

doi:10.3788/gzxb20184706.0612003

提取城市道路边线的点云法向量聚类法

杨望山, 蔡来良, 谷淑丹

(河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要:考虑城市道路边缘的空间姿态特征,建立了一种自动提取道路边线点云并绘制道路边界线的方法.建立空间格网点云存储结构,利用网格内整体点云的法向量特征对其进行聚类和分割,利用改进 K 均值算法提取道路边线点云,采用中值法绘制道路边界线.基于本文方法,分别选择实验区直线段和曲线段道路扫描数据进行分析.结果表明,本文方法不依靠任何辅助信息,便可以提取直线和曲线道路边线点云以及绘制道路边界线,在路面平坦的工况下有较好的提取效果.

关键词:点云数据;空间格网;法向量聚类;改进 K-means 算法;自动提取道路边线;中值法

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0612003-11

Extraction City Road Boundary Method Based on Point Cloud Normal Vector Clustering

YANG Wang-shan, CAI Lai-liang, GU Shu-dan

(School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract: According to the spatial posture characteristics of the urban road boundary, the method of automatically extracting road boundary point cloud and drawing road boundary lines was set up. Firstly, the spatial storage structure of the space grid point cloud was established, and used the normal vector feature of the whole point cloud in the grid to cluster and split them, and then the improved K-means algorithm was used to extract the road boundary point cloud. Finally, the road boundary line was drawn by the median method. Based on the method, the data of the straight section and the road segment scanning data of the experimental area are selected for analysis. The results show that the proposed method can extract the point cloud of straight line and curve line road boundary and draw the road boundary line without any auxiliary information, it has better extraction effect under the flat condition of the road.

Key words: Point cloud data; Spatial grid; Normal vector clustering; Improved K-means algorithm; Automatic extraction road boundary; Median method

OCIS Codes: 120.0120; 010.3640; 140.0140

0 引言

道路信息是城市建设基础地理信息的重要组成部分,快速高效地获取高密度、高精度的道路信息对城市道路规划、建设以及应急救助方面有着重要的意义^[1-3].近年来,随着导航地图、无人驾驶、智慧交通等产业的需求,对道路空间信息的建设提出了精度高、现时性强、网络传输快等要求,测绘部门如何快速地响应并提供上述信息是目前的研究热点.基于此,本文研究了利用车载扫描系统快速获取点云,自动提取道路边线和道路边界线绘制的算法,为满足产业需求奠定基础.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41701597,41771491)资助

第一作者:杨望山(1988—),男,硕士研究生,主要研究方向为点云数据处理和变形监测.Email:1584718441@qq.com

通讯作者:蔡来良(1983—),男,讲师,博士,主要研究方向为点云数据处理,测绘软件系统开发,矿山开采沉降等.Email:cailailiang@126.com

收稿日期:2017-12-16; **录用日期:**2018-02-05

<http://www.photon.ac.cn>

车载激光扫描技术集卫星定位、惯性导航、激光、电子信息等多种科技于一体,硬件设计及制造已日趋成熟,逐渐成为三维空间信息获取和移动制图的主要装备,但数据处理与应用以及软件开发仍有待完善.当前车载激光扫描数据处理的研究主要集中在地物点云的分类^[4-6]、建筑物建模^[7]、行道树与路灯的提取^[8-9]以及其他道路附属信息的提取^[10],而道路边线提取研究仍有进一步发展的空间.李永强^[11]研究了基于轨迹辅助下的K均值聚类算法,实现了道路边线的提取,但对无轨迹辅助的情况没有讨论.王淑燕^[12]采用点云片段法实现了车载点云道路边线提取,但它的点云片段获取需要人为参与,还需要选择合适的点云片段.闫兆进^[13]利用直线特征检测方法实现了道路边线提取,但该方法适合比较规则环境道路边线提取.方莉娜,杨必胜^[14]通过分析点云的空间分布和统计特征,利用结构化道路环境提取了道路边线.国际上,KANG Yeonsik^[15]提出了一种基于概率阈值的路边障碍物多模型交互分析方法,该方法能够准确估计路边位置,提取道路边界信息.ZHANG W^[16]利用一种类似高通低通滤波器的方法提取道路点云,然后在道路区域运用Hough变换检测垂直分布的点作为路坎点来提取道路边线点云.KUMAR P^[17]研究了Snake模型,并对各种参数进行分析,得出了最佳参数.文献^[18-21]利用激光雷达测量检测铺设道路的边界,并控制机器人与边界保持一定距离.

本文考虑了城市道路边缘的空间形态特征,建立了一种自动提取道路边线点云并绘制道路边界线的方法,将研究目标分为边线点云提取和边界线提取两个关键模块展开,最后利用实例验证算法的正确性.

1 道路边线提取与绘制

道路边线点云数据提取与道路边线绘制的流程图如图1所示.

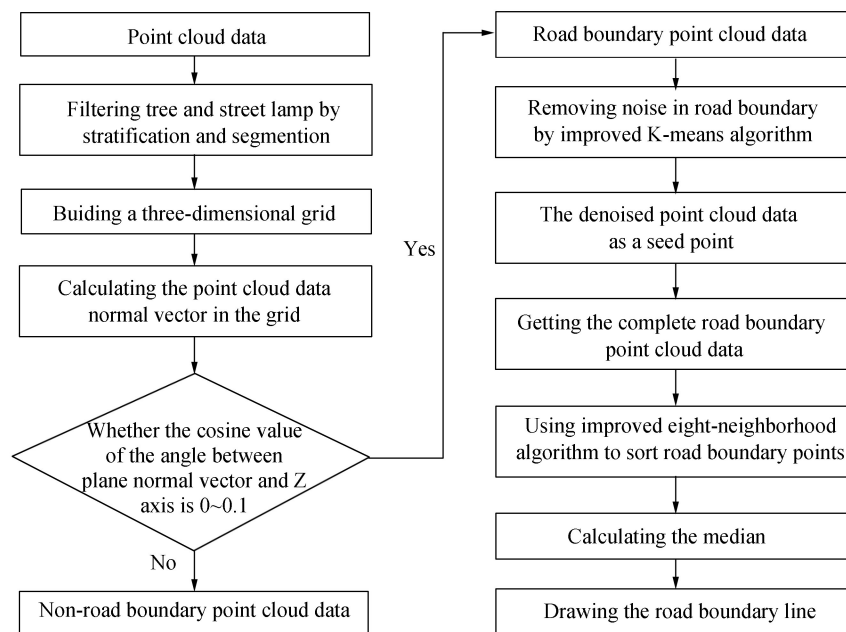


图1 道路边线点云数据提取与道路边线绘制的流程图
Fig.1 The flow chart of road boundary extraction and drawing

1.1 提取道路边线点云

本文数据采集使用的是北京四维远见信息技术有限公司和首都师范大学联合自主研究的首师/四维(ShouShi/SiWei,SSW)车载激光建模测量系统,其激光扫描测量精度 ≤ 10 mm,将该系统采集的点云分段存储,首先将每个文件内的该段道路点云数依据参考文献^[8-9]的方法去除道路上的树木和路灯;然后根据高度阈值分层处理,提取道路点云;其次将点云划分到一定大小的三维空间格网内;再次根据点云数据的法向量进行聚类,提取出点云面法向量平行于水平面的点云,利用改进的K-means算法进行聚类去除噪点,并以此作为种子点提取完整的道路边线.

1.1.1 点云的分层分段处理

车载激光扫描系统获得的点云按照一定大小分多个文件存放(即道路数据是分段存放的).分段处理可以减小数据量,分段处理原理如图 2.对于道路上附属结构的去除,文献[8-9]研究了路灯和行道树的提取方法.文献[8]通过人机交互的方式提取路灯的样本参数,依据数学形态学闭运算提取点云场景中疑似路灯的位置,利用样本参数确定疑似路灯范围并提取疑似路灯点云,对路灯样本和疑似路灯点云进行匹配,实现路灯判断和提取.文献[9]采用求差和拟合算法获得树木高度、胸径等属性信息,利用树木的理论和实际生长模型,计算得到树冠距离加权值,在此基础上对树冠进行迭代处理,实现邻接行道树点云的精确分割.通过分层分段处理点云,降低了算法复杂度,缩短算法运行时间.

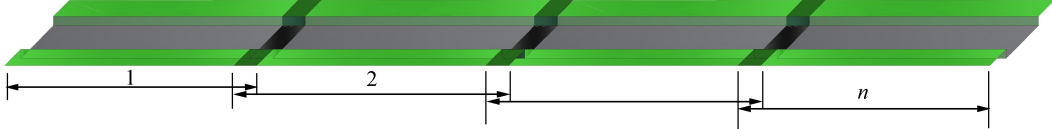


图 2 道路分段图

Fig.2 Road segmentation diagram

1.1.2 三维空间格网建立

本文根据数据结构和点云的特点,利用三维空间格网建立点云数据与空间格网之间以及空间格网与空间格网之间的关系,其建立过程如下:

首先读取点云数据,搜索到点云三维坐标 X, Y, Z 三个方向的最大值($X_{max}, Y_{max}, Z_{max}$)与最小值($X_{min}, Y_{min}, Z_{min}$);其次,给出一个微小的量 δ (δ 为大于 0 的一个常量),防止点云的最值落在格网线上,不参与运算.以($X_{max} + \delta, Y_{max} + \delta, Z_{max} + \delta$)和($X_{min} - \delta, Y_{min} - \delta, Z_{min} - \delta$)为最大值和最小值,在最值范围内绘制三维格网,设定三维格网的长、宽、高分别为 $X_{grid}, Y_{grid}, Z_{grid}$, 格网 X, Y, Z 方向格网的个数分别为 n_x 个、 n_y 个和 n_z 个,根据格网的长、宽、高求得各个空间格网的最大值($X_{g_max}, Y_{g_max}, Z_{g_max}$)与最小值($X_{g_min}, Y_{g_min}, Z_{g_min}$),有

$$\begin{cases} n_x = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{grid}} \\ n_y = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{grid}} \\ n_z = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{Z_{grid}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_{g_max} = X_{min} - \delta + X_{grid} \cdot (i + 1) & (i = 0, 1, 2 \dots n_x) \\ Y_{g_max} = Y_{min} - \delta + Y_{grid} \cdot (j + 1) & (j = 0, 1, 2 \dots n_y) \\ Z_{g_max} = Z_{min} - \delta + Z_{grid} \cdot (k + 1) & (k = 0, 1, 2 \dots n_z) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_{g_min} = X_{min} - \delta + X_{grid} \cdot i & (i = 0, 1, 2 \dots n_x) \\ Y_{g_min} = Y_{min} - \delta + Y_{grid} \cdot j & (j = 0, 1, 2 \dots n_y) \\ Z_{g_min} = Z_{min} - \delta + Z_{grid} \cdot k & (k = 0, 1, 2 \dots n_z) \end{cases} \quad (3)$$

利用空间格网的最值绘制三维格网,通过一定的循环,绘制所有的三维格网;最后,根据点云数据的坐标值是否落在某个空间格网最值范围内,将落在该格网最值范围内的点云数据存储在该格网内,进而将所有的点云数据分别存入对应的立方体格网内.完成点云数据与空间格网以及空间格网与空间格网之间关系的建立,空间格网以及点云存入空间格网示意图如图 3.

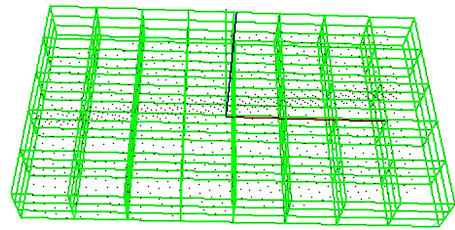


图 3 空间格网及点云存入格网示意图

Fig.3 Schematic diagram of spatial grid and point cloud

1.1.3 法向量聚类

研究道路点云数据各个格网内点云数据的法向量,可以根据道路的横断面图进行研究,道路的横断面图

如图4所示.根据道路的断面图可以得出道路中间高两边低,中间高程值变化较小.道路的很多结构都可以看成平面,例如城市道路两侧都有道路基石,道路基石上面和侧面等都是平面,道路基石如图5所示.道路和道路两侧的人行道等对应的三维空间格网内的点云数据其法向量都垂直于水平面,图4中直线箭头中的L、R、C部分.而道路两侧基石的两个点云面,其中部分点云面的法向量垂直于水平面如图4中L、R部分,另一个部分点云面法向量平行于水平面如图4中LG、RG部分,而在两个面交接处其法向量与水平面有一定的夹角如图4中LB₁、LB₂、RB₁、RB₂部分.利用点云面片法向量与Z轴的夹角余弦值对格网内点云面片进行聚类,设平面的法向量为 (a, b, c) ,平面与Z轴的夹角为

$$\cos \theta = \frac{c}{\sqrt{a \cdot a + b \cdot b + c \cdot c}} \quad (4)$$

运用式(4)提取格网内点云数据法向量平行于水平面的点云数据,即图4中带圆的箭头上的LG、RG部分点云面片.道路基石侧面点云数据的各个部分如图6,带圆的箭头部分是提取的道路基石侧面点云数据,带圆的箭头是其法向量.因此,本文利用格网内点云数据的法向量聚类,提取道路基石侧面点云数据,继而提取道路边线点云数据.

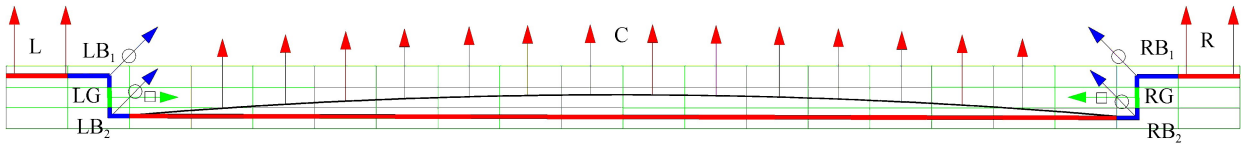


图4 道路断面图

Fig.4 Road section diagram



图5 道路基石

Fig.5 Road foundation

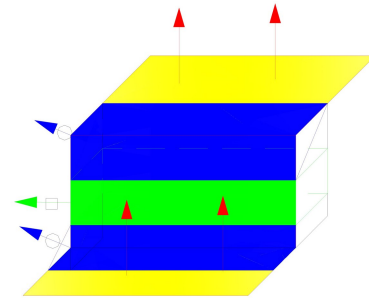


图6 道路边缘图

Fig.6 Road boundary diagram

研究格网内点云的法向量,需要进行空间平面拟合.空间平面拟合的方法有随机抽样一致(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)算法平面拟合、加权总体最小二乘平面拟合等平面拟合方法.本文根据格网内点云的法向量提取道路基石侧面点云,需要该格网内的点云全部是道路边线点云.因此需要用格网内所有点进行平面拟合,所以选取最小二乘平面拟合方法^[22-23].将格网内平面法向量与水平面夹角余弦值设置阈值为0~0.1,进行法向量聚类.

1.1.4 改进 K-means 算法聚类

道路点云通过格网划分,格网内点云根据法向量聚类,实现了点云的初步聚类,但聚类的结果有部分噪点,主要是由于道路旁边的树木底部、路灯底部以及道路中间的行人车辆等的影响.要获得道路基石侧面的点云,则需要滤除这些噪点.

K-means 算法可以将法向量聚类后的道路边线点云提取出来,滤除边线点云中的噪点.该算法有明显的缺点,不能很好地去除噪点,算法复杂度高、 k 值的选取不好把握.本文针对这些特点,对 K-means 聚类算法进行改进,其具体过程如下:

- 1) 观察点云,根据目标聚类个数 n (该部分点云数据中,有几小类是道路边线的点云数据),选择一个合适的初始聚类个数 N (N 是该部分点云数据有几个离散的小类,包括道路边线和其它噪点);
- 2) 从点云中随机选取一个点作为聚类中心,根据点云的密度和噪声点距离目标聚类中心的距离设置合适的阈值 d ;

3)以该点为聚类中心,循环所有点,设聚类中心点的坐标为 (x, y, z) ,某点的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,运用某点到该聚类中心点的距离方程为

$$d = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} \quad (5)$$

运用式(5)计算所有点到聚类中心点的距离,设置阈值,小于阈值的聚类到该中心,从点云中移除这些点;

4)把步骤2)中选作聚类中心的点去除掉,把步骤3)中聚类进来的数据分别选做聚类中心,利用空间点之间的距离公式把阈值内的点聚类到一起,重复该过程,直到把所有符合阈值的点聚类在一起,聚类结束,再进行下一个聚类;

5)重复步骤4)过程,根据初始聚类可以获得 N 类;

6)初始聚类后的道路边线点云数据投影 XOY 面内,噪点是片状,而道路边线点云是条带状,对初始聚类出来的每一类建立一个包围盒,根据包围盒的高度阈值和长度阈值,其包围盒的高度在 $0.05 \sim 0.15$ m范围内,长度是格网长度的 $0.9 \sim 1$ 倍,去除噪点,最终的 n 类聚类结果。

该改进的算法可以有效地滤除点云中的噪点,降低算法的复杂度,通过动态聚类中心的方式提高算法的运行效率。

1.1.5 道路边线点云自动分割

从空间形态上看,道路基石的侧面垂直于水平面,通过点云的法向量和改进的K-means算法聚类,可以很好地提取道路基石侧面大部分点云,即道路边线种子点数据,然后将其点云投影到 XOY 平面内,在种子点两侧各设置一定宽度阈值的缓冲区域,落在缓冲区域内的点认为是道路基石侧面点,从而完成道路边线点云数据的分割,如图7所示,图7中道路基石侧面的投影是根据法向量聚类和改进K-means算法提取道路边线点云,道路基石侧面的投影两侧是设置的缓冲区,缓冲区范围内的点即是道路边线点云。



图7 道路边线俯视图
Fig.7 Top view of road boundary line

1.2 道路边界线的绘制

道路边线点云是道路的基础信息,准确、快速地提取道路边线点云对城市的建设和管理提供了重要的信息,但点云没有属性信息,本文运用中值法对提取的道路边线点云数据绘制了道路边界线并使其具有属性信息,为道路的管理提供方便。

1.2.1 点云伪二维格网化

道路路面都平行于或者近似平行于地面,根据该条件将点云投影到 X, Y 平面,投影后的二维平面呈现了道路边线点云的关系,将实验区的点云三维格网化,使点云完全落在三维格网内,该三维格网的建立与上面三维格网的建立及点云填充相同,但本文通过将格网的高度阈值设置在 0.5 m,保证所有的点云数据都在同一层格网内,方便后文的八邻域搜索,又避免了重新建立二维格网,该过程称为伪二维格网的建立。

1.2.2 八邻域道路边线跟踪

在二维平面内邻域搜索方法有八邻域搜索方法^[24-25],改进的八邻域搜索方法^[26],在三维空间格网内,有26邻域搜索方法^[27],这些方法都需要对格网的边缘格网进行识别,本文在此基础上提出了改进的八邻域搜索算法,传统的八邻域搜索方法需要边缘格网识别,如果边缘格网内有点云,需要按照其所在的位置不同,进行不同的邻域搜索如图8。例如,如果在图8中边缘格网7的位置,需要对格网8、P、6所在位置进行搜索,如果在图8中边缘网格6的位置需要对8、P、4、5、7所在位置进行搜索等等,这样不仅导致效率低,而且还需要对其所在位置进行判断,根据不同的位置采用不同的搜索方式,改进的八邻域搜索方法是通过在 X 方向的最左边和最右边分别加一列格网,在 Y 方向的最上边和最下边分别加一行格网,使存在点云的格网八个邻域都存在格网,该方法不需要进行边缘格网的识别如图9所示,八邻域道路边线跟踪过程如下。

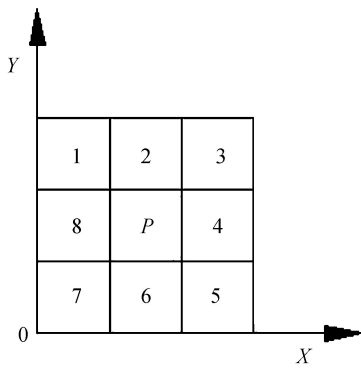


图8 八邻域

Fig.8 Eight neighborhood

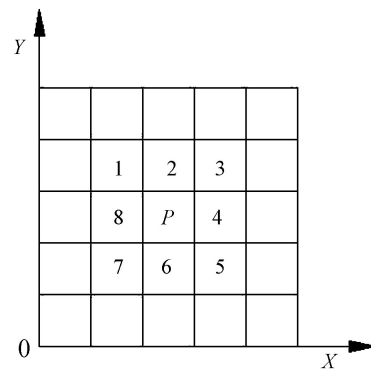


图9 改进的八邻域

Fig.9 Improved eight-neighborhood

设点 $P(x, y)$ 为道路边线的边界点, 利用改进的八邻域搜索, 则 $P(x, y)$ 点必定存在八邻域, 利用八邻域的信息进行道路边线跟踪. 首先找到该格网左上角那个网格, 按照图 9 中数字逆时针的顺序搜索, 找到下一个存在点云的格网, 这一搜索继续下去, 直到搜索结束. 若该点八邻域内没有存在点云的格网, 则此物体为孤立的物体, 循环结束, 进行下一个循环.

1.2.3 中值法求道路边线

法向量聚类法提取了道路边线的部分点云, 运用改进的 K-means 算法聚类去除了部分边线点云中的噪点, 以此作为种子点, 提取了完整的道路边线点云. 由于道路基石高度都是固定的, 通过上述方法提取了完整的道路边线点云, 则道路边线点云投影到 YOZ 平面或者 XOZ 平面是规则的矩形, 按照格网的最大值最小值 X_{g_max} 、 X_{g_min} 、 Y_{g_max} 、 Y_{g_min} , 将内点云填充到对应的格网内. 点云填充到二维格网内后, 求取每个格网的 X 最大值 X_{max} 、 X 最小值 X_{min} 、 Y 最大值 Y_{max} 、 Y 最小值 Y_{min} , 计算 X, Y 的中心点 (X_{centre}, Y_{centre}) , 原理图如图 10 所示. 中心点求取方程为

$$X_{centre} = (X_{max} + X_{min}) / 2 \quad (6)$$

$$Y_{centre} = (Y_{max} + Y_{min}) / 2 \quad (7)$$

利用式(6), (7)计算出该格网内点云的中点 (X_{centre}, Y_{centre}) . 通过网改进的八邻域搜索建立了格网的拓扑关系, 把对应的中点相连, 实现了中值法求取道路边界线.

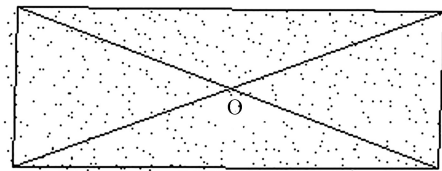


图10 中值法

Fig.10 Median method

2 实例分析

2.1 实验数据

本文以 Visual Studio 2010 为开发平台, 运用 C# 编程语言与 OpenGL 图形库相结合, 实现了道路边线点云的自动提取和求取了道路边界线. 运用 CAD 二次开发使求取的道路边界线具有属性, 并保存为 dxf 格式, 便于交通管理部门的利用与管理. 以校园道路为实验区, 使用车载激光扫描系统对校园道路进行扫描, 获取校园道路点云. 对获取的点云利用分层分段的思想进行了处理, 对校园道路的直线段和交叉路口路段分别进行了研究, 道路直线段和交叉路口路段的点云如图 11 所示.

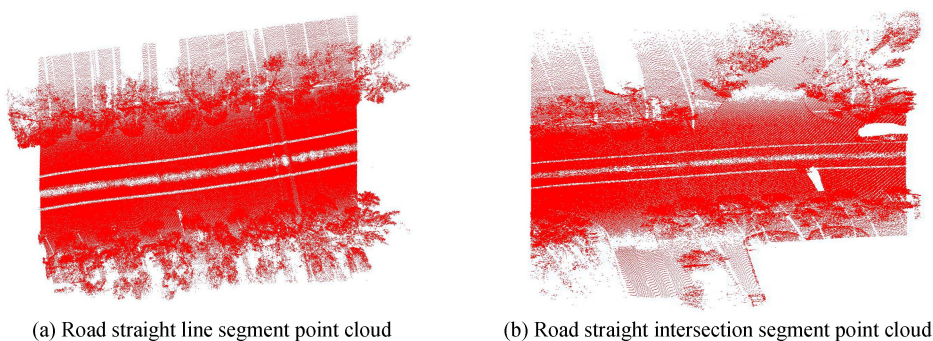


图 11 道路原始点云数据
Fig.11 Road original point cloud data

2.2 实验结果

实验区点云数据运用文献[8-9]的方法实现了道路树木、路灯的剔除.所选实验区道路坡度较小,分段后的点云利用高度阈值进行分层,剔除掉道路上的噪点以及地下部分的河道、凹坑等结构的点云数据如图 12 所示,依据经验高度阈值侧值为(-0.38 m,0 m).由于道路基石侧壁的高度一般在 15 cm,为了使 X,Y 方向边缘处的格网充满点云,则将道路直线段的格网长宽高设置为(1.31 m,0.5 m,0.045 m),道路交叉口段的格网长宽高设置为(0.6 m,0.5 m,0.045 m).对格网内点云进行平面拟合,对格网内平面的法向量与水平面夹角余弦值在 0~0.1 范围内的点云进行法向量聚类,点云数据默认点的大小为 1,通过调用 gl.PointSize() 函数,将点的大小设置为 3,如图 13 所示.

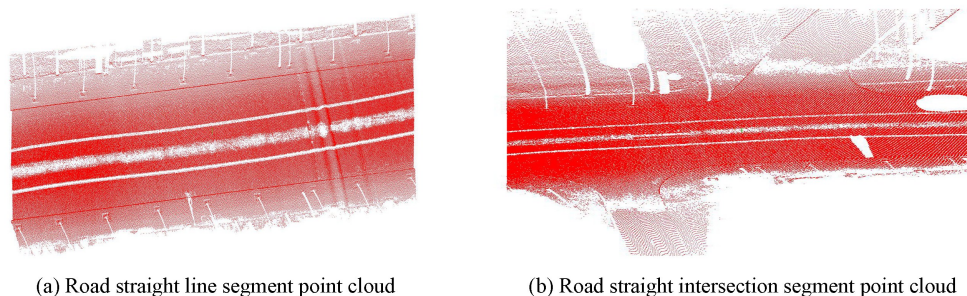


图 12 道路点云数据去噪
Fig.12 Removing noise of the road point cloud data

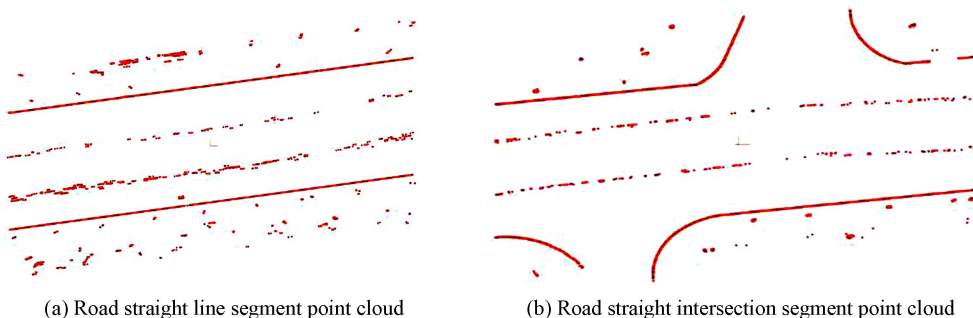


图 13 法向量聚类的道路边线点云数据
Fig.13 Road edge point cloud data of the normal vector cluster

由于 SSW 车载激光建模系统 RA100 扫描距离在 0.5~100 m,由于该次扫描用的车辆是人力脚踏三轮车,车轮处距离激光发射中心的距离小于 0.5 m,因此在车轮处激光点云的误差较大,再加上道路旁边的树木茎秆的底部的影响,从而导致存在部分噪点.利用改进的 K-means 聚类算法根据聚类后最小包围盒的长度和高度阈值对提取的道路边线部分点云数据进行优化,去掉部分噪点,将点的大小设置为 3,如图 14 所示.

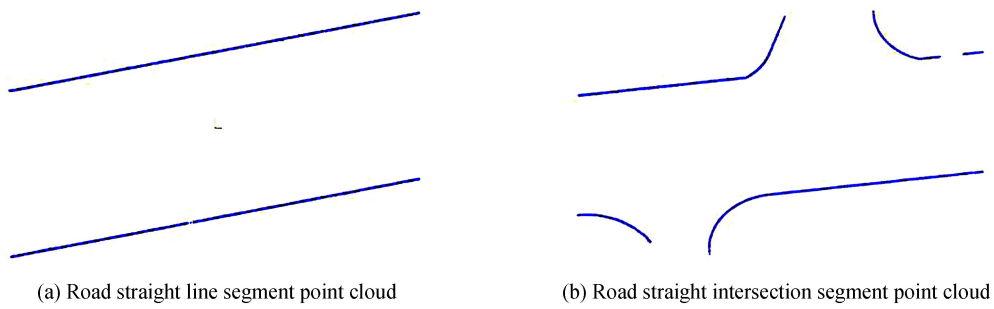


图 14 改进 K-means 聚类算法优化道路边线
Fig.14 The optimized road edges by improved K-means clustering algorithm

把获得的道路边线部分点云数据投影到 XOY 面,以道路边线部分点云数据为种子点,通过设置一定的缓冲区域,可以得到落在缓冲区域的点即为完整的道路边线点云数据,点云数据的大小为 3,如图 15,图 16 显示了道路边线与道路点云数据的叠加效果.

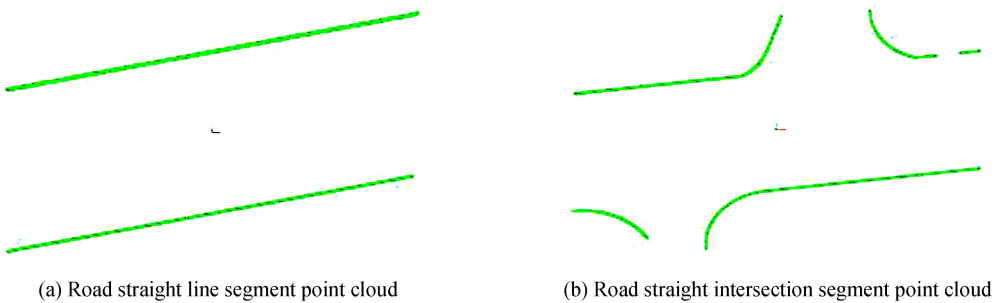


图 15 道路边线点云自动分割
Fig.15 The automatic segmentation of road boundary point cloud

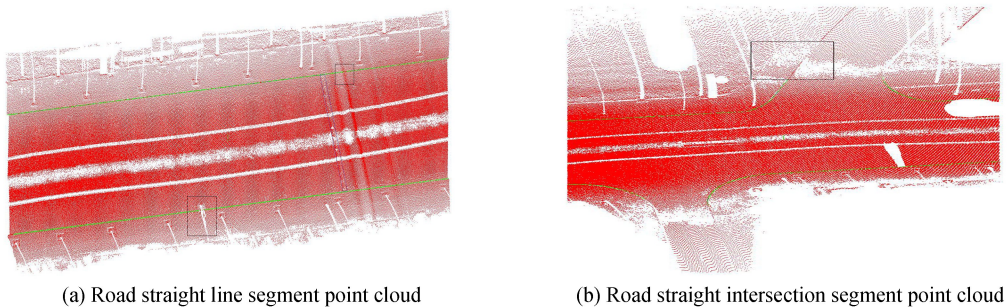


图 16 道路边线与道路点云数据的叠加
Fig.16 The overlay of road edge point cloud and point cloud data

根据完整的道路边线点云数据,利用改进的八邻域搜索算法对道路边线点对应的格网进行排序,求取道路边线点对应格网的中值并依次链接直线路段、曲线路段,线的粗细默认值是 1,通过调用 `gl.LineWidth()` 函数,将显得粗细设置为 3,如图 17 所示,将生成的道路边线保存为 DXF 格式,完成研究目标.

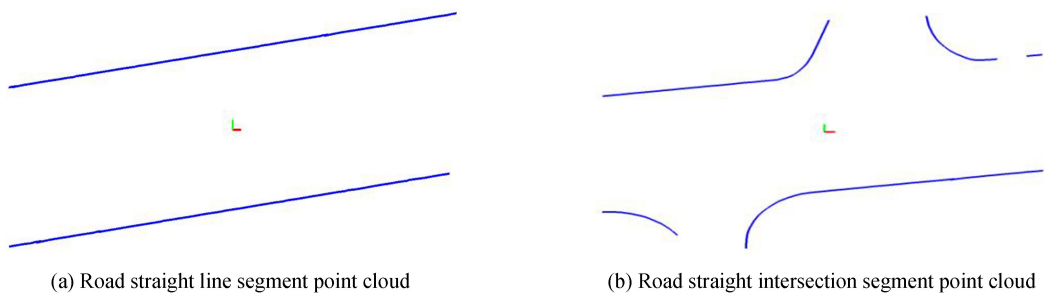


图 17 提取道路边界线
Fig.17 Extracting road boundary line

2.3 实验结果分析

在实验中,文献[14,28]的实验分析方法,对法向量聚类算法和改进的 K-means 聚类算法提取的道路边线点云的完整率和道路边界线求取情况进行分析。

UL 表示测量上边界长度,DL 表示测量下边界长度,UUL 表示上边界没有提取出来的长度,UDL 表示下边界没有提取出来的长度,TR 表示整体提取率

$$TR = (UUL + UDL) / (UL + DL) \cdot 100\% \quad (8)$$

LL 表示左侧测量宽度,RL 表示右侧测量宽度,CL 表示中值法求取道路边界线左侧宽度,CR 表示中值法求取道路边界线右侧的宽度。

通过对道路直线段和道路交叉路口段激光点云的实验,运用式(8)求取了道路直线段点云提取率为 99.43%,交叉路口段点云提取率为 99.44%。中值法求取道路直线段边界线左侧、右侧求取误差分别为 1.1 cm,1.2 cm,道路交叉路口段边界线左侧、右侧求取误差分别为 0.6 cm,1.1 cm。道路边线点云提取率分析如表 1,道路边界线求取情况分析如表 2。

表 1 道路边线点云提取率分析

Table 1 Analysis of road boundary line point cloud extraction rate

Segment	UL/m	DL/m	UUL/m	UDL/m	TR/(%)
Straight line segment	52.368	52.338	0.255	0.345	99.43
Intersection segment	37.771	40.38	0.441	0	99.44

表 2 道路边界线求取情况分析

Table 2 Analysis of obtaining road boundary line

Segment	LL/m	RL/m	CL/m	CR/m
Straight line segment	15.393	15.391	15.382	15.403
Intersection segment	15.388	15.390	15.382	15.401

通过表 1,可以看出道路边线点云整体提取率较高,都在 99%以上。通过图 13 可以看出,图 16(a)道路直线段上下边线都有部分没有提取出来,从该段线路原始点云图 11(a)中可以看出,在上边线 1 的位置处没有提出,而在图 16(a)这前面有用方框框起来的道路减速带。车辆在经过减速带时车辆不稳,后面出现两处长度约 25 cm,宽度与道路同宽的面状区域点云波动。前面一处(即是后轮通过时)影响较大,有长度为 25.5 cm 的道路边线点云没有提取出来。在下边线 2 位置处是路上行人的影响,有 34.5 cm 没有提取出来。图 16(b)在道路上边线交叉路口处的辅路口有 44.1 cm 的道路边线点云没有提出,从原始点云图 11(b)中可以看出该处是道路支杆路口,点云扫描的较少,点云密度较小,使部分点云没有提取出来。整体道路边线点云提取率都在 99%以上,说明该算法在道路边线点云提取方面有一定的优势。

通过表 2 可以看出,道路直线段和道路交叉路口段道路边界线求取误差都在 1.2 cm 范围内,而该次使用的是 SSW 车载激光扫描系统,激光扫描仪精度是 1 cm/0.5 m~100 m,而由于 IMU 直接影响惯性导航的精度,其道路边界线的误差在 1.2 cm 范围内,该算法适用于道路边线的求取。

3 结论

本文根据道路基石的特点,提出了一种道路边线点云提取以及中值法求取道路边界线的方法,该方法在路面平坦的工况下有较好提取效果。本文通过格网内点云的法向量和 K-means 算法聚类提取了道路边线部分点云,以此为种子点,保证了道路边线点云的完整性,克服了传统依据辅助信息方法的弊端,并可以快速、自动的提取道路边线点云和道路边界线。在道路直线段和道路交叉口的数据进行实验中,对其道路点云提取率和边界线求取误差进行定量的评价,定量评价道路边线点云提取率都在 99%以上,边界求取误差都在 1.2 cm 范围内。文本方法能够从车载激光点云中较好的提取出道路边线点云和求取道路边界线,解决了传统方法难以较好的提取道路边线信息或者需要依靠辅助信息才能提取道路边线点云以及求取道路边界线的问题。

参考文献

- [1] ZHOU J, CHENG L, BISCHOF W F. Online learning with novelty detection in human-guided road tracking[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2007, 45(12): 3967-3977.

- [2] BARZOHAR M, COOPER D B. Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1996, **18**(7): 707-721.
- [3] BARSİ A, HEIPKE C. Artificial neural networks for the detection of road junctions in aerial images[J]. *Geological Magazine*, 2008, **70**(2): 180-182.
- [4] TAN Ben, ZHONG Ruo-fei, LI Qin. Objects classification with vehicle-borne laser scanning data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, **16**(1): 50-66.
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.
- [5] SHI Wen-zhong, LI Bi-jun, LI Qing-quan. A method for segmentation of range image captured by vehicle-borne laser scanning based on the density of projected points[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2005, **34**(2): 95-100.
史文中, 李必军, 李清泉. 基于投影点密度的车载激光扫描距离图像分割方法[J]. 测绘学报, 2005, **34**(2):95-100.
- [6] YANG Bi-sheng, WEI Zheng, LI Qing-quan, et al. A classification-oriented method of feature image generation for vehicle-borne laser scanning point clouds[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(5): 540-545.
杨必胜, 魏征, 李清泉, 等. 面向车载激光扫描点云快速分类的点云特征图像生成方法[J]. 测绘学报, 2010, **39**(5):540-545.
- [7] CAI L, WU K, FANG Q, et al. Fast 3D modeling chinese ancient architectures base on points cloud[C]. International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, IEEE, 2010: 1-3.
- [8] ZHANG Xi-tong, LIU Hui-yun, LI Yong-qiang, et al. Streetlamp extraction and identification from mobile lidar point cloud scenes[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2016, **25**(9): 50-54.
张西童, 刘会云, 李永强, 等. 车载 LiDAR 场景中路灯的提取与识别[J]. 测绘工程, 2016, **25**(9):50-54.
- [9] ZHANG Xi-tong, LI Yong-qiang, MAO Jie, et al. Segmentation of connected street trees from mobile lidar data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, **41**(8): 111-115.
张西童, 李永强, 毛杰, 等. 车载 LiDAR 点云相行道树精细分割[J]. 测绘科学, 2016, **41**(8):111-115.
- [10] PU S, RUTZINGER M, VOSELMAN G, et al. Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, **66**(6): S28-S39.
- [11] LI Yong-qiang, WANG Wen-yue, ZHENG Yan-hui, et al. Refining extraction of road boundary from vehicle LiDAR data[J]. *Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science)*, 2014, **33**(4): 458-462.
李永强, 王文越, 郑艳慧, 等. 基于车载 LiDAR 数据的道路边精细提取[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2014, **33**(4):458-462.
- [12] WANG Shu-yan, CHEN Xiao-yong, YU Guang-wang. Extracting road boundary based on point cloud segment[J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 2017, **40**(1): 84-87.
王淑燕, 陈晓勇, 余广旺. 基于点云片段法提取道路边线[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017, **40**(1):84-87.
- [13] YAN Zao-jin, MENG Li-na. Automatic extraction method of road sideline based on linear feature[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2017, **26**(3): 42-45.
闫兆进, 孟丽娜. 基于直线特征检测的道路边线自动提取方法[J]. 测绘工程, 2017, **26**(3):42-45.
- [14] FANG Li-na, YANG Bi-sheng. Automatic extraction structural roads from mobile laser scanning point clouds[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, **42**(2): 260-267.
方莉娜, 杨必胜. 车载激光扫描数据的结构化道路自动提取方法[J]. 测绘学报, 2013, **42**(2):260-267.
- [15] KANG Y, ROH C, SUH S B, et al. A lidar-based decision-making method for road boundary detection using multiple kalman filters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, **59**(11): 4360-4368.
- [16] ZHANG W. LIDAR-based road and road-boundary detection[C]. Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2010: 845-848.
- [17] KUMAR P, LEWIS P, MCELHINNEY C P, et al. Snake energy analysis and result validation for a mobile laser scanning data-based automated road boundary extraction algorithm[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2017, **10**(2): 763-773.
- [18] WIJESOMA W, KODAGODA K, BALASURIYA A P. Road-boundary detection and tracking using lidar sensing[J]. *Robotics & Automation IEEE Transactions on*, 2004, **20**(3): 456-464.
- [19] KIM S H, ROH C W, KANG S C, et al. Outdoor navigation of a mobile robot using differential gps and curb detection [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007: 3414-3419.
- [20] KODAGODA K R, WIJESOMA W S, BALASURIYA A P. CuTE: curb tracking and estimation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, **14**(5): 951-957.
- [21] PETERSON K, ZIGLAR J, RYBSKI P E. Fast feature detection and stochastic parameter estimation of road shape using multiple LIDAR[C]. Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2012: 612-619.
- [22] CAI Lai-liang, YANG Wang-shan, WANG Shan-shan. Research on surface cooperative target design of underground mobile laser scanning system[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016, (S2): 234-237.
蔡来良, 杨望山, 王姗姗. 地下移动激光扫描系统平面合作标靶设计研究[J]. 测绘通报, 2016, (S2):234-237.
- [23] CAI Lai-liang, WU Kan, ZHANG Shu. Application of point cloud plan fitting to deformation monitoring using 3D lasers

- canner[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, **35**(5): 231-232.
- 蔡来良, 吴侃, 张舒. 点云平面拟合在三维激光扫描仪变形监测中的应用[J]. 测绘科学, 2010, **35**(5):231-232.
- [24] LI Yong-qiang, YANG Sha-sha, LI Kuang-yu, *et al* .Extraction of rod-like objects from vehicle-borne LiDAR data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, **40**(8): 42-46.
- 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.
- [25] LIU Xiang-bin, XIANG Jian-chi, YANG Bo. A labeling algorithm based on 8-connected boundary tracking [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001, **37**(23): 125-126.
- 刘相滨, 向坚持, 阳波. 基于八邻域边界跟踪的标号算法[J]. 计算机工程与应用, 2001, **37**(23):125-126.
- [26] QU Ya-yuan, CHENG Ying-lei, QIU Lang-bo. An improved method of extracting 3Dfeatures of buildings based on neighborhood search method[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2015(4): 66-69.
- 屈亚运, 程英蕾, 邱浪波. 改进的八邻域搜索提取建筑物立体特征方法[J]. 空军工程大学学报·自然科学版, 2015(4):66-69.
- [27] LÜ De-liang. Research on segmentation of scattered point cloud and identification the feature surface[D] . Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- 吕德亮.散乱点云分割及特征面片识别研究[D].北京建筑工程学院,2012.
- [28] LIU Ru-fei, LIU Xiu-shan, YUE Guo-wei, *et al* . An automatic extraction method of road from vehicle-borne laser scanning point clouds[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, **42**(2): 250-256.
- 刘如飞, 卢秀山, 岳国伟等. 一种车载激光点云中道路自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, **42**(2):250-256.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41701597, 41771491)

引用格式: YANG Wang-shan, CAI Lai-liang, GU Shu-dan. Extraction City Road Boundary Method Based on Point Cloud Normal Vector Clustering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6):0612003

杨望山, 蔡来良, 谷淑丹. 提取城市道路边线的点云法向量聚类法[J]. 光子学报, 2018, **47**(6):0612003