

文章编号: 2095-6134(2018)05-0612-05

基于 LiDAR 点云特征和模型拟合的高压线提取^{*}

杨 渊¹, 陈凤翔¹, 虢 韬¹, 时 磊¹, 王 成^{2†}, 罗 鑫³

(1 贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司, 贵阳 550002; 2 中国科学院遥感与数字地球研究所
数字地球重点实验室, 北京 100094; 3 贵州电力设计研究院, 贵阳 550002)
(2017 年 7 月 3 日收稿; 2017 年 9 月 27 日收修改稿)

Yang Y, Chen F X, Guo T, et al. Power line extraction using airborne LiDAR point clouds characteristics and model fitting method[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(5): 612-616.

摘 要 高压线数字化是数字电网建设和线路智能巡检的核心内容, 机载 LiDAR 在高压线三维数字重建中具有独特的优势。提出一种从输电走廊机载 LiDAR 点云数据自动快速高精度提取完整电力线点的方法。首先基于点云的空间分布特征粗提取电力线点, 并通过改进 Hough 变换和 RANSAC 抛物线拟合法剔除噪点, 然后分别进行电力线在平面和垂直面上的分股, 结合单股电力线的平面直线模型和垂直面上的抛物线模型, 采用模型生长的方法提取完整的电力线点。试验结果表明, 该方法提取的电力线点云的精度可达 99.6%。

关键词 机载 LiDAR; 高压线; 改进 Hough 变换; 随机抽样一致算法
中图分类号: P237 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2018. 05. 007

Power line extraction using airborne LiDAR point clouds characteristics and model fitting method

YANG Yuan¹, CHEN Fengxiang¹, GUO Tao¹, SHI Lei¹,
WANG Cheng², LUO Xin³

(1 Transmission Line Maintenance Operation Branch of Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guiyang 550002, China;
2 Key Lab of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China; 3 Guizhou Electric Power Design & Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract Digital power line is a core part of digital grid construction and smart line security inspection. Airborne LiDAR has a unique advantage for power line reconstruction because it is capable of accurately and quickly obtaining 3-D information. We propose a new method for automatically and rapidly extracting power lines from airborne LiDAR data in the transmission corridor. Firstly, the power line points were roughly extracted based on the spatial distribution of raw point clouds, and the noise points were removed by using the improved Hough transform and RANSAC parabolic fitting method. Then, the power lines were distributed on the horizontal plane and the vertical plane. Finally, the points of power line were extracted by the model growth method, which was based on the assumption that the plane model of single power line was linear and the model on the vertical plane was parabolic. The experimental results show that the extraction accuracy

^{*} 国家科技部重大科学仪器设备开发专项(2013YQ120343)资助

[†] 通信作者, E-mail: wangcheng@radi. ac. cn

of power line reaches 99. 6% using the proposed method.

Keywords airborne LiDAR; power line; improved Hough transform; RANdom SAmple Consensus

国民经济的快速发展促进了高压输电线路的大幅扩建,而且很多线路往往穿越各种复杂的地理环境,给传统人工巡检和维护带来诸多困难^[1],如何快速、精确、实时地监控输电线路的运营状态是电力行业的一大难题。近年来机载 LiDAR(light detection and ranging)在电力巡线中发展迅猛,其高效率、高精度的三维实时数据获取方式使输电线路数字化管理和智能巡检成为可能,而从输电线路机载点云数据分离电力线点并进行数字化是实现智能巡检的基础^[2]。

目前有许多针对机载 LiDAR 数据进行电力线提取和三维重建的研究,主要集中在电力线点的提取、电力线分股以及建立电力线模型^[3-4]。Melzer 和 Briese^[5]首先通过主成分分析进行数据预处理,并投影到二维平面,然后应用迭代 Hough 变换提取电力线点。叶岚等^[6]通过高程阈值分割滤波算法滤除地面点,基于二维 Hough 变换完成对电力线点的提取。余洁等^[7]通过三角网加密滤波和基于首次回波信息后的角度滤波分离地面、植被和电力线点,并采用双曲余弦函数完成对电力线的建模。尹辉增等^[8]基于点云的空间分布特征分离电力线点,利用 Hough 变换提取电力线位置以及对抛物线局部分段拟合实现电力线模型。韩文军等^[9]基于点云的多回波特性和局部点云的密度差异滤除非电力线点云,然后采用二维直线线性拟合的 Hough 变换检测电力线点,最后利用抛物线方程拟合重建电力线三维模型。陈驰等^[10]采用顾及地形起伏特征的机载 LiDAR 点云自动滤波方法,滤除大部分非电力线点,然后采用二维 Hough 变换检测电力线点。王平华等^[11]基于点云的空间分布特征,粗分离电力线与非电力线点,通过 RANSAC 线性拟合实现电力线的平面检测,最后结合点云高程统计和同一垂直面内电力线点的高程分布特性完成电力线点的分股。

上述从机载 LiDAR 提取电力线点的方法虽然都取得了一定的应用效果,但进一步分析发现,这些研究未考虑经过预处理后丢失的电力线点,而且通过 Hough 变换的线性检测并不能剔除与电力线点处于同一垂直面上的噪点。本文拟通过输电走廊点云数据的空间分布特征粗提取电力线点,然后基于改进 Hough 变换和 RANSAC

(RANdom SAmple Consensus)抛物线拟合方法,分别剔除与电力线不在同一垂直面上和在同一垂直面上的噪点,最后利用单股电力线的直线和抛物线模型生长完成电力线点的精提取。

1 方法

本文电力线点的提取是基于单档输电走廊点云数据(两个相邻电塔之间的点云),可以通过电塔的位置进行分档,提取过程分为基于点云空间分布特征的电力线点云粗提取、基于改进 Hough 变换的电力线点平面分股、基于 RANSAC 抛物线拟合的电力线点垂直面分股,以及基于单股电力线直线和抛物线模型生长精提取 4 个步骤,流程如图 1 所示。

```
graph TD; A[/输电走廊机载 LiDAR 点云数据/] --> B[网格划分]; B --> C{点云特征 高程分布统计}; C --> D[非电力线点]; C --> E[粗提取的电力线]; E --> F[改进Hough变换]; E --> G[RANSAC 抛物拟合]; F --> H[电力线点平面和垂直面分段]; G --> H; H --> I{模型拟合与生长}; I --> J[高精度完整的电力线点云];
```

图 1 电力线提取流程

Fig. 1 Flow chart of powerline extraction

1.1 基于点云空间分布特征的电力线点粗提取

将输电走廊的机载 LiDAR 点云投影到水平面上,可以发现在局部范围内,这些点云大体可以分

为 3 类:1)地表点(地面、植被、房屋等混合点);2)地表、电力线点混合;3)地表、电塔点混合(图 2),也会存在少量的地表点、电力线、电塔点混合的情况,但数量较少,对后续过程的影响可以不计。

图 2 中的区域 1,2,3 分别代表上述 3 类情形的点云数据。图 3 是 3 类情形下点云的高程分布

统计图(统计间隔为 1 m),横轴为各层点云的绝对高程,纵轴为相应层的点云数量。可以看出,地表点、电力线点混合的局部数据高程统计会有明显的两段为零的部分(图中箭头所指),这是此类局部数据的共性,因此可基于此特性进行电力线点的粗提取,步骤如下:



图 2 电力线点云空间分布特征示意图

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of point clouds in power line corridor

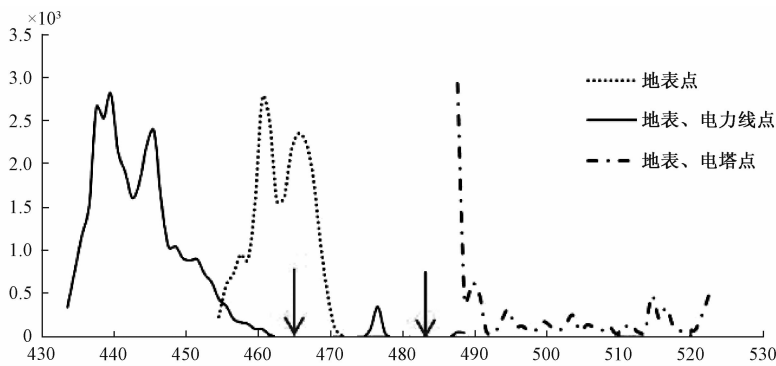


图 3 输电走廊不同地物点云的高程分布统计

Fig. 3 Elevation statistics of point clouds for different objects in power line corridor

1) 网格划分

按照一定大小的网格对输电走廊原始点云数据进行网格统计。网格划分的关键是网格大小的设定,若设定的网格较大,在统计点云高程分布时对地形起伏较大的区域会增加其在空间分布上的连续性,将部分电力线点误认为噪声而剔除,影响后续模型的建立;设置的网格较小,部分地物点会被当作电力线点,影响后续线性检测的效率。结合输电线路走廊点云特点,网格大小一般设置为 2~4 m。

2) 局部数据高程分布统计

对上述每个网格数据,从最低点按照一定的分层高度,从下到上统计各层点数量,建立每个格网点的高程分布直方图,并将无点云并连续的各层合并,计算间隔高度,最后将高程最低且间隔高度符合阈值要求的作为分隔层。为确保提取相对完整的电力线点,分层高度的设置应尽量小,一般

可设为 0.1~0.3 m。

3) 电力线点粗提取

由于第 1 类只有地表点的网格其相对高度(网格中最高点与最低点高程之差)明显低于第 2 类、第 3 类,因此通过设置相对高度阈值即可剔除绝大部分第 1 类格网点,然后按照步骤 2) 求取分割层,分离第 2 类格网中的地表点和电力线点,并将分割层以上的点作为电力线点,得到粗提取的电力线点云。对未找到满足相对高度阈值要求的网格,此网格中的点全部剔除。

1.2 基于改进 Hough 变换的电力线点平面分股

Hough 变换检测直线的基本思想是利用点与线的对偶性,将原来在 XOY 坐标系中按点斜式或两点式表示的直线方程转化为极坐标系中(ρ, θ)

的表示方法,且一条直线的 ρ_0 和 θ_0 是唯一的,过某个点的所有直线的 ρ_i 和 θ_i 在极坐标系下符合正弦曲线,因此一条直线上各个点的 ρ 和 θ 的正弦曲线在极坐标系中相交于一点,即为此直线的 ρ_0 和 θ_0 ^[12]。据此,可以将检测图像中的线性特征问题转化为寻找极坐标系下相近点问题,方法如下:

1) 计算每个点的极坐标 (ρ_i, θ_i) :由于绝缘子、引流线以及点云质量的影响,基于点云空间分布特征粗提取的电力线点在电塔附近有较多的噪点。为提高算法的效率和精度,本文将电塔附近一定距离的点暂时剔除,同时可根据电塔位置确定电力线点云水平投影直线的 θ 范围,而不必求取每个点所有直线的 θ_i 及其对应的 ρ_i ,减少计算量并节省运算时间和空间,还可以通过增加 θ 的角度分辨率提高算法的精度。

2) 求取符合线性特征的点云数据:即寻找相同(或相近的) ρ_i 和 θ_i ,需要解决4个关键问题:①Hough变换中,点离坐标原点(0,0)越远,当变换相同角度 θ 时, ρ 变化就越敏感,这样就需要减小角度变化步长(即增加角度分辨率)提高检测精度,但会增加运算量,降低数据处理的效率;②增加角度分辨率可以提高线性检测精度,但如果按照一般图像处理时采用的 ρ_i 和 θ_i 都取整的方法统计相同的 (ρ_i, θ_i) ,精度较低;③电力线点云的水平投影并不完全在一条直线,求取的同一条直线上 ρ_i 和 θ_i 不完全相等,存在一定的误差;④输电走廊中高压线一般由多股组成,为避免遗漏,应全部考虑。

为控制上述 ρ 随 θ 变化的敏感问题,可将点云数据整体平移到坐标原点附近。针对多股电力线问题,可采用循环的方法求取满足要求的电力线点。据此,本文采用RANSAC的方法求取邻近点,具体过程如下:

- ①将1)中得到的 (ρ_i, θ_i) 随意挑选一个作为局内点 (ρ_0, θ_0) ,用点位误差作为其数学模型;
- ②判断其他所有点与 (ρ_0, θ_0) 的距离,满足阈值要求则为局内点;
- ③通过局内点个数以及所有点位中误差的精度来评估模型,若满足阈值要求则为电力线点;
- ④重复迭代①~④步骤 k 次,满足点位中误差阈值要求的情况下选择局内点个数最多的为最优模型;
- ⑤重复迭代①~④步骤,直到无满足要求的电力线点为止,即可得到多股电力线点云。

1.3 基于 RANSAC 抛物线拟合的电力线点垂直面分股

通过上述过程,一方面剔除与电力线在同一垂直面上的噪点,另一方面实现电力线点的平面分股,但与电力线处于同一垂直面的噪点并未作相应的处理,而且同一垂直面上的电力线点仍然是一个整体。基于此,考虑到电力线在其走向垂直面上的投影为抛物线形状,本文基于RANSAC抛物线拟合方法,提取并分股垂直方向上的电力线点,方法如下:

1) 每一档输电走廊点云的走向并不一定与坐标轴平行,若要求电力线点在走向垂直面上的抛物线模型,需将坐标系进行旋转,旋转的角度根据电塔的位置计算。将旋转后的点云数据投影到垂直面上,组成由横坐标 t 和纵坐标 z 点集, (t_i, z_i) ($i=0,1,\dots,n$), n 为经过上述过程提取后剩余的点云数量;

2) 从点集 (t_i, z_i) 随机挑选3个点作为局内点,建立抛物线模型 $z = a_i t^2 + b_i t + c_i$, ($i=0,1,\dots,k$), k 为计算最优模型需要迭代的次数;

3) 判断点集中其他点与抛物线的距离是否满足阈值要求,若满足,则此点为局内点,即为同一条抛物线上的点;

4) 通过局内点的个数以及最小二乘拟合法,计算模型中误差,评估该模型的合理性;

5) 重复迭代上述步骤2)~4) k 次,选择在满足精度要求的情况下局内点个数最多的抛物线模型为最优模型,检测到的局内点即为单股电力线点云;

6) 一般电力线有多层,重复迭代步骤2)~5)直到无最优模型为止,即可实现电力线点云的垂直面上的分股。

1.4 基于直线和抛物线模型生长的电力线点云精提取

通过上述处理得到单股电力线点云数据并不完整,但可得到单股电力线的直线和抛物线模型,采用模型生长的方法进一步精提取其余电力线点,方法如下:

1) 建立点云在水平投影面上的直线和走向垂直面上的抛物线方程:

$$\begin{cases} y = ax + b, \\ z = at^2 + bt + c. \end{cases} \quad (1)$$

2) 分别判断未处理点云数据中每个点与单

股电力线模型的距离,满足阈值要求则为电力线点云,完成电力线点云的精提取。

2 实验与分析

以国家电网某超高压输电走廊的机载 LiDAR 点云数据为例(图 2),验证本文方法的有效性。该输电走廊点云数据共有 2 层、4 股电力线,每股电力线之间的平面距离约为 15 m、垂直距离约为 11 m,输电线路长约 395 m,宽约 80 m,平均点间距约为 0.35 m,点云数量 3 136 840 个,其中电力线点 23 436 个,地形为山区,电力线距离最近的

地物约为 10 m。

针对上述点云特征,采用格网大小 2 m × 4 m、分层高度 1 m 完成电力线点云的粗提取。为避免电塔附近较多噪点影响 Hough 变换检测的效率与精度,截掉电塔附近 10 m 长距离的点云,设置角度步长为 0.05°,角度 θ 为 1°、 ρ 为 1 m 完成 Hough 变换的线性检测,实现电力线的平面分股。利用 RANSAC 抛物线方法进行局内点的判断,设置点到抛物线的距离阈值为 2 m,实现电力线在走向垂直面上的分股,最后通过单股电力线模型生长完成电力线点的精提取,结果如图 4 所示。

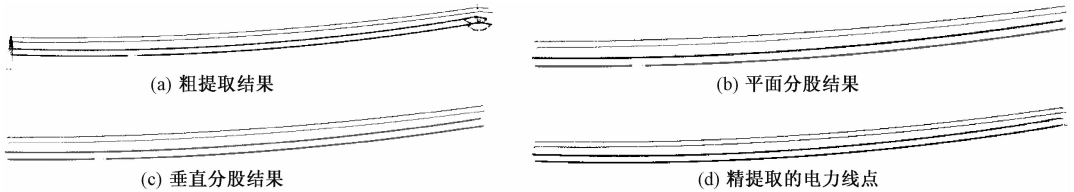


图 4 电力线点提取结果
Fig. 4 Power line points extracting results

本次实验共耗时 2 s,提取电力线点 23 349 个,正确率为 99.6%,说明本文方法几乎可以提取完整的电力线点。

3 结语

本研究提出一种从输电走廊机载 LiDAR 点云数据快速提取电力线点的新方法,从效率、精度和完整性方面都取得了很好的应用效果,特别是解决了预处理过程中电力线点丢失的问题。通过研究与分析发现,本文的算法还需要在以下方面进行进一步改进和优化:

- 1) 试验用的点云数据在电网工程应用中非常有代表性,但实际情况中可能会有一些极端情况,如获取的输电走廊点云中缺失部分电力线点云,或者植被点较多等,都会影响电力线点的粗提取,进而影响后续各类模型拟合的电力线的精度;
- 2) 将电力线点在走向垂直面上的投影简单地归为抛物线模型,对于较长距离的一档输电走廊电力线点云会存在一定的误差,针对该问题仍需深入分析。

参考文献

[1] 王和平,夏少波,谭弘武,等. 电力巡线中机载激光点云数据处理的关键技术[J]. 地理空间信息, 2015, 13(5): 59-62.

[2] Ussyshkin R V, Theriault L, Sitar M, et al. Advantages of airborne LiDAR technology in power line asset management [C] // Proceedings of the 2011 International Workshop on Multi-Platform /Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping (M2RSM), Xiamen, China, Jan 10-12, 2011: 1-5.

[3] Clode S, Rottensteiner F. Classification of trees and power-lines from medium resolution airborne laser-scanner data in urban environments [J]. Clinical Therapeutics, 2005, 34 (5): 1 145-1 158.

[4] Cheng L, Tong L, Wang Y, et al. Extraction of urban power lines from vehicle-borne LiDAR data [J]. Remote Sensing, 2014, 6(4): 3 302-3 320.

[5] Melzer T, Briesche C. Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds [C] // Proceedings of Workshop, 28th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition (OAGM), Hagenberg, Austria, Jun 17-18, 2004: 47-54.

[6] 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.

[7] 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): 1 275-1 279.

[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.

[9] 韩文军,阳锋,彭检贵. 激光点云中电力线的提取和建模方法研究[J]. 人民长江, 2012, 43(8): 18-21.

[10] 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): 1 600-1 605.

[11] 王平华,习晓环,王成,等. 机载激光雷达数据中电力线的快速提取 [J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 154-158.

[12] 阿布来提·依布拉音,王治强,刘薇,等. 基于 Hough 直线检测的深度图像配准方法 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(1): 112-116.