

文章编号: 1001-5078(2024)03-0396-08

· 激光应用技术 ·

## 基于车载激光点云的城市道路标线提取方法

周松<sup>1,2</sup>, 刘荣<sup>1,2</sup>, 陈志高<sup>1,2</sup>, 段炬奎<sup>3</sup>

(1. 东华理工大学测绘与空间信息工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 江西 南昌 330013; 3. 云南省核工业二〇九地质大队, 云南 昆明 650092)

**摘要:** 针对车载激光点云道路标线反射强度特性, 提出了一种基于车载激光点云的城市道路标线提取方法。具体而言, 首先提出一种联合布料模拟滤波和高差偏度平衡的地面滤波方法, 利用偏度平衡滤波的自适应性, 剔除布料滤波后残留的低矮植被的问题; 随后利用基于法向量密度聚类以提取路面点云, 并通过反距离加权插值将路面点云转为强度特征图; 为了缓解标线提取出的锯齿状现象, 引入快速引导滤波来平滑道路标线的边缘信息; 最后采用最大熵阈值分割和形态学比值滤波对道路标线进行精化处理。实验表明, 该方法能够有效地提取出道路标线点云, 提取的平均召回率为 80.98%, 平均准确率为 96.89%, 平均综合评定指标为 88.19%, 能够利用道路标线点云强度信息较为完整地提取出道路标线点云。

**关键词:** 点云; 布料模拟; 偏度平衡; 反距离加权插值; 快速引导滤波

中图分类号: TN958.98; TP391.14 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.010

## Urban road marking extraction method based on vehicle laser point cloud

ZHOU Song<sup>1,2</sup>, LIU Rong<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-gao<sup>1,2</sup>, DUAN Ju-kui<sup>3</sup>

(1. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;  
2. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake of Ministry of Natural Resources, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;  
3. No. 209 Geological Party, Geological Bureau of Yunnan Nuclear Industry, Kunming 650092, China)

**Abstract:** Aiming at the reflection intensity characteristics of road markings from vehicle-mounted laser point cloud, an urban road marking extraction method based on vehicle laser point cloud is proposed. Firstly, a ground filtering method combining cloth simulation filtering and elevation skewness balance is presented to take advantage of the adaptability of skewness balance filtering to eliminate the problem of low vegetation remaining after cloth filtering. Then, the normal vector density clustering is adopted to extract the road point cloud, and the road point cloud is converted into an intensity feature map by inverse distance weighted interpolation. In order to alleviate the jaggedness extracted from the markers, fast bootstrap filtering is introduced to smooth the edge information of the road markers. Finally, the maximum entropy threshold segmentation and morphological ratio filtering are used to refine the road marker. The experimental results show that the method can effectively extract the road marking point cloud, the average recall rate of extraction is 80.98%, the average accuracy rate is 96.89%, and the average comprehensive evaluation index is 88.19% and it can use the road marking point cloud intensity information to extract the road marking point cloud in a more complete way.

**Keywords:** point cloud; cloth simulation algorithm; skewness balancing algorithm; inverse distance weighted; fast guided filtering

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 42266006; No. 41806114) 资助。

作者简介: 周松 (1997 -), 男, 硕士研究生, 主要从事激光点云数据处理研究。E-mail: zhou\_1005@163.com

通讯作者: 刘荣 (1965 -), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事摄影测量与遥感研究。E-mail: rliu@ecit.edu.cn

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-08-05

## 1 引言

道路作为现代交通基础设施之一,对于人类社会的发展和经济的繁荣起着重要的作用。随着数字城市和智能城市的发展,构建语义标记的三维(3D)城市模型变得越来越重要,其中道路布局是提供对整个城市全面了解的主要组成部分之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着传感器和人工智能技术的不断发展,自动驾驶等相关技术也在不断提高和完善。车载激光扫描仪作为一种精密的激光传感装置,能够更加迅速、精确地获得道路表面的三维点云数据,为道路几何信息的获取提供了更多的可探索的方式<sup>[2]</sup>。

高精度地图作为辅助自动驾驶的重要数据,能够提供更丰富的道路和交通信息,包括车道、路口、限速、交通标识、交通信号灯等<sup>[3]</sup>。道路标线作为高精度地图的一个关键特征,是道路上用涂料绘制的引导车辆规范形式的交通信号标线,由于其与路面材质的不同,导致道路标线的反射率远高于路面<sup>[4]</sup>。因此,目前许多学者正在研究利用道路标线点云的强度特征来提取道路标线。Mao<sup>[5]</sup>等人利用点云强度构建 Logistic 回归模型进行阈值分割提取道路标线; Yan<sup>[6]</sup>等人首先利用强度特征图中道路标线的边缘特性进行边缘检测和连通域分析,再根据高斯混合模型对提取的结果进行去噪。Yao<sup>[7]</sup>等人利用积分图分块思路以实现自适应阈值来提取道路标线。但在局部范围内若都为标线或路面时,会造成一定的错提和漏提现象,并且受图像边缘像素影响,其图像周边出现一圈边界噪声。Li<sup>[8]</sup>等人针对分块自适应阈值分割面临的纯、杂块问题,提出了一种顾及全局阈值和局部阈值的动态阈值分割方法。

由于车载激光点云强度分布不均匀,传统的道路标线提取方法容易出现标线缺失和噪声问题,从而影响了车道保持和车道级别决策的精度。为了解决这一问题,本文提出了一种在强度特征图上结合快速引导滤波来增强道路标线的轮廓信息并平滑标线内部的像素,从而在一定程度上抑制了稀疏区域点云内部标线存在缺失的问题,提高道路标线点云的提取精度和效果。

## 2 道路标线提取算法

基于车载激光点云的城市道路标线提取方法,提取步骤主要分为三部分:地面点提取;路面点提取;道路标线提取。整体道路标线点云提取的流程如图1所示。

### 2.1 地面点提取

#### 2.1.1 布料模拟滤波(CSF)

首先需要原始点云进行滤波操作以提取出地面点数据,本文先使用“布料模拟滤波”对原始点云

进行粗提取。布料模拟滤波(Cloth Simulation Filter, CSF)最早是由 Zhang<sup>[9]</sup>等人于2016年提出,如图2所示。具体思想是通过模拟一张具有刚性的“布料”自由落在倒置的点云上,分析布料粒子在运动过程中的受力情况,以布料粒子与地面点云的间距来提取接地点。在此过程中,布料粒子的位置由外力 and 内力共同控制:

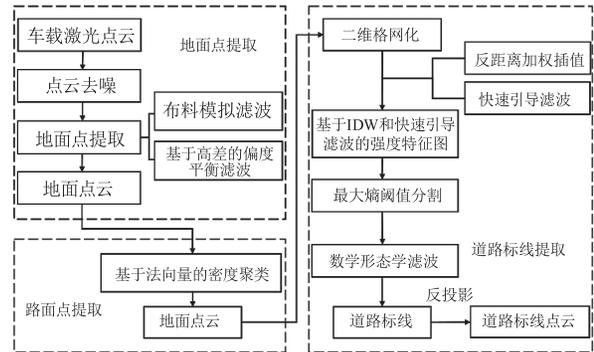


图1 道路标线提取流程图

Fig. 1 Road marking extraction flow chart

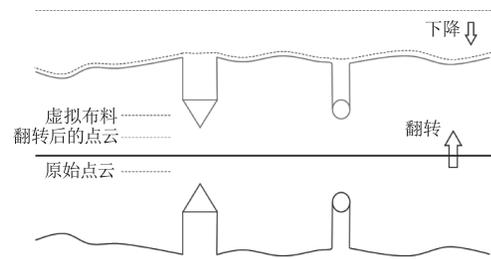


图2 CSF 滤波原理图

Fig. 2 CSF filtering schematic diagram

$$m \frac{\partial X(t)}{\partial t^2} = F_{\text{ext}}(X, t) + F_{\text{int}}(X, t) \quad (1)$$

其中,  $X(t)$  为粒子在  $t$  时刻的位置;  $F_{\text{ext}}(X, t)$  代表的外力由重力和碰撞力所产生;  $F_{\text{int}}(X, t)$  代表的内力由粒子间相互连接所产生。

在外部重力作用下,粒子随时间向下运动:

$$X(t + \Delta t) = 2X(t) - X(t - \Delta t) + \frac{G}{m}\Delta t^2 \quad (2)$$

其中,  $\Delta t$  为粒子移动的时间步长;  $G$  为万有引力常数;  $m$  为粒子的质量。

当粒子与点云碰撞,即产生碰撞力的位移:

$$\vec{d} = \frac{1}{2}b(\vec{p}_i - \vec{p}_0) \cdot \vec{n} \quad (3)$$

其中,  $\vec{d}$  为粒子移动的位移;若粒子为可移动粒子时,  $b$  取 1,反之  $b$  取 0;  $\vec{p}_0$  为粒子移动前的位置;  $\vec{p}_i$  为  $\vec{p}_0$  的相邻粒子的位置;  $\vec{n} = (0, 0, 1)^T$ , 以确保粒子只能在垂直的方向上移动。

#### 2.1.2 偏度与峰度

偏度(skewness)和峰度(kurtosis)是统计学中用于描述数据分布形态的指标。偏度是用来描述数

据分布偏斜程度的统计指标,而峰度则描述了数据分布的峰态或扁平度。若偏度的绝对值较大,则说明数据分布比较不对称;若峰度的绝对值较大,则说明数据分布比较尖锐或平坦<sup>[10]</sup>。偏度值一般用  $sk$  表示,它的计算公式为:

$$sk = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i - \mu_a)^3 \quad (4)$$

其中,  $N$  为样本  $s_i$  的总数,  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;  $\sigma$  和  $\mu_a$  分别表示为样本的标准偏差和算数平均值。而  $\sigma$  和  $\mu_a$  计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i - \mu_a)^2} \quad (5)$$

$$\mu_a = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N s_i \quad (6)$$

当偏度值  $sk > 0$  代表着样本呈现正偏态,当  $sk < 0$  代表着样本呈现负偏态,  $|sk|$  越大,样本偏离正态分布的程度越大,而正态分布的偏度值为 0。图 3 是关于偏度和正态分布之间的示意图。

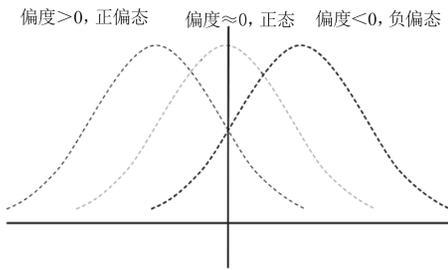


图 3 偏态分布示意图

Fig. 3 Diagram of skewness distribution

峰度是一种数学统计量,用来描述数据分布形态的陡峭和末端的粗细程度。它反映了数据集的对称性、峰态性和尾重性,并可用于比较不同数据集之间的形态特征。具有高峰度的数据分布更加陡峭和尖锐,而低峰度的数据分布更加平坦和广泛。峰度一般表示为  $ku$ , 它的计算公式为:

$$ku = \frac{1}{N \cdot \sigma^4} \cdot \sum_{i=1}^N (s_i - \mu_a)^4 \quad (7)$$

### 2.1.3 联合布料模拟滤波和高差偏度平衡地面滤波

布料模拟滤波(CSF)是目前简便且高效的地面滤波技术,它能够很好将高大建筑和树木与地面分离开来,但布料模拟滤波往往对低矮植被的过滤效果不佳,因此采用基于高差偏度平衡算法来过滤掉一些低矮植被和地物。

偏度平衡算法地面滤波最早由 Bartels 于 2006 年提出,通过调节点云高程,使其偏度达到平衡,从而分离出地面点<sup>[11]</sup>。随后 Bartels 对其进行了改进,使其适应于斜坡的地形<sup>[12]</sup>。

偏度平衡滤波算法是一种全局滤波,它遵循两个假设,假设地面点的分布是服从正态分布的,而非地面点的存在会使得数据呈现偏态分布。通过迭代计算,不断剔除较大高程的点云来“校正”高程数据的偏度值,从而保留地面点云。

考虑到偏度平衡算法对地形起伏较大区域的不适用性,Cheng<sup>[13]</sup>对其进行改进,首先利用薄板样条插值生成参考的拟合曲面,随后将点云的高程转为高差,再运用偏度平衡滤波自动去除非地点。

而本文为去除布料模拟滤波残留的低矮植被点云,避免曲面拟合过程中所产生的误差,直接从格网出发,将高程偏度改为高差偏度。具体步骤如下:

(1)首先在  $XOY$  平面上建立若干个  $D \times W$  的格网,将点云投影到格网中进行划分。根据下列公式,将它投影到对应的网格中:

$$\begin{cases} I = \text{floor}\left(\frac{X_i - X_{\min}}{D}\right) + 1 \\ J = \text{floor}\left(\frac{Y_i - Y_{\min}}{W}\right) + 1 \end{cases}, i \in [1, N] \quad (8)$$

$$P_{I,J} = \{p_i(x_i, y_i, z_i)\}, p_i \in C_p \quad (9)$$

式中,  $(I, J)$  是格网的索引;  $N$  为点云的总数;其中最小的横坐标值为  $X_{\min}$ , 最小的纵坐标值为  $Y_{\min}$ ;  $\text{floor}$  为向下取整符号;  $C_{I,J}$  是包含点云的空间格网,  $P_{I,J}$  是  $C_{I,J}$  中的点云投影到格网  $C_{I,J}$  的点云数据集;  $D$  和  $W$  代表着格网的尺寸大小。

(2)计算格网内点云的最低高程,再将格网内各个点云的高程减去最低点高程,得到高差。将全部点云的高程全部替换为高差。因此可以将式(4)改为式子(11),用高差进行偏度平衡滤波:

$$\begin{aligned} \Delta h_i &= z_{i,j}^i - z_{i,j}^{\min}, \{C_i, i \in [1, N]\} C_i \\ &= (x_i, y_i, z_i) \end{aligned} \quad (10)$$

$$sk = \frac{1}{N \cdot \sigma^3} \cdot \sum_{i=1}^N (\Delta h_i - \mu_a)^3 \quad (11)$$

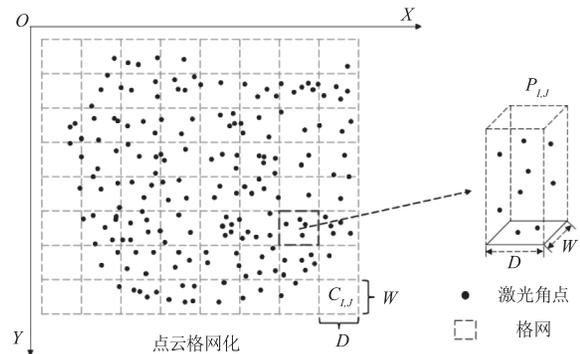


图 4 点云格网化

Fig. 4 Point cloud grid

(3) 经过高差偏度平衡滤波后的点云会被过滤成很多个“薄片”，符合地面点云的特征。高差偏度平衡滤波算法的流程如图 5 所示。

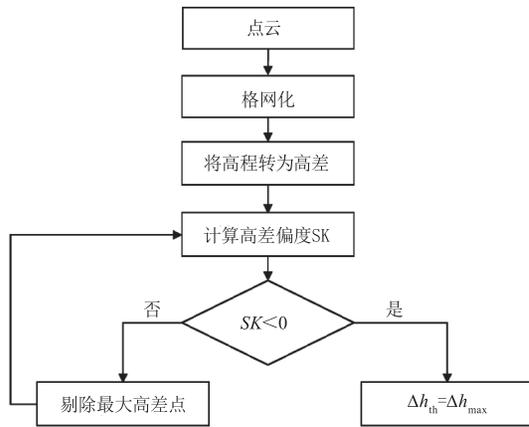


图 5 高差偏度平衡滤波流程图

Fig. 5 Flow chart of height difference skew balancing filtering

## 2.2 基于法向量密度聚类的路面提取

经过 CSF 滤波和高差偏度平衡滤波后获得的地面点云，且路缘石的垂直面会被高差偏度平衡滤波给过滤掉。根据路面点云的分布一般较为平坦的特性，其法向量的方向与重力方向的夹角较小，而非平坦区域点云的法向量会出现发散现象，如图 6 所示为点云的法向量分布特征。

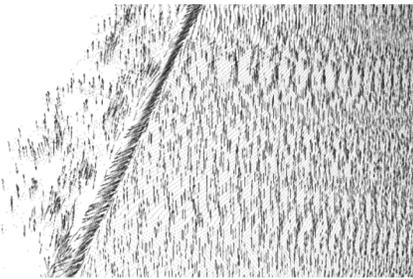


图 6 点云的法向量分布特征

Fig. 6 Normal vector distribution characteristics of point cloud

因此，本文采用基于法向量密度聚类的方法提取路面点云，首先根据各点的邻域点云的空间分布特征计算出各点的法向量，对接近垂直的法向量的点云进行聚类，并取最大簇的类别为路面点云的集合。

基于密度的空间聚类 (DBSCAN)<sup>[14]</sup> 是一种根据点与点之间的密度关系来进行空间聚类的无监督

聚类方法 (如图 7 所示)，该算法的基本思想是，如果一个点的邻域内包含的数据点数量达到一定的阈值，则该点属于一个簇；如果一个点的邻域内的数据点数量较少，则该点为噪声点或边缘点。因此该算法通过调节两个参数来控制：邻域半径  $\varepsilon$  和最少点数  $T_{\min}$ 。DBSCAN 算法的基本原理如下：

(1) 邻域半径  $\varepsilon$ ：空间中某点  $p_i$  半径邻域范围。

(2) 核心点：如果空间中某点邻域半径内的点数大于或等于最少点数  $T_{\min}$ ，则称该点为核心点。

(3) 密度直达：对于样本点  $p_i$ ，若点  $a$  在样本点  $p_i$  的邻域范围内，则点  $a$  就是点  $p_i$  的密度直达。

(4) 密度可达：对于一系列的点  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ，若  $p_1$  到任意点  $p_{i+1}$  都密度直达，则  $p_1$  到  $p_n$  为密度可达。

(5) 密度相连：若存在点  $p_i$  属于  $D$ ，使得  $p_i$  到  $a$  和  $b$  都密度可达，则  $a$  和  $b$  密度相连。

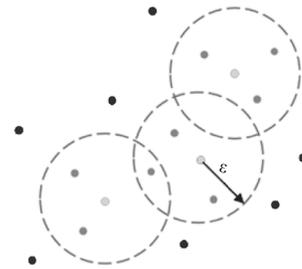


图 7 DBSCAN 原理图

Fig. 7 DBSCAN schematic diagram

## 2.3 基于强度特征图的道路标线提取

### 2.3.1 生成强度图

一旦路面提取出来后，即可针对路面点云进行道路标线的提取，由于绘制道路标线的材料的特性，导致其标线相对于路面而言有着较强的反射率。因此充分考虑道路标线点云强度特性，将点云通过反距离加权插值<sup>[15]</sup> (Inverse Distance Weighted, IDW) 算法转为强度特征图。

IDW 算法是根据待插值点与邻域点的距离来控制权重占比，距离待插值点越近其权重占比越高，距离越远其权重占比越低，权重占比与距离呈现反函数关系。

因此将强度特征图中每个像素点的位置作为待插值点，通过邻域点云的强度值反距离加权出待插值点处的强度值。反距离加权插值原理如图 8 所示。其中距离  $d_{(m,n,k)}$  的计算公式如下：

$$d_{(m,n,k)} = \sqrt{\left(X_k - \left(X_{\min} + \frac{2m-1}{2} \cdot R_{\text{pixel}}\right)\right)^2 + \left(Y_k - \left(Y_{\min} + \frac{2n-1}{2} \cdot R_{\text{pixel}}\right)\right)^2} \quad (12)$$

其中， $X_{\min}$  和  $Y_{\min}$  为点云最小的横纵坐标值； $m$  和  $n$  代表横纵坐标上格网的索引； $k$  为邻域点的数量； $R_{\text{pixel}}$  为强度图的分辨率大小； $(X_k, Y_k)$  为格网点一

定范围内点云的坐标。

为加速算法的计算速度和格网阈值的选择，本文采用格网 24 邻域进行插值计算。计算每个点与

其邻域内点的距离  $d_{(m,n,k)}$ , 再根据距离进行反距离加权插值强度值, 最后将插值得到的强度值归一化到对应的图像像素中:

$$I_{(m,n)} = \frac{\sum \frac{I_k}{d_{(m,n,k)}}}{\sum \frac{1}{d_{(m,n,k)}}} \quad (13)$$

$$I_{(m,n),\text{normal}} = \frac{I_{(m,n)} - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times 255 \quad (14)$$

式中,  $I_k$  为各点云的强度值;  $I_{(m,n)}$  为插值后的强度值;  $I_{(m,n),\text{normal}}$  为将强度值归一化后转为灰度值。

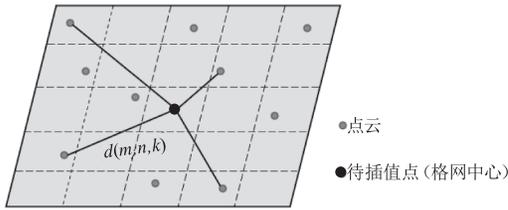


图 8 反距离加权插值

Fig. 8 Inverse distance weighted interpolation

### 2.3.2 快速引导滤波

引导滤波<sup>[16]</sup> (Guided Filtering, GF) 是一种能够保留图像边缘信息的滤波技术, 常用于对数字图像进行平滑处理。与传统的线性滤波器不同, 引导滤波可以通过一个引导图像来控制滤波过程, 从而在平滑图像的同时保留其细节和边缘信息。在引导滤波的过程中, 引导图像会被用来计算每个像素的权重, 这些权重决定了滤波器对于该像素的处理程度。引导图与输出图存在局部的线性关系:

$$Q_i = a_k G_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (15)$$

式中,  $Q_i$  为输出图像;  $G_i$  为引导图像;  $w_k$  为局部窗口;  $a_k$  和  $b_k$  是局部线性模型中的参数。若引导图中存在边缘, 则输出图像将保留其边缘信息, 于是需要引入一个正则化参数以防止  $a_k$  过大, 得到其损失函数为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k G_i + b_k - I_i)^2 + \epsilon a_k^2) \quad (16)$$

式中,  $I_i$  表示输入的图像;  $\epsilon$  为正则化参数。再采用最小二乘求解  $a_k$  和  $b_k$  得:

$$A_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in w_k} G_i I_i - \mu_k \bar{I}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (17)$$

式中,  $\mu_k$  为引导图在窗口  $w_k$  内得均值;  $\sigma_k^2$  为  $G$  的方差,  $|\omega|$  为窗口  $w_k$  内的像素总数;  $\bar{I}_k$  表示在窗口  $w_k$  内待滤波图像  $I$  的像素的均值。

为了提高引导滤波的计算效率, He<sup>[17]</sup> 等人对其进行了改进, 提出了快速引导滤波 (Fast Guided Filtering, FGF), 首先对图像像素进行下采样, 从而

减少像素点数, 计算出各个值的均值后再进行上采样可以恢复到原来的尺寸大小, 从而减少了计算的复杂性。通过对强度特征图进行快速引导滤波对其进行保边平滑, 以减少毛刺现象并降低局部区域零散点云强度高而引起的噪声。

### 2.3.3 最大熵阈值分割道路标线提取

图像熵是衡量数字图像中信息量的一种指标, 表示图像中像素的不确定性或随机性程度。利用图像最大熵值进行阈值分割最早是由 Kapur<sup>[18]</sup> 提出, 给定一个阈值将图像分为前景  $A$  和背景  $B$ , 使得两部分的熵值之和最大。熵的计算公式为:

$$H = \sum_p p(x) \log_b \frac{1}{p(x)} = - \sum_p p(x) \log_b (p(x)) \quad (18)$$

其中,  $p(x)$  代表阈值分割的前景或背景的像素出现的概率;  $b$  取  $e$  为底。前景熵和背景熵的计算公式如下:

$$H_A = - \sum_{i=1}^T \frac{p(i)}{P_A(T)} \ln \frac{p(i)}{P_A(T)} \quad (19)$$

$$H_B = - \sum_{i=T+1}^{L-1} \frac{p(i)}{P_B(T)} \ln \frac{p(i)}{P_B(T)} \quad (20)$$

式中,  $P_A(T)$  和  $P_B(T)$  表示前景和背景像素的总密度, 且两者之和为 1。因此前景和背景的信息熵之和为:

$$H = H(A) + H(B) \quad (21)$$

通过计算每个灰度级的信息熵之和, 找出最大熵对应的分割阈值即为最佳分割阈值, 即  $T = T_{\max(H_A+H_B)}$ 。

因此对反距离加权插值得出的强度图采用最大熵阈值分割算法, 能够很好的将高灰度值的道路标线提取出来。但由于车载激光点云强度分布的不均匀性以及部分道路标线的磨损, 最大熵阈值分割会在道路标线周边产生部分噪声点。针对其噪声点, 本文采用形态学滤波对其进行去噪处理, 计算每个斑块的面积与周长之比, 设定比值阈值对其噪声进行剔除:

$$\text{ratio} = \frac{\text{Area}}{\text{circumference}} \quad (22)$$

其中,  $\text{Area}$  为每个斑块的面积;  $\text{circumference}$  为每个斑块的周长, 若二者之间的比值小于 3 则将其作为噪声进行剔除。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验数据

本文使用的实验数据是由 AS-900HL 车载激光雷达系统采集的上海市某条 1.3 km 左右的外环高速公路的部分区域。为保证采集过程中点云密度不能过密或过稀, 车速控制在 40 km/h 以下。本文选取三组不同路况的数据进行实验分析 (如图 9 所示), 并将手动提取的结果用于进行效果的验证。

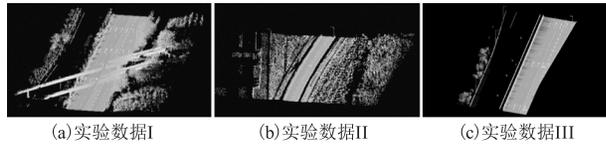


图9 三个路段的车载激光点云数据

Fig. 9 Vehicle laser point cloud data of three road areas

### 3.2 实验结果

首先通过对实验数据点云进行半径滤波去噪,去除离群点,随后联合布料模拟滤波和高差平衡滤波分离出地面点和非地面点,其中布料粒子格网的分辨率设置为0.1 m,距离阈值设置为0.5 m,地面点云的滤波结果如图10所示。可以发现基于高差的平衡滤波将布料模拟滤波后的点云进行了“打薄”,很大程度上剔除了低矮植被等地物。

接着,对地面点利用基于法向量的密度聚类提取出路面点云。其中DBSCAN参数 $\epsilon$ 和 $T_{min}$ 分别为0.1和10,得到的聚类效果如图11所示。在实验数据2中由于道路周边预留的排水沟,使其法向量与路面点云的法向量相差甚微,因此造成了一定的错提现象。

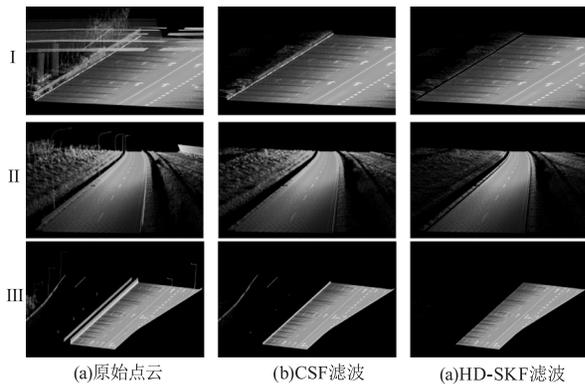


图10 三个路段的地面滤波结果

Fig. 10 Ground filtering results for three sections



图11 三个路段的路面提取结果

Fig. 11 Three road surface extraction results

为选择生成强度特征图的格网尺寸,我们分别采用0.02 m、0.05 m、0.07 m、0.10 m四种不同尺寸的格网进行实验。通过对比发现0.02 m的格网所提取的道路标线更为细腻,如表1所示。因此随后采用0.02 m的分辨率,24邻域进行反距离加权插值生成强度特征图。

通过本文的路面滤波方法能够有效的将路面点云与非路面点云分割开来,为下一步的道路标线提

取提供数据支撑。通过对强度特征图进行快速引导滤波,能够增强道路标线的轮廓信息并平滑标线内部的像素,从而减少道路标线提取时出现的毛刺现象以及路面局部点强度过大而引起的噪声。为进一步提高道路标线提取的效果,引入数学形态学滤波,修复提取过程中产生的噪声和孔洞;最后,根据点云的格网索引反投影到道路标线点云。

表1 不同格网下生成的强度图

Tab. 1 Intensity maps generated under different grids

网格尺寸/m	0.02	0.05	0.07	0.10
强度图				
二值图				

如图12~13所示,通过对比不同方法对道路标线提取的效果进行分析。在强度特征图上引入快速引导滤波前道路标线周围会受其邻域标线点云强度的影响使其产生一定的噪声(#1、#2、#3),而快速引导滤波能够平滑处理强度特征图上梯度突变的标线边缘,有效抑制锯齿状及其边缘噪声;Yao等人所提出的分块自适应阈值的方法,对于小型道路标线的提取效果较好,例如细长的标识线,然而,在处理大型道路标线时,如转向箭头,采用分块的方法会导致其内部都被视为标线像素,从而造成一定程度的漏提(#5)。同时,分块阈值对局部路面强度高点非常敏感,容易产生错误的标线提取结果(#4、#6、#8)。此外,提取过程也易受到强度图边界空像素的影响,形成一圈边缘噪声(#7)。图14展示了完成后的道路标线点云。

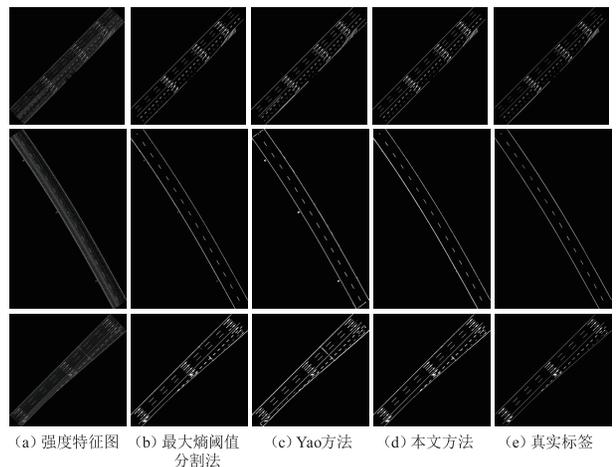


图12 道路标线提取

Fig. 12 Road marking extraction

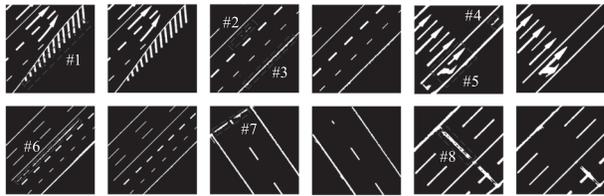


图13 实验结果对比图

Fig. 13 Comparison of experimental results



(a) 实验数据1 (b) 实验数据2 (c) 实验数据3

图14 道路标线点云

Fig. 14 Road marking point cloud

### 3.3 精度分析

为了定量评价道路标线提取的效果,通过手动

处理描绘出真实的路面点云和道路标线点云作为参考数据。通过召回率  $r$ 、完整率  $p$  和综合评定指标  $F$  这三个度量指标对提取的效果进行精度评价<sup>[19]</sup>。三个度量指标的计算公式如下:

$$r = \frac{TP}{TP + FP} \quad (23)$$

$$p = \frac{TP}{TP + FN} \quad (24)$$

$$F = 2 \frac{p \cdot r}{p + r} \quad (25)$$

式中,  $TP$  代表正确提取道路标线的点云数;  $FP$  代表错误提取道路标线的点云数;  $FN$  代表漏提的道路标线的点云数。表2、表3分别展示了路面点云及道路标线点云的提取精度。

表2 路面点云提取精度

Tab. 2 Extraction accuracy of road surface point cloud

数据组	参考点数/个	提取点数/个	TP/个	FP/个	FN/个	$r/\%$	$p/\%$	$F/\%$
数据1	2961332	2950600	2950484	116	10848	99.99	99.63	99.81
数据2	1038234	1013280	1012560	720	25674	99.92	97.53	98.71
数据3	2138571	2133058	2133056	2	5515	99.99	99.74	99.86

表3 道路标线点云提取精度

Tab. 3 Extraction accuracy of road marking point cloud

数据	项目								
	提取方法	参考标线点/个	提取标线点/个	TP/个	FP/个	FN/个	$r/\%$	$p/\%$	$F/\%$
数据1	最大熵阈值分割	197038	237812	195471	42341	1567	82.20	99.20	89.90
	Yao等 <sup>[7]</sup>	197038	273609	196126	77483	912	71.68	99.54	83.34
	本文方法	197038	236687	195497	41190	1541	82.60	99.22	90.15
数据2	最大熵阈值分割	40041	46067	36418	9649	3623	79.05	90.95	84.59
	Yao等 <sup>[7]</sup>	40041	50548	38928	11620	1113	77.01	97.22	85.94
	本文方法	40041	45573	37289	8284	2752	81.82	93.13	87.11
数据3	最大熵阈值分割	224895	281740	221090	60650	3805	78.47	98.31	87.28
	Yao等 <sup>[7]</sup>	224895	311298	214907	96391	9988	69.04	95.56	80.16
	本文方法	224895	281597	221098	60499	3797	78.51	98.31	87.30

## 4 结论

本文提出了一种基于车载激光点云的城市道路标线提取方法。该方法首先联合布料模拟滤波和高差偏度平衡算法对点云进行地面滤波处理,能够去除布料模拟滤波后残留的低矮植被,从而得到精确的地面点云。针对路面点云的平坦特性,采用基于法向量密度聚类的方法提取路面点云,接着利用反距离加权插值将点云转为强度特征图,并对强度特征图进行快速引导滤波以平滑边缘信息,并抑制局部区域稀疏点云强度过高而引起的干扰,再采用最大熵阈值分割和数学形态学比值滤波对提取的道路标线进行提取和精化,最后将提取结果反投影回点云数据。

本文采用三份不同路况的道路数据进行测试,

得出本文算法提取道路标线点云的平均召回率为80.98%,平均准确率为96.89%,平均综合评定指标为88.19%。较直接对强度特征图进行处理有较好的提升,能够有效的改善强度图中标线灰度不均匀的现象。为自动化驾驶服务的高精度地图的制作提供一定的应用价值。

本文只局限于对道路标线的点云进行提取,未能对提取的结果进行矢量化和分类。因此后续的研究将针对道路标线点云的矢量化和分类展开进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Zhang Xinchang, Li Shaoying, Zhou Qiming, et al. The rationale and innovative thinking of building Digital Twin

- City[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(3):147-152,168. (in Chinese)
- 张新长,李少英,周启鸣,等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学, 2021, 46(3):147-152,168.
- [2] Wang Guo, Wang Cheng, Zhang Zhenxin, et al. Single tree segmentation method of urban distributing belt based on vehicle-borne laser point cloud data[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(11):1333-1337. (in Chinese)
- 王果,王成,张振鑫,等. 利用车载激光点云的分车带识别及单木分割方法[J]. 激光与红外, 2020, 50(11):1333-1337.
- [3] Yu Shanchuan, Chen Yu. Application of high-precision maps in intelligent transportation[J]. Highway, 2023, 68(2):218-224. (in Chinese)
- 俞山川,陈雨. 高精度地图在智能交通上的应用[J]. 公路, 2023, 68(2):218-224.
- [4] Barçon E, Landes T, Grussenmeyer P, et al. Extraction of road markings from MLS data: a review[C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVIII-2/W1-2022, 2022:7-14.
- [5] Mao Yinrui, Chen Yuren, Liu Yangdong. Study on road marking extraction method based on mobile LiDAR point cloud[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(7):127-135. (in Chinese)
- 毛寅睿,陈雨人,刘洋东. 基于车载激光点云的道路标线提取方法研究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(7):127-135.
- [6] Yan Li, Li Zan. Road marking extraction from mobile LiDAR data[J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(1):1-6. (in Chinese)
- 闫利,李赞. 车载激光点云道路标线提取方法[J]. 遥感信息, 2018, 33(1):1-6.
- [7] Yao L, Qin C, Chen Q, et al. Automatic extraction and recognition of road markings base on vehicle laser point cloud[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, 5(2):313-319.
- [8] Li Weigang, Fan Xiang, Mei Yang, et al. Road marking extraction method based on vehicle laser point cloud[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7):149-160. (in Chinese)
- 李维刚,樊响,梅洋,等. 基于车载激光点云的道路标线提取方法[J]. 中国激光, 2022, 49(7):149-160.
- [9] Zhang W, Qi J, Wan P, et al. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6):501.
- [10] Shan Congmiao, Sun Huayan, Zheng Yonghui, et al. Study on the application of skewness and kurtosis in pulse laser echo analysis[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(2):153-156. (in Chinese)
- 单聪淼,孙华燕,郑勇辉等. 偏度与峰度在脉冲激光回波分析中的应用研究[J]. 激光与红外, 2018, 48(2):153-156.
- [11] Bartels M, Hong W, Mason D C. DTM generation from LiDAR data using skewness balancing[C]// International Conference on Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2006, 1:566-569.
- [12] Bartels M, Wei H. Threshold-free object and ground point separation in LIDAR data[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(10):1089-1099.
- [13] Penggen Cheng, Zhenyang Hui, Yuanping Xia, et al. An improved skewness balancing filtering algorithm based on thin plate spline interpolation[J]. Applied Sciences, 2019, 9(1):203.
- [14] Ester M, Kriegl H P, Sander J, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]//AAAI Press Portland, 1996:226-231.
- [15] CHENG M, ZHANG H, WANG C, et al. Extraction and classification of road markings using mobile laser scanning point clouds[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 10(3):1182-1196.
- [16] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(6):1397-1409.
- [17] He K M, Sun J. Fast guided filtering[J]. CoRR, 2015, arXiv:1505.00996.
- [18] J. N. Kapur, P. K. Sahoo, A. K. Wong. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1985, 29(3):273-285.
- [19] Yu Heshun, Liu Rong. Building point cloud extraction based on color information of oblique image[J]. Journal of East China University of Technology: National Science, 2021, 44(2):168-173. (in Chinese)
- 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.