

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.019

车载激光点云道路标线分类提取方法

高飞¹, 吴言安², 肖信峰², 袁斌², 张树峰², 谢荣晖²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230093)

摘要:利用车载激光道路点云提取道路标线的难度较大。针对此问题,文章采用一种改进的基于点云特征图像的道路标线分类提取方法。首先将道路点云投影生成点云特征图像,通过结合图像梯度分析、图像二值化和连通域分析等操作,进一步进行道路标线像素提取;然后反投影到三维点云后,利用高斯混合模型对道路标线精细优化,从而提取出完整的道路标线点云;最后通过模板匹配分类,对道路标线点云进行分类提取。实验结果表明,该方法对不同道路环境下道路标线提取的准确度、完整度以及综合评价都超过90%。

关键词:道路标线;点云特征图像;图像梯度分析;高斯混合模型;模板匹配分类

中图分类号:P237

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)06-0843-06

Classification and extraction of road markings based on mobile LiDAR point cloud data

GAO Fei¹, WU Yan'an², XIAO Xinfeng², YUAN Bin², ZHANG Shufeng², XIE Ronghui²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Kaiyuan Highway and Bridge Co., Ltd., Hefei 230093, China)

Abstract: It is difficult to extract road markings by using mobile LiDAR point cloud data. To solve this problem, this paper adopts an improved road marking classification and extraction method based on point cloud feature image. Firstly, the road point cloud is projected to generate the point cloud feature image. Through the image gradient analysis, image binarization and connected domain analysis, the road marking pixels are further extracted. Then, after back projection to 3D point cloud, Gaussian mixture model is used to finely optimize the road markings, so as to extract the complete road marking point cloud. Finally, the road marking point cloud is classified and extracted through template matching classification. The experimental results show that the accuracy, integrity and comprehensive evaluation of road markings extracted by this method in different road environments exceed 90%.

Key words: road markings; point cloud feature image; image gradient analysis; Gaussian mixture model; template matching classification

0 引言

道路标线是道路环境中重要的交通标志,在日常生活中为行人提供引导和规范信息^[1-2]。道路标线也是道路三维重建、高精度导航地图制作、自动驾驶感知等领域所需的核心要素。传统的方法是通过高清相机等传感器采集道路的图像数

据,通过图像处理方法提取道路标线点云,但是采集图像数据易受到环境等因素的影响,同时图像数据相比于激光点云数据缺乏空间三维信息^[3-5]。

目前利用点云数据提取道路标线的方法主要有2类:第1类方法是将车载激光点云投影到二维平面转换为强度图像,通过图像处理方法提取道路标线信息,然后通过形态学等方法进行优化;

收稿日期:2023-02-27;修回日期:2023-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41904010);安徽省自然科学基金资助项目(2008085MD115)

作者简介:高飞(1962—),男,安徽天长人,合肥工业大学教授,博士生导师。

第 2 类方法是直接从三维激光点云中通过强度信息提取道路标线信息。文献[6]将车载激光点云插值成点云特征图像,然后通过设置高程和强度阈值初步提取标线点云,最后结合语义信息进行进一步提取;文献[7]设计一种鲁棒和自动化的方法,设置阈值函数强度值来提取道路标线;文献[8]通过车载激光点云投影生成高程特征图像后采用 Canny 算子结合语义信息和几何特征提取标线点云;文献[9]提出一种结合图匹配和支持向量机(support vector machine, SVM)的道路标线提取方法,利用最小外包矩形、Hu 不变矩等构建点云特征向量通过 SVM 进行粗分类,然后利用具有空间语义信息的图结构进行匹配优化,能够精准识别不同类型的道路标线点云。

以上研究表明,直接从车载激光点云中提取道路标线的方法大多数需借助车辆轨迹信息及其他辅助信息,具有一定的局限性。本文将车载激光道路点云投影到二维平面生成点云特征图像;通过结合图像梯度分析、图像二值化和连通域分析等操作,进一步进行道路标线像素提取;然后反投影到三维点云后,利用高斯混合模型对道路标线精细优化,从而提取出完整的道路标线点云;最后通过模板匹配分类,对道路标线点云进行分类提取。

1 点云道路标线分类提取方法

本文点云道路标线分类提取方法的目的是滤除车载扫描数据中的道路点云,提取完整的道路标线点云,大体可分为点云生成图像、道路标线像素提取、道路标线分类提取,具体流程如图 1 所示。

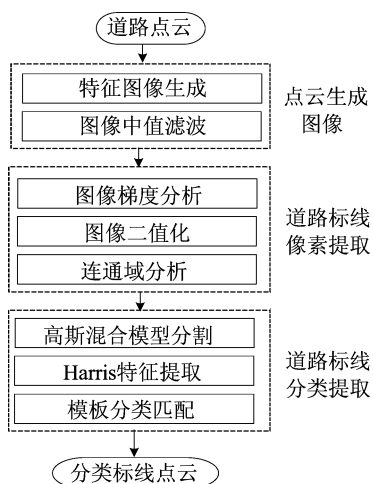


图 1 车载点云道路标线提取流程

1.1 点云生成图像

点云投影生成的特征图像中网格的大小是影响特征图像质量的关键因素,单个网格的面积越小,其中投影点云数量也会越少,生成的点云特征图像分辨率越高^[10]。将车载激光道路点云投影到二维平面生成点云特征图像主要步骤如下。

1) 首先选定 XOY 平面为投影平面建立平面直角坐标系,然后计算车载点云的包围盒得到点云在 X、Y 这 2 个方向上坐标最大、最小值,接着设定网格分辨率按照下列公式将车载点云投影到平面网格,具体计算公式为:

$$M = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{L} \quad (1)$$

$$N = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{L} \quad (2)$$

其中: M 、 N 为投影后平面网格的行列数; X_{\max} 、 Y_{\max} 、 X_{\min} 、 Y_{\min} 分别为在 X、Y 方向上坐标的最大、最小值; L 为平面网格的大小,即分辨率。

2) 根据划定的平面网格,将车载激光点云的反射强度值作为特征图像的像素灰度值填充到对应的每一个网格中,计算公式为:

$$G_i = \frac{\sum_{i=1}^K I_i}{K} \quad (3)$$

其中: I_i 为车载点云中第 i 个点的反射强度值; K 为投影网格内点云的数量; G_i 为投影后某一网格内的像素代表值,由于图像的像素值在 0~255 范围内变化,因此对求得的像素代表值要进行归一化处理。

车载激光点云投影成特征图像后理论上在道路和道路标线的内部像素灰度值是固定的或者平稳变化的,在道路标线的边缘才会出现灰度值的突然变化,但是椒盐噪声等噪声的存在会使得相邻像素的灰度值变化剧烈,因此在对图像处理前要对噪声进行滤波。本文通过中值滤波算法对噪声进行去除,原理是将特征图像中每个像素值用邻域窗口内像素中值替代,使各点像素值更加接近,从而去除特征图像中的噪声^[11]。

1.2 道路标线像素提取

在车载激光点云投影成点云特征图像后,从图像中可以更加直观地看出道路标线的像素灰度值和道路面的差异。为了识别并提取出道路标线,需要对点云特征图像的像素灰度值的变化进行分析,找到道路标线边缘处的像素。图像的梯度是用来衡量图像的像素灰度值的变化率,本文使用 Sobel 算子对点云特征图像进行梯度分析,

获取梯度特征图像。具体过程如下。

1) 使用 3×3 大小的 Sobel 算子卷积核在特征图像 X, Y 这 2 个方向上进行卷积运算求得 X 方向梯度 G_x 和 Y 方向梯度 G_y , 对于点云特征图像 I 计算公式为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} I \quad (4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} I \quad (5)$$

2) 根据上述的 X, Y 这 2 个方向上的梯度, 可以得出点云特征图像在任意一点的梯度, 计算公式为:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

在获取点云特征梯度图像后, 可以通过图像二值化将梯度图像转化为二值图像, 点云特征图像经过二值化后可以获得道路标线的边缘特征图像。图像二值化操作的关键是阈值的选择, 很大程度上影响道路标线的边缘检测效果, 本文采用最大类间方差算法进行阈值的自动选取。最大类间方差算法是将点云特征梯度图像分为前景和背景 2 个部分, 利用 2 个部分类间方差最大值得到最佳阈值^[12]。

在对点云特征图像进行边缘检测得到二值化图像后仍有离散的噪声点云影响道路标线的提取, 对于点云二值图像中的离散噪声, 可以通过连通分析将所有像素点按照连通关系标记为不同的连通区域, 对所有的连通区域设置一个最低像素点数量阈值, 小于阈值的连通区域被当做噪声点予以剔除, 最后留下精细提取后的道路标线。

为了尽量地保证点云道路标线提取的完整度和精确度, 对得到的二值图像进行 8-邻域连通分析, 步骤如下。

1) 点云特征图像经过二值化后分成前景和背景 2 个部分, 在前景中随机选取一个像素点 P 作为初始的种子像素点, 并放入到一个空的栈中。

2) 对像素点 P 赋予一个标签, 在点云二值化图像中进行 8-邻域搜索, 将搜索到的与像素点 P 灰度值相同的点放入栈中, 直到搜索完所有未被打上标签的点。

3) 将栈顶元素弹出设为新的种子点, 对于给定的标签同样按照 8-邻域搜索灰度值相同的像素点, 并放入栈中设为同样的标签。

4) 对步骤 3) 进行重复操作, 直到栈中的元素

为空时停止, 此时一个标签的连通域的所有像素点都寻找完成。

5) 遍历点云二值图像重复上述的步骤 1)~步骤 4), 对二值图像中所有的连通区域进行标记, 打上唯一的标签。

1.3 道路标线分类提取

1.3.1 道路标线精细优化

反投影后点云特征图像的像素点与原始点云中点不是一一对应, 这样从道路标线像素位置识别出的道路标线点云中会混有道路点云, 因此需要对候选道路标线点云进一步优化, 去除道路标线点云中混有的道路点云, 本文使用经典的高斯混合模型阈值分割算法对道路标线点云和道路点云进行分割。

高斯混合模型可以看作由 n 个高斯模型组合而成, 高斯混合模型分割就是计算每个点云属于 n 个高斯模型中某一个的概率值^[13]。具体步骤如下: 首先对车载激光点云建立高斯混合模型, 由于点云特征图像反投影得到的点云中有道路点云和道路标线点云, 因此高斯混合模型由 2 个高斯模型组成。在道路点云和道路标线点云的内部, 点云的数量和强度值服从高斯分布, 假设道路标线高斯分布的均值和标准差分别为 u 和 σ , 道路点云高斯分布的均值和标准差分别为 u_1 和 σ_1 , 类似于 2 倍标准差之外为噪声, 可以设置阈值为强度值 $u_0 - 2\sigma$, 小于阈值的点云都视为道路点云予以剔除。

1.3.2 模板匹配分类

由于道路标线根据形态和功能的不同有不同的种类, 需要对道路标线进行分类识别提取, 以满足在不同应用场景中的需求。本文使用基于道路标线几何特征的粗分类以及特征点模板匹配的精分类的方法对道路标线点云进行分类提取, 具体步骤如下。

1) 几何特征粗分类。粗分类中计算道路标线点云的包围盒, 设置道路标线点云的长宽比和点云面积的阈值对道路标线进行初步分类。首先按照索引对道路标线点云进行遍历, 找到点云在 X, Y 方向上的坐标最大值和最小值; 然后计算道路标线点云的长和宽从而得到长宽比, 再对点云进行投影后计算道路标线点云的面积; 最后设置长宽比的阈值 α 和面积阈值 β , 对不同种类的道路标线按照不同的阈值进行识别, 本文的道路标线分类主要包括道路虚线、前行指示线以及前行右转指示线。

2) 标线点云 Harris 特征点提取。在对标线点云进行模板匹配前首先要对点云进行特征点提取,本文使用 3DHarris 特征点检测算法^[14]对标线点云进行特征点提取。

3) 道路标线点云模板匹配。在得到道路标线点云的特征点后,将道路标线点云和已有的模板点云进行配准,通过配准后对应点距离平方和的平均值和设定的置信阈值进行比较,最终对道路标线进行分类提取。

2 实例分析

2.1 实验数据

本文在 Windows 10 的 64 位系统下,通过 C++ 编程语言实现了上述算法,实验数据为高速公路的车载激光扫描点云数据,如图 2 所示。实验数据为平坦的直线路段,全长约 400 m,路面起伏较小,道路中间有中央隔离带,道路两侧没有明显的路沿。

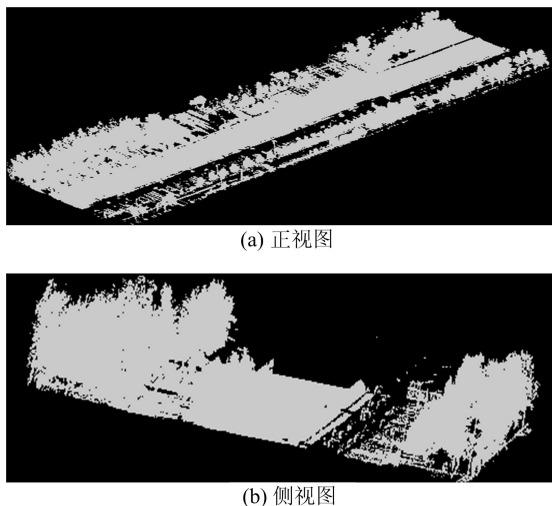


图 2 实验点云数据

2.2 道路标线提取实验

对于车载激光点云道路标线提取,选取实验数据中 A、B 两段包含道路虚线、前行指示标线、前行右转指示标线 3 种类别道路标线的道路局部区域点云,验证本文道路标线分类提取方法的可行性。

首先按照 1.1 节中点云生成图像方法将车载点云投影到二维平面并进行中值滤波,综合考虑车载激光点云扫描线间隔及运行效率,依据点云投影到二维平面后的点密度,经过多次实验对比,将点云投影成特征图像的网格边长设置为 0.08 m;然后对点云特征图像进行梯度分析,使

用 3×3 大小的 Sobel 算子卷积核求取特征图像在任意一点的梯度,获得点云梯度特征图像,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,道路标线的强度与周围道路路面的强度有着明显的差异。

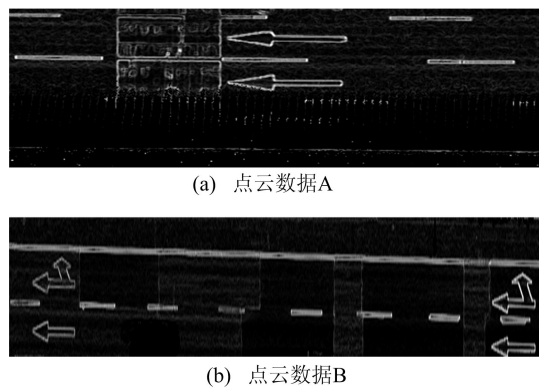


图 3 点云梯度特征图像

在得到点云梯度特征图像后,接着对道路标线进行边缘检测,按照 1.2 节中图像二值化的方法将梯度图像二值化获得道路标线的边缘特征,二值化的最佳阈值是当前景和背景类间方差最大时的阈值,经计算后设置最佳阈值为 39,得到的二值化图像如图 4 所示。

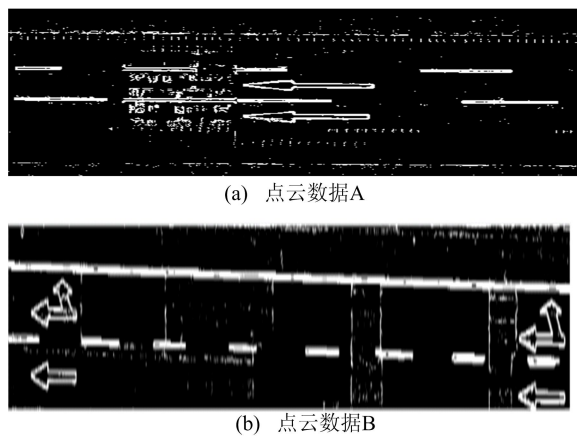


图 4 二值化图像

由图 4 可知,点云梯度特征图像经过二值化后只存在 0 和 255 这 2 个像素级的像素值,且存在许多离散分布的噪声点。

为了提高道路标线提取的精度,在连通性分析中将所有像素点按照连通关系标记为不同的连通区域,对所有的连通区域设置一个最低像素点数量阈值对离散噪声进行去除,通过对点云特征图像中道路标线的像素点进行计算,最低像素点数量阈值设为 420,剔除离散噪声后的二值图像

如图 5 所示。

从图 5 可以看出,点云二值图像经过连通分析后离散噪声区域已被剔除,但部分区域仍然存在少量与道路标线相连紧密的噪声点。

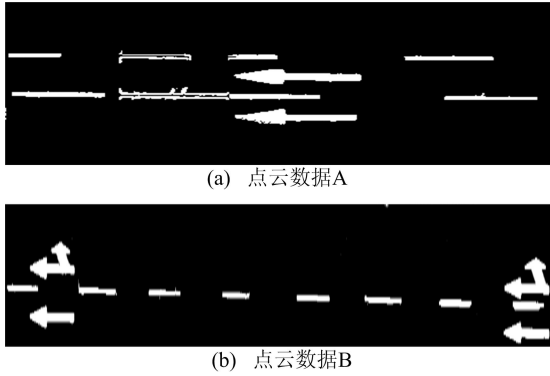


图 5 连通分析结果

通过上述步骤完成了对道路标线像素的提取,但此时得到的道路标线是二维图像,缺少三维的高程信息,精度难以满足道路标线应用的要求。根据特征图像中像素与点云中格网区域的对应关系,将点云特征图像反投影变换对道路标线点云进行识别,并利用高斯混合模型去除道路标线点云中混有的道路点云,结果如图 6 所示。图 6 中对道路标线进行随机赋色,方便与分类后的道路标线进行对比。

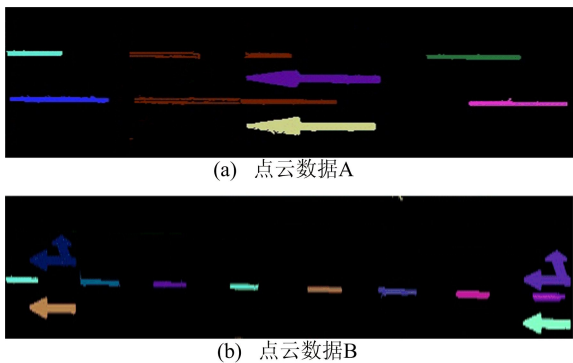


图 6 道路标线点云

为满足道路标线在不同场景下的应用需求,对提取出的道路标线进行的分类,在进行几何特征粗提取,提取道路标线的特征点,将道路标线点云和模板点云进行配准,配准精度的置信阈值设为 0.05,最终分类提取得到的道路标线点云以及道路标线边界点云如图 7、图 8 所示。

图 7、图 8 中:红色点云表示前行指示标线;黄色点云表示前行右转指示标线;蓝色点云表示

道路虚线。

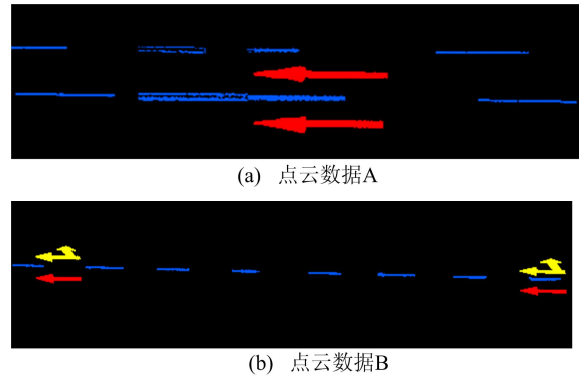


图 7 分类道路标线点云

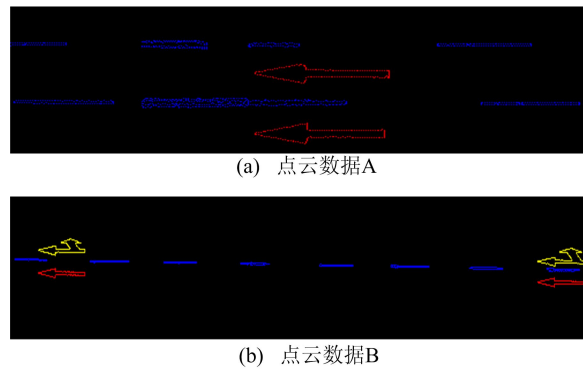


图 8 道路标线边界

2.3 精度评价与分析

由于道路面本身存在道路标线磨损以及道路裂缝等情况存在,在道路标线提取时会出现道路标线点云缺损。为了评估本文方法对车载激光点云道路标线提取结果,利用文献[15]提出的方法从准确度 P_{crt} 、完整度 P_{cpt} 、综合评价 F 这 3 个指标对本文方法道路标线提取结果进行定量评估,具体公式为:

$$\begin{cases} P_{crt} = \frac{C_{point}}{E_{point}}, \\ P_{cpt} = \frac{C_{pixel}}{R_{pixel}}, \\ F = \frac{2P_{crt}P_{cpt}}{P_{crt} + P_{cpt}} \end{cases} \quad (7)$$

其中: C_{point} 为本文方法提取出的道路标线的点云; E_{point} 为采用人工交互方法手动提取出的道路标线的点云; C_{pixel} 为本文方法点云投影成特征图像时提取出的道路标线像素点数量; R_{pixel} 为手动提取出的点云特征图像的像素点数量。

按照上述的道路提取评价指标对两段点云实验数据的道路标线提取结果进行分析,分析结果见表 1 所列。

从表 1 可以看出,点云数据 A 的提取完整度和精确度稍低于点云数据 B,这是由于点云数据 A 距离车载激光扫描系统较远,获得的点云密度更低,道路标线和道路面的强度差值更小,导致提取效果稍差。但本文方法对不同道路环境下道路标线提取的准确度、完整度以及综合评价都超过 90%,证明了本文改进的基于点云特征图像道路标线提取方法对道路标线提取的统一性和可行性。

表 1 道路标线提取精度分析 %

点云数据	P_{crt}	P_{cpt}	F
A	94.7	91.4	93.0
B	97.2	92.5	94.6

3 结 论

本文对基于点云特征图像的道路标线提取方法进行改进,设计了车载点云道路标线从提取到分类的流程。首先将车载点云投影成特征图像后对特征图像进行梯度分析、二值化、连通性分析等操作提取道路标线像素,接着将道路标线像素反投影回三维点云并进一步滤波优化得到完整道路标线点云,最后通过点云特征提取和模板匹配对道路标线进行分类,提高了道路标线提取精度。此外,本文的道路标线分类提取方法需要获得不同道路标线对应的模板点云,在面对道路标线种类复杂的情况下模板匹配的效率 and 准确率会受到影响,后续研究方向是借助点云分类神经网络,制作道路标线的训练集,提高道路标线分类的效率和适用性。

[参 考 文 献]

[1] 彭江帆. 基于车载激光扫描数据的高速公路道路要素提取方法研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
 [2] 闫利,李赞. 车载激光点云道路标线提取方法[J]. 遥感信息,2018,31(1):1-6.
 [3] LI Z, CAI Z, XIE J, et al. Road markings extraction based

on threshold segmentation [C]//2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. [S. l.]: IEEE, 2012: 1924-1928.
 [4] CHEN T, CHEN Z, SHI Q, et al. Road marking detection and classification using machine learning algorithms[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium. [S. l.]: IEEE, 2015: 617-621.
 [5] 王健,王润民,惠飞,等. 基于分裂合并算法的道路标线分割方法研究[J]. 计算机应用研究,2014,31(12):3880-3884.
 [6] YANG B, FANG L, LI Q, et al. Automated extraction of road markings from mobile lidar point clouds[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(4): 331-338.
 [7] KUMAR P, MCELHINNEY C P, LEWIS P, et al. Automated road markings extraction from mobile laser scanning data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 32: 125-137.
 [8] 尹辉增,方莉娜. 智能交通系统中道路标识线自动提取方法[J]. 科技资讯,2012(26):167-168.
 [9] 方莉娜,黄志文,罗海峰,等. 结合 SVM 与图匹配的车载激光点云道路标线识别[J]. 地球信息科学学报,2019,21(7): 994-1008.
 [10] CHEN X Z, CHEN Y P, HOMAYOUN N. End-to-end 3D object model retrieval by projecting the point cloud onto a unique discriminating 2D view[J]. Neurocomputing, 2020, 402: 336-345.
 [11] MONAIATI M, FAKHRAIE S M, KABIR E. Approximate arithmetic for low-power image median filtering[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015, 34(10): 3191-3219.
 [12] RENATO C S, MAURICIO G, ANDRE C C, et al. The use of Otsu algorithm and multi-temporal airborne LiDAR data to detect building changes in urban space[J]. Applied Geomatics, 2021, 13(4): 499-513.
 [13] KAPUIZ J N, SAHOO P K, WONU A K. 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.
 [14] 卢印举,段明义,苏玉. 遥感图像的有向空间高斯混合模型分割方法[J]. 遥感信息,2020,35(6):19-24.
 [15] 范强,刘鹏,杨俊,等. 基于 3D-Harris 与 FPFH 改进的 3D-NDT 配准算法[J]. 图学学报,2020,41(4):567-575.

(责任编辑 吴 亮)