

顾及相对距离的路灯点云分层提取方法研究

马茜茜¹, 沈月千^{1*}, 王金虎², 黄腾¹

¹河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100;

²中国科学院空天信息创新研究院定量遥感信息技术重点实验室, 北京 100094

摘要 路灯提取是车载点云目标提取的重要研究方向之一,但由于路灯上部和下部容易产生粘连和遮挡,路灯识别往往存在困难。针对此问题,考虑灯杆中部不易产生粘连和遮挡这一特点,结合灯头与灯杆之间的相对位置关系,提出了顾及相对距离的路灯点云分层提取方法。首先用布料模拟滤波(CSF)算法将原始点云分为灯头层、灯杆层和地面层,在此基础上对灯头层和灯杆层点云进行连通域分析并输出聚类;然后根据灯杆层各聚类矩形对角线长度和拟合圆内部范围提取灯杆点云;最后根据灯头中心与灯杆中心的相对距离搜索灯头点云,从而实现完整路灯点云的提取。对三组数据进行实验分析,结果表明:所提方法对数据1的正确率、完整率、质量和F1值均为100%;对数据2的正确率、完整率、F1值均为87.50%,质量为77.78%;对数据3的完整率和质量均为94.74%,正确率为100%,F1值为97.30%。所提方法能够实现路灯点云的有效识别和提取。

关键词 激光雷达; 车载点云; 路灯提取; 相对距离; 连通域分析

中图分类号 P237

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2228006

Hierarchical Extraction Method for Street Lamp Point Cloud Considering Relative Distance

Ma Xirui¹, Shen Yueqian^{1*}, Wang Jinhui², Huang Teng¹

¹School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

²Key Laboratory of Quantitative Remote Sensing Information Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Street lamp extraction is an important research direction for target extraction from point clouds obtained using vehicle-borne laser scanning. However, the upper and lower parts of street lamps always produce adhesion and occlusion, making street lamp identification difficult. Considering that the adhesion and occlusion are unlikely to occur in the lamp pole's middle, relative position relationship between lamp burner and lamp pole is examined and a hierarchical extraction approach for street lamp point cloud considering the relative distance is introduced. First, the original point cloud is divided into the lamp burner, lamp pole, and ground layers using the cloth simulation filtering (CSF) algorithm, then the connected component analysis is used to cluster the lamp burner layer and lamp pole layer point clouds. Then, the lamp pole point cloud is extracted using the diagonal's length in each clustering rectangle of the lamp pole layer and the fitted circle's included area. Finally, the lamp burner point cloud is estimated based on the relative distance between the lamp burner's center and the lamp pole's center to extract the entire street lamp. The proposed method was tested on three datasets. The proposed method's extracted correctness, completeness, quality, and F1 value for data 1 are 100%; the correctness, completeness, and F1 value for data 2 are 87.50% while the quality is 77.78%; the completeness and quality for data 3 are 94.74%, and the correctness is 100% while the F1 value is 97.30%. The experimental findings illustrate that this method can efficiently recognize and extract street lamps.

Key words light detection and ranging; vehicle-borne point cloud; street lamp extraction; relative distance; connected component analysis

收稿日期: 2021-09-18; 修回日期: 2021-09-26; 录用日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(41801379)

通信作者: *y.shen_lidar@hhu.edu.cn

1 引言

路灯是道路环境中一类重要的杆状交通设施,其三维信息的获取对高精度地图构建、智能交通建设和智慧城市管理等具有重要意义^[1-4]。传统路灯位置获取方法多采用全球定位系统(GPS)对每个路灯分别进行定位,耗时费力,且很难获取路灯三维信息^[5],已无法满足当今城市建设和管理的需要。而激光雷达技术的出现为道路及其两侧地物三维信息的获取提供了一个新的途径,该技术能够快速、无接触地获取高精度、高密度的路灯三维信息^[6-9]。然而,由于道路环境复杂以及遮挡等因素,实际情况中路灯的认识和提取往往存在一定困难,如何从车载点云中正确、完整地提取路灯点云仍需要进一步研究。

现有研究中,路灯提取方法主要分为4类,第1类是基于空间聚类的方法^[10-14],第2类是基于体素的方法^[15-19],第3类是基于深度学习的方法^[20-23],第4类是基于模板匹配的方法^[24-27]。第1类方法在滤除地面点云的基础上,按照特定规则对非地面点云进行聚类,之后根据每个聚类中地物的空间特征对感兴趣目标进行识别和提取。此类方法可以将非地面点云中形态相近的物体分割为大类,但受噪声影响,对路灯的进一步识别存在困难,且算法时间复杂度较高。第2类方法对点

云进行体素格网划分,以每个体素格网为单位对物体进行分割和提取。此类方法降低了点云数据的复杂度,计算速度较快,但分割结果受体素格网划分最小单元尺寸影响较大,容易出现混合体素。第3类方法利用深度学习模型从点云图像化、点云体素化、网络模型优化和直接端到端等不同角度学习三维点云的有效特征,提高了目标识别和提取的效率和精度,但容易产生细节信息丢失、计算成本高、复杂结构和自然地物的有效信息难以提取等问题。第4类方法通过采集路灯样本手动建立模板库,然后对模板库中的路灯模型与车载点云数据进行匹配,提取与路灯匹配相似度高的点云。此类方法对路灯样本的孤立性和完整性要求较高,路灯样本的质量和路灯所处环境对提取结果有很大影响,主要体现在灯杆周围若有其他地物,则会导致此处点云产生粘连。然而,现有路灯提取方法未考虑这个情况,识别路灯时容易受到邻近地物噪声干扰,造成识别正确率降低。针对上述问题,本文对点云数据进行分层处理,结合灯头和灯杆之间的相对位置关系,提出了顾及相对距离的路灯点云分层提取方法,实现了对路灯点云的准确、完整提取。

2 路灯分层提取方法

路灯分层提取方法的流程如图1所示。

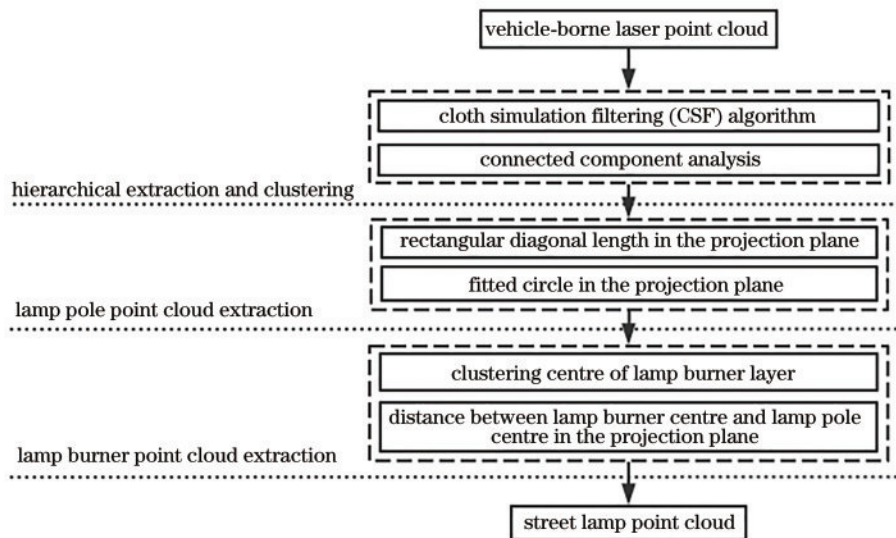


图1 路灯分层提取方法的流程

Fig. 1 Flow of street lamp hierarchical extraction method

2.1 点云分层聚类

布料模拟滤波(CSF)算法^[28]通过设置分类阈值参数,可以将点云分割为地面点和非地面点,以模拟地面为基准,距离小于分类阈值的点云为地面点,距离大于分类阈值的点云为非地面点,通过滤除非地面点,从而实现点对云的滤波。受CSF算法分割地面点和非地面点原理的启发,所提方法通过调整分类阈值参数大小对原始点云进行分层,将其分为灯头层、灯杆层和地面层。

首先设置分类阈值参数为 h_1 ,利用CSF算法将原始点云分割为灯头层和伪地面层,与模拟地面的距离小于 h_1 的点云分割在伪地面层,与模拟地面的距离大于 h_1 的点云分割在灯头层,其中 h_1 的设置原则是使得灯头点云全部被分在灯头层中。然后设置分类阈值参数为 h_2 ,利用CSF算法继续将伪地面层分为灯杆层和地面层,与模拟地面的距离小于 h_2 的点云分割在地面层,与模拟地面的距离大于 h_2 的点云分割在灯杆层,其中 h_2 的设置原则是

尽可能使车辆、低矮植被等近地面点云与地面点一起被分割在地面层。也就是说灯杆层高度阈值可在一定区间内灵活选取,只要保证灯杆的某一段被分在灯杆层,但为了保证路灯提取的正确率,一般根据路灯和周围地物的高度分布情况进行优化选取。对于交通标志杆,其口径和高度一般小于路灯,通过选取灯头下方一段灯杆,交通标志杆的头部被分割在灯杆层,这样灯杆层中的交通标志杆和路灯在 xoy 投影面内得以区分。对于和路灯直径相似的树木,如果路灯高度大于等于树木,通过选取树冠高度范围内的一段灯杆,树冠被分割在灯杆层,这样灯杆层中的树木和路灯在 xoy 投影面内得以区分。如果路灯高度小于树木,可以结合对应灯头层的投影几何进行判断,比如树冠在文中定义的灯头层中的投影形状与灯头的投影形状有明显差异。

对点云分层后,通过设置八叉树层次 m (对应的体元大小为 d) 和每一类最少点数 n , 对灯杆层点云 (灯头层点云) 进行连通域分析, 将每个连通域聚为一类。其中体元大小 d 是根据灯杆 (灯头) 与周围物体的最小距离进行设置的, 每一类最少点数 n 是结合扫描点云密度和灯杆、灯头长度进行设置的, 保证每个灯杆 (每个灯头) 都能保留下来且独立聚为一类, 同时将点云个数小于 n 的聚类删除。

2.2 灯杆点云提取

在 xoy 投影平面, 灯杆层中的灯杆类与其他类的矩形对角线长度存在显著差异, 灯杆类矩形对角线长度 d_i 接近灯杆直径且一般小于其他类的长度。 d_i 的计算公式为

$$d_i = \sqrt{d_{x_i}^2 + d_{y_i}^2}, \quad (1)$$

式中: d_{x_i} 为每个类中 x 的最大值与最小值之差; d_{y_i} 为每个类中 y 的最大值与最小值之差。根据灯杆直径一般范围, 设置阈值下界 D_{thremin} 和阈值上界 D_{thremax} , 将满足 $D_{\text{thremin}} < d_i < D_{\text{thremax}}$ 的聚类提取出来作为疑似灯杆类, 但其中可能包含少数与灯杆矩形对角线长度相似的其他类。在此基础上, 对疑似灯杆类中的每个聚类点云进行最小二乘圆拟合, 得到拟合圆的半径 r_i 和圆心坐标 (x_i, y_i) 。由于灯杆类在 xoy 平面上的投影为圆弧点集, 而其他类的投影可能为直线状或者散乱点^[29], 因此对灯杆类点云进行圆拟合时能够得到效果较好的拟合圆, 其直径与灯杆直径接近, 而其他类点云拟合圆的直径与灯杆直径差异较大。通过设置拟合圆半径与灯杆半径差异阈值 ΔR_{thred} , 将满足 $|r_i - D_{\text{thremax}}/2| > \Delta R_{\text{thred}}$ 的类删除, 剩下的类即为灯杆类。其中 ΔR_{thred} 根据理想情况下灯杆直径与灯杆在 xoy 投影面拟合圆的外切正方形对角线长度的差值来确定, 如图 2 所示, 例如当灯杆最大直径 d_{DE} 为 0.2 m 时, 其拟合圆外切正方形对角线 d_{AC} 则为 $\frac{\sqrt{2}}{5}$ m, 此时 ΔR_{thred} 取

$\frac{\sqrt{2}}{5} - 0.2$ m。最后根据灯杆类拟合圆的平面 (xoy 投影面) 方程,

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 < k \cdot r_i^2, \quad (2)$$

分两种情况提取灯杆点云。若路灯上方有树冠等点云遮挡, 则按照式 (2) 从伪地面层点云中提取灯杆点云, 这样避免了对路灯上方噪声点的提取; 若路灯上方无任何遮挡, 则按照式 (2) 从原始点云中提取灯杆点云。考虑圆弧拟合圆误差和灯杆口径上窄下宽的特性, 取半径的 k 倍对灯杆点云进行搜索, k 一般取略大于 1 的数。

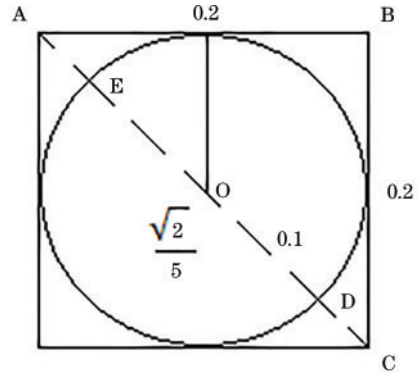


图 2 灯杆投影面拟合圆与外切正方形的几何关系示意图
Fig. 2 Schematic of the geometric relationship between the fitted circle of the projection surface of the lamp pole and the external square

2.3 灯头点云搜索

已经得到灯杆点云, 然后基于灯杆和灯头的相对位置关系对灯头点云进行搜索, 从而提取完整的路灯点云。在 xoy 投影平面, 灯杆中心到灯头层各聚类中心的相对距离 d_{r_i} 的计算公式为

$$d_{r_i} = \sqrt{(x_i - x_{\text{mean}_i})^2 + (y_i - y_{\text{mean}_i})^2}, \quad (3)$$

式中: 灯杆中心用灯杆拟合圆的圆心坐标 (x_i, y_i) 代替, 灯头层各聚类中心平面位置 $(x_{\text{mean}_i}, y_{\text{mean}_i})$ 由各聚类点云中的 x 列均值 x_{mean_i} 和 y 列均值 y_{mean_i} 组成。在灯头层各聚类中, 灯头类中心到各灯杆中心的平面距离最近, 根据灯头长度设置距离阈值 L_{thred} , 将满足 $d_{r_i} < L_{\text{thred}}$ 的类提取出来, 即为灯头类点云。最后将灯杆点云与灯头类点云合并, 从而实现对完整路灯点云的提取。

3 实验与分析

3.1 实验数据

为验证所提方法的有效性, 采用车载移动测量系统采集的三组道路环境复杂程度不同的路段数据进行实验, 利用 Matlab 编程语言实现算法。数据 1 和数据 2 由搭载 Riegl VQ-250 激光扫描仪的车载移动测量系统采集得到, 数据 3 由搭载 Riegl VQ-450 激光扫描仪的车载移动测量系统采集得到。其中 Riegl VQ-250

激光扫描仪每秒钟发射 300000 个激光脉冲,射程达 300 m,以 100 line/s 的扫描速度进行 360° 圆形扫描; Riegl VQ-450 激光扫描仪的测量速度达 550000 point/s,射程达 300 m,以 200 line/s 的扫描速率进行无缝 360° 线扫描。数据 1 中路段长约 100 m,点云数为 1299354 个,路灯分布较为独立,受周围地物遮挡少;数据 2 中路段长约 135 m,点云数为 2056150 个,道路两侧的路灯高

度差异较大,其中一侧路灯分布较为独立,遮挡少,另一侧路灯被树木包围,上方遮挡较多;数据 3 中路段长约 350 m,点云数为 2048201 个,不同路灯周围环境差异较大,有些路灯独立分布,有些路灯周围被树木、车辆等包围,且两侧路灯高度不一致。实验数据按高程的渲染效果如图 3 所示。

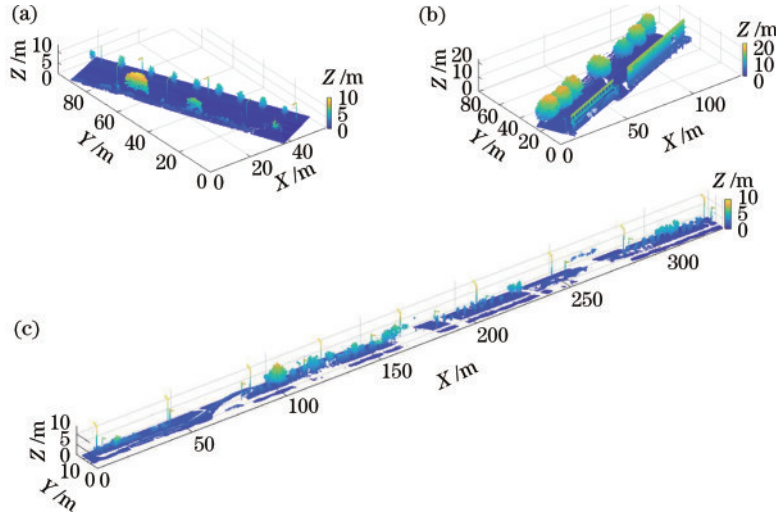


图 3 原始点云数据。(a)数据 1;(b)数据 2;(c)数据 3

Fig. 3 Raw point cloud data. (a) Data 1; (b) data 2; (c) data 3

3.2 实验过程和结果

首先结合路灯高度及其所处道路环境,通过设置分类阈值参数值 h_1 和 h_2 ,利用 CSF 算法将原始点云分为灯头层、灯杆层和地面层。数据 1 中路灯较高,灯头部分距离地面 8 m 以上,故将 h_1 设置为 8 m,把距离模拟地面 8 m 以上的点云分割到灯头层,8 m 以下的点云分割到伪地面层;将 h_2 设置为 4.5 m,把伪地面层中距离模拟地面 4.5 m 以上的点云分割到灯杆层,4.5 m 以下的点云分割到地面层。数据 2 中道路两侧的路灯高度相差较大,为了保证较低路灯的灯头能够被分割到灯头层,将 h_1 设置为 3 m,把距离模拟地面 3 m 以上的点云分割到灯头层,3 m 以下的点云分割到伪地面层;将 h_2 设置为 2 m,把伪地面层中距离模拟地面 2 m 以上的点云分割到灯杆层,2 m 以下的点云分割到地面层。同理,对于数据 3, h_1 设置为 7 m, h_2 设置为 5 m。

然后对灯杆层点云进行连通域分析,按照 2.1 节的参数设置原则,将数据 1 中八叉树层次设为 6 层,对应的体元大小为 1.5 m,每类最小点数设置为 50;将数据 2 中八叉树层次设为 8 层,对应的体元大小为 0.5 m,每类中的最小点数设置为 10;将数据 3 中八叉树层次设为 10 层,对应的体元大小为 0.3 m,每类中的最小点数设置为 100。之后将分析得到的每个连通域作为一个聚类输出。因灯杆直径一般为 0.1~0.2 m,故将阈值下界设为 0.1 m,阈值上界设为 0.2 m,将满足 $0.1 \text{ m} < d_i < 0.2 \text{ m}$ 的类提取出来作为疑似灯杆类,

其中可能包含少数与灯杆矩形对角线长度相似的其他类。在此基础上,对疑似灯杆类中的点云进行最小二乘圆拟合,设置拟合圆半径与灯杆半径差异阈值为 $\frac{\sqrt{2}-0.2}{5}$ m,将满足 $|r_i - 0.1| > \frac{\sqrt{2}-0.2}{5}$ m 的类删除,剩下的便是灯杆类。最后基于灯杆类拟合圆的圆心坐标 (x_i, y_i) 和 1.5 倍半径,按式(2)搜索拟合圆范围内的点云,提取得到完整的灯杆点云。因数据 1 和数据 3 中路灯上方无任何遮挡,故从原始点云中对灯杆进行搜索;而数据 2 中路灯上方有树冠遮挡,故从伪地面层点云中对灯杆进行搜索。图 4 为灯杆点云的提取结果。

接下来同样按照 2.1 节的参数设置原则对灯头层点云进行连通域分析和聚类输出。数据 1 中八叉树层次设为 6 层,对应的体元大小为 1.4 m,每个类中的最小点数 n 设置为 50;数据 2 中八叉树层次设为 9 层,对应的体元大小为 0.3 m,每个类中的最小点数 n 设为 40;数据 3 中八叉树层次设为 10 层,对应的体元大小为 0.3 m,每个类中的最小点数设为 100。然后求取灯头层中每个类的平面中心 $(x_{\text{mean}}, y_{\text{mean}})$,利用式(3)计算灯杆中心 (x_i, y_i) 到每个聚类中心 $(x_{\text{mean}}, y_{\text{mean}})$ 的相对距离 d_r ,则满足 $d_r < L_{\text{thred}}$ 的类别即为灯头类。其中数据 1 中灯头较长, L_{thred} 取 3 m;数据 2 和数据 3 中灯头较短, L_{thred} 取 1 m。灯头提取结果如图 5 所示。最后将灯杆点云和灯头点云合并,提取完整的路灯点云,最终结果如图 6 所示。

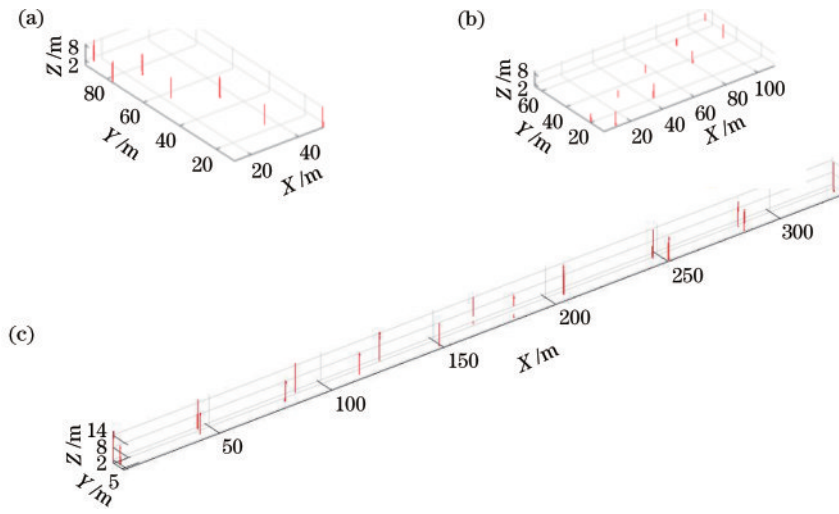


图 4 提取到的灯杆点云。(a)数据 1;(b)数据 2;(c)数据 3

Fig. 4 Extracted pole point cloud. (a) Data 1; (b) data 2; (c) data 3

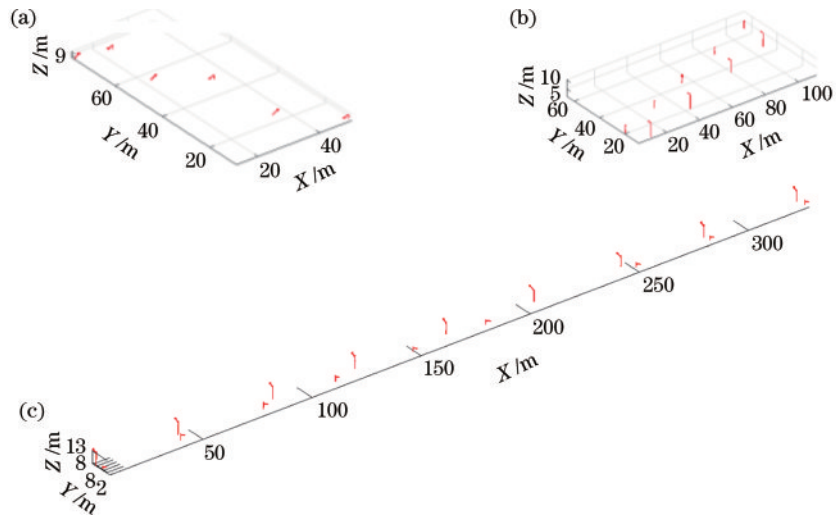


图 5 提取的灯头点云。(a)数据 1;(b)数据 2;(c)数据 3

Fig. 5 Extracted lamp burner point cloud. (a) Data 1; (b) data 2; (c) data 3

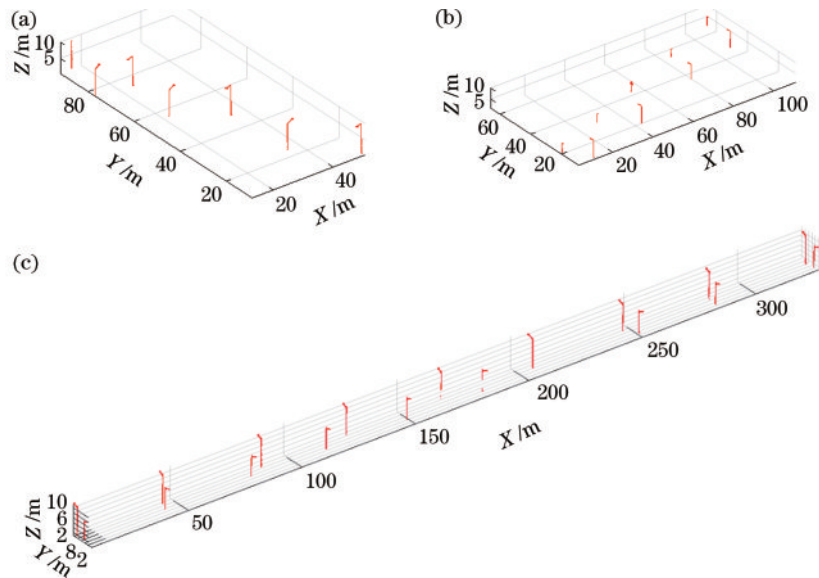


图 6 提取的完整路灯点云。(a)数据 1;(b)数据 2;(c)数据 3

Fig. 6 Extracted entire street lamp point cloud. (a) Data 1; (b) data 2; (c) data 3

3.3 实验结果分析

首先进行定性分析,对提取的路灯点云(红色)与原始数据进行叠加显示,结果如图 7 所示。图 7(a)为数据 1 的叠加图,可见所提方法将路段中的路灯全部提取出来,最左端的路灯由于原始数据中缺失灯头,因此提取出的路灯也没有灯头。图 7(b)为数据 2 的叠加图,可以看出其中有一个路灯漏提,而其近旁一个交通杆被当成路灯提取出来,该错误在图 7(b)中被放大显示。该处有两个与路灯位置非常接近的交通杆,因为此处灯杆上有附属部件,而分类阈值参数 h_1 恰巧从路灯附属部件位置将路灯一分为二,导致灯杆在 xoy 投

影面的矩形对角线长度不在灯杆提取阈值范围内,被当作其他类删除;而其邻近的交通标志杆的头部被分割到灯头层,杆部被分割到灯杆层,其在平面上投影矩形的对角线长度在灯杆提取阈值范围内,故被当成灯杆类提取出来。图 7(c)为数据 3 的叠加图及漏提取路灯所在位置的放大图,可以看出,漏提取的路灯较同侧路灯高度略小,导致 h_1 值从该路灯灯头将其一分为二,灯杆在 xoy 投影面的矩形对角线长度不在灯杆提取阈值范围内,被当作其他类删除。由此可见,分类阈值参数 h_1 的设定对路灯的正确提取有一定影响。

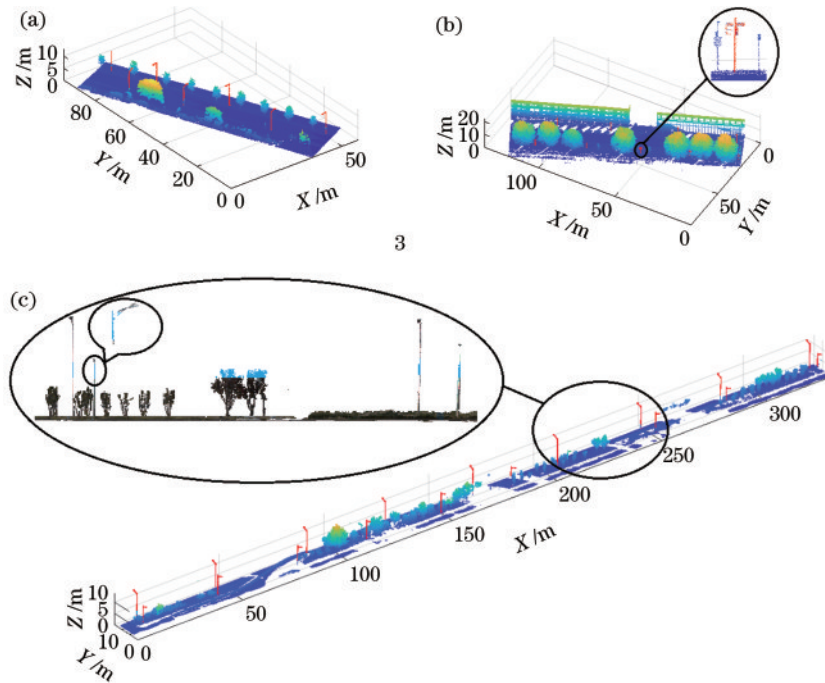


图 7 路灯与原始点云叠加图。(a)数据 1 路灯叠加图;(b)数据 2 路灯叠加图及错误提取路灯的放大图;
(c)数据 3 路灯叠加图及漏提取路灯的放大图

Fig. 7 Overlay of streetlights and original point cloud. (a) Street lamp overlay of data 1; (b) street lamp overlay of data 2 and enlarged view of wrongly extracted street lamp; (c) street lamp overlay of data 3 and enlarged view of missed extracted street lamp

然后进行定量分析,借鉴文献[27]的评估方法,采用完整率(completeness)、正确率(correctness)、质量(quality)和 F1 指数(F1)进行定量评价。完整率的计算公式为 $R_{\text{completeness}} = N_{\text{TP}} / (N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}})$,正确率的计算公式为 $R_{\text{correctness}} = N_{\text{TP}} / (N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}})$,质量的计算公式为 $Q_{\text{quality}} = N_{\text{TP}} / (N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}} + N_{\text{FN}})$,F1 指数的计算公式为 $F_1 = 2 \times R_{\text{completeness}} \times R_{\text{correctness}} / (R_{\text{completeness}} + R_{\text{correctness}})$,其中 N_{TP} 表示正确提取的路灯个数, N_{FP} 表示错误提取的路灯个数(即不是路灯却被当成路灯提取出来), N_{FN} 表示漏提取的路灯个数,统计结果如表 1 所示。由表 1 可知:所提方法对数据 1 中路灯的正确率、完整率、质量和 F1 值均为 100%;对数据 2 中路灯的正确率、完整率、F1 值均为 87.50%,质量为 77.78%;对数据 3 中路灯提取的正确率为 100%,完整率和质量均为 94.74%,F1 值为 97.30%。可见所提方法对路灯的提取效果较好,在路

灯相对于周围地物较独立的场景中,提取的正确率、完整率、质量和 F1 值可达 100%;在路灯周围环境较复杂的场景中,比如道路两侧路灯高度不一致且路灯上下部有遮挡的情况下,也能取得不错的提取效果。

将所提方法的路灯提取结果与文献[11]方法的提取结果(如表 2 所示)进行对比。由表 1 和表 2 可知,对于三组数据,所提方法提取的路灯在完整率、正确率、质量和 F1 指数 4 个方面均优于文献[11]方法的提取结果,分别至少提升 9.72 个百分点、9.72 个百分点、14.14 个百分点和 9.72 个百分点(对于数据 1 的完整性,两种方法均为 100%),可见所提方法的稳健性更强。对所提方法和文献[11]方法的计算效率进行对比,对于数据 1,所提方法耗时降低了 7%,但对于数据 2 和数据 3,所提方法耗时均提高了近 50%,可见所提方法在时间复杂度上还需要进一步优化。

表 1 所提方法的路灯提取结果定量评价

Table 1 Quantitative evaluation of street lamp extraction results of the proposed method

Data	TP	FP	FN	Proposed method				
				Completeness / %	Correctness / %	Quality / %	F1 / %	Time consuming / min
Data 1	7	0	0	100.00	100.00	100.00	100.00	0.66
Data 2	7	1	1	87.50	87.50	77.78	87.50	2.82
Data 3	18	0	1	94.74	100.00	94.74	97.30	3.31

表 2 文献[11]方法的路灯提取结果定量评价

Table 2 Quantitative evaluation of street lamp extraction results of method in Ref.[11]

Data	TP	FP	FN	Method in Ref. [11]				
				Completeness / %	Correctness / %	Quality / %	F1 / %	Time consuming / min
Data 1	7	2	0	100.00	77.78	77.78	87.50	0.71
Data 2	7	2	2	77.78	77.78	63.64	77.78	1.26
Data 3	15	1	4	78.95	93.75	78.95	85.72	1.76

4 结 论

以车载激光扫描点云数据为研究对象,提出一种顾及相对距离的车载点云路灯分层提取方法。通过对提取结果与原始数据进行叠加显示,定性评价路灯的提取效果,并对提取出错的原因进行分析。所提方法对数据 1 路灯提取的正确率、完整率、质量和 F1 指数均为 100%;对数据 2 提取的正确率、完整率和 F1 指数均为 87.50%,质量为 77.78%;对数据 3 路灯提取的完整率、质量均为 94.74%,正确率为 100%,F1 指数为 97.30%。定性和定量实验结果表明:所提方法对遮挡少、分布独立的路灯的提取效果比较理想;同时对道路两侧路灯高度不一致、路灯上方有树木遮挡的情况也能取得不错的提取效果。

参 考 文 献

- [1] 李赞. 基于车载激光点云的杆状交通设施提取与分类研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
Li Z. A study of pole-like traffic facilities extraction and classification based on mobile laser point clouds[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.
- [2] 李永强, 董亚涵, 张西童, 等. 车载 LiDAR 点云路灯提取方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2): 247-259.
Li Y Q, Dong Y H, Zhang X T, et al. Point cloud information extraction for streetlights with vehicle-borne LiDAR[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(2): 247-259.
- [3] 张文武, 李光太, 徐全鹏, 等. 车载激光点云中道路路灯提取方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 58-67.
Zhang W W, Li G T, Xu Q P, et al. Road streetlamp extraction method in mobile laser scanning point cloud[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1): 58-67.
- [4] 刘力荣, 唐新明, 赵文吉, 等. 基于影像与激光数据的小交标检测与地理定位[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0910002.

Liu L R, Tang X M, Zhao W J, et al. Detection and geolocalization of small traffic signs based on images and laser data[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0910002.

- [5] 胡啸. 基于车载激光扫描数据的道路要素提取方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
Hu X. Research on road element extraction method of vehicle-borne laser scanning data[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [6] 李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310001.
Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research on space-borne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310001.
- [7] Chen Y Z, Zhao H J, Shibasaki R. Amobile system combining laser scanners and cameras for urban spatial objects extraction[C]//2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, August 19-22, 2007, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2007: 1729-1733.
- [8] Barber D, Mills J, Smith-Voysey S. Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, 63(1): 128-141.
- [9] 胡杰, 刘汉, 徐文才, 等. 基于三维激光雷达的道路障碍物目标位姿检测算法[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2410001.
Hu J, Liu H, Xu W C, et al. Position detection algorithm of road obstacles based on 3D LiDAR[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2410001.
- [10] Wang Z, Zhang L Q, Fang T, et al. A multiscale and hierarchical feature extraction method for terrestrial laser scanning point cloud classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(5): 2409-2425.
- [11] 李永强, 杨莎莎, 李框宇, 等. 车载激光扫描数据中杆状地物提取[J]. 测绘科学, 2015, 40(8): 42-46.

- Li Y Q, Yang S S, Li K Y, et al. Extraction of rod-like objects from vehicle-borne LiDAR data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, 40(8): 42-46.
- [12] Rodríguez-Cuenca B, García-Cortés S, Ordóñez C, et al. Automatic detection and classification of pole-like objects in urban point cloud data using an anomaly detection algorithm[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 12680-12703.
- [13] 谭贲, 钟若飞, 李芹. 车载激光扫描数据的地物分类方法[J]. *遥感学报*, 2012, 16(1): 50-66.
Tan B, Zhong R F, Li Q. Objects classification with vehicle-borne laser scanning data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 50-66.
- [14] Yan W Y, Morsy S, Shaker A, et al. Automatic extraction of highway light poles and towers from mobile LiDAR data[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 162-168.
- [15] Yang B S, Dong Z, Zhao G, et al. Hierarchical extraction of urban objects from mobile laser scanning data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 99: 45-57.
- [16] 董震, 杨必胜. 车载激光扫描数据中多类目标的层次化提取方法[J]. *测绘学报*, 2015, 44(9): 980-987.
Dong Z, Yang B S. Hierarchical extraction of multiple objects from mobile laser scanning data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(9): 980-987.
- [17] Lehtomäki M, Jaakkola A, Hyypä J, et al. Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data[J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(3): 641-664.
- [18] Wu F, Wen C L, Guo Y L, et al. Rapid localization and extraction of street light poles in mobile LiDAR point clouds: a supervoxel-based approach[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(2): 292-305.
- [19] Yu Y T, Li J, Guan H Y, et al. Bag of contextual-visual words for road scene object detection from mobile laser scanning data[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(12): 3391-3406.
- [20] Lang A H, Vora S, Caesar H, et al. PointPillars: fast encoders for object detection from point clouds[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 12689-12697.
- [21] Graham B, Engelcke M, van der Maaten L. 3D semantic segmentation with submanifold sparse convolutional networks[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. New York: IEEE Press, 2018: 9224-9232.
- [22] Meng H Y, Gao L, Lai Y K, et al. VV-net: voxel VAE net with group convolutions for point cloud segmentation [C]//2019 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), October 27-November 2, 2019, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 2019: 8499-8507.
- [23] 杨必胜, 韩旭, 董震. 适用于城市场景大规模点云语义标识的深度学习网络[J]. *测绘学报*, 2021, 50(8): 1059-1067.
Yang B S, Han X, Dong Z. A deep learning network for semantic labeling of large-scale urban point clouds[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1059-1067.
- [24] Yu Y T, Li J, Guan H Y, et al. Semiautomated extraction of street light poles from mobile LiDAR point-clouds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1374-1386.
- [25] Yu Y T, Li J, Guan H Y, et al. Three-dimensional object matching in mobile laser scanning point clouds[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 492-496.
- [26] Yu T S, Wang R S. Scene parsing using graph matching on street-view data[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, 145: 70-80.
- [27] Yu Y T, Li J, Guan H Y, et al. Automated extraction of urban road facilities using mobile laser scanning data[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(4): 2167-2181.
- [28] Zhang W M, Qi J B, Wan P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 501.
- [29] 王鹏, 刘如飞, 马新江, 等. 一种车载激光点云中杆目标自动提取方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(7): 1035-1042.
Wang P, Liu R F, Ma X J, et al. An automatic extraction method for pole-like objects from vehicle-borne laser point cloud[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1035-1042.