

文章编号: 2095-2163(2024)01-0119-06

中图分类号: P237

文献标志码: A

# 基于 LiDAR 点云的单根电力线分离提取与多维度拟合重建

毛建国, 卿粼波, 池慧玲

(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 激光雷达技术能够快速高效地获取高精度的三维点云数据, 机载 LiDAR 不受天气影响且能在复杂地理条件下工作, 已成为电力线巡检的重要方法。而从获取的 LiDAR 点云数据中高效提取架空电力线点云是机载 LiDAR 电力巡检后期数据处理的重要内容。本文基于某地输电线走廊的 LiDAR 点云数据, 设计了一套单根电力线分离提取和多维度拟合重建的方案。该方案首先使用统计滤波算法去除 LiDAR 数据中的异常离群点; 再采用布料模拟滤波算法, 结合数据高程信息去除地面点, 利用 PCA 主成分分析法与快速欧式聚类算法, 从电力线走廊点云中分离提取单根电力线; 最后基于提取结果对单根电力线进行多维度拟合重建。实验结果表明, 本文方法能精准且快速地分离提取单根电力线并进行多维度拟合重建, 在电力线智能巡检中具有良好的工程应用价值。

**关键词:** LiDAR; 快速欧式聚类; 电力线提取; 三维重建

## LiDAR-based single power line separation and multi-dimensional fitting reconstruction scheme

MAO Jianguo, QING Linbo, CHI Huiling

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** LiDAR technology enables fast and efficient acquisition of high-precision 3D point cloud data. Airborne LiDAR, unaffected by weather conditions and capable of working in complex geographic conditions, has become an important method for power line inspection. Extracting overhead power line point clouds from LiDAR data is essential for post-processing in airborne LiDAR power line inspection. In this study, we designed a scheme to separate, extract, and reconstruct individual power lines based on LiDAR point cloud data from a transmission line corridor. The scheme utilizes statistical filtering to remove outliers, cloth simulation filtering with elevation information to eliminate ground points, and PCA and Fast Euclidean Clustering algorithms to separate and extract individual power lines. Finally, multi-dimensional fitting reconstruction is performed for each power line. Experimental results demonstrate the precision and speed of our method, making it valuable for intelligent power line inspection.

**Key words:** LiDAR; fast Euclidean clustering; power line extraction; 3D reconstruction

## 0 引言

随着国内电力线网结构日趋复杂, 对周期性电力巡检提出了更高的要求<sup>[1]</sup>, 尤其对电力线周期性巡检的安全性要求越来越高。传统的电力线周期性安全巡检方式存在的问题包括成本高、作业难度大、巡检结果不可靠等<sup>[2-3]</sup>, 而机载激光 (Light Detection And Ranging) 系统则集成了激光测距系统等多种子系统<sup>[4]</sup>, 能够高效获取目标地物表面高精度三维坐标信息<sup>[5]</sup>, 在一定程度上可弥补传统方式的缺憾,

对于复杂区域电力线巡检有巨大优势。

然而, 电力线周围环境复杂, 通过机载激光雷达采集到的点云数据中同时也包含了电力线周围复杂环境中生长的高大树木以及建筑物等三维坐标信息。因此, 从获取的 LiDAR 点云数据中自动、高效提取电力线是 LiDAR 点云电力线巡检的关键<sup>[6]</sup>, 其不仅能为电力线的完整性评估、植被管理、安全可靠评估提供关键信息, 还可为数据集成和分析提供基础, 促进电力系统的维护和管理工作的。

国内外学者在处理机载 LiDAR 点云数据中电

**作者简介:** 毛建国 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理和信总论、人工智能与计算机视觉; 池慧玲 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理和信总论、人工智能与计算机视觉。

**通讯作者:** 卿粼波 (1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 人工智能与计算机视觉、图像/视频处理。Email: qing\_lb@scu.edu.cn

收稿日期: 2023-07-26

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

力线提取和重建方面进行了广泛研究。其中,程宇航<sup>[7]</sup>等使用深度学习方法提取电力线,但训练样本有限且训练过程复杂。朱依民<sup>[8]</sup>等尝试通过局部高程直方图模式对杆塔点和电力线点进行分类,但该方法存在较大局限性。蔡岐彬<sup>[9]</sup>等采用高程阈值分割算法来区分电力线点和其他地物点,以避免单一高程阈值对分类结果的影响,但算法本身较为复杂。还有些方法考虑了地形起伏特征,通过自适应点云滤波后利用纬度特征排除非电力线点,然后应用 Hough 变换提取单根电力线,但这种方法在提取过程中涉及图像转换,导致分辨率降低且无法有效减少噪声对提取结果的影响。

为了应对 LiDAR 电力线提取与重建的挑战,从复杂的 LiDAR 点云数据中精确、快速提取到电力线,为电力线智能巡检提供支撑,本文设计了一套单根电力线点云快速高精度分离提取和多维度拟合重建的方案,设计思路如图 1 所示。

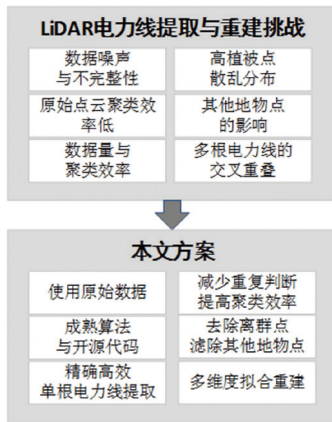


图 1 存在的挑战和本文方案

Fig. 1 Challenges and this article scheme

## 1 方法及原理

一般情况下,在实际电力线走廊点云中,高植被点呈不规则散乱分布,杆塔点局部范围内呈规则面状分布,电力线点呈水平线状分布。基于此,本文设计了一套单根电力线分离提取与多维度拟合方案。方案实现步骤如下:

(1)使用统计滤波算法<sup>[10]</sup>去除离群点之后,采用布料模拟滤波算法<sup>[11]</sup>,结合数据高程信息,滤除大量的地面点数据,完成其他地物点的滤波。

(2)根据点云空间分布特征,采用 PCA 主成分分析法实现电力线的粗提取<sup>[12]</sup>。

(3)对粗提取结果采用快速欧式聚类算法<sup>[13]</sup>快速聚类单根电力线,完成单根电力线的分离精提取。

(4)采用最小二乘法,从二维平面直线、二维平面多项式曲线、三维空间等 3 个维度对分离精提取后的单根电力线进行拟合重建。

### 1.1 其它地物点滤波

激光雷达获取的点云数据有时会错误接收回波信号,从而产生一些不可避免的离群点,对点云的成像、分割以及后续目标识别都有较大影响。本文采用统计滤波方法,对每个点的邻域进行统计分析,将超出正常范围值的点定义为离群点进行去除。

在 LiDAR 点云数据中,地面点云占据了较大部分,为了降低后续电力线提取的复杂度,获取高精度的电力线点云数据,对机载 LiDAR 点云数据进行地面点分割滤除是非常重要的步骤。本文中,采用布料模拟滤波算法,结合实际数据高程信息来滤除地面点。布料模拟是在点云翻转后的条件下,仅考虑重力和节点间的相互作用力,旨在模拟轻质布料的下落行为,并使其附着在经过翻转的点云表面。通过适当调整布料的硬度,在保持柔软度适度的情况下,可以使布料与地面点云实现贴合,而不会与其粘连在一起。该方法的目标是实现轻质布料在翻转后点云表面的精确模拟,布料的形状即为该处点云的数字高程模型<sup>[14]</sup>,布料模拟滤波对复杂地形表面具有鲁棒性。基本原理如图 2 所示。

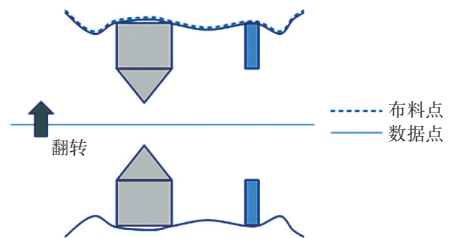


图 2 布料模拟滤波算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cloth simulation filtering algorithm

### 1.2 基于 PCA 主成分分析法的电力线点云粗提取

在对其它地物进行滤波处理后,得到了一组非地面点云,其中包含了电力线点、部分杆塔点以及高植被点。这些高植被点的分布不规则且散乱,而杆塔点在局部区域内呈现规则的面状分布,电力线点则表现为水平线状分布。根据不同目标点云的空间分布特征,利用 PCA 主成分分析法,粗判别面状杆塔点云与线状电力线点云,最大限度留取电力线点数据。具体判别方法为:通过分析空间点云的分布特征,可利用其在半径为  $R$  的邻域内,点集协方差矩阵的 3 个特征值  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  来进行判别。当特征值满足  $\lambda_1 \cong \lambda_2 \gg \lambda_3$  时,表示该点的数据呈现面状

特征,例如铁塔表面或建筑物表面;而当  $\lambda_1 \gg \lambda_2 \cong \lambda_3$  时,说明点的数据表现为线状分布特征,这可能是电力线点或某个面的边线点;如果  $\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$ , 则表示点呈现无序散点分布,很可能是植被点。最终根据这些特征点的信息对电力线点云进行初步提取。

### 1.3 基于快速欧式聚类的单根电力线分离

经过对电力线的粗提取后,得到所有条数的电力线点云数据以及部分误分类点,但无法精确分离提取单根电力线点云数据。对于单根电力线的分离提取,欧式聚类是一种较为经典的聚类方式,是一种基于密度和距离的聚类方法。

由于传统的欧式聚类必须要遍历点云中所有的点,导致许多点会被重复判断很多次,影响聚类效率,本文为减少重复判断来提升欧式聚类的计算效率,采用快速欧式聚类算法<sup>[12]</sup>,对单根电力线进行分离。使用快速欧式聚类算法需预先设置 4 个聚类参数,分别是领域搜索的最大点数  $\max\_n$ 、近邻搜索的最大搜索半径  $tolerance$ 、一个聚类需要的最少点数目  $\min\_cluster\_size$ 、一个聚类需要的最大点数  $\max\_cluster\_size$ 。

### 1.4 单根电力线多维度拟合重建

电力线的拟合常采用多种方法,例如 RANSAC 算法拟合和最小二乘原理拟合<sup>[15-16]</sup>。RANSAC 算法执行过程需要大量内存,并且其拟合结果可能具有较大的随机性。相比之下,最小二乘原理拟合则表现出更高的稳定性<sup>[17]</sup>。

因此,本文基于上述精确分离提取后的单根电力线点云数据,借助最小二乘配置法则,从平面直线拟合、平面曲线拟合、三维拟合 3 个维度对单根电力线进行拟合重建。

首先,理论上单根电力线点云在  $xoy$  平面上的投影为一条直线,表达式为

$$y = kx + b \tag{1}$$

其次,在拟合重建后的直线(1)上建立一个垂

直于  $xoy$  平面的平面,则电力线在该平面上的理论投影为二维多项式曲线,表达式为

$$p(x) = p_1 x^n + p_2 x^{n-1} + \dots + p_{n+1} \tag{2}$$

式中:多项式系数  $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n, p_{n+1}\}$ , 本文  $n$  取 2,采用线性最小二乘法求解出系数。

电力线三维重建是将电力线点以矢量形式进行表达,这种方法利用了抛物线方程,对电力线模型进行近似描述<sup>[18]</sup>。电力线在空中的自然形态通常可以用三维抛物线的数学基准来合理表示,拟合方程(悬链线方程)为

$$z = a(x^2 + y^2) + b\sqrt{x^2 + y^2} + c \tag{3}$$

依据提取到的电力线点云数据的三维坐标,可求解拟合系数  $a, b, c$ ,完成电力线三维拟合,从而构建出电力线的三维模型。

## 2 实验分析

### 2.1 实验数据

本文实验数据选用某地无人机搭载激光雷达系统扫描采集到的 66 kV 输电线走廊的点云数据,实验选取其中一段较为完整的电力线走廊的点云数据。选取电力线走廊片段包含 9 617 724 个点的三维坐标信息,包含 2 个电力杆塔以及 8 条电力线数据,如图 3 所示。

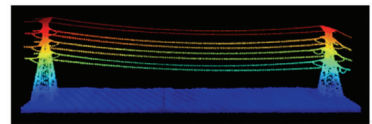


图 3 选取的电力线走廊点云

Fig. 3 The selected power line corridor point cloud

### 2.2 其它地物点滤波

本文采用统计滤波算法对分布在大部分点云之外的离群噪声点进行去除,统计滤波算法过程中设置两个滤波阈值  $k = 20, d_{\max} = 15$ 。

本文对比了高程阈值滤波和布料模拟滤波算法对地面点进行滤除,不同参数下两种方法的滤波效果如图 4 所示。

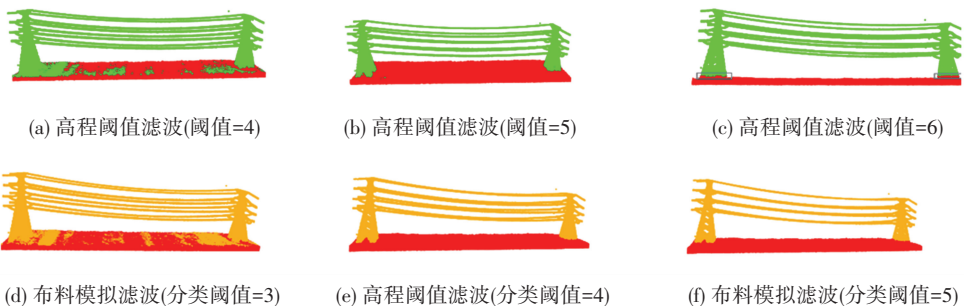


图 4 地面点与非地面点分割对比

Fig. 4 Ground points versus non-ground points

虽然高程阈值滤波在最优参数下也能很好地去除地面点,但在非平坦地形的情况下,设置唯一的高程阈值会滤除部分非地面点云;而布料模拟滤波则能够完整保留电力线点云,且完整过滤地面点。表1对比了布料模拟滤波算法和高程阈值分割在不同参数下的地面点与非地面点分割效果。当布料模拟滤波算法中的分类阈值  $classThreshold$  设置为4时,地面点过滤的准确性可达到99.99%。

表1 地面点与非地面点分割方法对比

Table 1 Optimal parameter setting for cloth simulation filtering

方法	参数	过滤地面点数	实际地面点数	过滤准确率/%
高程阈值滤波	4	6,705,480	6,851,029	97.88
	5	6,852,666	6,851,029	99.98
	6	6,879,409	6,851,029	99.59
布料模拟滤波	3	6,773,156	6,851,029	98.86
	4	6,850,022	6,851,029	99.99
	5	6,880,982	6,851,029	99.56

## 2.3 电力线提取

根据电力线与电力塔不同的空间分布特征,利用PCA主成分分析法,区分面状杆塔点云和线状电力线点云。电力线点云粗提取效果如图5,其中红色点为电力线点,绿色点为非电力线点。



图5 电力线点云粗提取

Fig. 5 Power line point cloud coarse extraction

采用快速欧式聚类算法从电力线粗提取结果中精确分离提取单根电力线需预先设置4个聚类参数,根据本文实验数据特点,设置不同参数进行实验对比后,最终将邻域搜索的最大点数  $max\_n$  设置为400,近邻搜索的最大搜索半径  $tolerance$  设置为两根电力线点云间最小的欧式距离4,根据单根电力线点云数量的范围,将聚类需要的最少点数目  $min\_cluster\_size$  设置为12 000、一个聚类最大点数目  $max\_cluster\_size$  设置为27 500。使用快速欧式聚类算法进行单根电力线分离提取结果三视图如图6所示。

同时,为了定量分析本文方案中的单根电力线点云分离提取的准确性,采用第三方点云数据处理软件手动提取电力线点的结果作为参考。通过对比这些结果,统计电力线点提取的准确率,以此作为精度评估的主要标准,统计结果,见表2。



(a) 左视图



(b) 正视图



(c) 俯视图

图6 快速欧式聚类单根电力线点云

Fig. 6 Fast euclidean clustering of single power line point cloud

表2 单根电力线分离提取结果

Table 2 Single power line separation extraction results

方法	电力线	提取点数	手动提取点数	准确率/%
基于快速 欧式聚类 的单根电 力线分离 提取	电力线1	17 306	17 360	99.69
	电力线2	16 513	16 190	98.04
	电力线3	16 776	16 777	99.99
	电力线4	13 906	14 232	97.71
	电力线5	24 511	25 115	97.60
	电力线6	22 673	23 555	96.26
	电力线7	11 728	12 161	96.44
	电力线8	12 093	12 399	97.53

从表2可以看出,8根电力线提取的准确率均在96%以上,进一步验证了本文方法能够精确高效实现单根电力线的分离提取。分析其主要原因如下:

(1) 利用原始的点云数据,避免数据内插带来的精度和信息损失;

(2) 选用快速欧式聚类算法聚类分离单根电力线,在对未采样的原始点云进行聚类时的效率比传统欧式聚类高近百倍,大大提升了欧式聚类的计算效率;

(3) 使用点云滤波、直线拟合等成熟的算法和开源代码,提高了电力线提取的整体稳定性。

## 2.4 电力线拟合重建

基于上述单根电力线拟合重建的方法,从二维平面直线、二维平面曲线和三维空间这3个维度对单根电力线进行拟合重建。以电力线1为例:电力线的二维平面直线拟合、二维平面多项式曲线拟合以及三维拟合重建结果如图7所示。

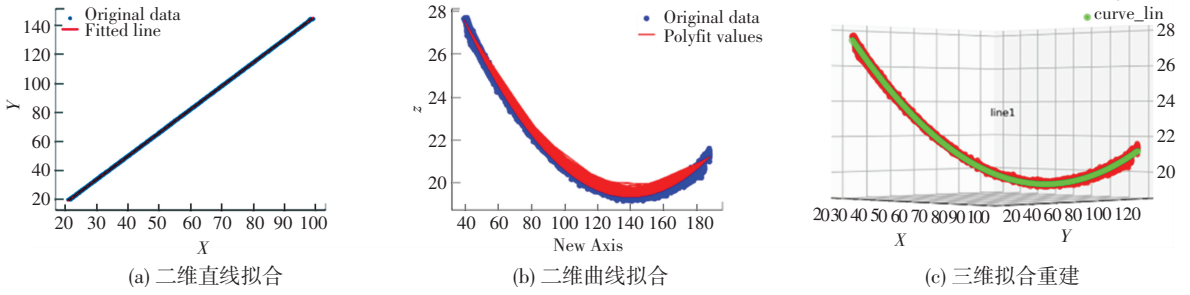


图 7 单根电力线多维度拟合重建示例 (line 1)

Fig. 7 Example of a multi-dimensional fitting reconstruction of a single power line

图 8 展示了 8 根电力线的三维拟合重建结果。可明显看出, 本文所用方法在实现单根电力线的多维度拟合重建方面取得了良好的效果。

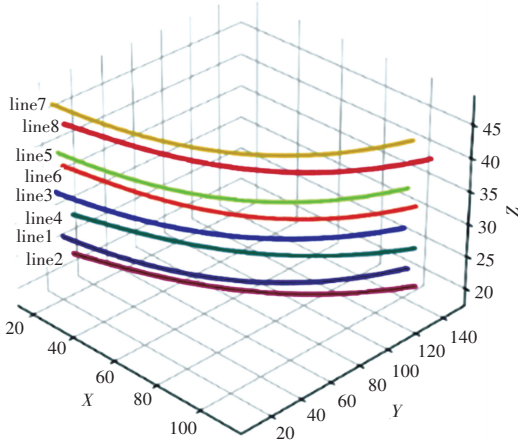


图 8 8 根电力线三维拟合重建结果

Fig. 8 Results of 3D fitting reconstruction of 8 power lines

本文采用最优拟合参数及 *RMSE* 客观评价单根电力线点云的拟合重建效果。以电力线 1 为例, 二维直线拟合表达式、二维多项式曲线拟合表达式、三维拟合表达式分别用式(4)~式(6)来表示, 拟合参数最优估计值及 *RMSE* 见表 3。

$$y = kx + b \tag{4}$$

$$p(x) = p_1 x^2 + p_2 x^1 + \dots + p_3 \tag{5}$$

$$z = a(x^2 + y^2) + b\sqrt{x^2 + y^2} + c \tag{6}$$

通过表 3 可得, 单根电力线二维直线拟合均方根误差 *RMSE* 为 0.174 769 12, 二维多项式曲线拟合均方根误差 *RMSE* 为 0.042 873 010, 三维拟合均方根误差 *RMSE* 为 0.044 493 44。拟合均方根误差越小, 表明拟合重建精度越高, 拟合电力线点均分布在拟合对象所在半径范围内, 单根电力线的多维度拟合均取得良好的效果。

表 3 单根电力线多维度拟合结果 (电力线 1)

Table 3 Two-dimensional straight-line fitting reconstruction of a single power line

拟合重建维度	参数	拟合参数最优估计值	<i>RMSE</i>
二维直线拟合	<i>k</i>	1.606 486	0.174 769 12
	<i>b</i>	-12.426 086	
二维多项式曲线拟合	<i>p</i> <sub>1</sub>	0.000 812 5	0.042 873 010
	<i>p</i> <sub>2</sub>	-0.224 8	
	<i>p</i> <sub>3</sub>	54.36	
三维空间拟合	<i>a</i>	0.000 821 68	0.044 493 44
	<i>b</i>	-0.210 267	
	<i>c</i>	52.251 965	

### 3 结束语

本文根据电力线点在电力走廊 LiDAR 点云数据中的空间分布特征, 设计并实现了一套单根电力线分离提取与多维度拟合重建方案。针对欧式聚类在高密度点云聚类耗时长的问, 使用快速欧式聚类对未采样的原始电力线走廊点云, 进行单根电力线的高精度高效率分离提取, 保证电力线点云高精度提取的同时, 大大提升聚类效率。此外, 基于实际输电线路走廊的点云数据对本文方法进行了实验分析, 结果表明本文设计的方案能够精确提取完整电力线点云, 并实现单根电力线的高精度、高效率分离与多维度拟合重建, 验证了本文所设计方案在电力线点提取与重建方面的准确性与可靠性, 在电力巡检等实际场景具有一定的应用价值。

### 参考文献

[1] ZHANG J, DUAN M, YAN Q, et al. Automatic vehicle extraction from airborne LiDAR data using an object-based point cloud analysis method [J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8405-8423. (下转第 129 页)