

大型无人机电力巡检 LiDAR 点云安全距离 诊断方法

陈驰¹, 彭向阳², 宋爽³, 王柯², 钱金菊², 杨必胜³

(1. 测绘遥感信息工程国家重点实验室(武汉大学), 湖北省 武汉市 430079;

2. 广东电力科学研究院, 广东省 广州市 510080;

3. 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心(武汉大学), 湖北省 武汉市 430079)

Safety Distance Diagnosis of Large Scale Transmission Line Corridor Inspection Based on LiDAR Point Cloud Collected With UAV

CHEN Chi¹, PENG Xiangyang², SONG Shuang³, WANG Ke², QIAN Jingju², YANG Bisheng³

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing (Wuhan University),

Wuhan 430079, Hubei Province, China;

2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, Guangdong Province, China;

3. Engineering Research Center for Spatio-temporal Data Smart Acquisition and Application (Wuhan University),

Ministry of Education, Wuhan 430079, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Safety distance diagnosis of ground objects in transmission line corridors is an important part in transmission line inspection task of power operation and maintenance departments. Combined with actual needs of power line maintenance, in this paper, an automatic safety distance diagnosis method of large scale transmission lines corridor inspection based on LiDAR point cloud collected with unmanned aerial vehicle (UAV) is proposed. Firstly, LiDAR point cloud collected with UAV inspection system are trimmed according to known power line position and direction, thus the point clouds in line corridor area are obtained. Secondly, adaptive partition filter is used to screen out ground points to obtain non-ground point clouds. Thirdly, power lines, towers, forest vegetation, buildings and other features of safety distance diagnosis concern are separated from the non-ground points according to characteristics of point-cloud dimension and spatial geometric distribution. On basis of aforementioned procedures, an iterative least squares catenary model for power lines is proposed to fit catenary equation of power line laser point cloud data for subsequent safety distance calculation. Finally, a sectional safety distance calculation method is used to calculate distance between power line and ground objects in the line corridor and compare it with standard safety distance,

then a danger warning is issued for the area with less distance than safety. The proposed method is validated with multiple LiDAR point cloud data collected with UAV power line inspection system. The results are compared against manual measurements in point clouds and on-spot field inspection to apply comparative analysis both qualitatively and quantitatively. Experimental results show that the safety distance diagnosis method proposed in this paper can effectively detect over-limit objects such as tree barricades with safety distance measurement accuracy at decimeter level at UAV inspection flying height.

KEY WORDS: UAV; LiDAR; point cloud; transmission line inspection; safety distance diagnosis

摘要: 输电线路走廊中地物安全距离检测是电力运维部门日常线路巡检作业中的重要一环。结合此项运维实际需求,提出一种无人机电力巡检 LiDAR 点云数据的自动安全距离诊断方法:首先依据已知的线路位置与走向对无人机巡检系统采集的 LiDAR 点云进行裁剪,获得线路走廊区域点云;其次,采用自适应分区滤波的方法滤除地面点,获得非地面点云;在此基础上,在非地面点数据中,依据点云维数特征以及空间几何分布特性从非地面点中分离出导线点、杆塔点、及林木植被、建筑物等安全距离诊断所关注的线路走廊其他地物;继而提出一种迭代最小二乘电力线悬链线模型解算方法,自无序电力线激光点云数据拟合悬链线方程,用于后续安全距离计算;最后使用分段剖面安全距离计算方法计算线路与线路走廊下方地面/地物距离,并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。采用大型

基金项目: 中国博士后科学基金(2016M600614); 国家自然科学基金重点项目(41531177, 41371431)。

Project Supported by China Postdoctoral Science Foundation (2016M600614); National Natural Science Foundation of China (41531177, 41371431).

无人机电力线路巡检系统采集的多组 LiDAR 点云数据对文中算法进行实验验证,并对检测结果与人工点云量测值与实地巡检值进行了定性与定量的对比分析。实验结果表明提出的安全距离诊断方法能准确探测树障等安全距离超限地物。

关键词：无人机；LiDAR；点云；电力巡检；安全距离

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2016.3194

0 引言

输电线路巡检是电网运行维护部门的主要责任与任务之一。我国电网现行的高压输电线路巡检方式,主要是通过维护人员依靠地面交通工具与低空有人直升机,利用手持仪器或肉眼来巡查设施处理缺陷,其劳动强度大,工作条件艰苦,劳动效率低,管理不便,难以适应现代化电网的发展和运行需要。超、特高压电网急需安全、先进、高效的电力巡检方式。

随着遥感技术的发展,世界各国均在研究利用遥感和摄影测量技术来辅助或取代传统的人工巡线工作的可行性^[1-5]。遥感对地观测技术由于其在不直接接触的情况下,也能对目标或自然现象进行远距离探测的特点,是获取电网空间信息的重要技术手段之一。目前基于遥感技术的输电线路巡检已经成为电力线路自动化巡检解决方案的研究热点^[6-7]。在电网已开展的有人、无人直升机巡线试验中,巡检平台多搭载红外线热像仪、长焦相机等传统观测设备对途经线路进行观测,实现自动或半自动的输电设备发热、放电故障与缺陷检测^[8-9]。

输电线路走廊中地物安全距离检测是电力线路巡检线工作中的重要一环。由于作业条件限制等各种客观原因,该类安全隐患存在查出困难或者查出时效性低的情况,树障放电、线路受外力破坏均可导致线路跳闸停电,更有甚者会引发山火等严重安全生产事故^[10],直接危害到电力系统的安全稳定运行以及线路走廊辐射范围内居民的人身和财产安全。激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是一种重要的遥感手段^[11-12],可以获取被探测物体的空间几何结构信息。机载 LiDAR 技术弥补了传统巡检手段低空间定位精度与低几何结构测量效率的局限性,可有效解决传统巡线技术难以解决的输电线路走廊地物到导线之间距离精确量测的问题^[13-14]。采用无人机作为 LiDAR 系统搭载平台,可有效提高线路巡检的灵活与机动性并节约了人工/有人机巡检所需大量人力、物力以及时间成本,对于山区等巡检困难区域的架空线路来说意义尤为重大。

本文主要研究大型无人机电力巡检系统采集的 LiDAR 点云数据中输电线路安全距离自动诊断方法,该方法自动提取无序激光点云中的电力线点云并提出迭代悬链线导线弧垂拟合方法,克服传统安全距离检测算法中导线弧垂拟合保真度低的问题,并依据分段邻近准则计算线路下方地物到线路的距离,进而依据测算距离对安全距离不符合线路运维标准的危险地物进行预警,实现输电线路的安全距离诊断。安全距离诊断机制可自动识别线路下方的包括建筑物、植被在内的多种自然、人工构筑物目标是否超过安全区域与高度。诊断结果含有绝对地理坐标,便于供电局对超限地物进行清理,保证输电线路安全。

1 LiDAR 点云输电线路安全距离诊断

依据 DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》相关定义,输电线路走廊安全距离诊断,即测量林木植被、建筑物、交叉跨越等各种位于线路走廊内的地物到电力线的距离,判断距离是否在安全范围内。输电线路巡检必须保证输电导线和线路走廊中的各种地物间的距离符合安全距离规程要求。无人机电力巡检 LiDAR 系统采集的线路通道点云含有多类目标,包括隶属于输电设施的电力线、杆塔及其附属设施,隶属于非输电设施的植被、建筑物等其他地物目标。对采集到的 LiDAR 点云数据进行分类,区分出海量三维点云中的电力线点云与其他地物点云是实现自动安全距离诊断的前提。本文首先对无人机载 LiDAR 点云进行分类,提取出输电导线点云与线路走廊中的其他地物点云,继而自离散的电力线点云拟合电力线悬链线矢量数据,最后基于此拟合曲线分段计算线路安全距离,排查出安全距离超限区域。

1.1 无人机载 LiDAR 点云分类

本文主要研究山区等巡检困难自然环境区域无人机载 LiDAR 数据安全距离诊断,其线路走廊点云数据主要包括林木植被、地面、被巡杆塔、被巡输电线路、极少量建筑物,其中林木植被列为主要危险地物。输电线路下方即量测一定范围内区域为安全距离检测的关注对象,故本文首先依据已知的线路位置与走向对无人机巡检系统采集的 LiDAR 点云进行裁剪,获得线路走廊区域点云。无人机载 LiDAR 点云分类是从原始点云数据中分离出地面点、导线点及包括植被、建筑物在内的其它地物点,为进一步的输电导线曲线拟合和安全距离诊断做准备。继而采用自适应分区滤波的方法滤除

地面点,在非地面点数据中,依据点云维数特征以及空间几何分布特性从非地面点中分离出导线点、杆塔点及林木植被、建筑物等安全距离诊断所关注的线路走廊其他地物。

用于分类机载激光点云数据中的地面点、非地面点的地面点云滤波方法,目前有较多相关研究^[15-16],但单一的滤波方法难以适应复杂多样场景^[17]。其中,自适应分区滤波方法^[18],利用点云分割方法将场景点云数据自动分割成同质点云区域和异质点云区域,并分别采用基于分割面片的滤波方法和多尺度形态学方法进行滤波处理得到地面点云。该方法充分利用了2个方法的适应区域优势,使得算法的场景适应性更加稳健。因此,本文采用此方法进行滤波处理,以分离地面点云和非地面点云。滤波后的地面点云用于制作数字高程模型(digital elevation model, DEM),用于后续的裸露地表输电线路对地距离计算。滤波后的非地面点云主要包括电力线点云、杆塔点云以及其他地物点云(林木植被点云、建筑物点云等)。对于其中的电力线点云与杆塔点云,本文采用基于维度特征与方向特征的电力线点云分割方法、杆塔投影点密度判别方法分别进行提取与聚类^[19]。

在本文研究对象山区输电线路中,其他地物主要包含大量林木植被及极少量低矮建筑物。林木植被形状无规则、分布广泛、且具有生长的特性,其及时安全距离量测困难,是线路巡检的重点关注对象亦是危及输电安全的主要走廊地物之一^[10,20]。LiDAR点云数据中林木植被的提取与分类已有较多研究,方法包括基于同区域的高分辨率卫星影像中得到的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[21],多次回波信息植被提取^[22],利用支持向量机(support vector machine, SVM)和顶面微分几何特性植被提取^[23]等。但其存在需要大量训练样本、辅助数据(例如卫星影像)等样本局限性。

点云维度特征^[24]可对点云形状分布进行描述,目前已在点云分割分类中广泛应用^[25]。林木为自然地物,建筑物为人工构筑物,二者对应的激光点云数据在空间几何分布特性上有极大的不同。本文使用维度特征结合区域生长的方法进行建筑物提取,并在剔除建筑物点云的基础上,利用点云维度特征进行林木植被目标的分类。LiDAR点云中点的维度特征由其邻域内的点集组成的协方差矩阵特征值计算而来,具体定义为:

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

式中: $a_{1D} + a_{2D} + a_{3D} = 1$; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, (\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3)$ 分别为邻域点集合协方差矩阵的特征值。由于激光扫描距离以及遮挡等因素,采用固定邻域进行点局部几何特征估计将导致较大的计算误差,从而影响分割结果。本文采用熵函数最小化的自适应邻域计算方法确定激光点的最佳邻域半径。该方法的基本原理如下:每个点的邻域半径从 r_{\min} (经验值 0.5m) 开始步进增大直到 r_{\max} (经验值 2m) 结束,分别对每个邻域做主分量分析,计算得到特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$; 定义熵函数:

$$E_f = -a_{1D} \ln(a_{1D}) - a_{2D} \ln(a_{2D}) - a_{3D} \ln(a_{3D}) \quad (2)$$

求使该函数 E_f 取得最小值的半径 r 为最佳的邻域半径大小。本文逐点计算点云维度特征,实现对点云几何形状分布的描述。

建筑物点云通常具有平直的空间分布特性。在空间中平直分布点集中的某一点其邻域点云在 X、Y、Z 3 个方向上的特征值在平直面所处的 2 个方向上特征值较为接近,且远大于第 3 个方向上的特征值,即 $\lambda_1 \cong \lambda_2 \gg \lambda_3$, 整体表现为面状目标。依据此分布规律,计算点云中各个点的维度特征,并选取面状分布点作为种子点,以点高程相似,平面坐标邻近作为生长准则,对同属面状分布维度特征点进行区域生长。完成面状分布点云区域生长后,获取面状分布点云区块。线路走廊内建筑物除平顶外,还存在多面片组合顶,如人字形屋顶,故继而对邻近面片进行组合,提取出完整建筑物目标。同时建筑物通常大于 10m^2 大小,本文依据此面积约束对小于此面积的面状聚集区块进行滤除,排除茂密林木植被平面冠顶区域以及其他噪声目标的干扰。

山区输电线路走廊内的非地面点云数据中主要部分为林木植被点,在移除少数建筑物点云后,剩余的 LiDAR 点云基本上全部为林木植被点。林木植被点由于其生长不规则,空间分布杂乱,在点云空间中呈多向同性分布,邻域点云在 X、Y、Z 3 个方向上的特征值较为接近($\lambda_1 \cong \lambda_2 \cong \lambda_3$),整体表现为球状目标。故本文逐点计算剩余点云维度特征,依据植被的球状分布特征,滤除其他噪声目标的干扰,从而提取出激光点云中的植被目标供后续安全距离计算。

1.2 机载激光点云中输电导线拟合

杆塔间的悬垂导线是三维空间中的三维曲线,有一定的曲率,不能直接采用线路两端的杆塔悬挂

点以线段的方式进行描述,需要对其形状进行拟合逼近。目前 LiDAR 电力线点云拟合尚未有标准算法出现,现有研究多采用分块质心解算的方法生成导线的三维节点,以三维空间多段线的方式对电力线三维进行表示^[19]。分段质心拟合可以较好解决无序、分布不均匀的线路点云的矢量拟合问题,但多段线存在段间不平滑(图 1(a)蓝色多段线)与激光点云(图 1 中红色点)缺失部分直线连接的局限性(图 1)。悬链线则以连续光滑曲线的方式实现导线形状拟合(图 1(b)绿色曲线),可对弧垂进行精确表达,并克服部分导线点云缺失的问题。

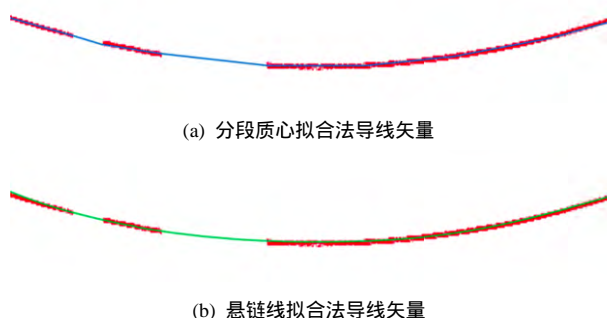


图 1 导线分段质心拟合与悬链线方程拟合导线

Fig. 1 Fitting transmission line with polyline model and catenary model

杆塔间悬垂导线形状服从悬链线模型分布^[26]。本文提出一种迭代最小二乘的方法自无序电力线激光点云数据拟合悬链线方程,直接求解电力线悬链线模型参数,从而实现导线的曲线矢量重建与输出,用于后续安全距离计算。本文采用的输电导线悬链线(如图 1)方程定义如式(3)所示和图 2 所示。

$$f(x, m) = a \cosh\left(\frac{x-b}{a}\right) + c \quad (3)$$

$$\arg \min_m \sum_{i=1}^n \left[\frac{f(x_i, m) - y_i}{\sigma_i} \right]^2 \quad (4)$$

对某根导线所对应的点云数据簇采用迭代最小二乘的方法实现悬链线的拟合,即优化如式(4)所示的目标方程。首先利用区域生长方法分割长段线路点;然后使用 Levenberg-Marquardt 最小二乘优化方法计算悬链线模型;再通过拟合模型,引导生

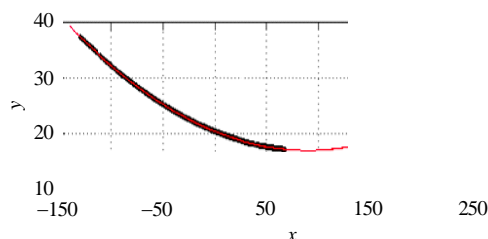


图 2 导线悬链线方程拟合

Fig. 2 Schematic diagram of fitting transmission line with catenary model

长线路点;迭代循环 2~3 步直至算法收敛。

1.3 安全距离诊断

经线路走廊地物点云分类、电力线曲线拟合之后,即可进行输电导线与线路走廊地物间的距离量测,完成安全距离诊断。在安全距离分析部分设计结合自动提取拟合的电力线曲线矢量数据、DEM 数据、线路下方林木植被、建筑物点云计算的线路与线路走廊下方地面/地物距离与标准安全距离做比较,提出一种分段剖面安全距离计算方法,对于距离小于安全距离的区域进行危险预警,并给出整条线路的危险等级、危险线路段坐标等信息,以辅助决策。其具体步骤如下:

1) 设定电力线分段安全距离检测值(经验值 1 m)。沿电力线曲线矢量将电力线按检测值进行分段,以便于在不同分段内进行当前剖面与邻近剖面包含的地物与导线间距的测量。

2) 计算各电力线在每一剖面(剖面垂直于电力线的走向)上距离剖面内地物的净空距离、垂直距离以及水平距离。同时,亦计算植被倒伏安全距离^[2]。依据植被类别点与 DEM 记录的地面高度差计算植被高度作为树木倒伏半径,以植被点与地面的交点为树木倒伏中心,计算植被倒伏时形成的圆弧,若圆弧与导线之间的最小距离大于安全距离阈值则认为安全,反之将其作为安全距离隐患。

3) 检索邻近的电力线剖面区段,依据步骤 2) 中定义的安全距离检测方法将邻近区段中的地物作为安全距离计算对象,计算相邻剖面中地物到当前电力线区段的安全距离值。

4) 最终取计算获得的最小安全距离作为当前电力线区段安全距离诊断结果,并依据 DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》中对于不同电压等级线路详细规定的安全距离阈值进行对比,对安全距离超限地物进行预警,并给出具体的线路区段坐标等信息,以辅助决策,便于后续实地清除。

2 实验分析

本文以 Microsoft Visual Studio 2015 为研发平台,研制了一套无人机 LiDAR 点云安全距离诊断软件,用于实验验证本文提出的基于 LiDAR 点云的无人机线路巡检安全距离诊断算法的诊断有效性。综合考虑电力系统安全性和巡检地形情况的多样性,在当地供电局的协助下选取了广东省内 2 条 220 kV 线路巡检困难区段作为巡检对象。使用广东电力科学研究院 Z5 大型无人机电力线路巡检系统采集这 2 条线路走廊 LiDAR 点云数据,并基于此

数据使用本文提出的安全距离检测算法进行了安全距离诊断工作。其中 线路 1 巡检区段全长 9.2km, 共 21 基塔, 地形以平原水田为主, 另有约 2km 的跨河地形和 3km 的山地, 点云密度为 $35 \text{ 点}/\text{m}^2$, 合计 9931 万点, 原始 LiDAR 点云数据以及局部放大图如图 3(a)(b); 线路 2 巡检区段全长 6.2km, 共 16 基塔, 所处地形以山地为主, 点云密度为 $34.3 \text{ 点}/\text{m}^2$, 合计 5320 万点, 原始 LiDAR 点云数据以及局部放大图见图 3(c)(d)。

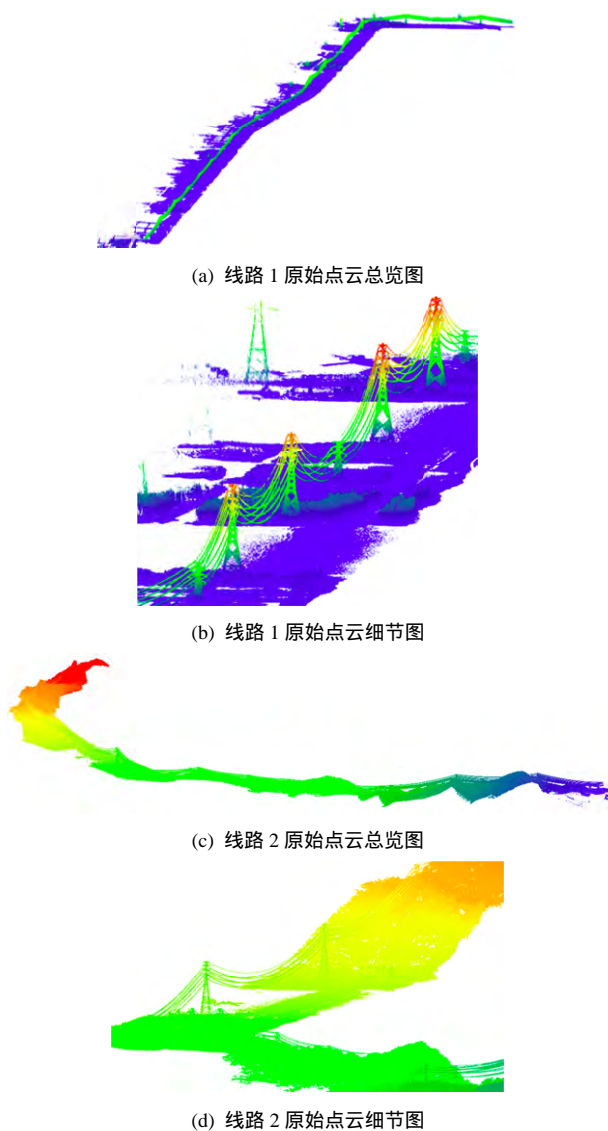
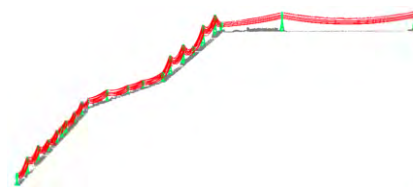


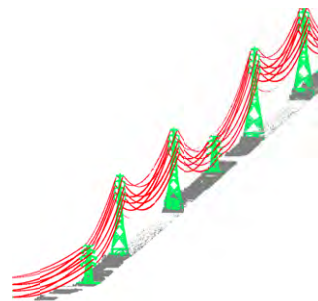
图 3 实验数据概览与细节图

Fig. 3 Overview and detailed snapshot of the experiment data

图 4 与图 5 分别展示了线路 1 与线路 2 的点云分类结果的总览与细节图。其中红色着色为提取到的电力线 LiDAR 点云, 绿色着色为提取到的杆塔 LiDAR 点云, 灰色为提取到的地表植被点云。由于所巡检区域内位于山区, 没有检测到建筑物。在进行点云分类前, 依据已知的线路位置与走向对无人机巡检系统采集的 LiDAR 点云进行裁剪, 获得线



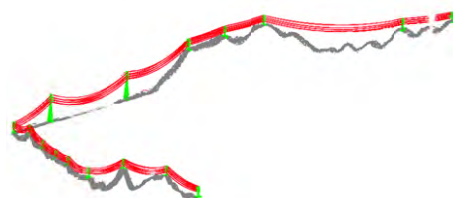
(a) 线路 1 走廊点云分类结果总览



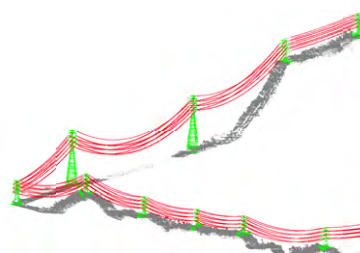
(b) 线路 1 走廊点云分类结果细节

图 4 线路 1 LiDAR 点云分类结果

Fig. 4 LiDAR point cloud classification results of dataset 1



(a) 线路 2 走廊点云分类结果总览



(b) 线路 2 走廊点云分类结果细节

图 5 线路 2 LiDAR 点云分类结果

Fig. 5 LiDAR point cloud classification results of dataset 2

路走廊区域点云, 故线路走廊点云呈规则条状, 与原始点云(图 3)相比剔除了远离线路走廊不相关的地物。由图 4(b)与图 5(b)分类细节图可见: 本文采用的自适应分区滤波方法的方法有效地滤除了地面点; 基于点云维数特征以及地物空间几何分布特性的非地面点分类方法较好地非地面点集合中分离出了导线点、杆塔点、及包含林木植被在内的安全距离诊断所关注的线路走廊其他地物。

安全距离诊断算法阈值依据 DL/T 741—2010《架空输电线路运行规程》中相关安全距离标准进行选择。依据本文提出的分段剖面安全距离计算方法, 计算输电导线对走廊地物安全距离, 对于超限阈值进行预警。通过 220kV 线路 1-2 通道巡视飞行, 对巡检区段内线路下相导线对地、建筑物、树木及重要交叉跨越的距离进行了测定, 巡检区间共计发

现 11 处安全距离值超限(表 1)。其中 220kV 线路 1 中 2 个档段 2 处导线与地物安全距离小于要求值。通过对激光点云数据人工确认,上述与导线距离过近的地物 1 处为树木(距离小于 4.5m),1 处为下方交叉跨越低压线路(距离下方 380V 线路小于 4m)。220kV 线路 2 巡检区段安全距离检查 9 处与树木距离小于 4.5m。

为实现对 LiDAR 点云导线安全距离检测结果

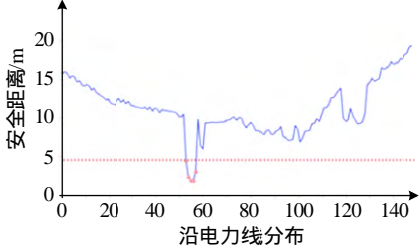
表 1 线路 1-2 检测到超限安全距离对比分析

Tab. 1 Comparative analysis of the detected over ranging safety distance cases

线路-编号	位置	类型	本文算法 安全距离/m	文献[27]检测算法 安全距离/m	激光点云人工量测 安全距离(真值)	本文算法对比 真值误差/m	文献[27]检测算法 对比真值误差/m
1-1	#40 至#41 C 相	树障	2.22	2.05	2.31	0.09	0.26
1-2	#43 至#44 C 相	交叉跨越	3.75	3.53	3.73	0.02	0.19
2-1	#38 至#39 A 相	树障	3.29	3.46	3.37	0.08	0.09
2-2	#40 至#41 C 相	树障	4.45	4.27	4.40	0.05	0.12
2-3	#41 至#42 A 相	树障	2.37	2.43	2.47	0.10	0.04
2-4	#41 至#42 C 相	树障	4.09	3.93	3.98	0.11	0.05
2-5	#42 至#43 A 相	树障	3.92	4.15	4.04	0.12	0.11
2-6	#42 至#43 C 相	树障	4.31	4.48	4.21	0.10	0.27
2-7	#43 至#44 A 相	树障	3.91	3.75	4.05	0.14	0.31
2-8	#43 至#44 C 相	树障	4.41	4.24	4.48	0.07	0.24
2-9	#44 至#45 A 相	树障	3.90	4.07	3.92	0.02	0.16

的定量对比分析,在实验激光点云数据中采用人工的方式,查找树障点,人工进行安全距离量测作为安全距离真值,并与文献[27]中安全距离诊断算法进行对比实验。实验对比结果如表 1 所示。经统计:本文检测算法计算所得安全距离结果与人工测量真值间误差最小值为 0.02m,最大值为 0.14m,平均误差 0.08m,误差均方根为 0.04;文献[27]中安全距离诊断算法所得安全距离结果与人工测量真值间误差最小值为 0.04m,最大值为 0.31m,平均误差 0.17m,误差均方根为 0.09。自对比结果可以看出,本文提出算法整体结果优于文献[27]中安全距离诊断算法,且与人工测量安全距离真值差距在 0.1m 以内(平均误差 0.08m)。本文算法较文献[27]中算法改进主要在于电力线拟合方式的不同,本文通过悬链线拟合取代分段质心拟合,提高了电力线拟合精度,进而提高了安全距离检测精度。

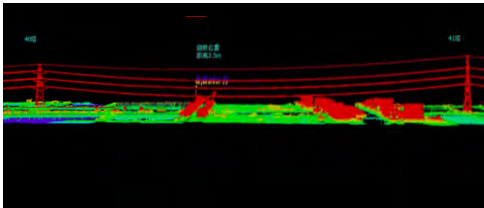
受实验条件限制,仅随机选取了一处易于到达的林木安全距离超限位置,对本文安全距离诊断精度进行了实地验证。验证方式为人工全站仪测量。选取的超限位置安全距离诊断曲线如图 6(a)所示,其对应的实地照片如图 6(b)所示。图 6(c)、图 6(d)分别为超限位置在 LiDAR 点云与航空影像中标记的结果。经供电局班组人员在树障点导线正下方采用全站仪测量,树梢与导线全站仪测量距离为 2.42m,无人机安全距离诊断结果为 2.22m,相差 0.20m。此处人工在激光点云中量测安全距离为 2.31m,与算法检测结果相差 0.09m。实地对比中存在的 0.20m 的误差来源有多方面,包括人工测量的全站仪对准树梢、导线的误差,LiDAR 点点密度不



(a) 超限位置安全距离诊断曲线



(b) 实地拍摄照片



(c) 超限位置在激光点云中标记



(d) 超限位置在航空影像上标记

图 6 人工实地测量对比实验

Fig. 6 Detected fault position compared with manual field measuring

足,树梢受风力影响造成的偏差等。其中,本文数据源点密度(35点/m²)不足,未达到DL/T 1346规定激光点云的密度(大于50点/m²)是造成测量偏差的主要原因之一。由于点密度不足造成激光点云未能采集到树障顶部的完整几何形状,进而导致了该测量误差。

整体而言,点云人工量测与实地全站仪测量对比验证了本文无人机电力巡检LiDAR点云安全距离诊断技术的功能及其精确性,说明了本文方法在有效发现树障等安全距离超限地物的同时,在无人机巡检作业高度(150m左右)亦保有0.1m级的安全距离量测精度。本文提取到的导线几何形状,与结合数字正射影像图与数字高程模型融合的地形建模、杆塔建模^[28]进行有机结合即可实现自LiDAR点云数据到输电线路三维虚拟表达,继而本文提取到的树障信息可在虚拟三维环境中进行直观表达,以便巡检班组及时制定排除方案。

3 结论

线路走廊地物安全距离诊断是电力巡检运维的重要工作内容之一。本文提出了一种基于大型无人机电力巡检LiDAR点云数据的自动安全距离诊断方法。采用多组无人机LiDAR点云数据对本文算法进行实验验证,并对检测结果进行了人工实地巡检定性与定量对比分析。实验结果表明本文提出的安全距离诊断方法能有效发现树障等安全距离超限地物。应用搭载LiDAR系统的大型无人机电力巡检系统采集线路走廊三维点云,并基于此高精度、高密度的三维点云几何数据进行安全距离诊断,提高了该项巡检工作的效率、精度与自动化程度。在下一步的研究工作中,将对具有较好区分性的单株树木进行几何生态建模,实现不同工况下(风、雪天气)林木几何形状动态变化分析,从而发现潜在的安全距离超限地物。

致 谢

本文的研究工作获得了中国南方电网公司科技项目(GD-KJXM201509)的资助,谨此致谢!

参考文献

- [1] 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.
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(in Chinese).
- [2] 阳锋,徐祖航.三维激光雷达技术在输电线路运行与维护的应用

- [J].南方电网技术,2009,3(2):62-64.
Yang Feng, Xu Zujian. Application of the lidar technology on operation and maintenance of power transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(2): 62-64(in Chinese).
- [3] Albatroz Engineering. Power line maintenance inspection [EB/OL]. (2013-11-10)[2013-11-10]. http://www.albatroz-eng.com/solutions/power_line_maintenance_inspection.html.
- [4] Electric Light & Power and Powergrid International. 3-GIS to release transmission inspection and maintenance system 5.1[EB/OL]. (2012-01-03)[2013-11-10]. <http://www.elp.com/articles/2012/01/3-gis-to-release-transmission-inspection-and-maintenance-system-5-1>.
- [5] Schaller J, Lohr U, Mannheim K. Integrated Heli-corridor-mapping (IHCM)[C]//1999 Esri User Conference. San Diego, USA: ESRI, 1999: 200-205.
- [6] 彭向阳,陈驰,饶章权,等.基于无人机多传感器数据采集的电力线路安全巡检及智能诊断[J].高电压技术,2015,41(1):159-166.
Peng Xiangyang, Chen Chi, Rao Zhangquan, et al. Safety inspection and intelligent diagnosis of transmission line based on unmanned helicopter of multi sensor data acquisition[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 159-166(in Chinese).
- [7] 张文峰,彭向阳,钟清,等.基于遥感的电力线路安全巡检技术现状及展望[J].广东电力,2014,27(2):1-6.
Zhang Wenfeng, Peng Xiangyang, Zhong Qing, et al. Based on remote sensing technology power line safety inspection: status and prospects[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(2): 1-6(in Chinese).
- [8] 张文峰,彭向阳,陈锐民,等.基于无人机红外视频的输电线路发热缺陷智能诊断技术[J].电网技术,2014,38(5):1334-1338.
Zhang Wenfeng, Peng Xiangyang, Chen Ruiming, et al. Intelligent diagnostic techniques of abnormal heat defect in transmission lines based on unmanned helicopter infrared video[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1334-1338(in Chinese).
- [9] 彭向阳,钟清,陈锐民,等.基于无人机紫外检测的输电线路电晕放电缺陷智能诊断技术[J].高电压技术,2014,40(8):2292-2298.
Peng Xiangyang, Zhong Qing, Chen Ruimin, et al. Intelligent diagnostic techniques of transmission lines corona discharge defect based on UAV ultraviolet detection[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2292-2298(in Chinese).
- [10] 刘怀东,陈伟,高晓辉,等.从大停电观点分析一类输电线路树闪故障[J].电网技术,2007,33(增刊1):67-69.
Liu Huaidong, Chen Wei, Gao Xiaohui, et al. Analysis of vegetation-related failures on transmission lines from the viewpoint of blackouts[J]. Power System Technology, 2007, 33(S1): 67-69(in Chinese).
- [11] Yang Bisheng, Chen Chi. Automatic registration of UAV-borne sequent images and LiDAR data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015(101): 262-274.
- [12] Chen Chi, Yang Bisheng. Dynamic occlusion detection and inpainting of in situ captured terrestrial laser scanning point clouds sequence[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(119): 90-107.
- [13] 彭向阳,陈驰,徐晓刚,等.基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J].电网技术,2014,38(11):3254-3259.
Peng Xiangyang, Chen Chi, Xu Xiaogang, et al. Transmission lines corridor safety distance diagnosis based on airborne laser scanning point cloud[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3254-3259(in Chinese).
- [14] Franken P. Transmission line monitoring through airborne modeling[EB/OL]. [2003-5-15]. http://www.fli-map.nl/downloads/download-articles/Transmission_Line_monitoring.
- [15] Kraus K, Pfeifer N. Determination of terrain models in wooded areas

- with airborne laser scanner data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, 53(4): 193-203.
- [16] Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data[J]. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 2000, (xxxiii): 935-942.
- [17] 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.
- [18] Yang B, Huang R, Dong Z, et al. Two-step adaptive extraction method for ground points and breaklines from lidar point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(119): 373-389.
- [19] 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): 1600-1605. Chen Chi, Mai Xiaoming, Song Shuang, et al. Automatic power lines extraction method from airborne LiDAR point cloud[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1600-1605(in Chinese).
- [20] 穆超. 基于多种遥感数据的电力线走廊特征物提取方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [21] Guo T, Yasuoka Y. Combining high resolution satellite imagery and airborne laser scanning data for generating bareland and DEM in urban areas[C]//International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Kunming, China, 2002: 1-6.
- [22] Alharthy A, Bethel B. Heuristic filtering and 3D feature extraction from LIDAR data[C]//International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Graz, Austria, 2002: 212-223.
- [23] Zhou Q Y, Neumann U. Fast and extensible building modeling from airborne LiDAR data[C]//ACM Sigspatial International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, Acm-Gis 2008, Irvine, California, Usa, Proceedings. DBLP, 2008: 7.
- [24] Lalonde J-F, Vandapel N, Huber D F, et al. Natural terrain classification using three-dimensional ladar data for ground robot mobility[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 839-861.
- [25] Yang Bisheng, Dong Zheng. A shape-based segmentation method for mobile laser scanning point clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013(81): 19-30.
- [26] 张江华. 高压输电线路弧垂在线监测研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [27] 彭向阳, 陈驰, 徐晓刚, 等. 基于无人机激光扫描的输电通道安全距离诊断技术[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3254-3259. Peng Xiangyang, Chen Chi, Xu Xiaogang, et al. Transmission lines corridor safety distance diagnosis based on airborne laser scanning point cloud[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3254-3259(in Chinese).
- [28] 麦晓明, 陈驰, 彭向阳, 等. 输电线路走廊三维可视化技术和系统设计[J]. 中国电力, 2015, 48(2): 98-103. Mai Xiaoming, Chen Chi, Peng Xiangyang, et al. 3D visualization technique of transmission line corridors: system design and implementation[J]. Electric Power, 2015, 48(2): 98-103(in Chinese).



陈驰

收稿日期: 2016-12-12.

作者简介:

陈驰(1989), 男, 博士, 主要从事无人机/车载/室内多传感器遥感系统硬件研发、多源时空数据特征提取与配准、多遥感传感器电力巡检数据智能诊断技术研究, E-mail: chenchi_liesmars@foxmail.com;

彭向阳(1971), 男, 教授级高级工程师, 工学硕士, 长期从事输电线路及高电压技术工作, 主要研究方向为输电线路运行及故障诊断、电力系统过电压及绝缘配合、高电压试验技术等。

(责任编辑 马晓华)