

机载激光点云数据中电力线自动提取方法

陈 驰^{1,2} 麦晓明³ 宋 爽^{1,2} 彭向阳³ 徐文学⁴ 王 珂³

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

2 武汉大学时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心, 湖北 武汉, 430079

3 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州, 510080

4 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛, 266061

摘要: 提出了一种从机载激光点云数据中自动提取电力线的方法。首先利用顾及地形起伏特征的机载激光点云自动滤波方法移除地面点, 利用维数特征以及方向特征自非地地面点中分割获得电力线激光点云; 然后对获取的电力线点采用二维霍夫变换和最小二乘拟合的方法求取每条电力线的中心线方程, 根据中心线方程求取每条电力线上的激光点完成单电力线目标提取, 并考虑了电力线在水平投影面内重叠时的情况; 最后根据分块质心解算方法生成每条电力线上的三维节点, 输出电力线矢量。采用实际线路巡检实验采集的机载激光点云数据进行实验, 实验结果表明, 该方法能从机载激光点云数据中提取出完整的电力线, 并具有较好的鲁棒性, 对电力巡线具有一定的实际意义。

关键词: 机载激光点云; 电力线提取; 滤波; 霍夫变换; 质心解算

中图法分类号:P236

文献标志码:A

电力工业是国民经济的基础工业之一, 是国家重要的支柱产业。为满足经济快速发展的需要, 超高压大容量输电线路的建设数量急剧增加, 线路走廊穿越的地理环境更为复杂, 给线路维护带来了更多困难^[1]。机载激光扫描(light detection and ranging, LiDAR)技术作为近年来快速发展的一项新技术, 可以弥补传统航空摄影测量无法进行电力线测量的缺憾, 快速获取高精度的数据信息, 提高电力巡线效率, 减少成本投入, 并具有全天候工作等优点^[2]。因此, 研究机载激光扫描数据中的电力线自动提取技术对电力巡线工作有着非常重要的现实意义。

激光雷达系统在国外电网维护中已有广泛应用, 在国内尚处于探索阶段。随着 LiDAR 技术的不断发展, 采用 LiDAR 技术进行电力巡线的作法将会越来越普遍。输电线是输电设备的重要组成部分, 基于 LiDAR 数据的电力线提取是对地观测技术在电力巡检中的一项重要应用。近年来, 众多学者对此进行了研究。Melzer 和 Briese 首先采用迭代式霍夫(Hough)变换方法在 XOY 平面上提取电力线, 然后利用随机采样一致性

(RANSAC)方法建立电力悬链线三维模型^[3]。但该方法只适用于塔间小范围区域的电力线提取。McLaughlin 根据维数特征自动将点云数据分类为电力线、植被和地面, 并利用局部仿射模型进行电力线提取^[4], 但其选取的初始仿射模型的好坏对最终的提取精度有较大影响。融合激光点云高分辨率航空影像数据进行目标提取是目前研究的热点之一^[5]。Kersting 和 Centeno 将点云数据与高分辨率航空影像数据融合, 采用模糊逻辑方法从输电线路走廊中分离出建筑物、植被等目标, 但此方法需要手工对电力线进行分类^[6]。余洁采用滤波的方法滤除地面点和植被点, 采用二维 Hough 变换分离各条电力线, 根据双曲余弦函数拟合单条电力线, 但树木和电力线混合区域的提取结果会相对变差^[7]。

由于电力线路自身的复杂性, 目前尚未有线路走廊 LiDAR 电力线提取的成熟算法。现有方法多采用二维投影方法进行电力线识别, 以及曲线方程拟合进行线模型构建, 存在投影重叠线路漏检, 曲线拟合贴合不完全等问题。针对上述问题, 本文根据电力线在 LiDAR 点云数据中的空

间分布特点,提出了一种适用于大范围线路巡检的 LiDAR 数据电力线自动提取算法,即通过维数特征与方向特征实现电力线点云的分割,在线目标提取阶段使用高程邻近性解决投影识别中的重叠问题,最后使用分段质心拟合的方式实现拟合线与原始点云的最佳贴合。

1 激光点云电力线提取技术

本文提出的从 LiDAR 点云数据中提取电力线的方法流程图如图 1 所示。该方法首先采用顾及地形起伏特征的机载激光点云自动滤波方法和维数特征滤除地面点、植被点、建筑物点以及电塔点;然后对获取的电力线点采用二维 Hough 变换和最小二乘拟合的方法计算电力线在 XOY 投影面内的中心线方程,根据中心线方程求取每条电力线上的激光点,并考虑了电力线在水平投影面内重叠时的情况;最后根据分块质心解算方法生成每条电力线上的三维节点,并输出电力线矢量。

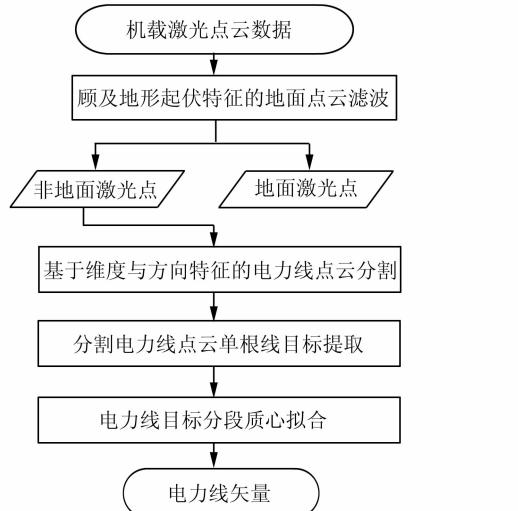


图 1 机载激光点云电力线提取流程图

Fig. 1 Flowchart of Power Lines Automatic Extraction from Airborne LiDAR Data

1.1 电力线激光点云分割

电力线激光点云分割是从原始点云数据中分离出电力线点云,为进一步的单条电力线目标提取做准备。在狭长的电力线走廊区域内,激光点主要分为地面点、植被点、建筑物点、电塔点和电力线点。本文首先采用滤波方法滤除地面点,然后根据激光点的维数特征以及与水平面的关系剔除植被点、建筑物点和电塔点,从而获取电力线点。

采用滤波方法滤除机载激光扫描数据中的地面点已经有较多的研究^[8-11]。本文首先采用顾及地形起伏特征的机载激光点云自动滤波方法^[12]对线路走廊激光点云数据进行滤波,滤除地面点云,保留非地面点云。

根据滤波后获取的非地面点的空间几何特性,利用维数特征自动滤除植被点和建筑物点,再利用方向特征滤除电塔点。首先根据邻域大小自适应的方法计算每个激光点的最佳邻域半径及其对应的特征值和特征向量,然后根据特征值 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) 定义维数特征^[13]:

$$(a_{1D}, a_{2D}, a_{3D}) = \left(\frac{\sqrt{\lambda_1} - \sqrt{\lambda_2}}{\sqrt{\lambda_1}}, \frac{\sqrt{\lambda_2} - \sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}}, \frac{\sqrt{\lambda_3}}{\sqrt{\lambda_1}} \right) \quad (1)$$

式中, $a_{1D} + a_{2D} + a_{3D} = 1$ 。

植被点在点云空间中表现为球状目标,在 X、Y、Z 三个方向上的特征值都比较接近;建筑物点在点云空间中表现为面状目标,有两个特征值比较大,且 λ_2 远大于 λ_3 ;电塔点在点云空间中表现为杆状目标,只有一个方向的特征值比较大,另外两个方向的特征值都比较小且比较接近;电力线点在点云空间中也表现为杆状目标。因此只选取杆状目标即可以滤除植被点和建筑物点。对于电塔点,则可以根据方向特性滤除。电力线平行于水平面,而电塔则垂直于水平面。因此,对于获取的杆状目标点,可以根据与 λ_1 对应的特征向量判断其方向,只保留与水平面平行的杆状目标点,达到滤除电塔点的目的。但是部分与水平面平行且与电力线垂直的电塔点依然未被滤除,接下来可根据提取的电力线之间的夹角关系滤除这些电塔点。通过上述预处理方法,可以充分保留电力线点,并最大化地去除地面点、植被点、建筑物点以及电塔点。

1.2 分割电力线点云单根线目标提取

通过基于维数特征的点云分割步骤后,电力线激光点云与地面、电塔等背景激光点云数据分离,独立成为一类地物。但由于塔间存在多根电力线,分割后的电力线激光点云中存在多个电力线目标,故在拟合之前,需要对电力线点云分割结果进行单根电力线的对象目标提取。电力线在水平面内的投影呈直线,且这些直线互相平行^[6]。本文首先采用二维 Hough 变换的方法从电力线点中提取出电力线的水平投影方程,然后根据水平投影方程反算出各条电力线上的激光点。

电力线点在 XOY 投影面内是离散点,大致均匀地分布在电力线上或两侧;并且电力线之间

具有一定的间距,单条电力线点云数据中可能会有中断。选用 Hough 变换方法提取点云数据中的电力线的水平投影方程能够有效地克服数据中断问题,提取出完整电力线二维矢量。选取分割后保留下来的电力线点的 X、Y 坐标在 XOY 投影面内进行二维 Hough 变换,从而获取多个直线方程。根据这些直线方程统计出电力线的主方向,将与主方向夹角较大的直线滤除,依次移除预处理后残留的与地面平行的电塔点提取的直线。用统计分析的方法将 Hough 变换检测到的直线进行分簇,使用最小二乘拟合法进行中心线拟合,获取电力线在 XOY 投影面内的中心线直线方程。

当电力线在 XOY 投影面上重叠或近似重叠时,传统的 Hough 变换电力线提取方法^[14,15]只能提取出一根直线,可能出现漏检的情况。为解决这一问题,利用同一条电力线的局部相邻点的高程比较接近这一原则,统计每条电力线在 XOY 投影面上的邻近点,判断其高程差是否超过一定的阈值;若超过一定阈值,则认为该条直线对应多条电力线,在阈值的点为同一条电力线上的点,从而确定每条电力线上的激光点,并解决电力线漏检的情况。接着根据获取的电力线的中心线方程反求出每条电力线上的激光点。计算每个激光点到提取的各条电力线中心线之间的二维距离,若该点到某条直线之间的距离小于一定的阈值(邻近电力线平面间距的 1/4),则认为该点是这条电力线上的点。如此循环,直到没有点满足该条件为止,即完成单条电力线的目标提取。

1.3 电力线分段质心拟合

电力线在三维空间中表现为曲率较小的曲线,使用电力线两端结点难以对其进行描述;而获取的激光点在电力线附近分布不规则,亦难以确定电力线的具体位置。基于此,本文使用基于分块质心解算的方法生成三维节点。该方法对提取的电力线点进行区域分块(采用平面空间划分原理),计算分块区域质心,将分块质心作为输出节点。其数学推导如下。

设某条电力线在 XOY 投影面上的拟合直线方程为 $y = kx + b$ 。通过遍历该电力线上的点可求得其最小外包矩形的左上和右下角坐标分别为 (x_{\min}, y_{\min}) 、 (x_{\max}, y_{\max}) 。将电力线划分为 N 个区域,则沿电力线方向的分割间距 d 在 x 方向上分量 d_x 满足式(2):

$$d_x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{N} \quad (2)$$

分块区域中噪声点的数目比较少时,使用质心的方法不但可以确定电力线节点的具体位置,还可以很好地抑制噪声点云对电力线提取结果的影响。质心点的坐标 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 的计算公式为:

$$(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right) \quad (3)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为该分块区域内第 i 个点的坐标值; m_i 为该点的权重,用该点到电力线中心线的距离的倒数来计算; n 表示该分块区域内点的数量。根据这些节点可以进行包含悬链线、双曲线、多段线在内的各种曲线形状的电力线曲线拟合,减少数据噪声对拟合结果的影响,从而稳健地重建出每条电力线。

2 实验与分析

本文以 Microsoft Visual Studio 2010 为研发平台,集成使用 OpenCV 图像处理库和 PCL 激光点云处理库,实现本文提出的机载激光点云数据的电力线提取与拟合算法。采用广东电网公司某 220 kV 的输电线路机载 LiDAR 数据进行实验验证。该线路长度为 3.6 km,包含 18 基输电杆塔,总点数为 90 608 407 点,平均点密度为 68 点/ m^2 。原始点云数据见图 2(a)。

图 2(b)展示了顾及地形起伏特征的机载激光点云自动滤波方法的实验结果,该方法能够准确地自动分离出地面点和非地面点。经过基于维数特征和方向特征的预处理后,非地面点中的植被点、建筑物点和部分电塔点都能够有效去除,电力线点被很好地保留下,如图 2(c)所示。同时,少量电塔点由于具有杆状、水平等与电力线一致的几何特征被误分割为电力线点。此类点将在后续的电力线单线目标提取阶段中剔除。

图 3 为实验数据某局部数据单电力线目标提取结果。自局部原始点云(图 3(a))可以看出,数据中存在 9 条电力线。若不考虑电力线在 XOY 投影面内重叠的情况,则电力线点云的提取结果如图 3(b)所示,存在着漏检的情况,只能获取 8 条电路线对应的点云数据。本文方法考虑了电力线在 XOY 投影面内重叠的情况,可以检测出点云数据中的所有电力线,即使在 XOY 投影面内重叠的电力线也可以被检测出来,如图 3(c)所示。

本文采取分块质心解算的方法输出电力线节点,依据一系列三维矢量节点生成多段线,完成电

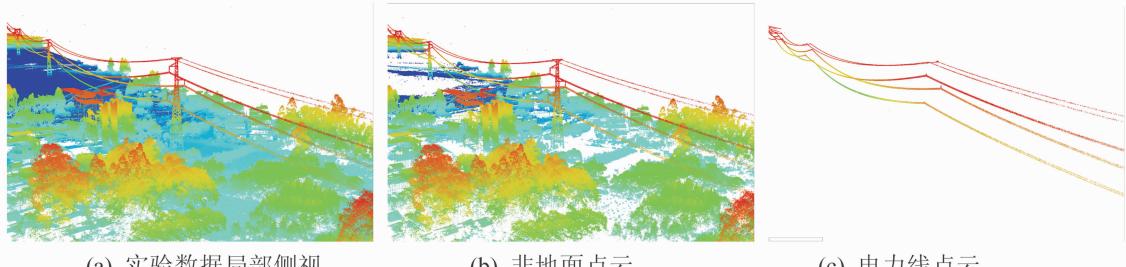


图 2 电力线点云分割

Fig. 2 Segmentation of the Power Line LiDAR Data

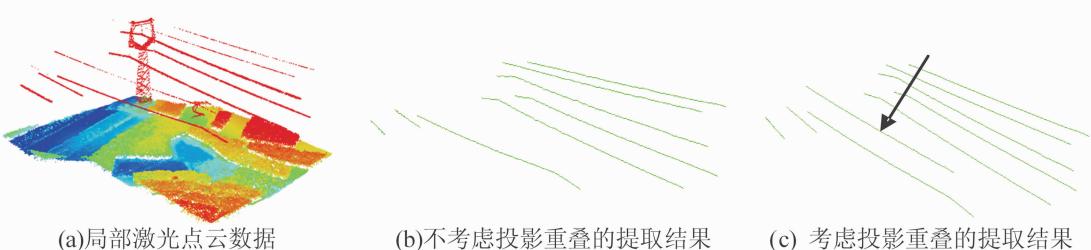


图 3 考虑 2D 投影重叠的线目标提取

Fig. 3 Power Line Extraction with 2D Projection Overlay Consideration

力线的矢量方式描述。该方法是一种逼近方法,不能完全真实地反映电力线应有的小曲率曲线特征。因此,电力线节点的选择是影响电力线矢量提取精度的因素之一。下面分析电力线节点的数量对电力线最终提取精度的影响。

选取实验数据中具有代表性的区段数据(图 3(a)),在设置电力线节点范围为 7~35 个的条件

下,进行电力线提取实验。通过直观的肉眼查看,评定提取电力线矢量数据对电力线拐点等细节特征的表现状况。利用电力线细节表现和 X、Y、Z 方向最大单位权中误差等多个标准对电力线的提取精度进行评定,输出选择不同数目节点时提取电力线的精度评定报告,并对报告结果进行统计。实验结果见表 1。

表 1 电力线节点数量与电力线提取效果

Tab. 1 Number of Nodes and Power Lines Extraction Effects

节点数	7	10	15	20	25	30	35
细节表现	丢失	丢失	丢失	完好	完好	完好	完好
X 方向最大单位权中误差/m	0.005 13	0.004 21	0.028 90	0.033 80	0.032 01	0.025 70	0.023 02
Y 方向最大单位权中误差 /m	0.004 15	0.004 00	0.027 30	0.023 38	0.033 34	0.029 69	0.035 07
Z 方向最大单位权中误差 /m	0.001 34	0.001 2	0.031 33	0.053 10	0.087 37	0.073 75	0.090 90

由实验结果可知,随着提取节点数目的增加,电力线提取结果的描述质量不断上升,电力线细节增加,但提取精度随之下降。结合提取算法原理可得出结论:随着电力线矢量节点的增加,电力线点云数据分块减小,分块中点云数据数目降低,质心计算结果易受到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。为达到电力线提取的细节效果与提取精度的平衡,本文采用 20 个节点作为最佳提取节点数目进行电力线提取。

图 4 为实验数据电力线自动提取结果(红色实线)在线路走廊环境中的三维可视化截屏。由的发展,能够提供的数据源越来越多,同时获取多

图 4 可知,本文提出的电力线激光点云分割、目标识别与矢量化方法可以应用于大范围电力线自动提取,并具有较好的抗噪性和稳健性。

3 结语

本文结合激光点云的数据特点与电力线的结构特征,提出了一种适用于大范围的精度较高的电力线自动提取方法。实验结果表明,该方法能完整地提取出机载激光点云数据中的电力线,具有较好的抗噪性和稳健性,对电力线路巡检具有一定的应用价值。随着机载 LiDAR 技术重回波数据、激光回波强度、高分辨率航空影像数

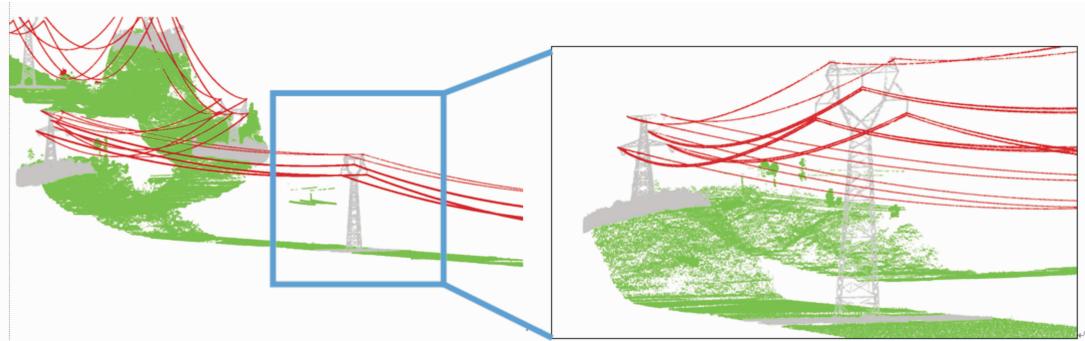


图4 机载激光数据电力线点云提取与拟合

Fig. 4 Power Line Extraction and Vectorization in LiDAR Cloud Data

据以及现有的DEM或GIS数据等成为可能。后续可结合多源数据的特点,基于多源数据进行电力线、电线塔等主要地物的分类与提取。

参 考 文 献

- [1] Shao Yunlin, Cao Jinen, Shang Dawei. Patrol Inspection of EHV Electric Power Transmission Line with Helicopter in North China Power Network[J]. *Electric Power*, 2003, 36(7): 35-38 (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[J]. 中国电力,2003, 36(7): 35-38)
- [2] Yin Jinhua, Sun Chaoyang, Zheng Yanchun. Application Study of Airborne Laser Measurement Technology in UHV Transmission Line Construction[J]. *Electric Power Construction*, 2007, 28(7): 9-13(殷金华,孙朝阳,郑彦春. 机载激光测量技术在特高压输电线路工程中的应用研究[J]. 电力建设, 2007, 28(7): 9-13)
- [3] Thomas M, Christian B. Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Points Clouds[C]. The 28th Proceedings of OAGM, Workshop, Hagenberg, Austria, 2004
- [4] McLaughlin R A. Extracting Transmission Lines from Airborne LiDAR Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(2): 222-226
- [5] Yang B, Chen C. Automatic Registration of UAV-borne Sequent Images and LiDAR Data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 262-274
- [6] Kersting A P B, Centeno J A S. Object Oriented Transmission Line Corridors Classification Using LiDAR Technology and a Non-Metric Digital Camera[J]. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2007, 13 (2): 295-315
- [7] Yu Jie, Mu Chao, Feng Yanming, et al. Powerlines Extraction Techniques form Airborne LiDAR Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(11): 1 275-1 279 (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] Mongus D, Zalik B. Parameter-free Ground Filtering of LiDAR Data for Automatic DTM Generation [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67(1): 1-12
- [9] Gao Guang, Ma Hongchao, Zhang Liang, et al. A Ground Filtering Algorithm for Airborne LiDAR in Consideration of Terrain Break Lines[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 466-470 (高广,马洪超,张良,等. 顾及地形断裂线的LiDAR点云滤波方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(4): 466-470)
- [10] Wu Jun, Li Wei, Peng Zhiyong, et al. Integrating Morphological Gray Scale Reconstruction and TIN Models for High-quality Filtering of Airborne LiDAR Points[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1 298-1 303(吴军,李伟,彭智勇,等. 融合形态学灰度重建与三角网分层加密的LiDAR点云滤波[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, (39)11: 1 298-1 303)
- [11] Hu Ju, Yang Liao, Shen Jinxiang, et al. Filtering of LiDAR Based on Segmentation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(3): 318-321 (胡举,杨辽,沈金祥,等. 一种基于分割的机载LiDAR点云数据滤波[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(3): 318-321)
- [12] Tang Tao. Automatic Filtering Method of Airborne LiDAR Data Based on Fluctuant Feature of Terrain [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(唐涛. 顾及地形起伏特征的机载激光点云自动滤波方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [13] Lalonde J F, Vandapel N, Huber D F, et al. Natural Terrain Classification Using Three-dimensional Radar Data for Ground Robot Mobility[J]. *Journal*

of Field Robotics, 2006, 23(10): 839-861

- [14] Ye Lan, Liu Qian, Hu Qingwu. Research of Power Line Fitting and Extraction Techniques Based on LiDAR Point Cloud Data[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010, 33(5): 30-34 (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)

- [15] Teng Jinzhao, Qiu Jie. Fast and Precise Detection of Straight Line with Hough Transform[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(2): 234-237 (腾今朝, 邱杰. 利用 Hough 变换实现直线的快速精确检测[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 234-237)

Automatic Power Lines Extraction Method from Airborne LiDAR Point Cloud

CHEN Chi^{1,2} MAI Xiaoming³ SONG Shuang^{1,2} PENG Xiangyang³
XU Wenxue⁴ WANG Ke³

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and
Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Engineering Research Center for Spatio-temporal Data Smart Acquisition and Application
of Ministry of Education of China, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China

4 The First Institute of Oceanography, Qingdao 266061, China

Abstract: This paper present a power lines automatic extraction method from airborne LiDAR point cloud. Firstly, ground points are removed by automatic filtering method based on fluctuant feature of terrain. Vegetation points, building points and part pylon points are also removed by dimensionality feature and direction feature. Secondly, 2D Hough transform and least square fitting are used to fit center line equation of power lines. And then, the laser point of each power lines can be obtained by center line equation. In this step, power lines projection overlap in the horizontal plane are considered as well. Finally, block centroid calculation method is used to calculate 3D nodes of each power lines. These nodes are used to output the power lines vector. The experimental result shows that the proposed method can extract complete power lines from airborne LiDAR point cloud. This method has some practical meaning for power line inspection.

Key words: airborne LiDAR point cloud; power lines extraction; filtering; Hough transform; centroid calculation

First author: CHEN Chi, PhD candidate, specializes in the UAV-borne multi-source remote sensing data fusion and application. E-mail: chenchi_liesmars@foxmail.com

Foundation support: The National Basic Research Program of China(973 Program), No. 2012CB725301; the National Natural Science Foundation of China, No. 41371431; the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co. Ltd, No. K-GD2013-030.