

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.016

# 输电线路多旋翼无人机激光雷达点云数据 自动分类技术研究及应用

阮峻<sup>1</sup>, 陶雄俊<sup>1</sup>, 刘东甲<sup>1</sup>, 张晨<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局, 昆明 650000; 2. 广州地理研究所, 广州 510070)

**摘要:** [目的]旨在提高输电线路激光点云数据处理的效率和质量, 为输电线路树障检测提供数据保障。[方法]基于自主研发的激光雷达无人机, 提出了一种新的点云自动分类算法; 基于该算法, 研发了一款树障隐患分析软件, 实现了一键式点云自动分类。[结果]研究表明: 点云分类的正确率可达到95%以上, 点云自动分类的效率可达60 km/h, 且在杆塔与电力线、杆塔与植被相互交叉的复杂区域, 也取得了较好的分类效果。[结论]本方法为树障隐患的分析提供了高效率、高质量、全自动、智能化的数据处理手段, 有效地提高了地理空间三维信息数据的获取精度和处理效率。

**关键词:** 机载激光雷达; 无人机; 树障隐患分析; 点云自动分类

中图分类号: TM7; TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)02-0089-05

## Research and Application of Automatic Classification Technology of LiDAR Point Cloud Data of Multi Rotor UAV for Transmission Line

RUAN Jun<sup>1</sup>, TAO Xiongjun<sup>1</sup>, LIU Dongjia<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>2</sup>

(1. China Souther Grid Corp Ultrahigh Voltage Transmission Companies Kunming Bureau, Kunming 650000, China;

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to improve the efficiency and quality of laser point cloud data processing and provide data guarantee for tree barrier detection for transmission lines. [Method] A new automatic point cloud classification algorithm was proposed based on the self developed laser radar UAV, then a tree barrier analysis software was developed based on the algorithm to realize one-click automatic classification of point cloud. [Result] The results show that the accuracy of point cloud classification can reach more than 95%, and the efficiency of point cloud automatic classification can reach 60 km/h, moreover, good classification results are achieved in the complex areas where the towers and power lines, towers and vegetation intersect each other. [Conclusion] This method provides a high efficiency, high quality, automatic and intelligent data processing method for the analysis of tree barrier danger, and effectively improves the acquisition accuracy and processing efficiency of geospatial three-dimensional information data.

**Key words:** airborne lidar; UAV; danger analysis of tree barriers; point cloud automatic classification

收稿日期: 2018-09-13 修回日期: 2019-04-04

基金项目: 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司2018年第一批科技项目(0002200000035768); 广东省科学院实施创新驱动发展能力建设专项(2017GDASCX-0101, 2017GDASCX-0601); 广东省引进创新创业团队项目(2016ZT06D336); 广东省重大科技专项(2017B010117008); 广州市科技计划项目(201604016047, 201806010106); 广州市水务科技项目(SW-2018-001)。

南方电网“十三五”电网运营规划提出, 要全面推行“机巡+人巡”的巡线模式的综合研究与应用, 实现“机巡为主、人巡为辅”的协同巡检目标<sup>[1]</sup>。据南方电网生技部统计, 约70%的电网故障隐患由树障隐患引起, 目前树障隐患巡视与分析已成为输电部门的主要工作。随着无人机可见光航测技术的飞速发展, 可见光航测树障巡视与分析技术已成为当前输电线路树障隐患分析的主要方式, 但其数据处

理的专业性强、计算量大、人工交互工作量大,严重制约了数据处理的效率。

机载激光雷达(LiDAR)技术和点云数据处理技术的出现,为地理空间三维数据的获取和处理提供了全新的技术手段<sup>[2]</sup>,丰富了输电线路巡视的手段,提高了点云数据处理与分类、树障隐患处理与分析的效率<sup>[3-5]</sup>。海量点云数据的精确分类,是进行树障智能分析的前提和基础。传统的点云数据分类方法由于自动化程度低、分类效果差、分类算法复杂等缺点<sup>[6-10]</sup>,已无法满足当前的业务需求。因此,本文基于机载激光雷达,提出一种新的点云自动分类算法,并将该算法运用于树障智能分析中,实现树障点云的全自动快速分类,以提高地理空间三维信息数据的获取精度和处理效率。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据获取

机载激光雷达由于作业效率高、观测精度高、机动灵活、不受云雾遮挡、作业范围广、自动化程度高等优点<sup>[11]</sup>,已逐渐成为对地观测的重要技术手段之一。基于机载激光雷达的优势,结合无人机的作业特点,本文采用自主研发的激光雷达无人机来获取输电线路的点云数据。

激光雷达无人机由 M600 Pro 无人机和 Velodyne VLP 32C 激光雷达组成(如图 1 所示,参数如表 1 和表 2 所示),一体化集成了高精度中距激光扫描仪、航摄相机、GNSS 和 IMU 定位姿态系统集成存储控制单元,以时间同步技术和一体化多传感器集成技术为支撑,可同步获取三维激光点云和定位定姿数据,具有集成度高、操作简便、性能出色、高效率、高质量等优点,获取的数据如图 2 所示。



图 1 激光雷达无人机  
Fig. 1 Laser radar UAV

表 1 激光雷达参数

Tab. 1 Parameters of LIDAR

项目	参数	项目	参数
激光传感器	Velodyne VLP 32C	测量距离/m	200
最大有效测量速率/(Pts·s <sup>-1</sup> )	1.2 × 10 <sup>6</sup>	测距精度/cm	2
波长	近红外	垂直视野/(°)	-25 ~ 15
安全等级	1 级, 人眼安全	水平视野/(°)	360

表 2 多旋翼无人机参数

Tab. 2 Parameters of multi rotor UAV

项目	参数	项目	参数
任务荷载/kg	5.5	最大可承受风速/(m·s <sup>-1</sup> )	8
飞行时间(满载)/min	16	最大速度/(km·h <sup>-1</sup> )	65
悬停精度/m	垂直: ±0.5 水平: ±1.5	最大水平飞行速度/(km·h <sup>-1</sup> )	65(无风环境)遮挡
最大上升速度/(m·s <sup>-1</sup> )	5	工作环境温度/°C	-10 °C 至 40 °C

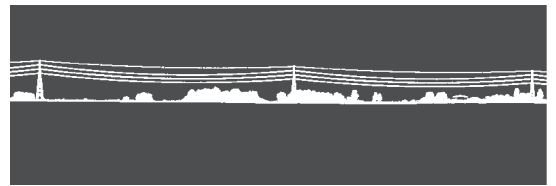


图 2 点云数据

Fig. 2 Point cloud data

### 1.2 数据处理

空间三维点云数据由于具有不连续性、不规则性,以及地物形态的多样性等,使得点云数据的自动分类具有一定的复杂性,在复杂地形、地物繁杂和不连续地表中易存在错分、漏分等现象。为解决上述问题,本文提出一种新的点云分类技术,以实现点云数据的精确分类,具体流程如图 3 所示。

#### 1.2.1 杆塔点云的提取与分类方法

基于电力线的横担宽和点云的属性值,采用改进的快速三维凸包构造算法来确定杆塔的位置,从而实现杆塔点云的提取与分类。该算法是在 Quick-Hull 算法的基础上进行改进的,有效地避免了更新拓扑关系带来的大量计算,提高了数据处理的效率。

#### 1.2.2 电力线点云的提取与分类方法

基于断面分析法获取的断面点云数据,利用  $k$ -

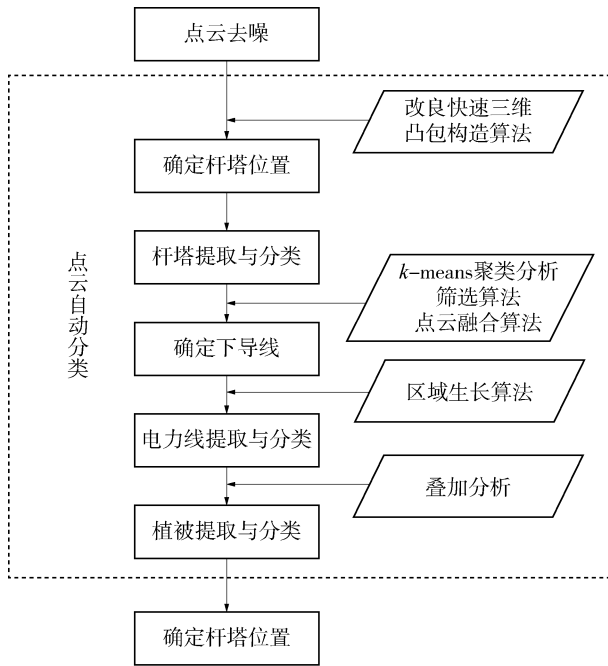


图3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

means 聚类分析算法、筛选算法以及基于法向约束的点云融合算法等确定电力线的数目和起点, 并基于高度的最小值确定电力线的下导线。然后利用区域生长算法进行导线追踪, 实现电力线点云的提取与分类。该方法速度快、准确性高, 可有效避免错分、漏分等现象。

### 1) $k$ -means 聚类分析算法

$k$ -means 聚类分析算法把  $n$  个对象分为  $k$  个类别, 使每个类别内部内具有较高的相似度, 而类别间的相似度较低, 通常采用平方误差准则, 其定义如下:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} |p - m_i|^2 \quad (1)$$

式中:  $E$  是全部对象平方误差的总和;  $p$  是空间中的点;  $m_i$  是类别  $C_i$  的平均值。

### 2) 基于法向约束的点云融合算法

基于法向约束的点云融合算法是种子点沿点的法向移动的结果, 其位置定义为:

$$P_{fi} = P_i + (S_c + S_p) n_{P_i} / (W_p + W_c) \quad (2)$$

融合点的法向为:

$$n_{fi} = (n_{P_i} + n_{C_i}) / \|n_{P_i} + n_{C_i}\| \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为种子点;  $n_{P_i}$  为  $P_i$  的法向;  $C_i$  为  $P_i$  的子点;  $S_c$  为  $C_i$  的位置加权;  $W_c$  为  $C_i$  的正则化系数;

$n_{C_i}$  为  $C_i$  的法向。

### 3) 区域生长算法

区域生长算法原理为将具有相似特征的点云归集到一类构成区域。首先对每个需要分割的区域筛选出一个种子点云作为生长的起点, 再将种子点云附近邻域中与其有相同或相似性质的点云(相似性准则需实现预设)合并到种子点云所在的区域中。同时, 新的点云成为新的种子, 向四周生长, 直到再没有满足条件的点云可以划分进来, 这时候一个区域即生长完成。

区域生长具体步骤如下:

1) 对点云数据按照顺序进行扫描, 找到第 1 个还没有归类的点云, 设该点云坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ 。

2) 以  $(x_0, y_0, z_0)$  中心, 考虑  $(x_0, y_0, z_0)$  的邻域点云  $(x, y, z)$ , 如果  $(x, y, z)$  满足生长准则, 将  $(x, y, z)$  与  $(x_0, y_0, z_0)$  合并(在同一区域内), 同时将  $(x, y, z)$  压入堆栈。

3) 从堆栈中取出一个点云, 把它当作  $(x_0, y_0, z_0)$  返回到第 2 步。

4) 当堆栈为空时, 返回到第 1 步。

5) 重复步骤 1-4 直到图像中的每个点都有相应分类时, 生长完成。

### 1.2.3 植被点云的提取与分类方法

最后, 基于筛选出的杆塔点云和电力线点云, 对点云数据进行叠加分析, 以实现植被点云的提取与分类。

## 2 应用和结果

为有效地减少点云数据处理的人工工作量、降低树障隐患分析的专业要求和操作难度, 本文基于上述点云分类算法, 研发了一套树障隐患分析软件。该软件实现了一键式点云自动分类, 点云的处理效率可达 60 km/h, 有效地提高了地理空间三维信息数据的处理效率。点云自动分类界面如图 4 所示, 点云自动分类的结果如图 5 所示, 图 6 为点云自动分类结果的放大图。

结果表明, 点云分类的正确率可达到 95% 以上, 点云自动分类的效率可达 60 km/h, 且在杆塔与电力线、杆塔与植被相互交叉的复杂区域, 也取得了较好的分类效果, 错分、漏分等现象极少。由此可知, 本文提出的点云自动分类方法分类精度高、分类效果佳、处理速度快, 解决了传统点云数

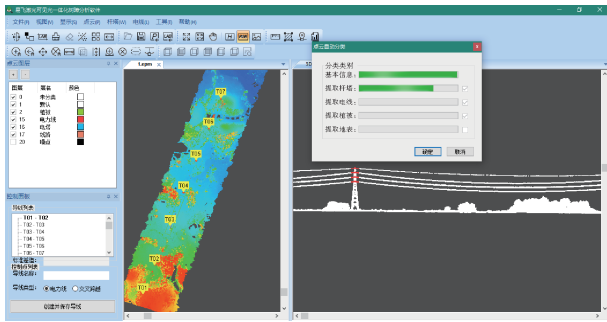


图4 点云自动分类界面

Fig. 4 Point cloud automatic classification interface

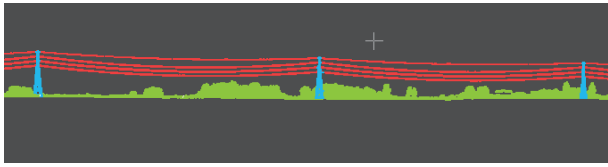


图5 点云自动分类的结果

Fig. 5 Results of automatic classification of point clouds

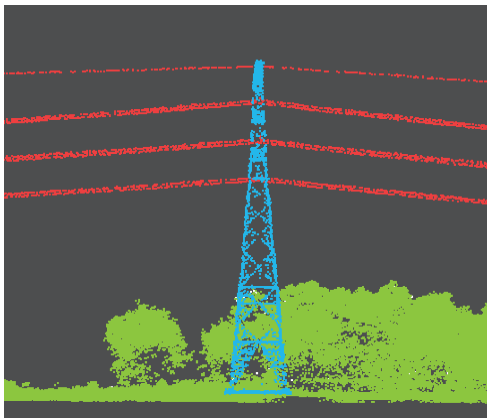


图6 点云自动分类的结果(放大)

Fig. 6 Results of automatic classification of points (amplification)

据分类自动化程度低、分类效果差等问题,有效地提高了地理空间三维信息数据的处理精度和效率。

点云数据的分类是进行树障智能分析的前提和基础,将本文提出的点云自动分类方法应用于树障隐患的分析中,可实现一键式点云自动分类和树障隐患分析。结果表明,树障隐患自动分析的效率可达720档/h,自动分析的精度可达到50cm。

### 3 结论

机载激光雷达为地理空间三维数据的获取提供了全新的技术手段,本文通过自主研发的激光雷达无人机,有效地提高了点云数据获取的效率和质

量。基于获取的点云数据,本文提出了一种新的点云自动分类方法。该方法分类精度高、分类效果佳、处理速度快,点云分类的正确率可达到95%以上,点云自动分类的效率可达60km/h,对于复杂区域也有较好的分类效果,错分、漏分等现象极少,有效地提高了地理空间三维信息数据的处理精度和效率。

基于本文提出的点云自动分类方法,将其应用于输电线路的树障隐患分析中,可使树障隐患自动分析的效率达720档/h,自动分析的精度达到50cm。该方法的应用,有效地减少了点云数据处理的人工工作量、降低了树障隐患分析的专业要求和操作难度,为树障隐患的分析提供了高效率、高质量、全自动、智能化的数据处理手段,提高了树障隐患处理与分析的效率。

### 参考文献:

- [1] 卓集. 国家电网、南方电网农村电网改造升级“十三五”规划[J]. 广西电力, 2016(4): 5-6.  
BI J. Upgrading of rural power grid in 13<sup>th</sup> five-year plan state grid and China southern power grid [J]. Guangxi Electric Power, 2016(4): 5-6.
- [2] 曾齐红. 机载激光雷达点云数据处理与建筑物三维重建[D]. 上海: 上海大学, 2009.  
ZENG Q H. Airborne LiDAR point cloud data processing and 3D reconstruction of buildings [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.
- [3] 林祥国, 段敏燕, 张继贤, 等. 一种机载LiDAR点云电力线三维重建方法[J]. 测绘科学, 2016, 41(1): 109-114+64.  
LIN X G, DUAN M Y, ZHANG J X, et al. A power line 3D reconstruction method for airborne LiDAR point cloud [J]. Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(1): 109-114+64.
- [4] 张继贤, 段敏燕, 林祥国, 等. 激光雷达点云电力线三维重建模型的对比与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(11): 1565-1572.  
ZHANG J X, DUAN M Y, LIN X G, et al. Comparison and analysis of 3D reconstruction models for LiDAR point cloud of power lines [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1565-1572.
- [5] 布罗杜尼古拉斯, 拉格迪米特里. 基于多尺度尺度准则的复杂自然场景三维激光雷达数据分类在地貌学中的应用[J]. 摄影测量与遥感, 2012(68): 121-134.  
BRODU N, LAGUE D. 3D terrestrial LiDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: applications in geomorphology [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012(68): 121-134.

- [6] 张小红, 刘经南. 机载激光扫描测高数据滤波 [J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 50-53+4.  
ZAHANG X H, LIU J N. Airborne laser scanning altimetry data filtering [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(6): 50-53+4.
- [7] 理查德马里奥, 文策马库斯. 基于径向反射的点云分割 [J]. 计算机科学讲义, 2009(5702): 955-962.  
RICHTSFELD M, VINCZE M. Point cloud segmentation based on radial reflection [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2009(5702): 955-962.
- [8] 周前义, 诺伊曼乌尔里奇. 密集机载激光雷达点云的城市居住区重建 [J]. 图形模型, 2013, 75(3): 118-125.  
ZHOU Q Y, NEUMANN U. Complete residential urban area reconstruction from dense aerial LiDAR point clouds [J]. Graphical Models, 2013, 75(3): 118-125.
- [9] 王金虎, 李传荣, 周梅, 等. 机载全波形激光雷达数据处理及其应用 [J]. 遥感信息, 2013, 28(5): 21-27.  
WANG J H, LI C R, ZHOU M, et al. Analysis of airborne full-waveform LiDAR data for supervised point cloud classification [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(5): 21-27.
- [10] 马利特克列芒, 布雷塔弗雷德里克, 鲁克斯米歇尔, 等. 全波段激光雷达数据在城区分类中的相关性评价 [J]. 摄影测量与遥感, 2011, 66(6): 71-84.  
MALLET C, BRETAR F, ROUX M, et al. Relevance assessment of full-waveform LiDAR data for urban area classification [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(6): 71-84.
- [11] 王东甫, 范亮. 利用地面激光雷达与无人机技术制作大型古塔立面正射影像图 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(4): 107-112.  
WANG D F, FAN L. Making large scale guta elevation orthophoto map using ground-based LiDAR and UAV Technology [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(4): 107-112.

#### 作者简介:



阮峻

1986-, 男, 云南镇沅人, 工程师, 南京邮电大学通信工程学士, 主要从事直流输电系统的运行维护工作 (e-mail) ruan-jun@outlook.com。

RUAN J



张晨(通信作者)

1993-, 女, 江西宜春人, 山东科技大学测绘工程硕士, 主要从事地理信息遥感、无人机应用等相关研究工作 (e-mail) 1024029982@qq.com。

ZHANG C

#### 项目简介

##### 基金项目 1:

**项目名称** 无人机采集影像三维建模在输电线路通道风险预警中的应用研究

**承担单位** 中国南方电网有限责任公司超高压输电公昆明局

**项目概述** 项目研究通过借助无人机高效低成本数据采集, 通过专业开发软件平台, 实现在计算机终端完成输电线路实景三维巡视、选点测量分析、通道地理信息的查询分析, 能够有效提高输电线路巡视质量与效率、减小人工劳动强度。同时, 该技术的成功提高输电线路应急响应速度, 为输电线路管理人员事故决策提供强大的数据支撑。

**主要创新点** (1)研发线路通道风险预警及分析展示平台, 为无人机输电线路通道数据采集、数据处理、数据分析、数据应用提供有效支持, 实现了数据的全生命周期统一管理; (2)突破树障轮廓线的提取方式和方法, 实现多期树障数据的对比预警; (3)实现输电线路多期点云数据的对比预警; (4)可对树障缺陷数据进行管理和导出, 并实现合并导出多期数据的树障缺陷报告。

##### 基金项目 2:

**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** 广州地理研究所

**项目概述** 本项目基于申报单位自主研发的多旋翼航测无人机软硬件系统, 突破无人机高精度高效航测关键技术, 研发面向电网巡检的无人机控制 APP 软件、一体化数据处理终端设备与三维数字化电网巡检分析系统, 提升电网线路日常管理和应急指挥的规范性、便利性和经济性, 为电网管理部门提供一种低成本、易操作、高效率、机动灵活的新型巡检模式, 在广东省电网管理部门进行推广应用。

**主要创新点** (1)面向电网巡检的无人机三维建模关键技术创新; (2)智能一体化实时高效无人机数据处理终端研发; (3)基于无人机的智能化电网巡检作业模式创新。

##### 基金项目 3:

**项目名称** 无人机高精度电网巡检关键技术研究(201806010106)

**承担单位** 广州地理研究所

**项目概述** 本项目基于申报单位自主研发的多旋翼无人机软硬件系统, 突破无人机高精度电网巡检关键技术, 研发面向电网巡检的无人机控制 APP 软件、一体化数据处理终端设备等产品, 提升电网线路日常管理和应急指挥的规范性、便利性和经济性, 为电网管理部门提供一种低成本、易操作、高效率、机动灵活的新型巡检模式。

**主要创新点** (1)无人机高精度电网巡检关键技术创新; (2)智能一体化实时高效无人机数据处理终端研发; (3)基于无人机的智能化电网巡检作业模式创新。

(责任编辑 郑文棠)