

# 基于区域生长算法的无人机点云电力导线提取方法

李行义<sup>1</sup>, 吴蔚<sup>1,✉</sup>, 赵智尧<sup>1,2</sup>

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:** [目的] 电力导线具有较长传输距离和所处空间环境复杂的特点, 由于无人机激光点云技术可以完整和高效地获取电力导线及其周边空间对象的几何信息, 针对现有的监督提取和无监督提取方法对于大范围复杂环境中点云数据提取中出现的缺失情况, 针对主网和配网线路点云数据的空间环境特点提出了基于投影线特征以及区域生长算法的点云电力线快速提取方法。[方法] 首先针对主网架空线路通常高于周围空间对象的特点, 通过高程直方图阈值方法对电力线进行粗提取。考虑到配网区域, 植被冠层高于配网线路的特点, 对粗提取的电力线点云数据获取其  $K$  近邻数据点, 并将点云投影在水平面上, 通过判断点云的线性度量判断是否为导线点云。[结果] 根据导线点云存在缺失的情况, 通过区域生长方式获取所有导线点云簇, 在此基础上将通过悬链线公式计算每个导线点云簇的悬链线公式, 合并拟合距离小于阈值的点云作为同一导线点云。[结论] 提出的方法针对电力巡检应用中导线快速提取的问题, 克服了导线点云提取过程中的导线点云缺失以及植被影响问题, 能够高效、高准确度实现导线点云提取。

**关键词:** 电网巡检; 无人机激光点云数; 区域生长; 悬链线; 电力导线提取

中图分类号: TM7; P231

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0138-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Power-Line Extraction Method for UAV Point Cloud Based on Region Growing Algorithm

LI Xingyi<sup>1</sup>, WU Wei<sup>1,✉</sup>, ZHAO Zhiyao<sup>1,2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611765, Sichuan, China)

**Abstract:** [Introduction] Since the power line has the characteristics of long transmission distance and a complex spatial environment, the UAV LiDAR point cloud technology can completely and efficiently obtain the geometric information of the power line and its surrounding spatial objects, and the existing supervised extraction and unsupervised extraction methods are deficient in point cloud data extraction in a large range of complex environments, according to the spatial environment characteristics of the main network and distribution network line point cloud data, a rapid extraction method of point cloud power line is proposed based on projection line characteristics and region growing algorithm. [Method] Firstly, in view of the characteristics that the overhead lines of the main network were usually higher than the surrounding spatial objects, the power lines were roughly extracted by the elevation histogram threshold method. Then, considering the characteristics that the vegetation canopy was higher than the distribution network line in the distribution network area, the KNN data points of the roughly extracted power line point cloud were obtained, and the point cloud was projected on the horizontal plane, and whether the point cloud was a power line point cloud was judged by the linear measurement of the point cloud. [Result] According to the existence of missing power line point clouds, all the power line point cloud clusters are obtained through a region growing mode, and on this basis, the catenary formula of each power line point cloud cluster is calculated through the catenary formula, and the point cloud with a fitting distance less than the threshold is merged as the same power line point cloud. [Conclusion] The proposed method aims at the problem of rapid power line extraction in inspection applications and overcomes the problem of power line

收稿日期: 2022-10-28 修回日期: 2022-12-05

基金项目: 广东省省级科技项目“面向电网巡检的高精度多旋翼航测无人机关键技术研发及应用”(2017B010117008); 广东电网有限责任公司规划项目“电网工程全生命周期研究”(031000QQ00210002); 中国能建广东院科技项目“基于地理信息数据的三维多细节层次语义模型构建”(EV10031W); 中国能建广东院科技项目“电网工程全生命周期数字孪生仿真模型研究”(ER10551W)

point cloud missing and vegetation impact in the process of power line extraction, so this method can achieve power line point cloud extraction with high efficiency and accuracy.

**Key words:** power grid inspection; UVA LiDAR point cloud data; regional growth; catenary; power line extraction

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

稳定和充足的电力供应是保障国家经济的高效发展的基石。高电压和长距离的输电线路规模不断增大,截至2020年底,10 kV及以上输电线路杆路长度为537.39万 km,其中架空线路和电缆线路长度分别为437.08万 km、100.06万 km<sup>[1]</sup>。受到成本和环境的限制,线路走廊通常位于山区或旷野,远离交通便利的城镇。虽然常态化电力线巡检是保障庞大电网能够安全稳定运行的关键,但是传统的人工巡检面临工作强度大,工作环境危险,巡检盲区多和观测存在随机误差等问题<sup>[2]</sup>。因此,如何借助新技术减少人员来提升巡检效率和观测结果的准确性成为国内外学者和产业界亟需解决的问题。

随着无人机技术和激光点云技术的成熟,机载点云技术在电力工程与运维过程中也得到推广与应用<sup>[3]</sup>。由于该技术可降低人员劳动作业强度,缩短工期,同时获取的数据有较高精度,机载点云数据已经成为电力工程、电力巡检与运维过程中常用的辅助数据源。巡检人员利用激光点云提供的高精度位置信息能够发现电力运行过程中存在的隐患,并进行分析<sup>[4]</sup>。然而激光点云数据仅体现空间位置信息,缺乏点云语义信息,在实际应用过程中需要对点云进行分类处理,通过点云分类赋予点云语义信息,在此基础上进行分析与引用。电力导线作为巡检的重要对象,在点云中提取导线的准确性与精度对巡检运维分析结果的可靠性具有重要意义<sup>[5]</sup>。针对电网工程点云分类有诸多学者进行了研究并提出了针对电力杆塔<sup>[6]</sup>、巡检通道地面点等地物提取提出了相应的算法并在具体工程应用中取得了较好的效果<sup>[7]</sup>。

这些方法通常可分为监督方法和非监督方法,两类方法各有其优缺点。其中无监督方法提取点云电力导线主要是提出滤波方法和线路的线性几何特性来制定。Melzer等依据方向特征对电力线点云进行提取,通过Hough变换提取最长直线方式实现导线提取<sup>[8]</sup>,但是该方法会受到地形和植被的影响,降

低提取精度。叶岚等结合直方图统计电力导线点云高程分布特点,提出高程投影方法提取电力导线<sup>[9]</sup>,该方法在电力导线两端高差较大时会将部分导线识别为植被和山体。陈驰等结合维数特征与方向特征构建了分段质心拟合的电力导线提取方法<sup>[5]</sup>,但质心计算结果易受分块中的噪声数据或提取质量较差的点的影 响产生偏移,导致提取精度降低。基于方向特征,吴建军等提出杆塔约束的电力导线提取方法<sup>[10]</sup>,该方法对于杆塔悬挂点的提取精度要求较高。余洁等引入地面不规则三角网来剔除地面点,并以点与点所夹角度进行辅助电力导线点云提取<sup>[11]</sup>,角度滤波后仍有大量地面植被点无法被剔除。沈小军等提出基于子空间特征的高程阈值分割算法依据高程点云密度差异实现导线提取<sup>[12]</sup>,但只考虑高程的密度而忽视了扫描场景水平方向上的差异。很明显,这些无监督的方法需要定义一套基于知识的规则来识别在更复杂的环境中会受到限制的电力线。

与无监督方法不同,有监督方法使用手工制作或数据驱动特征描述原语,并将检测任务制定为二进制分类问题。Yang等考虑到不同输电线路独特的形状特征,首先提取了不同输电线路的骨架结构,并进行了基于体素的监督识别框架<sup>[13]</sup>。Wang等人系统研究了不同因素(如特征选择、分割、尺度分类器等)对检测结果的影响<sup>[14]</sup>。Munir等人基于支持向量机(SVM)模型利用提取的垂直剖面特征对垂直和非垂直对象进行分类,并利用体素化的非垂直对象提取电力线<sup>[15]</sup>。Nardinocchi等人使用训练后的深度学习模型对传输走廊进行了联合分类,并进行了风险分析<sup>[16]</sup>。尽管有监督方法可能比无监督方法获得更好的提取性能,但制作模型训练样本是费时费力的。

上述的监督方法和非监督方法虽然能够在特定条件下实现点云数据中提取电力导线,但是对于数据质量均有较高需求。在电力运维巡检的过程中,由于设备差异以及数据获取条件的差异,可能存在导线段缺失或部分导线段点云密度不足、导线噪点较多等问题<sup>[17]</sup>,数据问题的存在导致导线点云提取

可能存在误提取或漏提取的现象。

针对此类问题, 本文章提出了结合投影线性特征以及区域生长方法的点云电力导线提取, 该方法针对电力导线点云缺失的情况能够通过区域生长方式获取部分导线点云, 实现对电力导线点云的快速提取, 同时结合导线拟合悬链线公式获取对缺失点云进行重建。

## 1 点云预处理

### 1.1 点云去噪

在点云处理过程中点云数据中会存在少量噪声点, 而噪声点的存在对点云数据的分析和处理结果往往存在较大的影响, 因此在点云数据处理过程中首先需要对点云进行去噪以消除噪声对于点云数据的影响提高点云分析结果的准确性。

针对点云数据的去噪有许多学者提出了相关算法, 如基于点云密度滤波的算法<sup>[18]</sup>, 基于体素的点云滤波算法<sup>[19]</sup>, 基于核密度估计的点云滤波算法<sup>[20]</sup>, 以及基于点云表面特征的滤波方法等<sup>[21]</sup>。而在点云电力线提取应用中, 导线点云相对于地面点以及植被点点云密度较低, 采用基于点云密度的滤波方法可能进一步降低导线点云的密度, 从而导致导线点云提取精度下降, 为了能够在消除噪声的同时最大程度的保证导线点云密度, 本文采用基于 Mean-Shift 点云滤波算法, 滤除边缘离群点, 保证导线点云的完整<sup>[22]</sup>。

算法过程为: 给定  $d$  维空间  $R_d$  的  $n$  个样本点,  $i = 1, 2, 3 \dots$ , 在空间中任选一点  $X$ , 那么 Mean-Shift 定义为:

$$M_h = \frac{1}{K} \sum_{X_i \in S_k} (x_i - x) \quad (1)$$

$$S(X) = \{x : (x - x_i)^T (x - x_i) < h^2\} \quad (2)$$

式中:

$S(X)$  —— 一个半径为  $h$  的高维球;

$x$  —— 球中的点的集合。

通过该算法, 则处于点云中心区域的数据点由于存在各个方向的向量, 因此不具有方向特征, 而处于边缘的离群点, 由于具有较为明显的方向特征, 因此表现出明显的方向性, 通过该方法能够有效地滤除噪声点同时能够最大限度地保存导线点。

### 1.2 杆塔点云分类

由于杆塔具有相对固定和容易识别的几何结构, 且杆塔高度与电力线高度相似, 两者点云有部分重叠, 因此针对点云中的杆塔先进行剔除操作是保证电力线提取准确性的基础。

由于野外的架空线路的杆塔的塔基周边存在大量的植被, 因此本文采用通过分段提取塔顶与塔基的电力杆塔点云提取方法<sup>[23]</sup>, 该方法利用杆塔点云的线性特征对点云数据进行提取, 具有较高的准确度。具体提取方法为: 首先根据点云构建地面拟合平面并提取塔顶点云, 其次在此基础上对点云进行分块操作, 然后假设每一块中所包含的点云数据为  $P = \{P_1, P_2, P_3 \dots P_n\}$ , 对分块后的点云进行 PCA 变换如式(3)、式(4)所示:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) & \text{cov}(x, z) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) & \text{cov}(y, z) \\ \text{cov}(z, x) & \text{cov}(z, y) & \text{cov}(z, z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$E = \text{Eign}(\Sigma) \quad (4)$$

最后通过 PCA 变换后根据协方差矩阵的特征值判断每一块点云数据的线性特征, 选取特征值大于给定阈值的数据块判定为塔基点云。

## 2 导线点云提取

### 2.1 基于高程直方图的导线点云提取

导线点云会明显高于周围地物点云, 因此选取合适的高程直方图阈值范围能够从直方图中看到地物点云与导线点云的明显分界线<sup>[12]</sup>, 由此确定高程阈值, 最后通过高程阈值将导线点云分割出来, 点云高程直方图如图 1 所示。

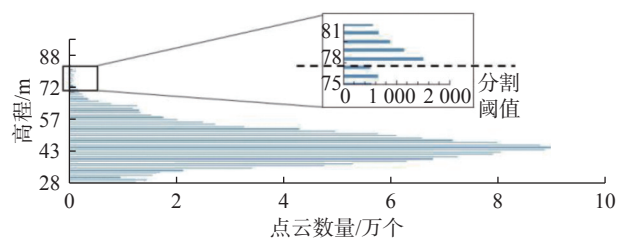


图 1 高程直方图

Fig. 1 Histogram of elevation

从图 1 中可以看出在一定高度后, 随着高程的增加在高程范围段内的点云在逐渐减小, 然而由于导线点点云的影响, 在高程增加到一定阶段会产生

一个点云数量突变的直方图, 则我们可以认为点云数量的突然增加是由于导线点点云影响导致的, 据此可以大致判断出导线高程阈值。

表 1 为高程直方图部分数据, 从数据中可以看出高程在 77.77~78.77 m 之间点云数量有一个突然的大幅度增加, 可以认为增加的点云是由于导线点点云导致的。

表 1 高程直方图数据表  
Tab. 1 Elevation histogram data

高程/m	点云数量/个
75	520
76	643
77	506
78	1 505
79	1 136
80	878
81	654
82	555

## 2.2 基于投影线特征的

通过阈值方法进行提取后能够提取出所有导线点云, 然而在高植被地区, 特别是在配网线路中, 选取高程阈值在提取出导线点云的情况下也会混入植被点点云, 相比于植被点点云, 导线点点云具有较为明显的线性特征, 如图 2 所示, 其中图 2(a)为导线点云, 图 2(b)为植被点云。

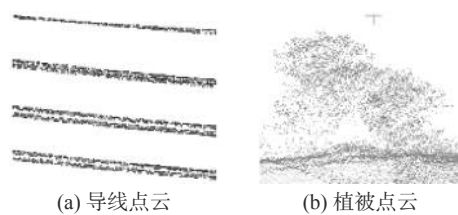


图 2 导线与植被点云的形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of power line and vegetation point clouds

从图 2 点云数据中可以看出导线点云与植被点云在空间分布上存在着明显的差异, 导线点云表现出明显的线性特征, 而植被点云则并没有表现出线性特征。实际上导线为两端悬挂于挂点上的悬链线, 因此直接针对导线采用直线拟合方式判断可能存在误判的情况。因此需要对导线线性情况进行分析如图 3 所示。

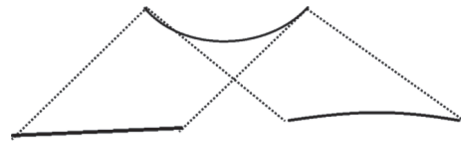


图 3 导线不同状态下的水平面平面投影

Fig. 3 Horizontal plane projection of a power line in different states

图 3 为导线在自然条件下与存在风偏条件下于水平面平面投影的形态, 从形态上可以看出在自然条件下导线在平面上的投影为一条直线, 而在存在风偏的条件下投影为一条弧线。实际上在激光点云数据获取过程要求风速不大于 10 m/s, 根据设计要求, 在此条件下导线风偏对于导线投影形态变化的影响可以忽略, 近似认为导线在水平面的投影为一条直线, 因此可以通过线性特征判别的方式来精化导线提取结果, 剔除通过高程阈值误提取的植被点。

图 4(a)为导线点云在水平面的投影, 图 4(b)为植被点云在水平面上的投影, 通过对投影点云的线性程度的分析可以判断出点云为植被点云或导线点云, 具体判别方法为: 对待分析点云构建 RT 树, 通过 KNN 算法获取待分析点周围给定半径内的点云, 将获取的点云投影到水平面上, 采用公式(1)计算点云相关系数, 若相关系数大于给定的相关系数阈值则认为待分析点为导线点否则则认为待分析点为植被点。

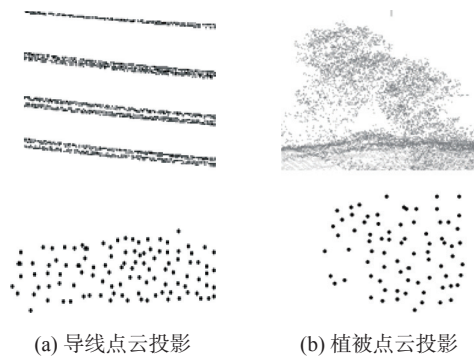


图 4 导线与植被点云投影

Fig. 4 Power line and vegetation point cloud projection

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{D(x)} \cdot \sqrt{D(y)}} \quad (5)$$

式中:

$\rho_{xy}$  ——投影到水平面上的点坐标与坐标的相关系数;

$\text{cov}(x,y)$  —— $x, y$  协方差;

$D(x)$  —— $x$  方差;

$D(y)$  —— $y$  方差。

通过公式(5)计算投影到平面上的点的相关系数,作为点云线性度的度量。

图 5 为针对单个点云选取一定半径内的点云示意图,通过示意图可以看出,提取周围点半径的选择不宜过小,若选取的半径过小则导线点云的线性特征体现不明显,且植被点可能被误判为导线点,同时选取的半径也不宜过大,半径过大可能导致范围内出现多条导线的点云影响分析结果。经过多次实验与分析,针对 35 kV 以上输电线路选取 2 m 的半径,配网线路选取 0.8 m 半径既能够保证判断的准确性又能够比较高效地进行计算。



图 5 计算每个点的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficient calculated for each point

### 2.3 基于区域生长与悬链线公式的导线恢复

通过导线点云精化提取后能够获取较为准确的导线点云,在分析过程中为了能够区分出每一回导线,一般采用 DBSCAN 的聚类方法对导线点云进行聚类分析,通过设置距离阈值将不同回路的导线区分出来,其算法描述如表 2 所示。

表 2 DBSCAN 算法步骤表  
Tab. 2 Algorithm step of DBSCAN

步骤	计算操作
Step1	从点集中取任意一个点将其设置为据类1,以1为中心R为半径获取距离内所有点将其设置为点1
Step2	对Step1中获取到的所有未处理的点,重复Step1, Step2到所有点都完成处理为止
Step3	若点集中不是所有点都完成处理,则对剩下未分类的点重复 Step1~Step3
Step4	若点集中所有点都完成了处理,则结束

通过 DBSCAN 算法,设置合适的阈值范围能够方便地提取出每一回路的导线,一般来说输电线路选择查找半径为 0.5 m,配电线路选择查找半径为 0.2 m 能够较好地对导线进行分回路提取如图 6 所示。

然而在点云密度比较低的情况下导线点云可能存在不连续的情况,在导线点云分析过程难以将不



图 6 导线按回路分类提取

Fig. 6 Classified extracted power lines by circuit



图 7 导线的部分点云缺失

Fig. 7 Part of the point cloud of the power line missing

连续的导线作为一个整体进行分析。针对此类问题,为了更好地对每一根导线进行分析,需要将不连续的导线分类为一个整体如图 7 所示。

图 7 为导线点云缺失示意图,在此情况下,采用基于 DBSCAN 的区域生长方法会将同一导线聚类为多个类别影响后续的数据处理与分析,因此需要将断裂的导线点云重新连接并分类为同一回路。

针对以上问题,本文采用基于悬链线公式的导线拟合方法对每一个聚类的导线进行拟合,针对不同聚类的点云数据集,比较合并两点云数据集后拟合均方根误差以及合并前两个点云数据集的均方根误差,若合并后的拟合误差未发生明显变化则说明两个点云数据集应该属于同一回导线,对于等高挂点悬链线公式如式(6)所示:

$$y = \frac{\alpha}{2} \left( e^{\frac{x}{2}} + e^{-\frac{x}{2}} \right) \quad (6)$$

式中:

$\alpha$ ——导线所受到的一侧挂点的拉力。

公式(6)为悬挂点等高状态下以悬链线最低点为坐标原点构建坐标系得到的方程,在实际应用过程中导线两侧挂点一般不等高,且弧垂最低点未知,因此在实际应用过程中为了简化运算通常以式(6)的一阶泰勒展开式,也就是抛物线公式对悬链线公式进行拟合,对于非等高挂点,则通过斜抛物线公式进行拟合,若坐标原点设置为挂点,则斜抛物线公式为:

$$y = x \tan(\beta) + \frac{\gamma x(l-x)}{2\sigma_0 \cos(\beta)} \quad (7)$$

式中:

$\gamma$ ——导线比载;

$\sigma$  ——导线应力;  
 $\beta$  ——高差角;  
 $l$  ——导线档距。

在确定挂点的条件下对每一个点云通过 DBSCAN 算法提取的点云数据集通过式(7)进行拟合, 得到拟合参数, 根据拟合参数获取拟合后的导线, 合并拟合后距离相近的导线的点云作为同一导线点云, 实现同回路导线点云的合并。最后对合并后的点云通过公式(7)计算导线公式, 最终实现完整导线提取。

### 3 实验分析

针对本文提出的算法, 考虑到试验工作站的性能, 实验中的区域选择采用两档档距为 200 m 的实际数据进行解算和分析, 数据的主要选取范围如图。

图 8 为未分类的某一档段点云数据, 点云数据中包含了杆塔、植被、导线以及地面点等相关地物。针对以上数据, 首先对杆塔与地面点进行分得到杆塔与地面点分类结果如图 9 所示。

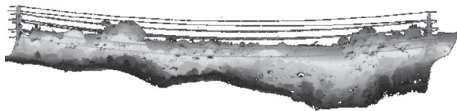


图 8 电力线与周边植被的原始点云数据  
 Fig. 8 Raw point cloud data of power lines and surrounding vegetation

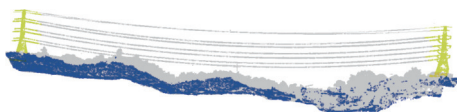


图 9 杆塔与地面的点点云分类结果  
 Fig. 9 The result of point cloud classification of tower and ground

图 9 为杆塔与地面点点云分类结果, 由于杆塔点云与地面点点云分类存在效果较好, 较为成熟的算法, 同时在分析过程中通过对杆塔点云和地面点点云进行分类能够更好地进行植被与导线点云的分类, 避免出现误分现象。

从应用的角度分析, 剩下的点云数据中只需要分出植被点云与导线点云即可, 因此在区分出导线点云后剩下所有点云数据都可以分类为植被点云。首先采用高程直方图方法对导线点云进行提取, 为了能够减小漏提取, 在进行直方图提取的过程中选择相对高程较低的阈值进行提取, 最终提取的导线

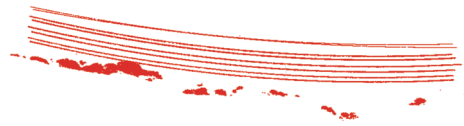


图 10 基于高程阈值的导线点点云提取结果  
 Fig. 10 Extraction results of traverse point cloud based on elevation threshold

结果如图 10 所示。

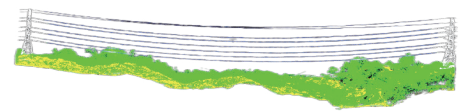
从图 10 中可以看出直接通过高程阈值进行提取后由于选择的高程阈值较低, 因此存在植被点被误提取为导线点的情况, 针对此类情况通过线性度分析剔除植被点云, 提取准确的导线点云。

图 11 为剔除植被后的点云提取结果, 对比图 10 与图 11 可以看出, 线性特征能够很好地反应导线点云的特征, 通过线性阈值能够很好地剔除误提取的导线点云, 提高点云提取的准确性。

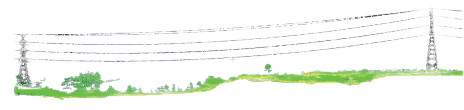


图 11 剔除植被后的点云  
 Fig. 11 Point cloud with vegetation removed

图 12 为分类结果, 通过分类结果可以看出, 通过本文的方法进行分类后能够很好地将电力线完整的进行提取。



(a) 植被茂盛区域



(b) 植被稀疏区域

图 12 分类结果

Fig. 12 Classification result

通过对不同的数据集进行处理与分析对算法的适用性进行验证, 结果表明, 针对不同类型的数据集, 本文提出的算法都能够很好地对导线点云进行提取与分析, 算法具有较强的适用性和应用价值。

### 4 结论

本文章提出的结合投影线性特征以及区域生长

方法的点云电力线提取算法针对点云数据电力巡检应用中的电力导线提取问题具有较好的适用性。针对点云电力线提取过程中导线与植被混淆的问题,通过导线点云的空间几何特征将导线点云和植被点云进行区分,剔除了通过高程阈值误提取的植被点云数据;针对点云密度导致的导线点云缺失问题,通过悬链线公式拟合的方式对同回路导线点云进行合并,将同回路导线点云合并为同一类。

实验结果表明,本文提出的算法能够很好地剔除误提取的植被点云,同时针对不同数据集具有较好的适用性和较强的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 2020年全国电力可靠性年度报告 [R]. 北京: 国家能源局中国电力企业联合会, 2021.  
National Energy Administration. National electric power reliability annual report 2020 [R]. Beijing: China Electricity Council of the National Energy Administration, 2021.
- [2] 孙全, 薛菲. 基于机载激光LiDAR的电网巡检应用研究 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 133-139. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.022.  
SUN T, XUE F. Research and application of power grid inspection based on airborne LiDAR system [J]. Southern energy construction, 2018, 5(3): 133-139. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.022.
- [3] 彭向阳, 陈驰, 饶章权, 等. 基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断 [J]. 高电压技术, 2014, 41(1): 159-166. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.01.022.  
PENG X Y, CHEN C, RAO Z Q, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition [J]. High voltage engineering, 2014, 41(1): 159-166. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2015.01.022.
- [4] 汤明文, 戴礼豪, 林朝辉, 等. 无人机在电力线路巡视中的应用 [J]. 中国电力, 2013, 46(3): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9649.2013.03.008.  
TANG M W, DAI L H, LIN C H, et al. Application of unmanned aerial vehicle in inspecting transmission lines [J]. Electric power, 2013, 46(3): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9649.2013.03.008.
- [5] 陈驰, 麦晓明, 宋爽, 等. 机载激光点云数据中电力线自动提取方法 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(12): 1600-1605. DOI: 10.13203/j.whugis20130573.  
CHEN C, MAI X M, SONG S, et al. Automatic power lines extraction method from airborne LiDAR point cloud [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1600-1605. DOI: 10.13203/j.whugis20130573.
- [6] 陈亮. 基于高密度机载激光点云的输电线路杆塔信息提取 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.  
CHEN L. Information extraction of transmission line tower based on high density airborne laser point cloud [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2016.
- [7] 吴蔚, 刘岚, 黄文诚. 基于渐进三角网的线路巡检点云地面点快速提取方法 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(增刊1): 53-58. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.010.  
WU W, LIU L, HUANG W C. Fast ground points extraction method in electric line inspection based on the progressive encryption TIN [J]. Southern energy construction, 2020, 7(Suppl. 1): 53-58. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.S1.010.
- [8] MELZER T, BRIESE C. Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds [C]//28th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition. 2004: 47-54.
- [9] 叶岚, 刘倩, 胡庆武. 基于LIDAR点云数据的电力线提取和拟合方法研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2010.05.011.  
YE L, LIU Q, HU Q W. Research of power line fitting and extraction techniques based on LIDAR point cloud data [J]. Geomatics & spatial information technology, 2010, 33(5): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2010.05.011.
- [10] 吴建军, 陈灵, 李磊, 等. 机载LiDAR点云中电力线的提取和重建研究 [J]. 激光技术, 2019, 43(4): 500-505. DOI: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.04.012.  
WU J J, CHEN L, LI L, et al. Power line extraction and reconstruction from airborne LiDAR point cloud [J]. Laser technology, 2019, 43(4): 500-505. DOI: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.04.012.
- [11] 余洁, 穆超, 冯延明, 等. 机载LiDAR点云数据中电力线的提取方法研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(11): 1275-1279. DOI: 10.13203/j.whugis2011.11.016.  
YU J, MU C, FENG Y M, et al. Powerlines extraction techniques from airborne LiDAR data [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1275-1279. DOI: 10.13203/j.whugis2011.11.016.
- [12] 沈小军, 秦川, 杜勇, 等. 复杂地形电力线机载激光雷达点云自动提取方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 982-987. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.07.017.  
SHEN X J, QIN C, DU Y, et al. An automatic power line extraction method from airborne light detection and ranging point cloud in complex terrain [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2018, 46(7): 982-987. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2018.07.017.
- [13] YANG J T, KANG Z Z. Voxel-based extraction of transmission lines from airborne LiDAR point cloud data [J]. IEEE journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing, 2018, 11(10): 3892-3904. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2869542.
- [14] WANG Y J, CHEN Q, LIU L, et al. Systematic comparison of power line classification methods from ALS and MLS point cloud data [J]. Remote sensing, 2018, 10(8): 1222. DOI: 10.

- 3390/rs10081222.
- [15] MUNIR N, AWRANGJEB M, STANTIC B. Automatic extraction of high-voltage bundle subconductors using airborne LiDAR data [J]. *Remote sensing*, 2020, 12(18): 3078. DOI: 10.3390/rs12183078.
- [16] NARDINOCCHI C, BALSÌ M, ESPOSITO S. Fully automatic point cloud analysis for powerline corridor mapping [J]. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2020, 58(12): 8637-8648. DOI: 10.1109/TGRS.2020.2989470.
- [17] 王丽英, 夏玉红, 徐艳, 等. 一种机载LiDAR点云缺失数据的填补方法 [J]. *测绘通报*, 2018(10): 27-31. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0309.
- WANG L Y, XIA Y H, XU Y, et al. A method for filling absence data of airborne LiDAR point cloud [J]. *Bulletin of surveying and mapping*, 2018(10): 27-31. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0309.
- [18] 张芳菲, 梁玉斌, 王佳. 基于近邻搜索的激光点云数据孤立噪点滤波研究 [J]. *测绘工程*, 2018, 27(11): 29-33. DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2018.11.006.
- ZHANG F F, LIANG Y B, WANG J. The nearest neighbor search filtering of point cloud data based on noise isolation [J]. *Engineering of surveying and mapping*, 2018, 27(11): 29-33. DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2018.11.006.
- [19] MORALES N, TOLEDO J, ACOSTA L, et al. A combined voxel and particle filter-based approach for fast obstacle detection and tracking in automotive applications [J]. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2017, 18(7): 1824-1834. DOI: 10.1109/TITS.2016.2616718.
- [20] 梁士超, 韩永国, 吴亚东. 改进的核密度点云去噪算法的研究与实现 [J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(5): 1285-1289. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2015.05.033.
- LIANG S C, HAN Y G, WU Y D. Research and implementation of improved kernel-density de-noising algorithm based on point cloud [J]. *Computer engineering and design*, 2015, 36(5): 1285-1289. DOI: 10.16208/j.issn1000-7024.2015.05.033.
- [21] 葛宝臻, 项晨, 田庆国, 等. 基于曲率特征混合分类的高密度点云去噪方法 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(1): 64-67. DOI: 10.13494/j.npe.2012.012.
- GE B Z, XIANG C, TIAN Q G, et al. Denoising approach of high density point clouds based on mixed classification of curvature features [J]. *Nanotechnology and precision engineering*, 2012, 10(1): 64-67. DOI: 10.13494/j.npe.2012.012.
- [22] 孙正林, 邹峥嵘, 吴爱琴. 一种改进的Mean Shift点云数据滤波 [J]. *测绘工程*, 2011, 20(5): 57-59. DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2011.05.015.
- SUN Z L, ZOU Z R, WU A Q. An improved mean shift algorithm used for point cloud data filtering [J]. *Engineering of surveying and mapping*, 2011, 20(5): 57-59. DOI: 10.19349/j.cnki.issn1006-7949.2011.05.015.
- [23] 宋强, 吴永欢, 吴蔚, 等. 基于PCA的电力杆塔点云提取方法 [C]// 第三届智能电网会议论文集——智能用电, 北京, 2019-10-28. 北京: 中国电力科学研究院有限公司, 2019: 97-101. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.055173.
- SONG Q, WU Y H, WU W, et al. Power tower point cloud extraction method based on PCA [C]// Proceedings of the Third Smart Grid Conference: Intelligent Electricity Use, Beijing, October 28, 2019. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2019: 97-101. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.055173.

#### 作者简介:



李行义 (第一作者)

1985-, 男, 高级工程师, 武汉大学硕士, 主要从事地理信息科学工作(e-mail)lixingyi@gedi.com.cn。

#### 吴蔚 (通信作者)

1992-, 男, 工程师, 中国地质大学(武汉)硕士, 主要从事电力巡检信息化研究工作(e-mail)wuwei2@gedi.com.cn。

#### 赵智尧

1992-, 男, 工程师, 武汉大学博士, 主要从事数字孪生工作(e-mail)zhaozhiyao@gedi.com.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 面向电网巡检的高精度多旋翼航测无人机关键技术研发及应用(2017B010117008)

**承担单位** 中国能建广东省电力设计研究院有限公司

**项目概述** 传统的电网人工巡检工作量大、条件艰苦。因此, 电网管理部门急需一种成本低、自动化程度高、机动灵活的新型巡检方式。无人机的特点是重量轻、适应性强、机动性高、无人飞行、可搭载多类传感器, 具有机动、快速、经济等优势, 无人机技术已逐步从研究开发发展到实际应用阶段。本项目研究可实现高效电网巡检, 快速发现输电线路运营过程中的缺陷和隐患, 同时, 可作为电网应急联动系统的重要组成部分, 为应急抢险提供及时的辅助决策。

**主要创新点** (1) 无人机系统与机载 RTK 模块集成实现高精度定姿定位; (2) 电网巡检智能高精度无人机控制技术; (3) 基于倾斜空三处理后倾斜摄影数据的逐像素密集匹配技术。

(编辑 赵琪)