

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.020

# 基于固定翼无人机激光雷达点云数据的输电线路 三维建模与树障分析

阮峻<sup>1</sup>, 陶雄俊<sup>1</sup>, 韦新科<sup>1</sup>, 李红盛<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]针对当前输电线路树障巡检周期长、作业强度大、无法保证巡检结果客观性与完整性的问题,提出了一套基于固定翼无人机三维激光点云数据进行输电线路三维建模及树障隐患智能识别的方法。[方法]通过固定翼无人机搭载三维激光扫描仪获取输电线路点云数据,提取点云中电力线点并模拟出完整电力线,计算电力线与电力线保护区范围内植被的欧式距离,将计算的结果与电力线安全规范比较得到树障点或预警点等信息。[结果]试验结果表明:自动拟合的电力线误差较小,满足树障检测的要求。[结论]研究方法可自动、快速、完整地提取电力线,且提取精度满足树障检测的精度要求,可大幅提升现有输电线路树障隐患检测的质量与效率。

**关键词:** 无人机; 激光点云; 输电线路; 树障缺陷

中图分类号: TM7; TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0114-05

## 3D Modeling and Tree Barrier Analysis of Transmission Lines Based on LIDAR Point Cloud Data of Fixed Wing UAV

RUAN Jun<sup>1</sup>, TAO Xiongjun<sup>1</sup>, WEI Xinke<sup>1</sup>, LI Hongsheng<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** [Introduction] Aiming at the problems of long inspection period, high operation intensity and no guarantee of objectivity and integrity of inspection results of the current tree barrier inspection of transmission line, this paper presents a method for three-dimensional modeling of transmission lines and intelligent identification of dangers of tree barriers based on three-dimensional laser point cloud data of fixed-wing UAV. [Method] Point cloud data of transmission lines was collected by three-dimensional laser scanner equipped with fixed wing UAVs, then extracted the power line points in the point cloud and simulate the complete power lines, calculated the euclidean distance between vegetation and power line protection area, and we can get the information of tree barrier points or early-warning points through comparing the calculated results with the power line safety specifications. [Result] The test results showed that the error of automatic fitting power line is small, which met the requirements of tree barrier detection. [Conclusion] This method can extract power lines automatically, quickly and completely, and the extraction accuracy meets the accuracy requirements of tree barrier detection, greatly improved the quality and efficiency of existing tree barrier danger detection method of transmission line.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; laser point cloud; transmission line; tree barriers defects

随着我国经济的发展,高等级、长距离输电线路越来越多,输电通道走廊的地形越来越复杂,给线路的管理和监测带来了很大困难。目前,国内对架空输电线路通道林木树障信息的采集,主要包括人工树障隐患采集,无人机可见光树障隐患采集和激光雷达树障隐患采集等方式。传统的树障隐患采集方法主要以人工目测为主,不但工作强度大,而且难以确定具体位置,效率低。随着无人机技术的

收稿日期: 2018-09-13 修回日期: 2018-09-28

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)

兴起, 国内外越来越多的研究学者开始利用低空可见光航拍影像进行输电线安全距离的检测, 存在精度差、不稳定等问题。激光雷达(LiDAR)技术通过激光实现回波测距和定向的技术, 融合了激光测距、差分定位、姿态测量, 利用物体的反射特性来获取目标物的位置、径向速度等信息, 从而实现对目标物的识别。基于激光雷达技术的电力行业应用也在逐渐深入, 目前已经取得了一定的研究成果<sup>[1-3]</sup>。有学者提出了一种将全球定位系统、惯性导航系统和计算机视觉组合的导航方法, 再利用激光测高仪, 可以对 CCD 序列成像进行光流分析, 不仅可以获取导航信息来实现输电线安全距离的检测, 而且能实现三维场景的重建<sup>[4]</sup>。澳大利亚 GSIRO(联邦科学与工业研究组织)通信技术中心的研究人员专心于研发小型的 T21 型巡线无人机, 并在无人机上安装激光测距仪, 可以准确测量导线到导线下方地物的距离<sup>[5-6]</sup>。

本文基于分类的点云数据以及自动提取的电力线矢量数据, 采用点云距离计算方法计算线路与线路走廊下方地面/地物的距离, 并自动根据电压等级与标准安全距离做比较, 对于距离小于安全距离的区域进行危险预警。然后通过可视化校核技术, 对树障分析结果进行校核, 以提高树障隐患分析的准确性, 减少外业工作, 提高工作效率。

## 1 研究方法

### 1.1 电力线点提取

输电线路点云数据三维建模, 首先需要将点云数据中的电力线点提取出来。基于断面分析法获取的断面点云数据, 利用 k-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<sup>[7]</sup>。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。

由于雷达数据具有多次回波的特性, 电力线上方一般没有其他遮挡物, 因此电力线点云主要集中在雷达的首次回波中。因此, 提取首次回波的激光点, 就可以滤除一部分植被点, 而保留全部电力线点。此外, 电力线在局部里高程基本相同, 而植被高程一般起伏较明显, 根据这一特征, 本文提出一种滤波方法可进一步提取电力线点。

对于点  $p_{(i)}$ , 在固定半径  $r$  的圆形区域中, 如果

该点与区域中其他点之间的最大倾斜角度小于一定阈值  $\beta$ , 则该点纳入电力线点范围, 反之则是树木点。点  $p_{(i)}$  和  $p_{(i-1)}$  之间的倾斜角度  $S$  的计算公式如下:

$$S_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}} \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i, z_i)$ 、 $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  分别是点  $p_{(i)}$  和  $p_{(i-1)}$  的三维坐标。

使用这种方法, 通过设定一定的参数, 可使首次回波点中的植被点和杆塔点得到最大程度的滤除, 从而充分提取电力线点。

### 1.2 电力线分类

提取电力线点后, 需要对输电线路中的多条电力线进行分类。电力线一般呈线状分布, 具有较强的延伸性, 且同一线路不同电力线的投影呈直线, 其分裂导线相互平行<sup>[8]</sup>。基于电力线的此特征, 对分离出来的电力线点和少量植被点, 将其投影到 XY 平面, 对投影点的 XY 坐标作 Hough 变换, 以提取 XY 平面上的电力直线, 得到若干条电力线的直线方程。然后, 计算平面上每个点到直线方程的距离, 当距离小于一定阈值时, 将此点归属到对应的电力直线。所有点归类到直线后, 即可对每一单条电力线进行曲线拟合<sup>[9]</sup>。

### 1.3 电力线三维建模

在小范围区域点云中, 高程极大值位置即为杆塔位置。两杆塔间的电力线属于自然悬垂线, 符合双曲余弦函数模型, 因此可根据此特征对电力线进行拟合, 曲线方程为:

$$y = a + c \cdot \cosh\left(\frac{x - b}{c}\right) \quad (2)$$

将两杆塔间的点云数据投影到输电线路纵剖面, 利用曲线拟合和函数逼近方法求解上式<sup>[10]</sup>, 得到每条电力线的最佳参数, 即可完成每条电力线的三维建模。

### 1.4 树障安全距离诊断

分类后的点云数据经电力线三维建模后, 即可对电力线和线路走廊地物间的距离进行量测, 完成安全距离诊断。基于拟合的电力线矢量数据和植被点云数据, 可量测任意位置输电线路与植被的距离<sup>[11]</sup>, 将量测的结果与电力线安全规范比较得出树障点或预警点等信息, 根据电网规范将一定空间范围内的地物进行等级划分, 得到紧急缺陷、重大缺陷、一般缺陷及关注点等相关信息, 并自动生成

树障隐患报告。

## 2 试验与分析

基于 Visual Studio 2010 C++ 集成开发了基于激光点云实现电力线三维重建及缺陷检测。试验平台配置: ThinkPad L470, 配置为 i7-8550U, 运行平台为 Windows 7 系统。

### 2.1 试验数据

本次实验采用纵横 CW-30LiDAR 垂直起降固定翼无人机搭载获取输电线路点云数据。试验飞行速度 25 m/s, 飞行高度约 200 m。激光雷达参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达参数  
Tab. 1 Parameters of lidar

指标	参数
激光等级	1 级, 人眼安全
波长	近红外
精度 / cm	±1.5
最大有效测量速率 / (Pts · s <sup>-1</sup> )	750 000
扫描角 (FOV) / (°)	330
回波处理	多周期回波处理
最大测距 / m	1 350

## 2.2 试验流程

### 2.2.1 加载点云

首先导入点云数据, 然后加载杆塔文件, 根据杆塔位置, 将点云数据分档处理, 点云数据与电力杆塔数据叠加示意图如图 1 所示。

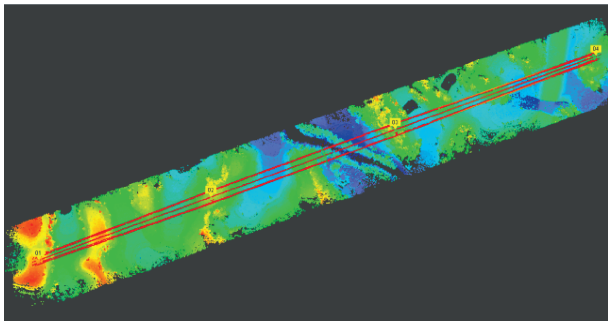


图 1 点云数据与电力杆塔数据叠加

Fig. 1 Superposition of point cloud data and power tower data

### 2.2.2 电力线提取

首先, 提取相邻电塔间电力线点云, 将其作为一个处理单元, 对每个单元进行电力线提取: 利用

KD 邻域搜索最近点, 并根据单条电力线的点云高程连续变化、XY 平面呈直线分布等特性, 跟踪同根电力线上相邻点云; 对每条电力线点云, 采用多项式模型进行拟合, 即可完成电力线三维建模。提取效果图如图 2 所示:

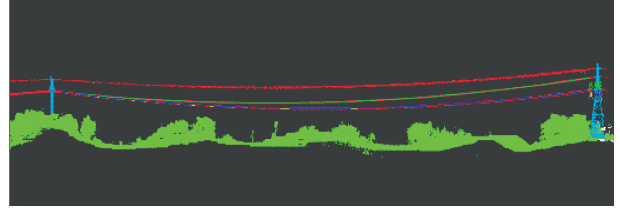


图 2 电力线自动提取结果

Fig. 2 Automatic extraction of power lines

### 2.2.3 精度分析

对自动提取的电力线, 需要对其提取精度进行评估。本文以人工判别拟合的电力线为参考, 测量自动拟合电力线到参考电力线的距离, 根据距离评估电力线自动提取的精度。

自动拟合和人工判别拟合的电力线对比图如图 3 ~ 图 4 所示:

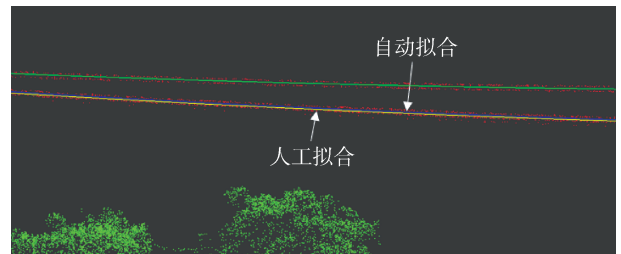


图 3 自动和人工拟合电力线对比

Fig. 3 Comparison of automatic and manual fitting of power lines

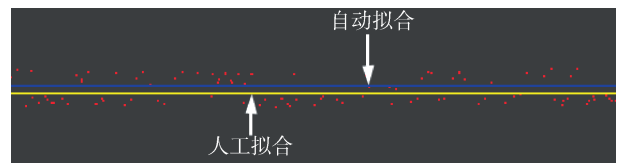


图 4 自动和人工拟合电力线局部放大对比

Fig. 4 Fractionated gain comparison of automatic and manual fitting of power lines

在相邻两杆塔之间沿导线均匀选取 10 个位置, 测量每个位置自动拟合电力线与人工拟合电力线之间的水平距离、净空距离和垂直距离 (如表 2 和图 5 所示)。

结果表明, 自动拟合的电力线与人工判别拟合的电力线水平距离约为 0.247 m, 垂直距离约为

表 2 自动拟合和手动拟合电力线误差  
Tab. 2 Error of automatic fitting and manual fitting

位置点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
水平距离/m	0.285	0.332	0.534	0.198	0.178	0.181	0.230	0.212	0.167	0.156	0.247
垂直距离/m	0.109	0.094	0.070	0.231	0.139	0.089	0.167	0.157	0.234	0.145	0.144
净空距离/m	0.293	0.334	0.539	0.264	0.201	0.213	0.244	0.220	0.232	0.167	0.271

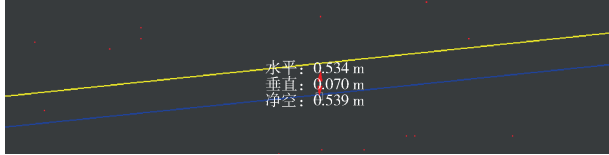


图 5 自动拟合与手动拟合误差

Fig. 5 Error of automatic fitting and manual fitting

0.144 m, 净空距离约为 0.271 m, 误差均较小, 自动拟合的电力线精度较高, 尤其是垂直距离误差最小, 满足树障检测的要求。

#### 2.2.4 树障分析

量测提取的电力线到植被点云的距离, 根据线路安全运行规程所规定的安全距离, 判断是否有植被达到安全距离内, 如果存在, 则确认为树障隐患点位置(如图 6 和图 7 所示), 并保存至树障数据库, 同时可以自动生成树障隐患报告并导出。

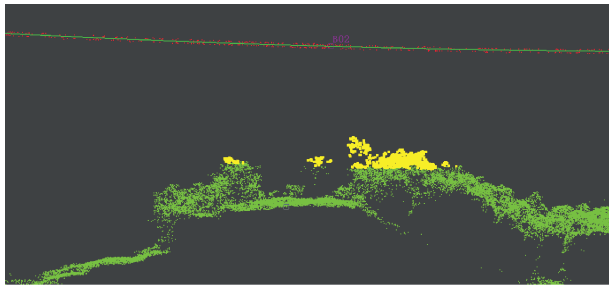


图 6 树障检测结果

Fig. 6 Tree barrier detection results

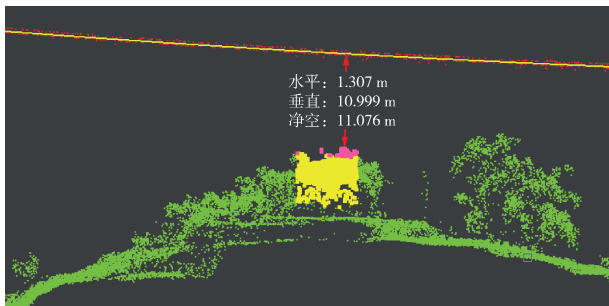


图 7 缺陷点欧式距离

Fig. 7 Euclidean distance of tree barrier points

## 2.3 试验结果

以上测试数据的结果表明, 本文提出的方法可基于输电线路激光点云数据实现多个电塔间多层电力线的自动、快速、完整提取建模, 自动提取电力线的精度满足树障检测的精度要求, 且与传统树障检测方式相比, 速度快、位置准确、效率高。

## 3 结论

本文提出一套无人机三维激光雷达智能识别输电线路缺陷研究方法。通过固定翼无人机搭载三维激光雷达扫描仪获取输电线路点云数据, 提取点云中电力线点并模拟出完整电力线, 自动导线分类与手动导线分类垂直距离相差 0.144 m。通过计算电力线与电力线保护区范围内的物体欧式距离, 将计算的结果与电力线安全规范比较得到树障点或预警点等信息, 极大地提高了导线拟合以及树障点位置信息。

#### 参考文献:

- [1] 浦石, 吴新桥, 燕正亮, 等. 无人机激光雷达智能识别输电线路缺陷 [J]. 遥感信息, 2017, 32(4): 52-57.  
PU S, WU X Q, YAN Z L, et al. Automatic recognition of defects on transmission lines from UAV-borne laser scanning data [J]. Remote Sensing Information, 2017, 32(4): 52-57.
- [2] 周汝琴, 翟瑞聪, 江万寿, 等. 机载激光点云数据中分裂导线自动提取和重建 [J]. 测绘科学, 2018, 43(6): 124-130.  
ZHOU R Q, ZHAI R C, JIANG W S, et al. Automatic extraction and reconstruction of bundle conductors from airborne LiDAR point clouds [J]. Science of Surveying & Mapping, 2018, 43(6): 124-130.
- [3] 段敏燕. 机载激光雷达点云电力线三维重建方法研究 [D]. 武汉大学, 2015.  
DUAN M Y. Research on power line 3D reconstruction method of airborne LIDAR point cloud [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.

- ty, 2015.
- [4] 林祥国, 张继贤. 架空输电线路机载激光雷达点云电力线三维重建 [J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 347-353.
- LIN X G, ZHANG J X. 3D power line reconstruction from airborne LiDAR point cloud of overhead electric power transmission corridors [J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2016, 45(3): 347-353.
- [5] 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.
- 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.
- [6] 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.
- YU J, MU C, FENG Y M, et al. Powerlines extraction techniques from airborne LiDAR data [J]. Geomatics & Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1275-1279.
- [7] 赖旭东, 戴大昌, 郑敏, 等. LiDAR 点云数据的电力线 3 维重建 [J]. 遥感学报, 2014, 18(6): 1223-1229.
- LAI X D, DAI D C, ZHENG M, et al. Powerline three-dimensional reconstruction for LiDAR point cloud data [J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(6): 1223-1229.
- [8] 尹辉增, 孙轩, 聂振钢. 基于机载激光点云数据的电力线自动提取算法 [J]. 地理与地理信息科学, 2012, 28(2): 31-34 +2.
- YIN H Z, SUN X, NIE Z G. Power line automatic extraction algorithm based on airborne laser point cloud data [J]. Geography and Geo-information Science, 2012, 28(2): 31-34 +2.
- [9] 杜娥. 基于 ADAMS 的巡检机器人运动学、动力学仿真 [D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- DU E. Kinematics and dynamics simulation of inspection robot based on ADAMS [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [10] 范亮, 汤坚. 架空输电线路三维建模方法现状及展望 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 120-125.
- FAN L, TANG J. Current situation and Prospect of 3D modeling method for overhead transmission lines [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 120-125.
- [11] 杨喆, 邓超怡. 无人机在特高压输电线路巡检中的应用研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(增刊1): 135-138.

YANG Z, DENG C Y. Application of UAV in UHV transmission line inspection [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3(supp. 1): 135-138.

**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, 通过专业软件开发平台, 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。

**作者简介:**



**阮峻**

1986-, 男, 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) ruanjun@outlook.com.

**RUAN J**

**陶雄俊**

1983-, 男, 高级工程师, 三峡大学输电线路工程学士, 主要从事特高压直流输电线路运行与维护工作 (e-mail) 402215837@qq.com.

**韦新科**

1985-, 男, 工程师, 三峡大学输电线路工程学士, 主要从事特高压直流输电线路带电运维维护工作 (e-mail) weixinke207@163.com.

**李红盛(通信作者)**

1992-, 男, 湖北黄冈人, 广州地理研究所解决方案工程师, 中南林业科技大学硕士, 主要从事地理信息、无人机应用等研究工作 (e-mail) 871748433@qq.com.

(责任编辑 郑文棠)