出其最大值记作 D_{\max} , 相关数据如表 1 所

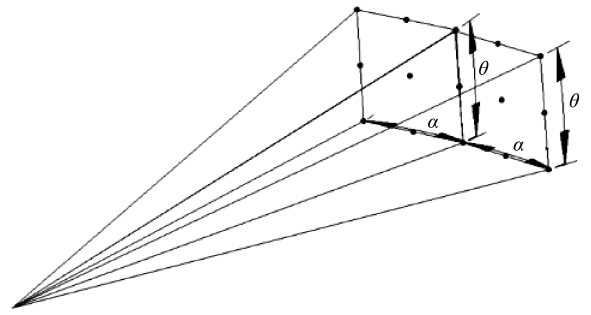


图5 球体栅格

列。观察数据可知, 部件表面的点云在最小特征向量方向上调整后的数值 D 普遍偏小, 为谨慎起见, 设定 D 的阈值为 0.001 m 。若某区域内点云数据中所有点沿最小特征向量方向的调整数值 D 均未超过此阈值, 则该区域的点云数据可被认为是有效拟合平面。

表 1 不同桥梁构件平面部分点云平面度

构件	点数	点平均密度/mm	D
混凝土梁	26 570	2.4	2.641×10^{-5}
钢梁	10 668	10.6	1.847×10^{-4}
混凝土桥墩	91 024	8.9	8.668×10^{-4}
混凝土桥塔	67 479	2	4.698×10^{-5}

在进行法向量求解的过程中, 引入 Delaunay 三角剖分技术构建网格。将每一个点 P_i 周边直接相邻的点集定义为 P_i 的最近邻点集, 亦即 P_i 的一圈邻接点。求得点 P_i 的法向量还需经过以下步骤: 首先计算出与点 P_i 相关的各个三角网格面的法向量, 随后对其进行加权平均得出点 P_i 的法向量 N_i 。权重的确定依据各三角网格面的面积大小及其夹角进行设定, 具体示意如图 6 所示。

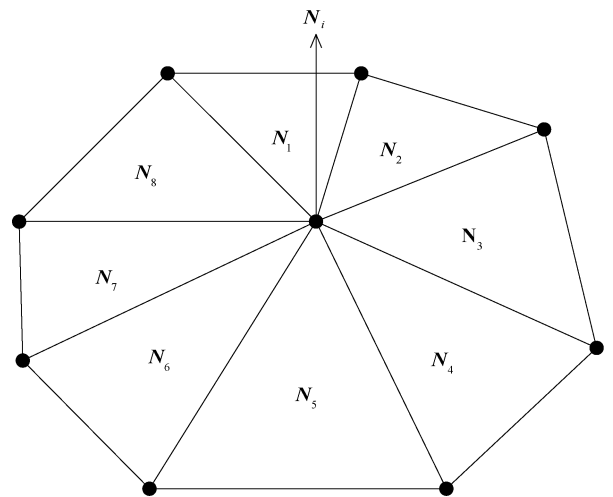


图6 点 P_i 的点法向量 N_i

在确定栅格中各点 P_i 法向量过程中, 通常会选取 P_i 的邻近点, 也就是所谓第一环邻近点。然而不同位置的点 P_i , 其第一环邻近点的数量是有所差异的。为确保噪声检测的统一性, 必须对每个检测点 P_i 选定相同数量的周边点进行评估。为此, 在网格化点云数据中建立 $k-d$ 树模型, 便于在球坐标系内为每个点 P_i 搜寻最近的数个邻近点, 并将这些邻近点组成点 P_i 的评估组 P_q 。通过获取栅格单元内各点 P_i 的法向量 N_i 及确定集合 P_{iq} , 进而能够对点 P_i 与 P_{iq} 在三维空间中的相对几何布局进行深入解析。

依据构建模块的三维空间特征, 把特定区域的点云数据当作平面或圆柱体表面处理。首先设定 P_i 和 P_{iq} 两个点共处于一个平面内, 利用 P_i 点的空间坐标及其法向量 N_i 来确立该平面的方程式。同时, 以原点为基准, 结合判定点集 P_q 来形成直线的方程式, 确定每个判定点 P_{iq} 所对应直线与包含点 P_i 的平面相交形成的点 J_q , 然后测量点 J_q 与判定点集 P_{iq} 之间的实际距离, 具体过程如图 7 所示。在计算点与平面之间的垂直距离时, 往往忽略了由距离和角度测量误差所引起噪声点的误差。为更加精确地模拟噪声点的实际偏差, 选取计算连线的间隔作为衡量标准。依据测量设备的准确度与实践经验, 设定适宜的界限值 d_1 , 对每个 P 的八个判定点 P_q 中, 将小于界限值 d_1 的数量进行计数, 记作 N_1 。

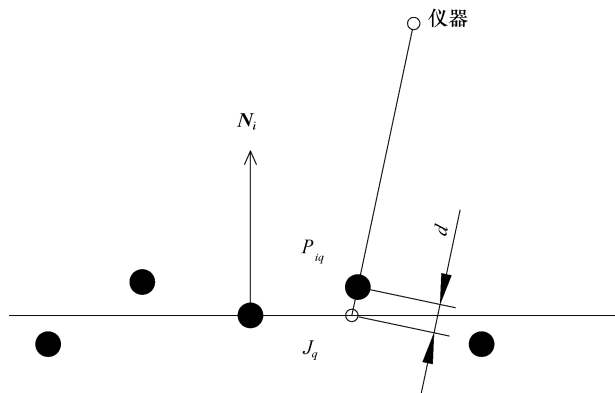


图 7 平面拟合误差

考虑点 P_i 与 P_{iq} 共同形成的圆柱面, 基于这两点的三维坐标及法向量确立两条空间直线的模型, 进一步通过计算这两条直线在垂直于它们的叉乘方向上的投影交点, 确定圆柱面底部的半径 R_i 和 R_q , 如图 8 所示。此外, 还需比较点 P_i 与各个判定点 P_{iq} 之间构成的半径差异。对于各项测量设备, 依据其测量准确度及过往操作经验, 筛选出适宜的临界值 d_2 ; 进而, 对每个 P_i 的 8 个判定要素 R_q 进行详

细分析, 记录其中数值小于 d_2 的判定点个数, 将其命名为 N_2 。

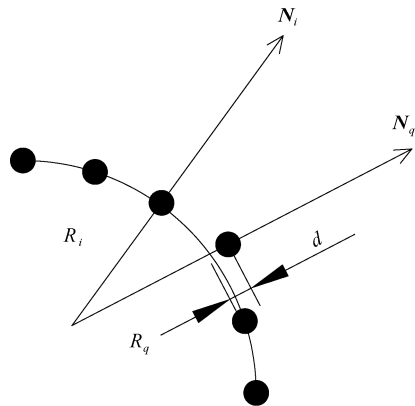


图 8 圆柱面拟合误差

通过对比每个节点 P_i 的 N_1 与 N_2 数值, 选取二者中的较高者作为判断 P_i 是否为噪声点的标准。这一较高值即代表节点 P_i 的噪声水平。显而易见, 噪声水平越高, 节点 P_i 成为噪声点的可能性就越小。

2.2 基于改进双边滤波的低频噪声平滑算法

目前, 针对小型的点云数据, 研究人员主要开发了多种低频噪声的平滑技术。这类点云数据普遍表现出点数不多、分布密度较为一致及细节特征丰富等特性。本文介绍了一种新型的低频噪声平滑方法, 该方法是在双边滤波技术的基础上进行优化改进。它通过分析点云内各个点及其周边点的法向量与特征信息, 从而达到对低频噪声进行有效平滑的目的。

点云的曲率揭示了各点在微小范围内的变动情况。当点集位于一个平面时, 其弯曲度理应趋近于零。不过, 低频的干扰点, 尤其是在点集分布密集的地带, 会对弯曲度的测定带来明显的干扰。正如图 9 所展示的, 在混凝土 T 型梁的端部表面, 众多点的弯曲度数值彼此非常接近。

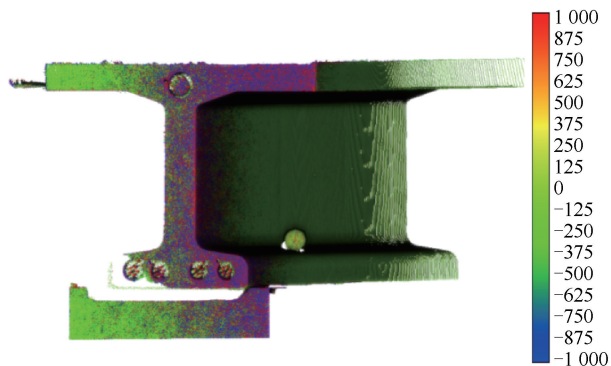


图 9 点云曲率图

常规双边滤波算法在处理点云数据时, 首先需为每个点指定一个大致邻域范围, 随后依照距离的权重选取邻近点以实现平滑处理。然而, 这种方法往往会导致曲面的过度平滑, 使得原本清晰的边缘变得模糊。针对这一缺陷, 对经典点云双边滤波技术进行以下优化: (1) 将原有的距离权重机制调整为法向量权重机制; (2) 将平面特征权重机制更新为圆柱面特征权重机制。

基于改进双边滤波的低频噪声平滑算法主要步骤如下。

第一步: 对点云中的每一个点 P_i , 根据欧氏距离查找 20 个临近点 P_{in} , $n=1, 2, \dots, 20$, 作为点 P_i 的邻域点集。

第二步: 选取恰当的法向量与特征权重的系数, 确定点 P_i 周边点 P_{in} 的法向量 \mathbf{W}_C 及特征的权重数值 W_S 。

第三步: 计算点 P_i 在双边滤波过程中的加权系数 α 。

第四步: 对点 P_{in} 应用双边滤波处理, 从而得出其更新后的坐标位置 p'_i 。

第五步: 对点云中的其余点重复第三步和第四步, 完成一轮双边滤波。

在该方法中, 法向量权重的计算方法影响了整个方法的精准度, 如图 10 所示。在点云上建立 kd-tree, 然后对每一个点 P_i 根据欧氏距离搜索距离最近的若干个点 P_{in} , 计算点 P_i 和点 P_{in} 的单位法向量 N_i 和 N_{in} , 并将每个点 P_{in} 的单位法向量与点 P_i 的单位法向量做内积, 倘若两个单位向量方向一致且共线, 则它们的点积等于 1; 而若它们方向相反且共线, 点积则等于 -1。考虑到以高斯函数形式表现的权重函数在正实数范围内呈现递减趋势, 故需对点积进行适当调整, 采取 $1-\langle N_i \rangle$ 的形式作为权重函数的变量。在挑选权重函数的决定性因素时, 依据实际工程实践, 桥梁部件中的圆柱体表面圆心角通常不会超过 $\pi/2$, 通过对该角度取半并结合三倍标准差原则, 适宜的影响因素应涵盖那些夹角不大于 $\pi/4$ 的向量, 因此影响因素的取值宜为 0.26。正向量权重计算公式为

$$W_N = e^{-\frac{(1-\langle N_i, N_{in} \rangle)^2}{2\sigma_N^2}} \quad (2)$$

式中, N_i 为待平滑点的单位法向量; N_{in} 为待平滑点的邻域点的单位法向量; σ_N 为法向量权重的影响因子。

将二维空间视为一种曲率归零的独特几何形态,

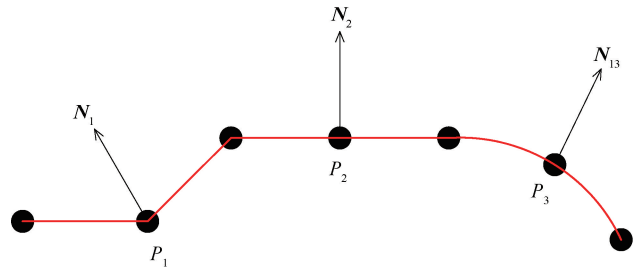


图 10 点的法向量与几何形状

因此, 在处理点云数据平滑问题时, 将待处理点及其周边点视为曲面结构更为恰当。针对每个点 P_i 及其周边点 P_{in} , 需分别求取点 P_i 和点 P_{in} 所对应的方向向量 N_i 与 N_{in} 。并将每个点 P_{in} 的单位法向量与点 P_i 的单位法向量做外积, 得到垂直于这两个向量的一个新向量。

将点 P_{in} 按照某一方向向量移动特定长度, 得到点 P'_{in} , 从而使得空间中两个不在同一平面上的向量 N_i 和 N_{in} 共面, 通过计算以这两个向量为方向的直线交点, 并进一步求解该交点至点 P_i 和点 P'_{in} 的距离, 便可确定两个圆柱面的半径 R_i 和 R_{in} 。具体过程详如图 11 所示。

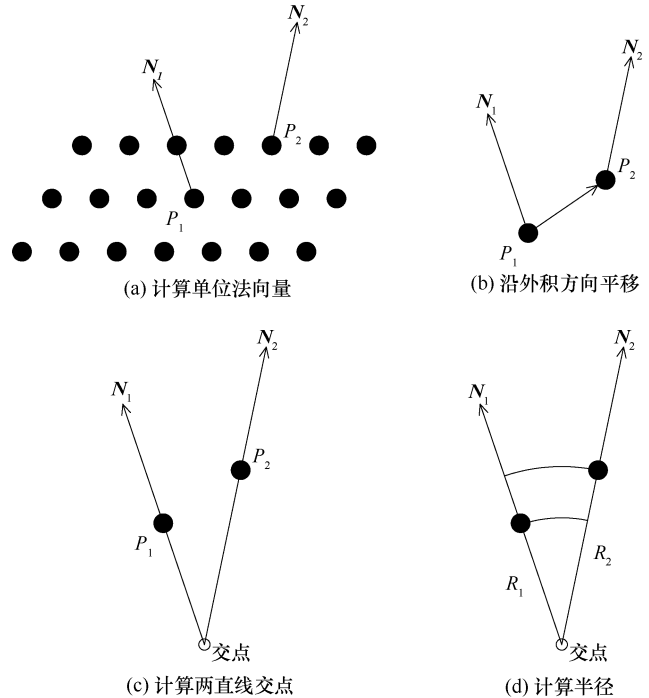


图 11 基于圆柱面的特征权重计算

在平面坐标中, 若 P 点和 P_{in} 点重合, 则法向量 N 和 N_{in} 将呈现共线趋势, 进而导致计算出的两个圆的半径无限扩张。设定半径的最大允许值为 10 m, 若所得半径数值超过限制, 即可针对点 P_{in} 将圆柱面的特性权重降低至平面特性权重, 依照传统双边滤波

进行处理。假定点 P_i 和点 P_{in} 均位于同一圆柱面内, 则它们对应的半径 R_i 和 R_{in} 理应相互接近, 此时可将二者差值的一半, 即 $(R_i - R_{in})/2$ 作为影响系数的独立变量引入。若 π 与平面及圆柱体上点 P_{in} 的半径之差超出一定范围, 考虑到实际工程需求, 将修正系数设定为 0.001 m , 以降低计算误差。依据圆柱体表面特性的权重计算公式为

$$W_R = e^{-\frac{((R_i - R_{in})/2)^2}{2\sigma_R^2}} \quad (3)$$

式中, R_i 是过点 P_i 的圆柱面的半径; R_{in} 是过点 P_{in} 的圆柱面的半径; σ_R 为基于圆柱面的特征权重的影响因子。

基于邻域点相对位置改进的双边滤波过程为

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

式中, p'_i 表示 p_i 在双边滤波后的新位置; α 为双边滤波的加权因子。其中

$$\alpha = \frac{\sum_{p_{in} \in N(p_i)} W_N(|1 - n_{in}, n_i|) W_R(|(R_j - R_i)|/2)(R_j - R_i)/2}{\sum_{p_j \in N(p_i)} W_N(|1 - n_{in}, n_i|) W_R(|(R_j - R_i)|/2)} \quad (5)$$

式中, p_{in} 为 p_i 的邻域点; n_{in} 为点 p_{in} 的单位法向量; W_N , W_R 为以 σ_N , σ_R 为标准差的高斯核函数; W_N 为法向量权重; W_R 为基于圆柱面的特征权重。

3 算法验证

3.1 高频噪声点滤除算法的验证

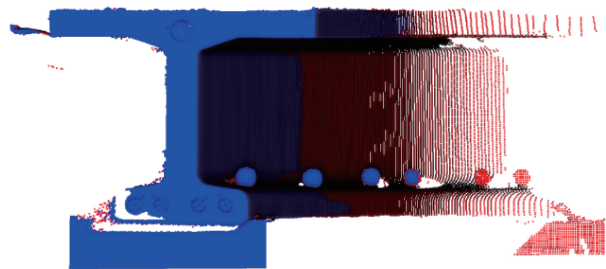
本文对一根 25 m 长的预制混凝土梁进行详细扫描分析。利用单站点云数据, 该数据集包含 $2\,733\,624$ 个点, 通过运用常规的半径法、邻近点法、聚类法及一种创新的基于邻近点空间关系的高频噪声过滤算法对噪声点进行识别, 实验成果展示在图 14 中。同时, 这四种检测手段的成效通过表 2 和表 3 进行详细对比分析。在 DBSCAN 聚类检测中, 将不属于最大簇群的所有点标记为噪声点。

表 2 传统噪声检测方法结果

方法	参数	噪声点数	噪声比例/%
半径检测	$R=0.01 \text{ m}$	41 551	1.52
临近点检测	$K_{nn}=8$	3 882	0.142
DBSCAN 聚类检测	$R=0.01 \text{ m}, P_{ts}=2$	1 722	0.063

表 3 基于邻近点空间关系的噪声检测方法

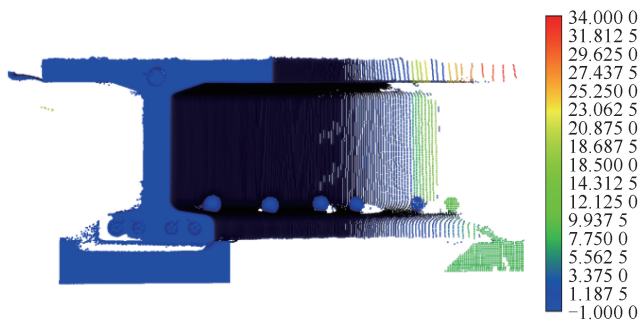
指标	点数	比例/%
0	519	0.019
1	1 394	0.051
2	2 350	0.086
3	2 980	0.109
4	4 401	0.161
5	7 025	0.257
6	12 711	0.465
7	110 001	4.024
8	2 592 514	94.838



(a) 基于半径的噪声点检测方法



(b) 基于邻近点统计的噪声点检测方法



(c) 基于DBSCAN聚类的噪声点检测方法



(d) 本文方法的高频噪声点检测结果

图 12 噪声点检测结果对比

关于检测结果的呈现,传统方法通常将点云的密集程度作为滤除噪声的标准,通过设定半径范围和邻近点检测来对各个点执行二元判定,进而将点云中的点归入明确的噪点或非噪点类别。这样的处理方式可能会使得点云中较为稀疏的区域被整体误判为噪点。而在 DBSCAN 聚类分析中,点云根据其密度分布被分割成多个簇群,若密度分布较为一致,这些簇群便能够有效地将突出的噪点与主要点云分离。然而,在点云数据中,在密度分布不均的情况下,稀薄地带常涌现大量无谓的群集效应。如图 12 所示,对于高频噪声的探测结果,T 型梁的靠近端部区域多数未被识别为噪声,然而在远离端部的地方,高频噪声的分布却异常明显,这与实际情况存在较大出入。

图 12(d)展示了采用基于邻近点空间关系的高频噪声点滤除算法得到的检测成果,其中云模型中的每个构件点都标明了 0 至 8 的噪声度量,此度量用以评估该点成为噪声点的概率。对于 T 型梁的点云数据,在端面及侧面的多数区域,噪声度量均为 8,表明这些区域的点云数据能够有效地被拟合成一个平面或圆柱形状。在 T 型梁边缘及其下方球体边缘附近,发现噪声强度低于 5 且逼近 0 的点云,此现象源于该区域几何形态的急剧变化,受两种边缘效应共同影响,导致高频噪声的产生。

以某混凝土桥墩构件的点云数据为案例,其噪声分布情况展示在图 13 中。观察桥墩前方,绝大多数区域展现的是较为优质的平面点云,噪声度普遍维持在 8 的水平,表明该区域几乎未受到噪声干扰。这主要是因为桥墩横截面呈矩形且表面平整,加之三维激光扫描仪直接对准桥墩前方进行扫描,从而捕捉到了最优的表面信息。在对桥墩的侧面进行理论上的扫描时,预期会获得一个平滑的点云数据集,然而在实际

点云模型中,发现存在噪声度在 4~7 之间的点。这种现象,是因为在桥墩的扫描过程中,激光束的侧面与检测设备发射的光线近乎平行,使得在入射角度超过一定限度后,测量点的精确度显著降低。在桥墩的顶端和底端,噪声水平呈现出 0 到 2 之间的波动,这一现象主要是由于桥墩顶端与主梁连接处的边缘效应及墩底植物对高频噪声的屏蔽效果所引起的。

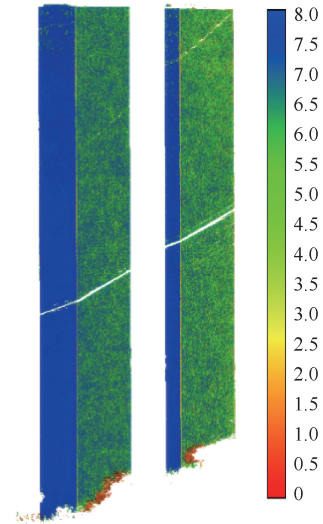


图 13 预制桥墩构件点云噪声

3.2 低频噪声平滑算法的验证

以同一根混凝土 T 梁为算法验证对象。本文展示了采用低频噪声平滑算法处理后的结果对比图,观察图像可见,滤波算法显著降低了梁端面点云的曲率,达到了良好的平滑效果。

与传统双边滤波技术相较,本研究提出的改进型低频降噪算法在维持点云模型显著变化区域及锐利特征方面表现出更优的性能。如图 15 所示,其中蓝色表示经过优化双边滤波处理的 T 梁点云,而红色则代表经过常规双边滤波处理的 T 梁点云。通过对点云进行切割,如图 15(a)所示,可以明显观察到常规

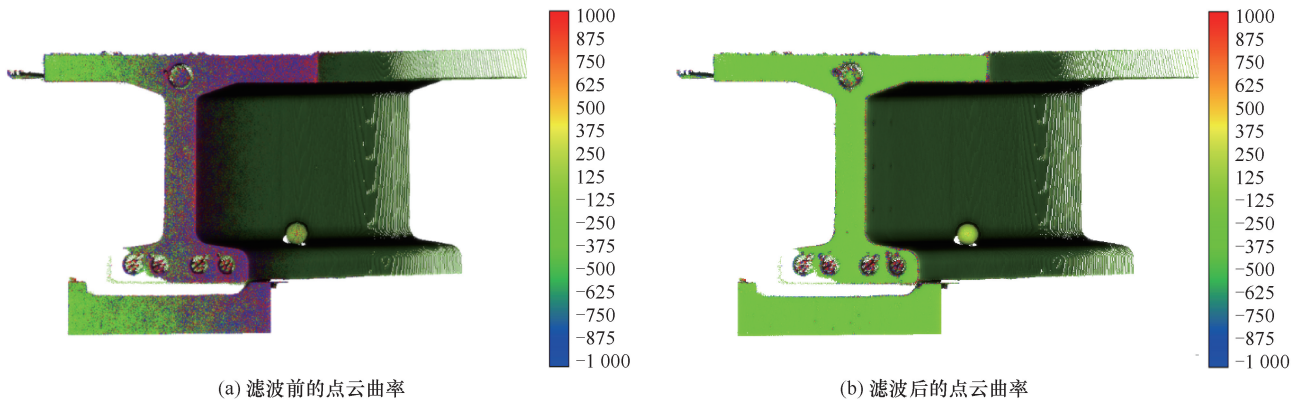


图 14 基于改进双边滤波的低频噪声平滑的 T 梁点云

双边滤波在处理过程中对滴水槽深度的减少, 如图 15 (b) 所示, 同时该处理方式还导致翼缘板边缘的锐利度降低, 形成圆弧状边缘, 如图 15 (c) 所示。

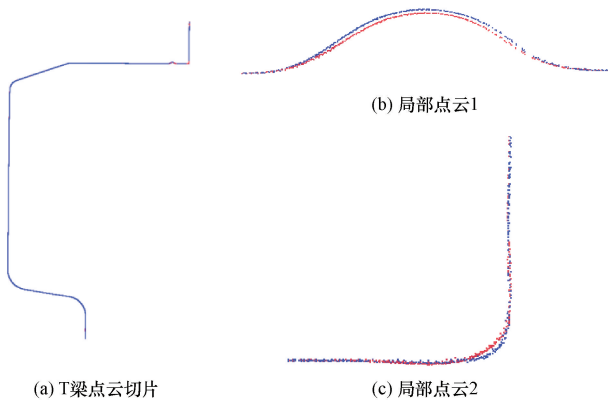


图 15 改进双边滤波与传统双边滤波的处理结果对比

用优化后的双边滤波技术对低频噪声进行平滑处理, 并拓展至其他结构部件。以箱形梁内部点云数据模型作为测试对象, 图 16 展示了处理前后对比效果。观察图像可知, 经过平滑处理, 箱形梁底部的点云曲率显著减少, 表明平滑处理达到了预期效果。

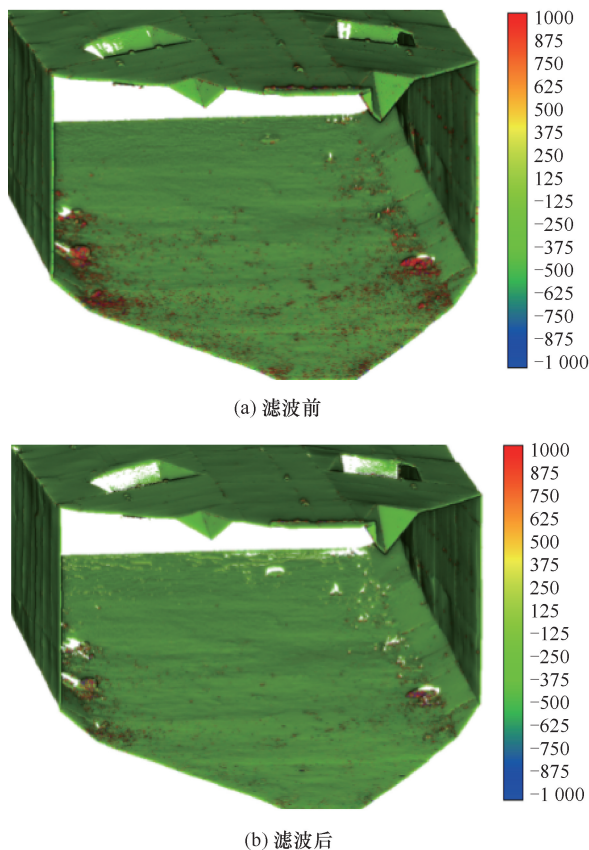


图 16 基于改进双边滤波的低频噪声平滑的箱梁点云

4 结论

本文面向三维激光点云技术在桥梁预制构件检测领域中的运用。针对点云模型的质量问题进行分析, 结合预制梁场中的实际扫描环境, 总结了点云模型质量问题产生的原因, 并提出了有效的改进方案。

(1) 归纳了点云模型质量问题的主要原因: 边缘效应与构件长度效应。

(2) 为了应对高频噪声的生成机理及其特定属性, 开发了一种依据相邻点空间位置关系的噪声消除方法。与传统噪声剔除算法相比, 效率得到了明显的提升, 且更符合实际情况。

(3) 考虑到低频噪声的形成根源和其独特性质, 构建了一种优化后的双边滤波技术以实现噪声的平滑处理。改进后的双边滤波与改进后的双边滤波相比, 点云的曲率得到了显著降低, 平滑效果较为明显。

参考文献:

- [1] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 高斯滤波稳健性能的研究与改进[J]. 仪器仪表学报, 2004(5): 633-637.
- [2] 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.
- [3] 王振, 孙志刚. 散乱点云噪声分析与降噪方法研究[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(9): 1668-1673.
- [4] 郭进, 陈小宁, 吕峻闽, 等. 采用密度 k-means 和改进双边滤波的点云自适应去噪算法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(7): 147-149.
- [5] 陈崇帮. 基于最优领域的点云降噪算法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014.
- [6] LIN G, YANG L, ZHANG C, et al. Patch-Grid: An efficient and feature-preserving neural implicit surface representation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2025, 44(4): 1-14.
- [7] 吴晓庆, 黄玉清. 基于移动最小二乘法的点云平滑及重采样[J]. 微型机与应用, 2017, 36(11): 47-49.
- [8] 朱广堂, 叶珉吕. 基于曲率特征点云去噪及定量评价方法研究[J]. 测绘通报, 2019(6): 105-108.
- [9] BARHAK J, FISCHER A. Adaptive Reconstruction of freeform objects with 3D som neural network grids [J]. Computer and Graphics, 2002, 26(5): 745-751.
- [10] 胡国飞. 三维数字表面去噪光顺技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

(责任编辑 王海锋)