

一种基于机载激光点云数据的电力线提取方法

徐景中, 寇媛

武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079

摘 要: 提出了一种基于机载激光点云数据的电力线自动提取算法。首先利用高程直方图统计法分离地面点, 再利用点云密度差异分离电塔点。然后, 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。最后, 计算相邻电力线间悬挂点位置, 延伸电力线。实验证明, 该算法对激光雷达点云密度要求低, 电力线提取完整性好, 可实现多条电力线的快速、自动提取。

关键字: 机载激光雷达, 滤波, 电力线点检测, KD 树, 电力线拟合

1 引 言

随着我国经济高速发展, 对高电压、大功率、长距离输电需求的提高, 线路走廊穿越的地理环境越来越复杂, 对其运行维护日趋困难(邵允临等, 2003)。传统的直升机巡线大多通过获取线路走廊可见光和红外影像, 但这些技术受环境影响大、空间定位精度较低, 不利于电网的勘测设计及维护。激光雷达系统是一种利用激光脉冲来获得被检测对象的相关信息, 具有稳定性好、精度高的特点, 可快速地获得高精度三维线路走廊的地形、地貌、地物和线路设施空间信息, 进一步可精确、快速地量测线路走廊地物点到电力线的距离、电力线线间距离等, 满足电力线巡线的应用要求(张险峰等, 2007)。

目前激光雷达在电力线提取方面的应用正处于初始阶段, 国内在此方面研究甚少, 且提取的过程大都利用 Hough 变换提取电力线(余洁等, 2011; 尹辉增等, 2012), 即将三维点云转化到二维空间后, 再进行 Hough 变换, 此类方法损失了点云的高程信息, 对于平面位置相同的多层电力线点云, 不能快速实现单条电力线分类。此外, 利用 Hough 变换检测电力线, 计算过程复杂, 不利于大数据的应用。Liang Jing 等人 (2011) 直接根据同一根电力线上激光脚点紧密相连的特性, 利用点云聚类的思想, 并结合 KD 树组织数据结构进行最近邻搜索, 实现了电力线的快速自动提取。但该算法需要满足聚类阈值 K 需小于两根电力线的最小距离, 当点云间距大于两根电力线的最小距离时, K 值无法满足聚类需要, 降低了聚类的完整性。本文提出一种新的电力线提取方法, 该方法通过电力线点分类、拟合再延伸等方法实现电力线建模, 其中通过局部

点密度统计法进行电塔剔除和电力线分段, 利用高程约束及电力线方向约束进行电力线点分类。该算法提取速度快, 对聚类阈值的要求低, 可满足电力巡检的需求, 实现电力线走廊的连续、完整提取。

2 电力线提取算法

为实现激光雷达数据中电力线的自动提取, 首先要解决从大量原始激光点云中分离电力线点云的问题, 主要包括剔除地面点和电塔, 提取电力线点云。其次, 根据电力线的各项特性, 识别出每条电力线数据。最后, 对电力线数据进行三维重构, 恢复电力线的空间特性。为了进一步缩小搜索空间, 在电塔提取完成后, 利用电塔位置对电力线点云进行分段, 将相邻电塔间电力线点云作为一个处理单元, 进行电力线提取。各部分提取完成后, 对电力线进行延伸, 实现电力线在电塔处无缝连接。电力线提取流程如图 1 所示:

2.1 电力线点提取

为了提取电力线点云, 首先采用高程直方图分析法 (LiangJing, 2011) 去除地面点, 然后实现电力线点云

与电塔点云自动分离, LiangJing 等人 (2011) 直接采用整体激光点云密度统计法检测电塔, 尹辉增等人 (2012) 采用局部高程直方图分析法实现电力线点云和电塔点云自动分类, 为了提高算法速度, 本文采用整体激光点云密度统计法检测电塔, 并对电力线点云进行分段存储。

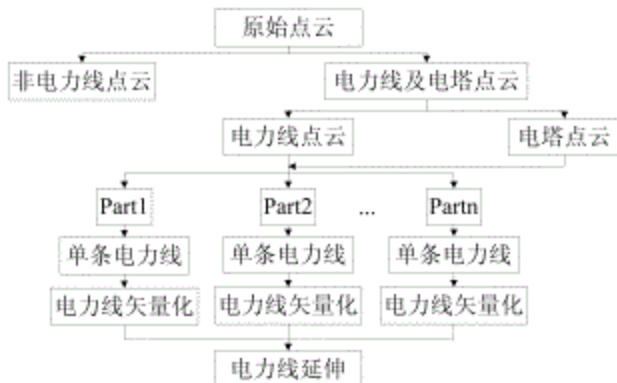


图1 电力线提取流程图

2.2 电力线分类

将每段电力线点云作为一个处理单元, 进行电力线分类, 即将若干条电力线点云区分开来。一般来说单条电力线相邻点云间距离差较小, 而不同电力线的点云距离差就比较大。但是由于激光雷达系统数据采集的随机性, 单条电力线上激光雷达点云相邻点距离可能大于不同电力线间点云的最小距离, 即如图2中, $d_{p1p2} > \text{Distance}$ 。此时, 若仅考虑相邻点云距离因素进行聚类, 距离阈值设置过小, 则导致聚类不完整, 过大则可能导致跟踪至其它电力线。

研究发现: ①单条电力线相邻点云高程变化小, 即使两相邻点间距离较大时, 高差仍较小; ②在 XY 平面, 单条电力线上所有点云大致在同一直线上。当设置距离阈值较大时, 根据特性①, 可避免跟踪到垂直方向不同层电力线点云; 根据特性②, 可避免跟踪至电力线走廊水平方向其它平行电力线。

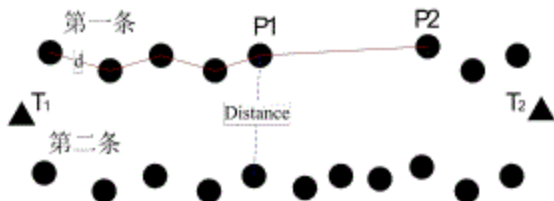


图2 激光点云跟踪原理

该方法的具体实现步骤如下:

1) 建立 KD 树。为提高搜索速度, 要适当确定点云的搜索范围, 范围太大则降低搜索效率, 范围太小则可能遗漏同条电力线上的激光点。一般选择在中心点附近 20 个点内进行搜索。

2) 从电力线点中任意选取一个激光点作为中心点, 并记为起始点 P_0 。

3) 基于中心点 P_0 进行 K 近邻域搜索, 在 20 个点内找到距离最近的激光点 P_i , 记下点号 i , 根据空间距离计算公式 (式 1) 计算该点距中心点的距离:

$$\begin{aligned} dx &= x_i - x_0; \quad dy = y_i - y_0; \quad dz = z_i - z_0 \\ d &= \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \end{aligned} \quad (1)$$

4) 设置一个距离阈值 K , 如果满足以下条件:

①式(1)中距离 d 小于 K , K 值可根据点云中相邻点最大间距设置, 本文设为 10 m;

②式(1)中 dz 小于某阈值, 记为 dz_max 。 dz_max 可根据单根电力线相邻点的最大高差设置, 本文设为 1 m;

③电力线垂直方向偏差小于某阈值, 即该点到该电力线距离 d_{p2line} 小于某阈值, 本文设为 1 m。 d_{p2line} 计算方法如图3所示, 图中 A, B 为该电力线数组中最远的两点, C 为当前点, d_{p2line} 即为 C 点到 AB 直线的距离。

满足以上三个条件时, 则把该点存入电力线数组中, 该数组中的点代表一根电力线点云, 将该点作为新的中心点, 同时标记该点已处理。

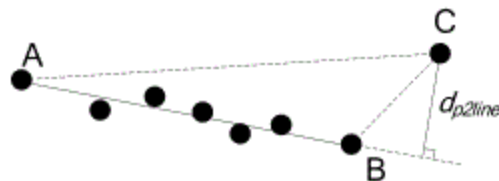


图3 点到电力线距离示意图

5) 重复执行步骤3)到步骤4), 直到邻域范围找不到满足条件的点, 结束此方向跟踪。

6) 进行反方向跟踪。重新将起始点 P_0 作为中心点, 重复执行步骤3)到步骤5), 直到没有满足条件的点为止, 至此一条电力线的激光点云识别完成。

7) 基于未处理的点云数据, 重新执行步骤2)到步骤6) 直到所有符合条件的数据点均识别完毕。

2.3 电力线建模

电力线是自然悬链曲线, 国外很多学者采用悬链线方程拟合导线 (Thomas & Christian, 2004; Jwa, et al.2009; 余洁, 等, 2012), 此类方法较复杂, 本文采用

多项式模型,利用最小二乘原理,在三维空间对导线弧垂建模,公式(2)是二维空间多项式方程。

$$y = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

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

当没有外界因素影响,如风力作用,电力线在XY平面可近似为一条直线, a 为 0; 公式(3)是转化到三维空间的多项式方程,在电力线方向与Z平面近似为一条二次曲线。

2.4 电力线延伸

为了保证各电力线处理单元的独立性,避免将电塔点保留在电力线点中,在分离电塔时,电塔附近一定范围内的电力线点云也划分为电塔类,。因此为了保证电力线提取的完整性,在各部分电力线提取完成后,需要利用电塔类点云对电力线拟合结果进行延伸。

对于每条电力线,首先获取其相邻电塔数据,利用2.2节描述的点云跟踪原理,以及已有的电力线方程,获得相应的电力线点云数组,记为 A 。最后重新拟合电力线,更新电力线端点。由于电力线对应电塔数据中可能包含相邻段电力线点云,因此 A 中可能包含相邻电力线点云数据。此时,需要对 A 数组中点云进行判断,寻找可能存在的节点,即两相邻电力线交点,剔除 A 数组中节点之后的所有点云。节点判定方法如下:首先对 A 中点云进行平滑,即剔除局部最低点;然后,寻找局部最高点,并以此作为节点。

为实现电力线在电塔处的无缝连接,对电力线进行延伸后,需要进一步计算各电力线穿过电塔时悬挂点的平面位置,更新电力线端点。悬挂点平面位置计算方法如下:

(1) 首先,计算电塔左侧任意电力线与右侧任意电力线距离 $d_{l_1 l_2}$ (如图4所示),获得两侧电力线空间距离关系

矩阵 M ;



图4 曲线距离示意图

由于电力线延伸后,完整性较好,若曲线间距离 $d_{l_1 l_2}$ 采用 d_1 与 d_2 和平均,相较取两者最小值,偏离实际情况较大。文中 $d_{l_1 l_2}$ 计算公式如下:

$$d_{l_1 l_2} = \min(d_1, d_2) \quad (4)$$

其中, d_1 为 B 点与过 B 点垂直地面的平面与曲线 l_2 交点的欧氏距离, d_2 为 A 点与过 A 点垂直地面的平面与曲线 l_1 交点的欧氏距离。

(2) 获得两侧电力线邻接关系。根据 M 矩阵,若距离电力线 l_1 最近的电力线为 l_2 , 则 l_1 与 l_2 为邻接关系;

(3) 计算悬挂点位置。对于一组邻接电力线,分两种情况进行计算:①两电力线方向差异较大时,直接计算各自平面方程(式(2))的交点 P , 则悬挂点的平面位置为 P 。②两电力线方向差异较小时,需要通过计算两条二次曲线的交点,一般通过迭代计算获得交点平面位置 P , 使 P 点对应两曲线高差最小(式(3))。

3 实验与分析

为验证本文算法的有效性,本文采用一条带机载激光扫描数据的一部分进行验证。图5为原始点云数据,该数据包含6个电塔,64条电力线,单条电力线中相邻点云平均间距约为1m,最大约9.8m。算法首先对电力线点云分段,每段为一个处理单元,然后进行电力线自动提取,最后延伸电力线。图6为电力线剔除地面点云效果图。

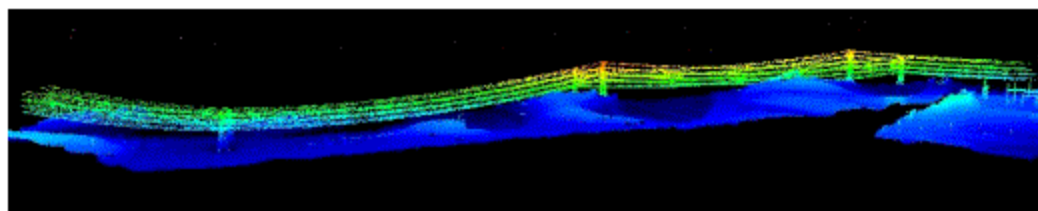


图5 原始点云

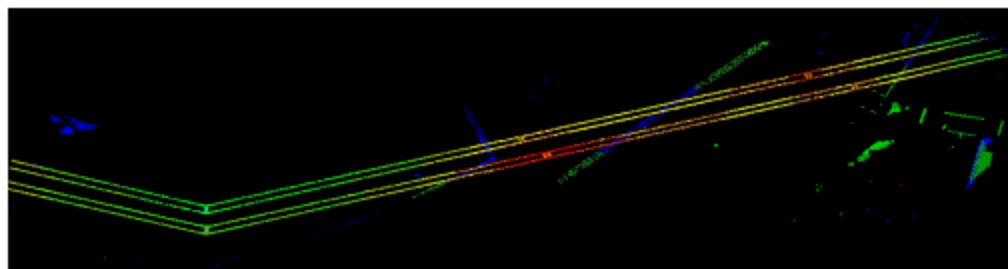


图6 去地面效果图

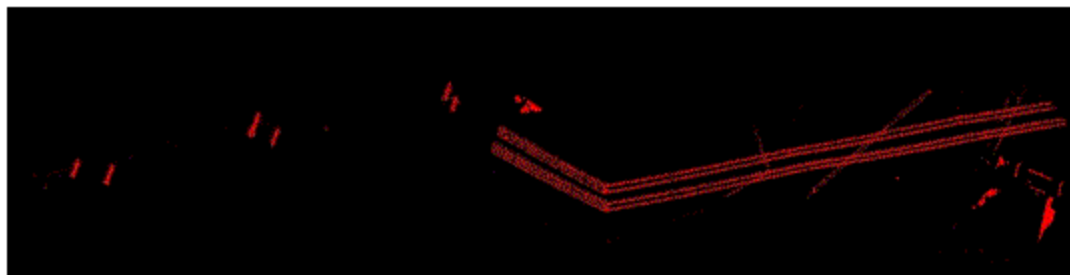
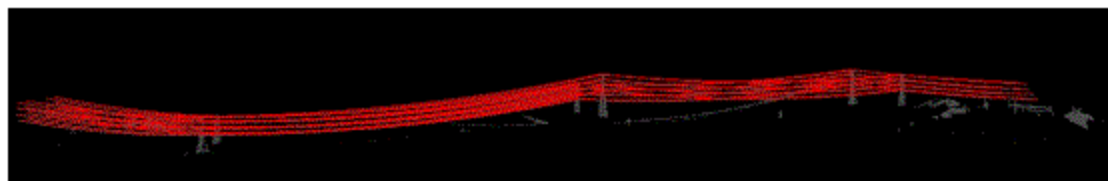


图7 电塔分离效果图

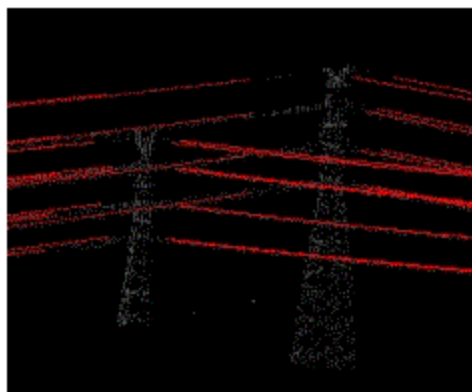
由图6可以看出,根据点密度统计分离电塔和其他非电力线区域点,仍然存在一些非电力线点,但由于此类点数较少,且分布离散不规则,不影响后期电力线提取结果。

电力线点云提取完成后,根据单条电力线点云分布的两个特性,利用KD树近邻域搜索方法跟踪单条电力线点

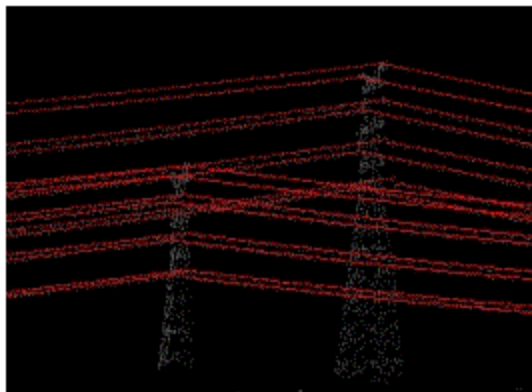
云,并进行拟合,完成单条电力线提取。为了进一步保证单条电力线的完整性,在电力线提取完成后,需判断是否存在电力线断裂情况,并对属于同条电力线的多条曲线进行合并。图8为电力线提取效果图(其中红色为电力线点,灰色为电塔点)。



(a) 整体效果



(b) 局部放大效果



(c) 电力线延伸效果图

图8 电力线提取效果图

图8(a)为电力线提取整体效果图。图8(b)为某电塔部分局部放大图,可看出部分曲线下方存在一系列原始点,不在曲线上。这些点位于电力线下方的悬挂线,算法为提高电力线的提取精度,进一步剔除悬挂线点云,对聚类的电力线点云进行再分类,仅选择最上方一层点云作为最终电力线点云进行拟合。

图8(c)为电力线延伸效果,可看出单条电力线不存在过提取现象,悬挂点处电力线完整,且在高程方向上偏差小,延伸效果好。此外,算法点云提取率高,拟合效果好,精度可达毫米级;由于采用分段电力线提取策略,提取速度与Liang Jing等人(2011)的算法相当,甚至更快,本文数据中电力线总条数为64,提取时间为5.844秒。

4 结论

本文在充分分析单条电力线点云特征基础上, 提出了

一种基于机载激光点云数据的电力线自动提取算法。实验证明, 该算法可实现多个电塔间多层电力线的自动、快速、完整提取, 受激光雷达点云密度影响较小, 特别是当单条电力线中相邻点云最大间距大于两根电力线的最小距离时, 本文算法仍可实现电力线的完整提取。

REFERENCES

- JWA Y, SOHN G, KIM H. Automatic 3D powerline reconstruction using airborne LiDAR data. IAPRS, Vo1.XXXVIII,2009.pp: 105-110.
- Liang J, Zhang J X, Deng K Z, Liu Z J, Shi Q S. 2011. A new power-line extraction method based on airborne LiDAR point cloud data. Image and Data Fusion (ISIDF), 2011 International Symposium on.9-11 Aug. 2011. Pp. 1-4.
- ShaoY L, Cao J N, Shang D W. 2003. Patrol inspection of EHV electric power transmission line with helicopter in north china Power Network. ELECTRIC POWE, 2003, 36(7): 35-3.
- THOMAS M, CHRISTIAN B. Extraction and modeling of power lines from ALS point clouds.IEIEEE,2004.
- Yin H Z, SunX, NieZ G. 2012. An automated extraction algorithm of power lines based on airborne laser scanning data. Geography and Geo-Information Science, 28(2):31-34.
- Yu J, Mu C, Feng Y M, Dou Y J.2011.Powerlines extraction techniques from airborne LiDAR data.Geomatics and Information Science of Wuhan University, 36(11):1275-1279.
- Zhang X F, Cheng G, Cheng Z F, Cheng Y, Long W. 2007. The application of laser- radar for helicopter transmission line inspection. Central China Electric Power, 20(6):33-39.

附中文参考文献

- 邵允临, 曹晋恩, 尚大伟. 直升机巡检华北电网超高压输电线路. 中国电力, 2003, 36(7): 35-3.
- 尹辉增, 孙轩, 聂振钢. 2012. 基于机载激光点云数据的电力线自动提取算法, 地理与地理信息科学, 28(2):31-34.
- 余洁, 穆超, 冯延明, 樊延娟. 2011. 机载 LiDAR 点云数据中电力线的提取方法研究. 武汉大学学报·信息科学版.36(11):1275-1279.
- 张险峰, 陈功, 程正逢, 程永, 龙维. 2007. 激光雷达在直升机巡线中的应用. 华中电力, 20(6):33-39.

An Extraction Algorithm of Power Lines Based on Airborne Laser Scanning Data

Abstract: An automated extraction algorithm of power lines based on Airborne Laser scanning data is proposed in this paper. Firstly, the Histogram Statistical Method is used to remove ground points, and remove the pylons by the density difference between pylons and power lines. Then, extract power point cloud between adjacent pylons as a processing unit. Each unit independently extracted by two steps: Track point cloud belonging to a single power-line, using K-Nearest Neighbor Search method to search the nearest point, and according to linear distribution in 2D plane, the continuous change of height in a single power-line; fit each power-line using the polynomial fitting model. Finally, hanging points between adjacent power lines are extracted to extend power lines.

The experiments results show that the proposed algorithm has low demands on point cloud density, and can completely, quickly and automatically extract multiple power-lines.

Key words: LiDAR, filter, power lines extraction, KD tree, power-line fitting