

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.094



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



知识驱动的梁桥点云实例级分割技术

庞博¹, 艾岩², 张家奇², 王斐亮¹, 杨健¹, 聂柯夫²

(1. 上海交通大学上海市城市公共建筑与基础设施数字化运维重点实验室; 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200040)

摘要: 在桥梁全周期数字化运维需求背景下, 桥梁快速逆向建模技术成为搭建运维数据底座的关键环节, 扫描所采集三维点云数据是构成运维档案与数字孪生体的关键要素。数字管控框架下构件语义信息的准确性依赖点云实例级语义分割的精度。为实现典型桥梁构件的高精度、可解释实例分割, 引入设计知识作为语义信息, 对知识驱动的实例级点云分割方法进行研究。首先, 通过基于聚类的数据优化处理类别级分割中的归类错误, 提升实例提取参数精度。其次, 根据设计准则给定的构件间几何关系, 确定桥面板边界与梁轴分布。最后, 基于桥墩中心线及纵、横梁正交布局的形式化规则, 构建动态边界框, 实现桥面板与梁的实例级分割。在真实扫描点云数据上的实施结果表明, 该方法具有良好实例级分割性能, 降低了语义分割算法对数据的依赖性, 可为桥梁从扫描点云至数字孪生体自动化建模技术提供支持。

关键词: 三维点云; 桥梁构件; 语义分割; 知识驱动; 实例分割

中图分类号: TP391.4; U445 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-07

Knowledge driven beam bridge point cloud instance-level segmentation

PANG Bo¹, AI Yan², ZHANG Jiaqi², WANG Feiliang¹, YANG Jian¹, NIE Kefu²

(1. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure; School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China; 2. China Railway Shanghai Group Co., Ltd, Shanghai 200040, P. R. China)

Abstract: In the context of the demand for digital life-cycle maintenance of bridges, rapid reverse modeling techniques have become key links in building the foundation of maintenance data. The 3D point cloud data collected by scanning is a key element that constitutes the maintenance archives and digital twin. The accuracy of the semantic information of components under a digital control framework depends on the accuracy of the instance-level semantic segmentation of the point cloud. To achieve high-precision and interpretable segmentation of typical bridge instances, design knowledge is introduced as semantic information and a knowledge-driven point cloud instance-level segmentation method is proposed. Firstly, by using clustering-

收稿日期: 2025-07-09

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(N2023G050)

作者简介: 庞博(1993-), 男, 博士生, 主要从事基础设施数字化运维研究, E-mail: b.pang.ce@sjtu.edu.cn。

王斐亮(通信作者), 男, 助理研究员, E-mail: wongfayeung@sjtu.edu.cn。

Received: 2025-07-09

Foundation items: Science and Technology Research and Development Plan Project of China Railway Co., Ltd (No. N2023G050)

Author brief: PANG Bo (1993-), PhD candidate, main research interest: digital maintenance of infrastructures, E-mail: b.pang.ce@sjtu.edu.cn.

WANG Feiliang (corresponding author), assistant research fellow, E-mail: wongfayeung@sjtu.edu.cn.

based data optimization to handle classification errors in category-level segmentation, the accuracy of instance extraction parameters can be improved. Secondly, based on the geometric relationships between the components determined by the design criteria, the boundary of the bridge deck and the distribution of the beam axis are determined. Finally, based on the formal rules of the centerline of the bridge pier and the orthogonal layout of the longitudinal and transverse beams, a dynamic bounding box is constructed to achieve instance level segmentation of the bridge deck and beam. The implementation results on practical scanning point cloud data show that the proposed method has good instance-level segmentation performance, reduces the dependence of segmentation method on data, and can provide support for the automated bridge modelling technique from scanning point cloud to digital twins.

Keywords: 3D point cloud; bridge components; semantic segmentation; knowledge driven; instance segmentation

面对日益增长的公路、铁路桥梁运维需求,三维激光扫描获取的既有桥梁点云数据已成为桥梁结构的重要数据来源。为了对点坐标数据赋予对场景理解和认知中有意义的语义信息,需要对采集的点云进行语义分割^[1]。在工程建设及运维领域,常用语义信息一般包含特定构件类型及构件实例的语义标签,以便对不同构件进行识别^[2]。

点云数据的语义分割一般可分为类别级与实例级两种精度,前者对桥墩、桥面板等基本构件类别进行区分,而后者则进一步实现各独立构件的实例分割。针对类别级的语义分割算法,目前已有较为广泛的研究,其一般将点云所提取特征输入到特定分类模型中以计算最可能的构件类别标签。该种特征无论是从邻域直接获取^[3-6],或从端到端的学习网络中得到^[7-10],均可获得可接受类别级分割效果。针对学习网络中训练数据集依赖问题,提出了一些具有小样本学习能力的分割网络^[11-12],以适应公路、铁路桥梁等类别复杂、样本有限的应用场景。

考虑到建筑信息模型(BIM)等数字孪生体系架构往往针对单独构件进行建模与特征存储,类别级语义分割结构无法满足面向全过程管理的数字化建模需求。因此,需要针对公路、铁路桥梁点云数据,提出一套自动化实例级语义分割方法。目前,已开展一定面向公路、铁路桥梁点云的实例级语义分割相关研究,其主要针对钢架桥杆件^[13-14]或桥墩、墩帽等^[15]相对易识别构件实例,且在不同桥梁场景下的一致性表达需要进一步验证。此外,上述学习驱动的实例分割在基本特征提取上仍与类别级分割相似,其通过直接定义实例标签来实现实例级分割。因此,该种具有数据依赖性策略分割结果对于特征提取质量敏感,数据完整性影响较为显著^[16],且分割后构件实例点云边界不完全可控。

先验知识和语义信息是对规则或事实的抽象化表达,可以提升语义分割结果的可解释性,降低结果中的随机分布噪声与模糊边界^[17]。为了实现桥

梁普适场景下的实例分割,避免点云数据质量对分割结果的显著影响,增加语义结果可解释性,笔者通过引入桥梁设计知识,设定先验构件边界,形成知识驱动的自动化实例级分割算法。

1 梁桥构件实例分割算法

1.1 算法架构

与文献[11-12]所述钢混公路、铁路桥梁点云语义分割算法所识别构件相同,实例分割算法主要针对桥面板、梁、墩帽及桥墩4类基本结构构件。同时考虑代表背景环境的点云数据,类别级语义分割实施后原始点云将具有5种类别级语义标签。针对分割后表示各构件类别的点云数据,算法流程如图1所示,主要包括分割点云数据优化、语义信息定义及实例分割3部分。在实施类别级语义分割时,囿于分割算法本身性能与噪声数据影响,类别级分割结果总是存在误差,部分点云数据会具有错误的构件类别语义标签。此外,实际扫描得到的点云数据不可避免地会带有一定散乱分布的环境噪声点。因此,在数据优化阶段,使用基于密度的空间聚类算法(DBSCAN)对点云进行聚类,以自动化去除上述对实例分割造成干扰的噪声数据。

桥梁点云类别级语义分割算法一般依赖于点云几何、色彩等特征的提取与识别。对于实例级实例分割,由于公路、铁路桥梁一般采用模块化施工,同一类别构件往往具有完全相同或相似的几何外观,难以通过局部特征实现对各个构件的有效区分。因此,在语义信息定义阶段引入桥梁设计知识,针对各类构件点云分布形态,定义构件边界等分割限定条件。最后,基于上述知识信息,形成知识驱动的自动化实例分割算法,输出带有实例级语义信息的桥梁点云模型。

1.2 点云数据优化

为了实现对点云类别级语义分割误差及扫描环境中植被、栏杆、电力设施等非结构干扰物造成

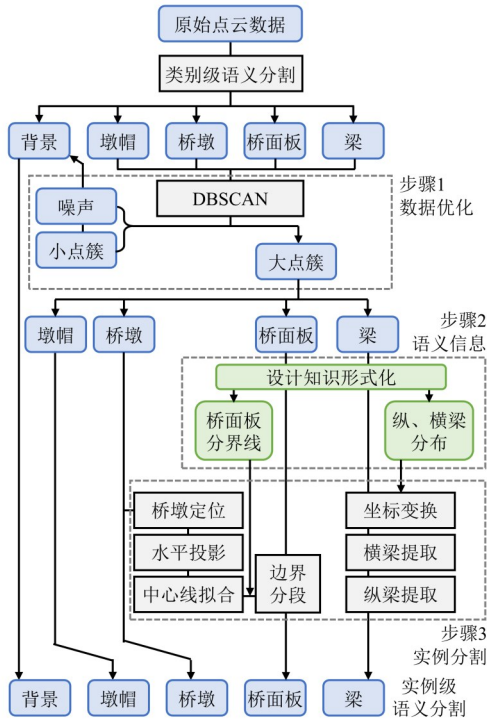


图1 桥梁构件分割算法流程图

Fig.1 Flow of bridge component segmentation algorithm

的噪声数据进行自动化过滤,避免人工数据预处理过程,使用DBSCAN进行点云数据优化。由于DBSCAN不需要对聚类集群的数量进行先验指定,且其迭代聚类过程无拓扑倾向性,可形成不定数量且任意空间几何形状的聚类点簇,适用于桥梁点云过滤该类环境复杂且无先验信息工况。

数据优化主要包含两个阶段。第1阶段使用DBSCAN对各类构件进行聚类,此时每类构件将形成多个点簇。需要说明的是,此时生成的点簇可能对应单个构件,也可能为多个距离相近构件的集合,仍需要在后续步骤中使用语义信息进一步分割。第2阶段针对上述生成的具有不同点数的点簇,通过定义最小点数阈值,将错误分类与环境噪声所产生的小点簇与代表构件的大点簇进行划分,并将小点簇语义标签改为背景环境类别,以优化类别级语义标签。

DBSCAN基本流程如图2所示,该算法将密集分布点视为点簇并聚类,而将孤立点识别为噪声。进行聚类时,首先从任意点 P 开始考察,定义点 P 邻域半径 r_p 及邻点最小数量 n_{min} ,若点 P 邻域内包含点数不少于 n_{min} ,则将点 P 标记为核心点并纳入当前点簇,将其邻域内的点列入待考察序列。反之,则将点 P 标记为噪声点。然后遍历待考察序列中的点,若当前点被标记为核心点,则将其邻域内的点纳入待考察序列;反之则将该点标记为边界点,其邻域内点不作处理。重复上述过程,直至所有新添加的

点均为边界点,此时即实现了一个点簇的聚类。随机考察点云中其他未考察点,直至遍历所有潜在点簇。优化采用的 r_p 和 n_{min} 分别设置为0.4 m和10。

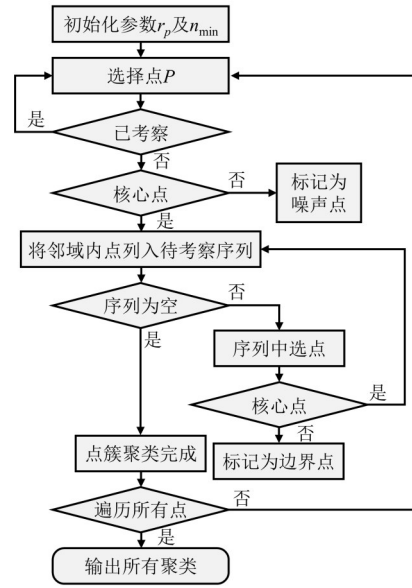


图2 DBSCAN基本流程

Fig.2 Basic flow of DBSCAN

1.3 语义信息定义

对于墩帽和桥墩,同类构件的不同实例往往在空间上不相邻,通过步骤一中的聚类可以基于空间分布实现对各实例的语义分割。而公路、铁路桥梁的桥面板和梁沿路线方向连续布置,不同跨桥面板和梁在步骤一中基本会被划分至连续的同一点簇中,无法实现实例级语义分割。因此,需要根据桥梁基本设计知识,定义其分割所需语义信息。

对于桥梁、建筑场景下的点云实例分割而言,结构构件拓扑关系较为明晰,构件布置较为规整以符合力学设计基本原理,所引入知识一般用于定义构件边界框以实现单独构件点云从类别级整体点云中的提取。使用如下两条限定条件以实现桥面板与梁的实例分割。第一,根据桥梁设计知识可知,相邻两跨分段桥面板的分界线应与两跨交界处桥墩的水平向中心线重合,从而在桥面板支承处构成简支构造以平衡两端桥面板传递的力矩,使桥墩基本处于轴压状态。桥墩中心线可作为不同跨桥面板和梁的分割边界。第二,对于梁式桥,其梁一般采用正交纵、横梁形式,其中纵梁起到承担主要竖向荷载的作用,横梁起到连接纵梁,提升纵梁面外抗扭稳定性的作用。根据该种基本关系,可通过确定纵、横梁正交分布位置以定义梁分布局部坐标系并确定各梁提取边界框。需要说明的是,对于采用箱梁的梁桥,其箱梁几何形式在桥梁宽度方向一般无显著变化,将其视为桥面板等同处理。

1.4 实例分割

1.4.1 桥面板分段

基于设计知识定义的语义信息,桥面板及梁首先基于第1条限定条件进行分段,其包括桥墩定位、水平投影、水平中心线拟合及边界分段4个阶段:

1)当桥墩采用多柱形式时,同一桥墩位置的多支柱在第1步DBSCAN优化中可能会被划分为多个独立点簇。为方便确定桥墩坐标,首先通过定义点簇空间距离阈值方式,将位置相近的点簇重新合并以表示同一位置桥墩。

2)在桥梁、建筑场景中,所采集点云Z轴方向一般表示高程。因此,可以将同一位置桥墩所有空间点云沿Z轴投影至水平面以获取桥墩水平横截面。

3)对桥墩水平投影进行主成分分析(PCA)以确定桥墩的主要分布方向,求出桥墩中心点,将与主要方向平行且经过中心点的直线定义为桥面板分割线,分割线所处竖向平面即被视为桥面板与梁分段边界。

4)获得所有桥墩位置对应分段边界后,判断桥面板及梁点云空间坐标所属不同分段位置,即可明确各段桥面板及梁实例级语义标签,实现桥面板的实例分割。

1.4.2 纵、横梁实例分割

对于使用纵、横梁的梁式桥而言,仍需要对梁点云进行进一步分割,以获得各梁的具体几何信息。根据上述第2条限定条件所给定的纵、横梁坐标关系,可根据点云投影直方图分布确定各梁分布位置,其实例分割包含坐标变换、横梁提取、纵梁提取3个阶段:

1)桥梁、建筑场景下扫描点云除Z轴固定外,其水平面全局坐标X-Y往往根据扫描站点设置而变更,所提语义分割算法需具有水平面旋转一致性。首先利用PCA算法确定单跨所有梁点云的主要分布方向,以梁点云中心点为原点,构成梁点云局部平面坐标系 $X'-Y'$ 。此时纵、横梁分布方向与局部坐标方向一致,各单独梁点云将具有相近的横坐标或纵坐标,可根据横纵坐标分布规律对梁进行实例分割,以实现纵、横梁所处位置的一致性表达。

2)将梁的所有点投影到 X' 轴,获得点在 X' 向的分布直方图,此时直方图波峰将表示横梁分布位置。通过判断直方图中突变位置即可划定横梁边界框并从完整点云中提取横梁。具体而言,基于对实际点云数据分布统计,定义所有点数大于二倍平均点数的坐标区间为直方图突变区间,此时可以认为相邻的连续坐标区间属于同一根横梁,从而得到不同横梁的坐标区间。然后根据横梁的坐标区间

进行提取,将属于同一个坐标区的点分割至同一根横梁,从而实现横梁的提取与实例分割。

3)在梁点云中取出横梁部分后,将剩余纵梁点云投影至 Y' 轴,获得点在 Y' 向的分布直方图,此时直方图波峰将表示纵梁分布位置。与横梁提取方式相同,通过 Y' 坐标区间的划定,实现对纵梁的提取与实例分割。

2 试验数据信息

为验证实例级语义分割效果,通过激光扫描方式获得了位于上海的一座公路桥梁的完整点云数据,并实施上述分割流程。实施过程所用计算平台为Intel Core i9-9900k 处理器及NVIDIA GeForce GTX 1080ti 显卡。扫描采用Leica P40 激光扫描仪,测距精度及角精度分别为3 mm@50 m及8",扫描密度设置为3.1 mm@10 m。由于单次扫描无法获取桥梁完整数据,进行多站点扫描并使用标靶进行配准。目标桥梁为钢混梁式桥,其桥面板底布置有纵、横梁,其中横梁为矩形梁,纵梁为工字形梁。图3给出了扫描原始点云数据,由于桥梁整体长度较大,仅展示某一桥墩及其左、右半跨数据。可以看出,该处桥墩左侧跨板底设有梁,而右侧跨无梁。



图3 公路桥梁原始扫描点云

Fig.3 Raw scanning point cloud of highway bridges

作为实例级语义分割点云数据前处理过程,首先基于文献[11-12]所提类别级语义分割算法,获得背景、桥面板、梁、墩帽、桥墩5类类别语义标签。该类别级语义分割算法首先根据所定义多尺度局部描述符编码方式,通过点邻域内空间相对坐标关系,计算各点局部特征向量。其后将所获取特征向量带入神经网络构成的分类网络中,得到端到端的类别语义标签。

在实施类别级语义分割时,每个点的特征向量是通过计算该点与其邻域内所有点的几何关系得到的,其特征计算具有 $O(n^3)$ 复杂度。因此,考虑到计算机内存限制,对桥梁原始点云进行最小距离为40 mm的下采样。

图4给出了类别级语义分割结果。上述5类类

别语义标签的交并比(IoU)分别为 92.74、98.29、97.78、88.73、95.09,即部分点云并未正确归类,且该种少数错误分类的点呈分散和稀疏分布。因此,需要实施前述数据优化策略对其结果进行优化。

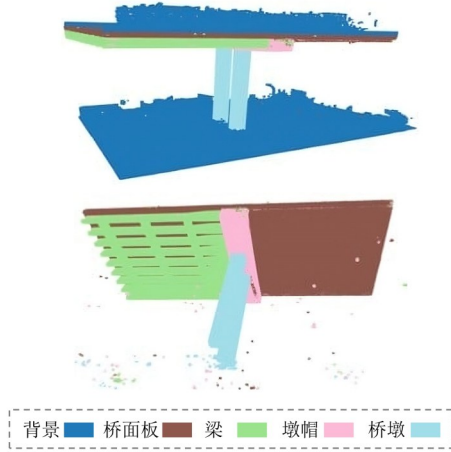


图 4 类别级语义分割后结果

Fig.4 Result of category level semantic segmentation

3 试验测试结果

3.1 数据优化结果

针对图 4 所给的类别级语义分割结果,首先实施实例级语义分割算法点云数据优化步骤。图 5 给出了优化后的类别级分割结果。由图 5 可以看出,通过 DBSCAN 对于小点簇的分离与重新归类,植被、栏杆、地面杂物、扫描噪声等干扰物被有效识别并划分至背景中,不参与后续实例分割。如此,桥面板、梁、墩帽、桥墩 4 类结构构件的点云 IoU 分别提升至 98.39、98.06、90.50、95.40,噪声数据对于后续实例分割中分布直方图统计等操作的干扰将大幅降低。

3.2 实例分割结果

针对图 5 所示分割结果,仍需要进一步利用所

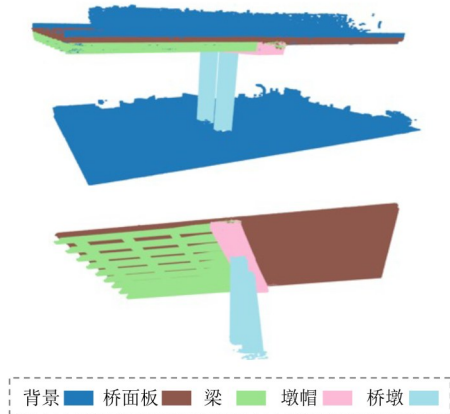


图 5 优化后类别级语义分割结果

Fig.5 Optimized category level semantic segmentation

引入设计知识对桥面板及梁进行进一步实例分割。在桥面板分段过程中,首先将桥墩点云投影至水平面如图 6(a)所示。可以看到,实际点云中不可避免地存在排水管等局部构造设备细节,该类设备在不同场景下分布多样,且该部分点云难以在上述流程中被识别或消除。然而,该类点云在总体点云中占比有限,对于主方向及中心点的计算影响很小,此处不予特殊处理以提升整体算法在各类工况下的鲁棒性。此时通过 PCA 分析在全局坐标系下获得的桥面板分割线如图 6(b)所示。需要说明的是,若所采集桥墩原始点云数据中出现大面积缺失,则会影响桥墩主方向的评估精度。此时需要分段切片拟合或实施点云补全算法,其并不在本文讨论范畴。

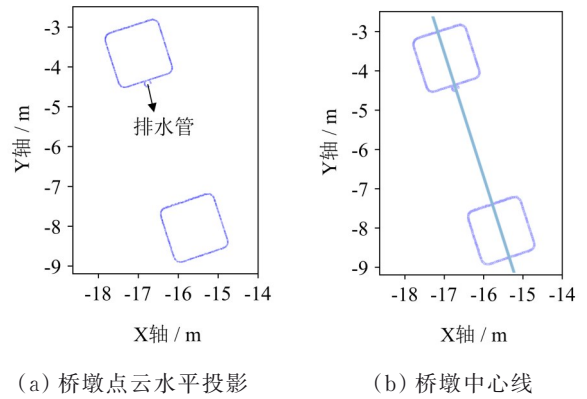


图 6 桥面板分割线的确定

Fig.6 Determination of the dividing line of the bridge deck

基于获取的桥面板分割线,可将连续桥面板分割为桥墩左右侧两段,如图 7 所示。该实例分割符合实际工程中桥面板简支的一般设计构造。

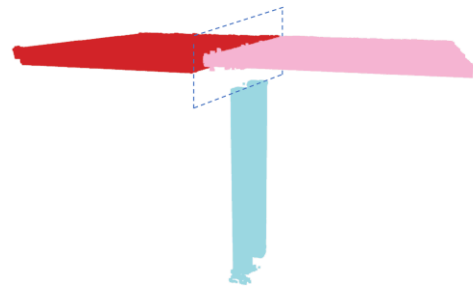


图 7 桥面板实例分割

Fig.7 Bridge deck instance segmentation

对于纵、横梁组成的正交梁网,通过 PCA 确定的平面局部坐标系 $X'-Y'$ 如图 8 所示,该局部坐标系即为后续直方图统计基本坐标系。将梁点云向 X' 轴投影并计算分布直方图如图 9(a)所示,即可观察到 3 个显著波峰,对应该梁段内 3 根横梁。此时根据上述突变区域定义规则,给定各横梁坐标区

间,并按照该区间在局部坐标系中建立横梁边界框提取横梁点云。所提取横梁点云如图9(b)所示,此时即完成横梁的实例分割。

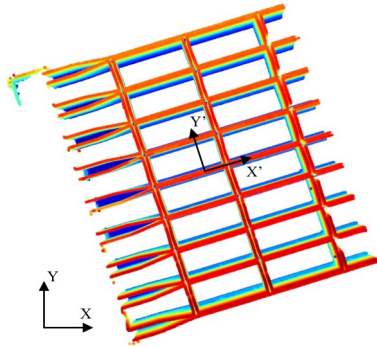
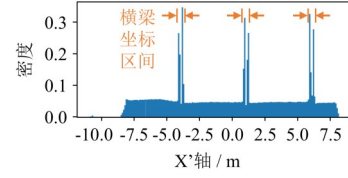


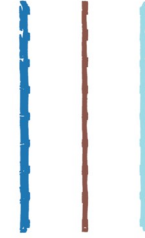
图8 梁点云局部坐标确定

Fig.8 Determination of local coordinates of beam point cloud

提取横梁点云后,剩余点云即为全部纵梁点云,如图10(a)所示。将纵梁点云投影至 Y' 轴,可得到图10(b)给出的分布直方图,图中可观察到9个显著波峰,对应该桥所采用的9根纵梁。采用边界



(a) 梁点云横坐标直方图

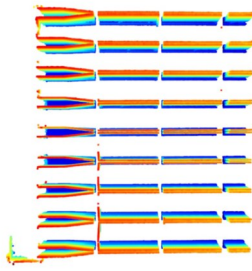


(b) 横梁实例分割结果

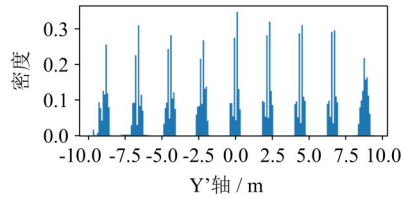
图9 横梁提取与分割

Fig.9 Horizontal beam extraction and segmentation

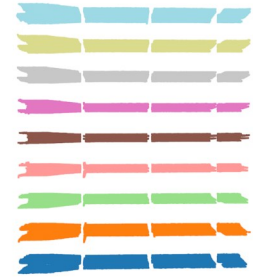
限定方式,或可直接利用DBSCAN将不同纵梁进行聚类,其实例分割结果如图10(c)所示。



(a) 纵梁点云



(b) 梁点云纵坐标直方图



(c) 纵梁实例分割结果

图10 纵梁提取与分割

Fig.10 Vertical beam extraction and segmentation

经过上述实例分割流程,图4所示的类别级语义分割可以被进一步细化为图11所示的实例级语义分割结果。桥梁中每个单独构件均被赋予不同的语义标签以示区分。此时,即可针对各构件点云进行后续几何信息的提取与记录,构建实例级BIM等数字孪生或数字化管理应用成为可能。

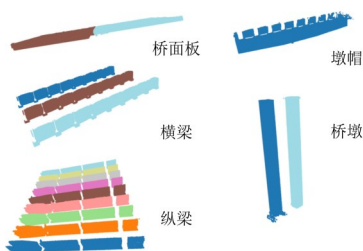


图11 实例级语义分割最终结果

Fig.11 Result of instance level semantic segmentation

4 结论

面对实例级语义分割需求,针对桥梁结构复杂点云数据场景,通过引入设计知识,对构件边界语义信息进行定义,从而提出了知识驱动的桥梁点云实例级分割方法。该方法在数据优化阶段对类别级语义分割结果进行优化,以提升后续实例分割精度。根据设计知识定义构件间边界关系,以桥墩中心线作为桥面板划分边界,符合实际工程设计构造。采用点云投影直方图统计策略,实现对纵、横梁分布的自动化识别与实例提取。通过在实际扫描点云数据上的试验,验证了所提方法的可行性,其结果满足实际应用需求。研究得到的结论包括:

1)建立融合DBSCAN和桥梁设计知识的构件分割方法,有效增加语义分割结果可解释性。

2)该方法采用的DBSCAN、平面投影、直方图统计等策略基于点云整体统计特征,受局部干扰数据影响有限,对不同数据场景均具有良好鲁棒性。

3)该方法将桥梁结构语义分割推进至构件层次,实现了扫描点云至数字化模型的自动化处理流程,可推动数字孪生技术在公、铁路桥梁场景下的实际应用落地。

对于非标梁桥,其构件语义信息可能不同于本文应用场景,本文所提方法适用于标准梁桥。

参考文献

- [1] XIE Y X, TIAN J J, ZHU X X. Linking points with labels in 3D: a review of point cloud semantic segmentation [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2020, 8(4): 38-59.
- [2] 张佳颖, 赵晓丽, 陈正. 基于深度学习的点云语义分割综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 28-46.
ZHANG J Y, ZHAO X L, CHEN Z. Review of semantic segmentation of point cloud based on deep learning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 28-46. (in Chinese)
- [3] LU R D, BRILAKIS I, MIDDLETON C R. Detection of structural components in point clouds of existing RC bridges [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2019, 34(3): 191-212.
- [4] WANG F, ZHOU G Q, XIE J L, et al. An automatic hierarchical clustering method for the LiDAR point cloud segmentation of buildings via shape classification and outliers reassignment [J]. Remote Sensing, 2023, 15(9): 2432.
- [5] XU S B, SUN J X, ZHANG J G, et al. Lightweight semantic architecture modeling by 3D feature line detection [J]. Remote Sensing, 2023, 15(8): 1957.
- [6] 刘德儿, 司玄玄, 杨大海, 等. 大桥工字梁点云模型特征面智能识别及应用[J]. 激光与红外, 2023, 53(4): 528-536.
LIU D E, SI X X, YANG D H, et al. Intelligent recognition and application of characteristic surface of point cloud model of bridge I-beam [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(4): 528-536. (in Chinese)
- [7] 王卫东, 刘延, 邱实, 等. 用于铁路场景语义分割的改进动态图卷积神经网络[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2025, 37(1): 139-147.
WANG W D, LIU Y, QIU S, et al. Improved dynamic graph convolutional neural network for semantic segmentation of railway scenes [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2025, 37(1): 139-147. (in Chinese)
- [8] 万桂军, 吴维维, 王浩琛, 等. 基于无人机路径规划与深度学习的桥梁点云自动化分割研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(3): 60-72.
- WANG G J, WU W W, WANG H C, et al. Study on automated segmentation of bridge point clouds based on UAV path planning and deep learning [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(3): 60-72. (in Chinese)
- [9] QI C R, YI L, SU H, et al. PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space [EB/OL]. 2017: arXiv: 1706.02413. <https://arxiv.org/abs/1706.02413>
- [10] LEE J S, PARK J, RYU Y M. Semantic segmentation of bridge components based on hierarchical point cloud model [J]. Automation in Construction, 2021, 130: 103847.
- [11] XIA T, YANG J, CHEN L. Automated semantic segmentation of bridge point cloud based on local descriptor and machine learning [J]. Automation in Construction, 2022, 133: 103992.
- [12] PANG B, YANG J, XIA T, et al. Automated heritage building component recognition and modelling based on local features [J]. Journal of Cultural Heritage, 2025, 71: 252-264.
- [13] LAMAS D, JUSTO A, SOILÁN M, et al. Automated production of synthetic point clouds of truss bridges for semantic and instance segmentation using deep learning models [J]. Automation in Construction, 2024, 158: 105176.
- [14] LAMAS D, JUSTO A, SOILÁN M, et al. Instance and semantic segmentation of point clouds of large metallic truss bridges [J]. Automation in Construction, 2023, 151: 104865.
- [15] 吴承文, 王万齐, 卢文龙. 基于改进RandLA-Net的铁路桥梁点云构件级分割方法[J]. 中国铁路, 2024(4): 42-48.
WU C W, WANG W Q, LU W L. Method of point cloud segmentation at component level of railway bridges based on improved RandLA-Net [J]. China Railway, 2024(4): 42-48. (in Chinese)
- [16] RAHMAN A U, HOSKERE V. Instance segmentation of reinforced concrete bridge point clouds with transformers trained exclusively on synthetic data [J]. Automation in Construction, 2025, 173: 106067.
- [17] 李彦胜, 武康, 欧阳松, 等. 地学知识图谱引导的遥感影像语义分割[J]. 遥感学报, 2024, 28(2): 455-469.
LI Y S, WU K, OUYANG S, et al. Geographic knowledge graph-guided remote sensing image semantic segmentation [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2024, 28(2): 455-469. (in Chinese)