引文格式：李寒冰, 韩梦玥, 王盼. 基于机载 LiDAR 点云的道路提取方法研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(8): 129-132. DOI:10. 3969/J.ISSN. 1672-4623.2023.08.033

基于机载LiDAR点云的道路提取方法研究

李寒冰[1]，韩梦玥[1*]，王　盼[1]
（1. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 211100）

摘　要：道路是建设数字交通和数字城市的重要组成部分，也是空间地理信息的重要元素。针对传统遥感技术提取道路效率低、自动化程度不高以及易受周围环境影响等问题，基于无人机搭载LiDAR测量系统获取的某城郊结合区的点云数据，提出一种点云数据预处理、道路点云分级提取和道路边界提取算法。该算法首先对获取的LiDAR点云原始数据进行去噪处理，再结合曲面拟合滤波和点云几何特征提取包含道路在内的地面点云，然后利用点云的强度信息初提取道路点云，针对与道路材质相似的停车场等地物点云，在构建TIN的基础上，使用边长和面积约束进一步对道路点云进行精提取，最后使用α-shape算法对道路边界进行提取，并利用算法对实测的点云数据进行道路提取，以准确率和误分率对本文算法进行定量分析，结果表明提出的道路提取算法能够快速准确地提取道路点云。

关键词：道路提取；机载LiDAR点云；曲面拟合滤波；点云强度信息；α-shape算法
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）08-0129-04

Research on Road Extraction Method Based on Airborne LiDAR Point Cloud

LI Hanbing[1], HAN Mengyue[1], WANG Pan[1]
(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: Road is not only an important part for building digital transportation and digital city, but also an important element of spatial geographical information.Aiming at the problems of low efficiency, low degree of automation and vulnerability to the surrounding environment in the extraction of road by traditional remote sensing technology, based on the point cloud data of a suburban junction area obtained by UAV equipped with LiDAR measurement system, we proposed a point cloud data preprocessing, road point cloud hierarchical extraction and road boundary extraction algorithm. Firstly, wedenoisedthe original data of LiDAR point cloud, andextracted the ground point cloud including roadby combining surface fitting filtering and geometric features of point cloud. Then,we extracted the road point cloud initially by using the intensity information of point cloud. For the parking lot and other ground object point clouds similar to the road material, based on the construction of tin, we further extracted the road point cloud by using side length and area constraints. Finally, we used α-shape algorithm to extract theroad boundary. Weusedthe algorithmto extract the road from the measured point cloud data, and used the accuracy and error rate of road extractionto analyze the algorithm quantitatively. The calculation result shows that the road extraction algorithm proposed in this paper can extract the road point cloud in a quick and accurate way.

Key words: road extraction, airborne LiDAR point cloud, surface fitting filter, point cloud intensity information, α-shape algorithm

机载激光雷达测量技术的出现为道路的识别和提取提供了新的思路和方法，其获取的数据不仅包含高密度的点云三维坐标，还包含点云回波强度、回波次数、邻域特征等信息，这都有助于道路的分类和提取[1-2]。本文基于相关研究[3-7]，对基于机载LiDAR获取的点云数据进行分析，提出一种综合点云数据去噪和滤波、基于强度信息的道路点云初提取、基于TIN约束的道路点云精提取以及基于α-shape的道路边界提取算法，以提升道路提取的效率和准确性。

1　机载LiDAR点云去噪和滤波

1.1　点云去噪

无人机搭载LiDAR测量系统在空中对地测量时，发射的激光遇到无关物体时会产生噪声点，同时由于受到多路径效应的影响也会产生噪声点云。噪声点云不仅会导致数据冗余，也会对后续的滤波处理造成影响[8]。因此，在机载LiDAR原始点云的预处理过程中进行点云去噪是非常必要的。噪声点在空间中分布存

收稿日期：2022-03-17；修回日期：2022-07-10。
第一作者简介：李寒冰（1980—），高级工程师，主要从事工程测绘信息化发展等方面的研究，E-mail：15951936312@163.com。
通信作者：韩梦玥（1995—），硕士研究生，主要从事测量数据处理等方面的研究，E-mail：z2242045579@163.com。

在高程突变的特点。因此，一般是根据噪声点的空间分布特性对其进行去除。由于噪声点云的数量较少且在空间中呈现孤立分布的形式，因此，本文选用高程统计分布直方图法去除原始机载LiDAR点云中的噪声点云，通过设置合适的频数阈值和各点的距离阈值去除噪声点。

1.2 结合曲面拟合和点云几何特征的点云滤波

目前的点云滤波算法主要有基于坡度的、基于形态学的、基于三角网的以及基于曲面拟合的。其中基于曲面拟合的滤波算法不仅能够适应各类地形，而且处理效率也较高。因此，本文采用曲面拟合滤波算法[9]对去噪后的点云进行滤波。

曲面拟合滤波算法的核心思想是使用一个二次曲面对地面进行表示，通过判断各点与拟合曲面的高差值和高差阈值的大小来滤除非地面点，其中地面点云与拟合曲面的高差值较小，而非地面点与拟合曲面的高差值较大。用来拟合地面的二次曲面的函数方程如式（1）所示。

$$Z=a_0+a_1X+a_2Y+a_3X^2+a_4XY+a_5Y^2 \tag{1}$$

式中，a_0、a_1、a_2、a_3、a_4、a_5为方程的待求参数，其误差方程矩阵形式如式（2）所示。

$$v=\boldsymbol{A}\hat{\boldsymbol{X}}-l \tag{2}$$

其中，$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2\\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2y_2 & y_2^2\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & x_ny_n & y_n^2\end{bmatrix}$，$\hat{\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix}a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$l=\begin{bmatrix}z_1 & z_2 & \cdots & z_n\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，（$x_n$，$y_n$，$z_n$）为第$n$个地面点云的三维坐标值。

$$\hat{\boldsymbol{X}}=\left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}l \tag{3}$$

根据最小二乘法中的$V^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}V=\min$最小原则（$\boldsymbol{P}$为权矩阵，由于测得的数据是同精度独立观测的，因此$\boldsymbol{P}$为单位阵），依据公式（3）就可以求解出二次曲面方程的最佳参数值，然后依次对所有的点云进行判断，将点云的平面坐标x，y值代入公式（1）中就可以计算得到各个点的拟合高程值，通过计算与真实高程点的高差值并和高差阈值进行判断就可以划分地面点和非地面点。

由于低矮植被点云和地面点云的高程相接近，在此，本文进一步利用点云的几何特征信息对低矮的植被点云进行去除。通过分析地面点以及低矮植被点等地物点的空间位置可知，这两类点云及其K邻域内点云的高度方差σ^2是不同的，低矮植被点云的σ^2较大，而地面等地物点云的σ^2是较小的，因此，可以设置合适的高度方差阈值对地面点云中包含的低矮植被点云进行去除。

2 道路点云提取

2.1 基于点云强度信息的道路初始点云提取

经过点云预处理和滤波后得到的地面点云中除了道路点云以外，还包含其他非道路点云，比如低矮的植被点和汽车等地物点云。机载LiDAR扫描得到的点云中包含了地面目标的反射强度信息，反射强度主要取决于反射率。而反射率是由不同地物其本身的材质属性所决定的，通常定义柯达白板的表面反射率为100%，不同地物的反射率如表1所示。激光LiDAR获取的强度值依赖于入射角、传感器与物体表面的距离、以及物体表面的反射率，2个在同一入射角和距离下的物体，其强度之比应与物体表面的反射率之比相同，对其进行进一步量化后得到的不同主要地物的点云反射强度相对值如表2所示。因此，可以利用点云强度信息对地面点云进行进一步的划分，从中得到所需的道路点云。目前，道路的材质主要有混凝土和沥青2种，从表2可以看出，这两种材质的反射强度值在50~150之间，因此可以设置合适的点云强度阈值对上述得到的地面点进行进一步的道路点云提取。

表1 不同介质地物点云的反射率

介质	反射率/%
白纸	接近100
形状规则的木材（干松树）	94
雪	80~90
白石块	85
石灰石、黏土	接近75
落叶树	典型值60
海岸沙滩、沙漠裸露地	典型值50
松针类常青树	典型值30
粗糙木料	25
混凝土	24
沥青	17
火山岩	8
黑色氯丁橡胶	5
黑色橡皮轮胎	2

表2 主要地物点云的强度信息相对值

强度值	介质	可能地物
50~150	沥青、混凝土	道路、桥梁、房屋屋顶
150~250	泥土、沙石	裸露地、浅色房屋屋顶
250~350	稀疏植被、金属	灌木丛、草地、长势不好的农作物、行驶车辆
350~500	茂密健康植被	草地、长势好的农作物、行驶车辆

2.2 基于TIN约束的道路点云精细化提取

由于停车场等地物和道路具有相似的材质，因此利用点云强度信息得到的道路点云中还会包含这类的

非道路点云，为了进一步对道路点云进行精细化的处理，本文使用一种基于TIN约束的非道路点云分离方法。将利用强度信息提取到的道路点云分为真实道路点云和非道路点云，分析可知，真实道路区域的点云密度要远大于非道路区域的点云密度，且由于道路的连通性决定了道路区域的面积也是要大于非道路区域的，因此，可以利用密度和面积约束来对真实道路区域点云进行提取。具体的过程为：

1）对提取到的道路点云基于Delaunay准则构建TIN三角网，如图1所示。

2）设置三角网的边长阈值，将长度大于阈值的三角形边长删除，由于真实道路区域和其他地物区域的点云密度较大，构成的三角网的边长较短，而连接真实道路区域和其他地物区域的三角网的边长就会较长，通过这一步的操作可以将道路点云分割成若干个孤立的TIN和离散点，如图2所示。

3）将离散点删除，并设定面积阈值，将小于面积阈值的孤立TIN也一并删除，这样就得到了真实的道路区域点云。

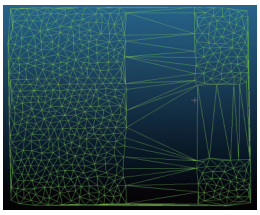
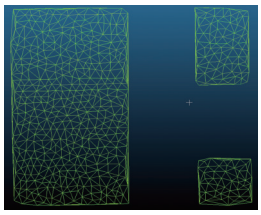



图1　TIN三角网　图2　边长约束后的TIN三角网

2.3　基于−shape算法的道路边界提取

经过上述步骤的处理，可以得到道路的点云数据，但是不便对道路的整体布局和边界有一个清晰的认知，为了更好的确定道路的空间位置以及为了后续的空间地理信息处理，本文基于 α −shape算法提取道路的边界点云并生成道路边界轮廓线。 α −shape算法的主要思想是构造一个固定半径的圆，然后使其绕着点云集合滚动，从而提取出点集的轮廓点，一般将滚动圆的半径设置为点云集合平均间隔的2~3倍，在此实验中即将半径 α 设置为经2.2节处理后的道路点云集合平均间隔的2~3倍，其圆心坐标由式（4）、（5）得到。

$$\begin{cases} O_x = \frac{1}{2}(x_1 + x_2) + H(y_2 - y_1) \\ O_y = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) + H(x_1 - x_2) \end{cases} \tag{4}$$

$$H = \sqrt{\frac{\alpha^2}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} - \frac{1}{4}} \tag{5}$$

式中，（ O_x，O_y ）为滚动圆的圆心坐标，（ x_1，y_1 ）和（ x_2，y_2 ）分别为待判断点 P_1 和 P_2 的平面坐标。此算法的具体步骤可以参考文献[14−15]。

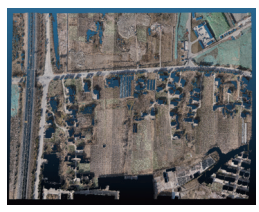
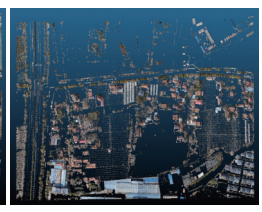
3　实例计算

为了验证本文提出的道路提取算法的可行性，采用SKY−LARK无人机搭载LiDAR测量系统对某城郊区域进行扫描，该测区的点云图像如图3所示，从中可以看出，该测区内不仅包含一条南北走向的高速公路、两条南北和东西走向的较宽的水泥道路、若干条分支窄路、停车场和房前庭院等地面点云，还包括车辆、房屋、车辆、植被等非地面点云。测区的总面积为307 476 m^2，扫描的点云密度约为61.66个/ m^2。



图3　测区点云图像

对经过去噪后的点云数据进行曲面拟合滤波处理，首先对测区进行格网划分，格网的尺寸为测区内建筑物的最大边长为32.5 m，然后将格网内高程值最低的点云作为种子点进行曲面拟合滤波，滤波中的高程差阈值设置为0.2 m。对于与地面紧密相连的低矮植被等地物点云，再利用点云的几何特征信息对其进行去除，这里设置的邻域半径为0.5 m，设置的高度方差阈值 σ^2 为0.1 m^2。经过滤波处理后得到的地面点云和非地面点云的图像如图4所示。

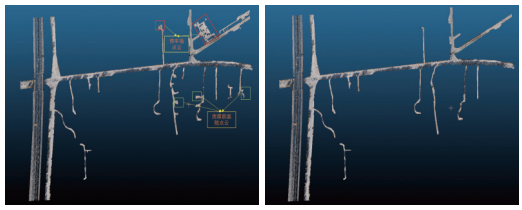
a 地面点　　b 非地面点

图4　滤波处理后测区地面点云和非地面点云图像

对比图4中的a和b可知，本文结合曲面拟合滤波和点云几何特征精细化的算法基本上将房屋、植被、树木、车辆、道路中间绿化带等地物去除了，较为精确地得到了包含道路在内的地面点云。

对地面点云集合进行基于回波强度的道路点云提取，设置的点云强度阈值区间为50~150，得到的初始道路点云图像如图5a所示，从图中可以看出基于点云强度信息初提取得到的道路点云中还包含了停车场（图中红色线框区域），房前庭院（图中绿色线框区域）等材质和混凝土道路一致的区域。为了进一步去除初始道路点云中的非道路点，采用基于TIN约束的方法对道路点云进行精细化提取，此处设置的TIN三角网边长阈值

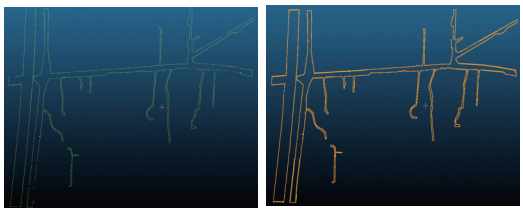
为两倍扫描点云间隔为0.25 m，面积阈值为100 m^2，通过此步骤处理得到的精细化的道路点云如图5b所示。



a 基于强度提取的点云图像 b 基于TIN提取的点云图像

图5 基于强度信息及TIN约束提取到的道路点云图像

对得到的精细化道路点云使用α-shape算法进行道路边界提取，α取值为0.15 m，最终得到的道路边界点云和道路轮廓如图6所示。



a 道路边界点 b 道路轮廓线

图6 道路边界点云和道路轮廓图像

4 精度评定

通过观察提取到的精细化道路点云图像和道路边界点云轮廓图像，可以发现虽然本文提出的算法对于道路点云的提取具有比较好的结果，但还是会受到其他地物遮挡的影响，导致提取的道路边界不够光滑且有部分缺失。为了对本文的道路提取算法进行定量分析，本文采用正确度（Correctness）、完整度（Completeness）以及质量（Quality）等精度指标对算法进行评定，其各自的计算公式如式（4）所示，采用的对照数据为手动提取的准确道路点云，计算结果如表3所示。

$$\begin{cases} R_{\text{Correctness}} = TP/(TP+FN) \\ R_{\text{Completeness}} = TP/(TP+FP) \\ R_{\text{Quality}} = TP/(TP+FN+FP) \end{cases} \tag{4}$$

式中，TP为正确提取出的道路点云个数；FN为未能提取出来的道路点云个数；FP为将非道路点云误提取为道路点云的个数。

表3 本文算法提取道路点云的精度评价结果

参数	定量评价指标	点云个数
数量/个	TP	990 420
	FN	58 316
	FP	13 679
质量指标/%	$R_{\text{Correctness}}$	94.44
	$R_{\text{Completeness}}$	98.65
	R_{Quality}	93.22

分析表3中的统计结果可知，利用本文算法对道路点云进行提取可以取得较好的结果，其中提取正确度达到了94.44%，完整度达到了98.65%，总体质量为93.22，说明本算法在道路提取方面具有一定的适用性。由于本文的实验数据中既有高速公路这种规则宽阔的道路，也有宽窄不一、线型差异较大的水泥道路，所以也可以看出本文算法对多种现状和材质的道路具有一定的鲁棒性。

5 结 语

道路提取的研究对于道路三维建模、构建智慧城市三维模型至关重要，本文在深入分析已有方法优缺点的基础上，提出一种综合点云数据去噪和滤波、基于强度信息的道路点云初提取、基于TIN约束的道路点云精提取以及基于α-shape的道路边界提取算法，构建了一套基于机载LiDAR点云数据提取道路的完整方法流程，为后续的道路建模，地图导航等应用提供了数据支撑，对智慧交通和数字城市的建设具有重要意义。

参考文献

[1] 彭译萱,陈晨. 基于LiDAR点云检测的城市道路轮廓提取技术[J]. 激光杂志,2020,45(10):141-144

[2] 李峰,崔希民,刘小阳,等. 机载LiDAR点云提取城市道路网的半自动方法[J]. 测绘科学,2015,40(2):88-92

[3] 贾建鑫,孙海彬,蒋长辉,等. 多源遥感数据的道路提取技术研究现状及展望[J]. 光学精密工程,2021,29(2):430-442

[4] 王濮,邢艳秋,王成,等. 机载LiDAR数据提取山区道路方法研究[J]. 遥感技术与应用,2017,32(5):851-857

[5] 陈健华. 基于机载LiDAR点云的道路提取算法研究[J]. 测绘工程,2020,29(3):51-55

[6] 原战辉,肖林萍. 基于机载LiDAR点云数据的城区道路提取[J]. 测绘与空间地理信息,2018,41(4):147-151

[7] 李磊,张永生,于英,等. 利用偏度平衡自动提取机载LiDAR点云城区道路[J]. 测绘科学技术学报,2017,34(6):628-638

[8] 操松元,郭可贵,谭弘武,等. 激光雷达在输电线路巡检中的关键技术及应用[J]. 地理空间信息,2021,19(2):83-86

[9] 朱依民,田林亚,毕继鑫,等. 基于PTD和改进曲面拟合的高山区水电工程机载激光雷达点云滤波方法[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):35-40

[10] Edelsbranner H,Kipkpatrick D,Seidel R. On the Shape of a Set of Points in the Plane[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1983,29(4):551-559

[11] Edelsbranner H. Smooth Surfaces for Multi-scale Shape Representation[C]//Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, Springer-Verlag,1995:391-412