

# 电力巡线中机载激光点云数据处理的关键技术



王和平<sup>1</sup>, 夏少波<sup>2,3</sup>, 谭弘武<sup>4</sup>, 王 成<sup>2</sup>, 习晓环<sup>2</sup>

(1. 国网通用航空有限公司, 北京 102209; 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. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 北京煜邦电力技术有限公司, 北京 100028)

**摘 要:** 介绍了机载激光雷达技术在电力巡线中的具体应用, 探讨了巡线应用中点云数据处理的关键技术以及输电线路走廊点云分类和本体三维重建技术的研究进展。构建基于电力巡线需求的机载点云处理流程, 能提高点云处理算法和三维建模的自动化程度, 是机载激光雷达技术在电力巡线应用中发挥其重要作用的保证。

**关键词:** 电力巡线; 机载激光雷达技术; 点云分类; 电力线提取; 三维建模

**中图分类号:** P225

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1672-4623 (2015) 05-0059-04

电力建设是国民经济建设的重要组成部分, 其中输电线路是电力系统的重中之重, 是发电厂、变电站、配电设备和电力用户的纽带。随着国民经济的飞速发展, 电网规模日益庞大, 电网结构日趋复杂, 对电力设施安全性、可靠性及其运行状态的实时性监测要求越来越高。由于输电线路往往距离长、覆盖范围广, 因此电力巡线就成为电网运营维护、确保电力安全可靠运行的一项重要内容<sup>[1,2]</sup>。

激光雷达技术 (LiDAR) 是近 20 a 来发展非常迅速的遥感技术, 它通过发射激光脉冲、接收返回的脉冲信号, 经过系统处理来获取目标的三维空间信息。机载 LiDAR 即将 LiDAR 系统安置于机载平台 (包括飞机、直升机和无人机等) 对地物进行扫描来获取地物空间信息, 在不需要大量地面控制点的情况下即可快速获取地表各种地物高密度、高精度的三维空间信息, 并且能部分地穿透植被获取林下地形信息<sup>[3]</sup>, 因此逐渐被引入到输电线路巡线中<sup>[4-6]</sup>, 特别是在山区地形复杂或者条件恶劣的地区。

当前的应用主要涉及输电线走廊的激光点云处理, 但与巡线应用相结合的研究很少。本文结合前人的研究及生产实践, 对机载 LiDAR 在电力巡线中的数据处理和应用中的关键技术进行了深入探讨, 以期提高 LiDAR 技术在电力巡线中的应用效率。

## 1 机载 LiDAR 技术在电力巡线中的应用

机载激光点云数据在电力巡线中可应用于空间距离量测、导地线建模、横断面图输出和环境模拟分析等方面。

空间距离量测与分析是激光点云数据在电力巡线中最直接、最常见的应用<sup>[7]</sup>。通过自动量测已分类点

云之间的距离可以进行输电线路的安全分析, 查找出危险处或者存在安全隐患处, 也可以通过点云建模, 量测模型和模型、模型和点云之间的三维距离来进行安全分析。另外, 基于高精度、高密度的点云, 可以实现各分裂导线之间的距离量测等, 该应用是传统方法难以实现的。最后, 在空间距离量测的基础上, 通过缓冲区分析, 还可研究电力设施的空间位置状态及其他电力设施或一般地物之间的空间关系。

导地线建模也是机载点云在电力巡线中的重要应用之一<sup>[1]</sup>。从点云中提取导地线模型, 研究其在不同的温度、风速、风向等环境下, 导线的风偏、弧垂等的变化状态, 并可模拟输电线路增容下的弧垂。若结合植被点云、DEM、杆塔模型等, 就可以评估不同条件下输电线路的安全信息, 这对输电线路管理意义重大。

基于点云输出线路的横断面图也是常用的功能, 如图 1 所示。基于高精度高分辨率的地形数据、杆塔位置信息等, 一些应用还实现了在三维场景中的排杆、线路优化等功能<sup>[6]</sup>。另外, 依据激光点云数据, 还可以建立地质灾害地形预测模型, 分析树木生长、火灾、泥石流、山体滑坡<sup>[8]</sup> 等对输电线路安全可能造成的安全隐患, 为输电线路防灾减灾提供参考和依据。

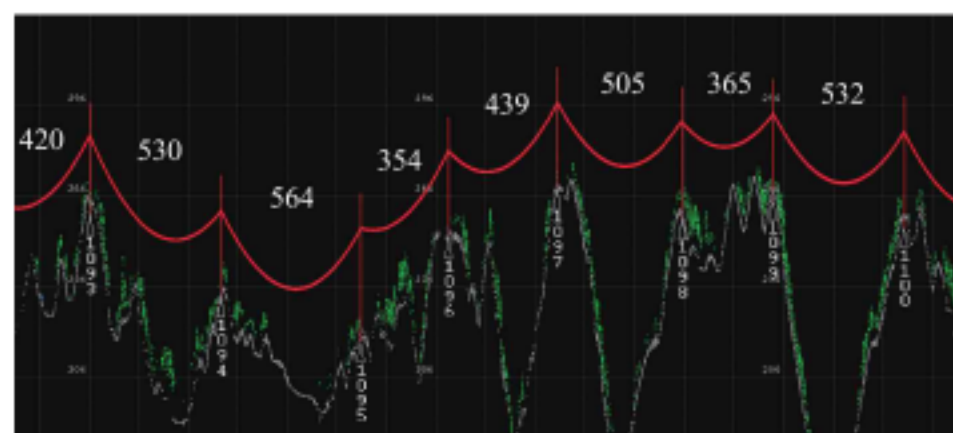


图 1 基于点云横断面图

**收稿日期:** 2014-09-22。

**项目来源:** 国家科技部重大科学仪器设备开发专项资助项目 (2013YQ120343); 中国科学院百人计划专项资助项目 (09ZZ06101B)。



上述应用的基础是机载点云的数据处理。通常机载点云数据处理包含了点云去噪、滤波分类、目标提取和建模等内容,其中点云分类和输电线路本体的三维重建是电力巡线应用中的重点。

## 2 输电走廊点云分类

点云分类的目的是将获取的原始激光点云标记为地面点、植被点、建筑点、输电线路点、杆塔点等,这是生产DEM和分析输电线路安全以及建模的基础。地面点和导线点分类一般可以基于高程特征自动识别;植被点、建筑点、道路点、杆塔点云和绝缘子等精细电力设施往往需要结合相关算法和手动标注。图2为常见输电线路走廊内的点云分类结果,灰色点云为地面点;电力线点云为红色;杆塔标记为蓝色;植被点标记为绿色。

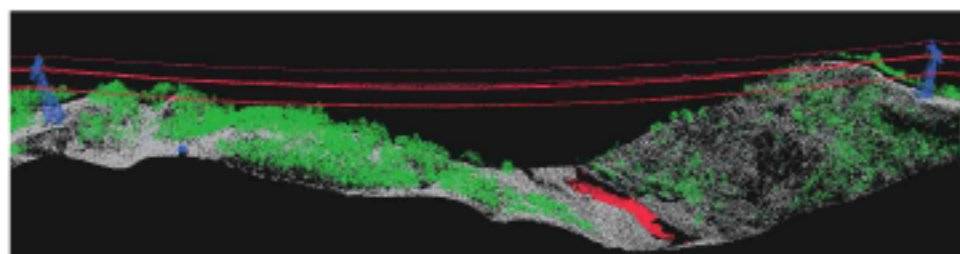


图2 电力线走廊点云分类实例

### 2.1 地面点分类

从机载激光点云提取地面点方法很多,其中以基于不规则三角网加密的滤波算法的应用最为广泛<sup>[9]</sup>。该算法首先将一定范围(一般以不小于区域内的最大建筑物的面积为下限)内的点云最低点作为可能的地面点,即种子点,生成一个稀疏的三角网,计算其余点到这个三角网表面的距离和夹角。如果二者满足阈值,则该点被加入到原种子点集中,更新和加密三角网。如此迭代,直到点云中没有任何点可以加入三角网为止。至此,地面点(三角网的所有顶点)与非地面点得到了分离。该滤波算法具有较强的地形自适应能力,并且能够自适应地处理沟坎等具有阶跃特征的地形(如陡坎),因而较为实用。其他的滤波方法如形态学滤波、坡度滤波、移动曲面滤波等也经常出现在不同的研究中<sup>[10]</sup>,并取得较好的效果,但对地形的自适应能力不如三角网加密法,在实际生产中应用不多。在获得地面点云后,采用合适的插值方法,如反距离加权插值算法、普通克里格插值等,即可获得满足需求的DEM。

### 2.2 电力线点云分类

电力线在激光点云中表现出较明显的空间特征,如呈线状分布、贯穿整个数据区域;相邻的电力线点高程变化小,而与下方非电力线点相距较远;电力线点在水平面上投影呈相互平行的直线等。但是由于电力线非常窄,只能反射部分激光脉冲,因此在点云的多回波信息中,电力线点往往仅表现为首次回波点等。

基于这些特征,可以设计特定算法将电力线点云从原始点云中分离出来。

一些研究利用了电力线点云的高程显著大于非电力线点高程的特征,采用高程直方图自动阈值分割法,即统计出局部点云的高程分布信息,将显著高于局部地形点的点云归为电力线点云,而其他点云则标记为粗分类的地面点<sup>[11,12]</sup>。为克服该类方法受地形影响大的缺点,梁静<sup>[13]</sup>先利用DSM(digital surface model)消除地形起伏影响,然后采用高程直方图进行滤波分类。Cheng<sup>[14]</sup>提出一种从车载点云中分离电力线的方法,首先标记出地面点,然后利用电力线点云到地面距离较大的特点,将高于地表一定距离的点三维格网化,并计算格网内点集的特征值和特征向量,将表现为线状特征的格网标记为电力线格网,利用电力线点云空间分布连续的特点,提取包含电力线的格网,最后利用霍夫变换检测格网内的电力线点云。这对从机载点云中分离电力线,尤其是高密度的直升机载激光点云,具有重要的借鉴意义。

比较和分析上述研究可以发现,目前大多数电力线点云分类研究中利用了电力线与地面之间高差大且线状分布的特点,通常情况下能取得较好的效果。由于点云数据质量及算法不稳健等因素,提取的电力线点云往往存在缺失、断开等现象,尤其是与杆塔相连的电力线点云的精细分类,且少有研究涉及复杂地形、城镇环境等情况下电力线的提取。因此,电力线点云的分类方法和精度需要进一步研究。

### 2.3 其他地物分类

在输电线路走廊的点云处理中,地面和导线之外的地物(如杆塔、植被、建筑物等)通常采用人工方法进行分类,目前对走廊内其他地物分类方法的研究较少。

电力杆塔连接悬垂的高压电力线,如果将两电力塔之间的电力线看作是一个区段,不同区段的电力线之间往往通过电力塔身上的变压装置或者绝缘子相连。因此,通过计算电力线之间的连接点,可以帮助定位和分析电力塔的位置、轮廓等信息,进而从点云中筛选出杆塔点云<sup>[13-15]</sup>。事实上,仅依靠与电力线的空间关系只能对杆塔点云进行粗略的分类,地形、杆塔周围地物的分布情况等都会直接影响杆塔点云的提取,目前精细的杆塔点云分类(包括绝缘子等)基本依赖于人工圈选。

植被点云的检测主要利用LiDAR在植被区域具有多次回波的特点进行区分。建筑点云主要指屋顶的检测,结合建筑屋顶的平面特征,采用平面法向量和区域生长算法,提取屋顶面片点云,如图3所示。这些方法一般能够对大多数植被点和建筑点进行分类,但



整体计算量大, 分类结果需要大量人工干预, 实用性和自动化还需要进一步研究。

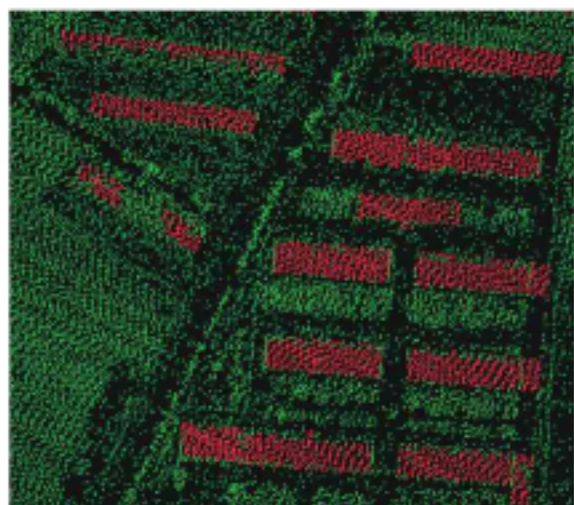


图3 平面屋顶检测实例

一些学者利用机器学习的方法对输电线路走廊内的地物进行自动分类和识别。Guo<sup>[16]</sup>从原始点云数据中提取了多个局部特征, 然后通过 Adboost 方法训练分类器, 最后引入图切割的理论进行全自动分类, 整体分类精度能够达到 95% 以上, 具有自动、全面等优点, 但在各个地物的特征选择、模型训练等方面依然需要深入研究。

总之, 目前常见的点云分类算法通常只将特定类别的点云识别出来, 电力线走廊内的地物分类需要结合不同的分类算法提高分类的精度和效率, 在电力巡线等工程实践中点云的高效、高精度自动分类非常必要。

### 3 输电线路走廊三维重建

走廊三维重建也即输电线路本体建模, 这是输电线路安全分析和模拟的基础。目前, 除了 DEM 等可自动重建外, 走廊内的很多地物主要还是依赖于人工勾绘和第三方软件<sup>[17]</sup>。本节主要介绍导地线建模的主要方法和其他地物自动或半自动的建模方案。

#### 3.1 导地线建模

导地线的矢量模型是输电线路增容等分析的基础。因此, 将离散化的导地线点云进行矢量化是当前输电线路点云处理的重点。

分类得到的电力线点云是无序、离散的, 且两杆塔间还同时存在多根空间相邻的电力线, 因此导地线建模中首先要完成单根电力线的分离, 即将归属于同一根电力线的点云进行合并。梁静<sup>[13]</sup>利用同根电力线内部点之间的距离较小、不同电力线点云之间的距离较大的特点, 采用空间聚类的方法并设置距离阈值, 分别将每一相的每一根电力线点云进行合并。这种方法对单相电力线点云十分有效, 但无法处理相邻相的电力线紧密相连的情况, 其结果往往是连续的几相电力线连接在一起。有的研究基于导线具有明确的方向性的特点, 沿导线的走向, 利用体元探测的方法将属于同一根导线的点云进行合并<sup>[18]</sup>。国外学者基于导地线模型参数, 通过假设检验的方法将电力线进行区分并拟合, 这种方法具有一

定的鲁棒性, 能克服部分导线点云缺失的情况<sup>[18]</sup>。

对每一根电力线的点云进行模型拟合是电力线三维重建的最后一步, 拟合的基础模型是电力线的悬链线方程, 但由于该方程较为复杂, 因此常采用简化的方程即抛物线方程。当确定拟合模型以后, 需要通过离散点云求出抛物线的参数, 常用的拟合方法为最小二乘法<sup>[11,13]</sup>。由于抛物线方程是在二维平面内, 因此在实际操作中, 一般需要在导线点云所在的垂直平面内进行拟合, 或者通过坐标转换将拟合模型转换为三维坐标表达。完成每根电力线的拟合后, 即可获得精细的导地线模型。通过不同相的导线求交, 还可求出精确的挂点位置。图4所示为某两杆塔间的导线点云, 不同颜色用于区分不同的电力线, 对于每一根电力线, 通过空间曲线拟合的方法可获得导线模型(白色)。

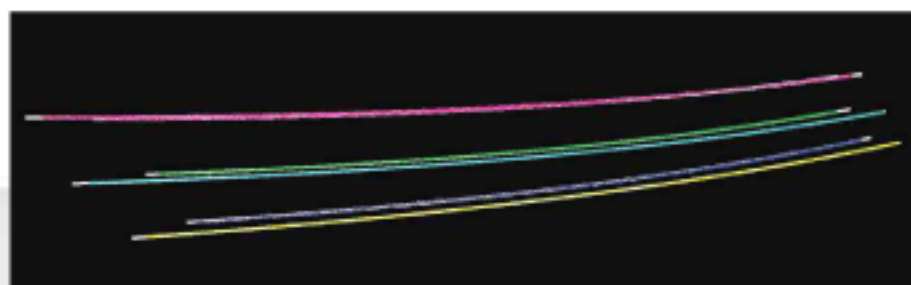


图4 输电导线建模实例

在实际操作中, 由于扫描设置、电力线相互遮挡和点云测量噪声等因素, 会出现电力线点云缺失的情况, 若缺失 10 m 以上, 对单根电力线点云的分离乃至建模均有影响。另外, 目前国内外电力线重建研究主要集中在单根电力线的矢量化, 对于常见的分裂导线通常只拟合中心线, 难以满足输电线路精细建模、模拟和分析的需求。

#### 3.2 其他地物重建

输电线路中的其他结构, 如杆塔、变电站等, 走廊内的其他地物, 如植被、房子、道路、桥梁等的重建一般结合点云的空间分布, 采用通用模型替代的方法, 本文以杆塔的建模为例进行阐述。

杆塔建模主包含了普通电线杆和电力塔, 由于二者结构差异较大, 首先需要识别不同的杆塔类型进而分别建模。电线杆结构简单, 一般视为圆柱体或者圆台, 基于机载 LiDAR 的高密度点云, 可使用模型驱动的方法拟合出几何模型。然而, 电力铁塔的空间结构十分复杂, 一般只能利用杆塔点云的分布, 通过半自动(人机交互)匹配的方法将模型放置到杆塔点云表示的位置。因此, 构建完整的电力塔模型库十分重要。韩文军<sup>[19]</sup>尝试对铁塔自动建模, 首先在铁塔点云空间中建立三维格网, 然后将格网内有无激光点作为格网二值化的准则, 并设计了三维格网特征线跟踪算法, 进而建立铁塔的线模型。该方法能识别出铁塔中约 80% 的线状结构, 但仍然需要结合手工编辑才能获得完整的铁塔模型。



## 4 结 语

近年来,不同飞行平台的机载 LiDAR 在电力巡线中发挥了重要的作用,然而输电线路走廊点云后处理以及电力巡线的应用效率并不高,有时甚至在采集数据后一个月才能输出相应的产品,这显然不能满足现代电力巡线和科学管理的需求。究其原因,主要是当前输电线路走廊的点云数据处理基本照搬了传统机载点云的处理方法,没有与巡线需求紧密结合,并缺少自动化的数据处理算法,需要大量的人工操作,尤其是输电线路走廊点云分类和输电设备精细模型(杆塔、绝缘子等)。因此,构建基于电力巡线需求的机载点云处理流程,研究自动化的点云处理算法十分必要。

## 参考文献

- [1] 张险峰,陈功,程正逢,等.激光雷达在直升机巡线中的应用[J].华中电力,2007,20(6):33-39
- [2] 杨永平.机载激光雷达在输电线路中的应用[J].水利电力科技,2012,39(2):17-20
- [3] 王成, Menenti M, Stoll M, 等.机载激光雷达数据的误差分析及校正[J].遥感学报,2007,11(3):390-397
- [4] 林昀,吴敦,李丹农.基于机载激光雷达的高精度电力巡线测量[J].城市勘测,2011,10(5):71-74
- [5] 孙晓云,王晓冬.应用 LiDAR 数据中提取电网信息方法初探[J].测绘技术装备,2010,12(1):27-29
- [6] 徐祖航,王溢政,阳锋.机载激光雷达测量技术及工程应用实践[M].武汉:武汉大学出版社,2009
- [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

- [8] 陈刚,陈伟涛,李显巨.基于机载 LiDAR 技术的滑坡识别参数提取方法[J].地理空间信息,2013,11(6):3-4
- [9] Axelsson P. DEM Generation From Laser Scanner Data Using Adaptive TIN Models[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, 33(B4): 111-118
- [10] 余洁,张国宁,秦昆,等. LiDAR 数据的过滤方法探讨[J].地理空间信息,2006,4(4):8-10
- [11] 叶岚,刘倩,胡敬武.基于 LiDAR 点云数据的电力线提取和拟合方法研究[J].测绘与地理空间信息,2010,33(5):30-34
- [12] 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
- [13] 梁静,张继贤,刘正军.利用机载 LiDAR 点云数据提取电力线的研究[J].测绘通报,2012,12(7):17-20
- [14] 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
- [15] 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
- [16] Guo B, Huang X, Zhang F, et al. Classification of Airborne Laser Scanning data Using JointBoost[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014(92):124-136
- [17] 王方建,习晓环,万怡平,等.大型建筑物数字化及三维建模关键技术分析[J].遥感技术与应用,2014,29(1):144-150
- [18] Jwa Y, Sohn G.A Piecewise Catenary Curve Model Growing for 3D Power Line Reconstruction[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2012, 78(12): 1 227-1 240
- [19] 韩文军,肖雪.基于机载 LiDAR 数据的输电铁塔建模方法研究[J].人民长江,2012,43(8):22-25

**第一作者简介:**王和平,工程师,主要从事直升机电力作业及信息化相关工作。

(上接第 58 页)石构造组合(面)、侵入岩岩石构造组合(面)、变质岩岩石构造组合(面)在进行拓扑重建时,存在一定困难,需要就涉及地质内容或参照报告认定或与地质背景组相关人员进行反复沟通商定。

2)大地构造相图空间数据库作为大地构造相图的信息化表现形式,是便于地质人员进行查询、检索并以此为基础进行矿产资源预测评价的重要依据;大地构造相图件规定和引用图层属性项数据总项数(不包括特征码和图元编号)约 7 万余个,其中一半为面图元属性项。

## 3 结 语

基于空间数据库的图件是借助 GIS 空间分析功能对地质属性数据的检索、分离和重组。因而,在江西省大地构造相图空间数据库的建设中,主要抓住地质特征属性数据整理以及属性数据与空间数据无缝链接 2 个方面来完成。通过大地构造研究可以获得一个地区某一时期的地球动力学环境的认识,作为地质信息的重要

载体,江西省大地构造相空间数据库的建设提高了找矿工作的科学性,减少了盲目性,将在江西省矿产勘查工作中起到一定的战略指导作用。

## 参考文献

- [1] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等.大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志[J].地质通报,2008,27(10):1 613-1 637
- [2] 任小丽,张晓帆.基于空间数据库的大地构造相图生成方法研究[J].新疆大学学报,2008,25(4):379-384
- [3] 何茂传.山东省大地构造相图数据库建设方法探讨[J].山东国土资源,2013,29(10):90-93
- [4] 宋道万,刘远刚,李少华.基于 GIS 的地质知识库设计与实现[J].地理空间信息,2013,11(6):60-65
- [5] 李霞.福建省大地构造单元划分及基本特征[J].世界地质,2013,32(3):549-557
- [6] 李锦秋.对大地构造研究与矿产勘查评价之间关系的初步认识[J].西北地质,2012(B12):5-8
- [7] 王勇毅.GIS 与地质图制作[J].地质与勘探,2000,36(1):44-45
- [8] 潘瑜春,钟耳顺,赵春江.GIS 空间数据库的更新技术[J].地球信息科学,2004,6(1):36-39

**第一作者简介:**周雅雯,硕士,工程师,主要从事地理信息与地质建库研究工作。