

机载 LiDAR 点云数据中电力线的提取方法研究

余 洁¹ 穆 超^{1,2} 冯延明³ 窦延娟⁴

(1 武汉大学遥感信息工程学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 湖北省国土测绘院,武汉市澳门路 199 号 430010)
(3 昆士兰科技大学科学学院,澳大利亚布里斯班 4001)
(4 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘 要 :提出了一种基于机载 LiDAR 点云数据的电力线提取方法。首先在进行 LiDAR 数据滤波的基础上,分离地面点与非地面点;然后针对非地面点采取一种基于角度的滤波方法,分离非地面点中的植被点与电力线点,对电力线点,采用二维 Hough 变换进一步分离各条电力线点;最后使用双曲余弦函数模型,对单条电力线进行曲线拟合。实验结果表明,该方法能够从 LiDAR 点云数据中较完整地提取出电力线点,电力线点提取正确率达 96.2%,并能够对电力线走廊进行三维重建。
关键词 :机载激光雷达;电力线提取;滤波;曲线拟合
中图法分类号 :P225

随着遥感技术的快速发展,遥感技术已应用于电力巡线。传统的直升机巡线,大多搭载红外线摄影仪、数码摄像机、照相机等设备,在飞行的同时,对途经线路进行观察,获取线路走廊可见光和红外影像,但这些技术的空间定位精度均不高,很难精确判断线路走廊地物到线路的距离。而机载 LiDAR 测量系统可以很好地解决空间定位和测量精度等问题,它可直接而快速地采集线路走廊高精度三维激光点云数据,进而快速地获得高精度三维线路走廊的地形、地貌、地物和线路设施的空间信息^[1]。

从激光雷达数据中可以完整提取电力线点,并三维重建电力线走廊,提取的电力线矢量可以计算树木点与电力线的距离,还可以建立安全缓冲区,计算树木点进入缓冲区的数量,决定树木修剪位置等。目前,激光雷达数据处理多集中于建筑物提取和数据滤波方法研究^[2-4],由于成本昂贵等原因,目前将激光雷达技术运用于电力巡线的并不多,从激光点云数据中自动提取电力线的相关研究也较少^[5-7]。本文在分析归纳机载 LiDAR 数据中电力线点的主要特性后,提出了一种基于 LiDAR 点云数据的电力线自动提取方法。该方法

能够自动提取电力线点,并对电力线点进行曲线拟合,形成连续、完整的电力线走廊。

1 LiDAR 点云数据的电力线自动提取方法

在进行电力线提取过程中,需要解决几个关键问题:分析电力线在机载 LiDAR 数据中的特性;根据这些特性,最大化地提取电力线走廊中的电力线点;分离多条电力线点,并进行单条电力线的曲线拟合。

1.1 电力线在 LiDAR 点云数据中的特性

电力线在激光点云数据中的主要特性有:电力线点呈线状分布,通常贯穿整个数据区域,具有较强的延伸性;两根相邻电线杆之间的电力线在水平方向的投影呈直线,且相互平行,同时,电力线点在局部小面积区域里的高程基本相同;电力线属于自然悬垂线,其数学模型符合双曲余弦函数;LiDAR 数据具有多次回波特性,电力线上方的区域一般无其他地物遮挡,电力线信息主要集中在 LiDAR 数据的首次回波中;针对狭长范围内的电力线走廊数据,主要

收稿日期 :2011-09-15。
项目来源 :澳大利亚国家空间信息合作研究中心资助项目 (CRCSI6-07)。

地物类型为植被和电力线。

基于上述特性,本文提出了一套针对机载 LiDAR 点云数据的电力线自动提取方法。具体技术流程如图 1 所示。

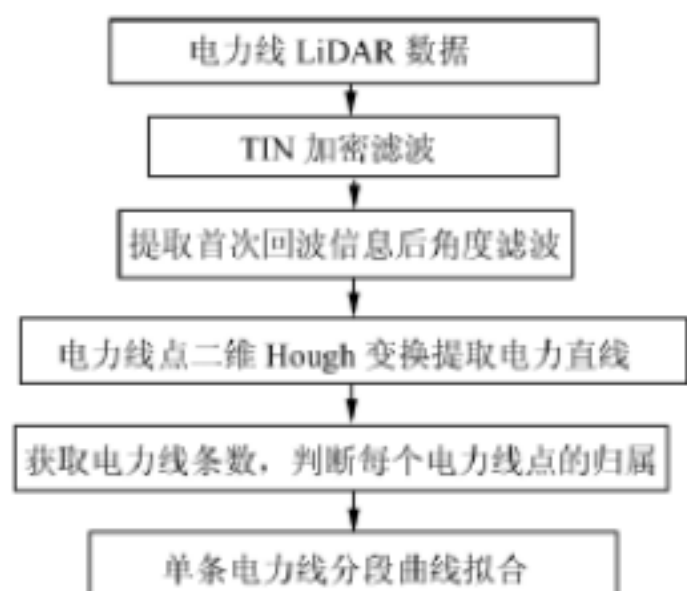


图 1 LiDAR 点云数据的电力线提取技术流程

Fig. 1 Flow Chart for Powerlines Extraction from LiDAR Data

1.2 电力线点的提取方法

本文研究的目的是电力线点的提取与拟合。针对一幅原始 LiDAR 点云数据,首先需要将电力线点分离出来。本文采用基于不规则三角网加密(TIN densification)的滤波方法,分离出地面点与非地面点。以粗放的尺度寻找地表点,并根据这些地表点建立粗尺度的 TIN 网格表面;然后逐一判断其余的三维点与 TIN 表面的垂直距离及角度,当距离 d 与角度小于一定阈值时,将该点纳入并重新生成新的 TIN 表面,否则将该点删除。重复该过程,直至所有点判断完成^[8]。在 TIN 滤波中,网格大小(边长 l)、新的三维点到 TIN 表面的垂直距离 d 以及角度等参数阈值的设置直接影响生成 DEM 的精度。一般来说,应保证每个网格中均有地面点,通常边长 l 取实验数据中最大树冠的边长。

对于提取后的非地面点,主要包括树木和电力线以及少量电线杆点。根据电力线的特性,只需提取首次回波的激光点,即能滤除掉一部分植被点,而保留全部电力线点。根据每个激光点的回波次数属性,提取首次回波点后,仍存在一部分植被点和电线杆点没有被去除。根据特性,电力线在小面积局部区域里的高程基本相等,而树木点在局部区域里的高程一般具有起伏的特点,本文设计了一种基于角度的滤波方法,其算法原理如下:对于点 $p(i)$,在一个给定半径 r 的圆形区域中,如果该点与区域中任何其他点之间的倾斜角度的最大值小于给定的阈值,点 $p(i)$ 被认为是电力线点;反之,则是树木点。假设点 $p(i)$ 和

$p(i-1)$,则 $p(i)$ 点相对于 $p(i-1)$ 点的倾斜角度 S 的计算如式(1)所示:

$$S_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}} \quad (1)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 、 $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$ 分别是点 $p(i)$ 、 $p(i-1)$ 的三维坐标。设定一定参数,使用基于角度的滤波方法对首次回波中的非地面点进行滤波后,可使树木点和电线杆点得到最大化的去除,而电力线点得到充分的保留。

1.3 电力线点的分离与归类

使用 §1.2 的方法可以提取出电力线点,但同时还会残留一些树木点。为了对单条电力线进行曲线拟合,需要把若干条电力线区分开来。利用电力线的特性和,将 §1.2 中提取的电力线点投影到 XY 平面,并对 XY 平面的点作二维 Hough 变换,分离各条电力线点。具体方法为:对于分离出来的电力线点及少量植被点数据,取每个点的 XY 两个坐标值。由于电力线点在 XY 平面上的投影基本是相互平行的,可以使用二维 Hough 变换方法提取 XY 平面上的电力直线。获得若干条电力线直线方程的参数 (ρ, θ) 后,需判断每个点从属的电力线。在二维 XY 平面上,计算每个点到各条直线的垂直距离,如果该点到某条直线的距离小于一定阈值,则认为该点为这条电力线上的点。阈值一般取电力线间距的 $1/2$ 。采用此方法,那些不满足阈值条件的树木残余点将被去除。每个电力线点归类后,即可对单条电力线进行曲线拟合。

1.4 电力线曲线拟合

单条电力线悬垂线分段拟合前,需判断电线杆点的位置。电线杆点的特点是:该点在 XY 小范围区域里,高程是极大值。确定电线杆点位置后,即可对两根电线杆之间的点进行曲线拟合。根据电力线的特性,电力线是自然悬链曲线,其数学模型符合双曲余弦函数,曲线方程为:

$$y = a + c \cosh \left(\frac{x - b}{c} \right) \quad (2)$$

将两根电线杆之间的点投影到电力线方向和 z 轴所在的平面,用数值分析中曲线拟合及函数逼近方法解算式(2)中最佳的参数 a 、 b 、 c ,得到每条电力线的最佳参数,则可三维重建每条电力线。

2 实验结果与分析

为了验证本文方法的可行性,本文采用澳大利亚空间信息合作研究中心 CRCSI6.07 项目组

采集的机载 LiDAR 数据进 行实验 。该数据为昆士兰州 Murgon 至 Wondai 地区大约 10 km 的通往农村的 10 ~ 110 kV 高压 电力 线走廊 数据 ,采集仪器是 TopoSys Harrier 56 激光雷达测量仪 ,采集高度大概为 500 m ,采集频率为 200 kHz ,扫描角为 60° ,本数据单次激光脉冲最多记录 4 次回波信号 ,点云密度为 9 点 /m² ,同档电力线相隔距离约为 1 m 。

截取的 电力 线走廊 数据如插页 彩图 3 所示 ,其中包 括 6 条电力 线、2 根电线杆。通过计算 ,实验数据 中总 共有 1 506 个电力 线点。首先利用基于 TIN 加密的滤 波方法 ,将地 面点 滤除。考虑到每个粗放网格 内均 应有地面点 ,且电力线正下 方的低矮树木需要滤除 ,粗放网格的边长 l 取 30 m ,角度 取 50° ,新的三维点到 TIN 表面的垂直距离 d 取 1.5 m。滤波结果如图 2 所示。根据每个点的回波次 数属性 ,提取的 地物点中的首次回波信息如图 3 (a)所示 。

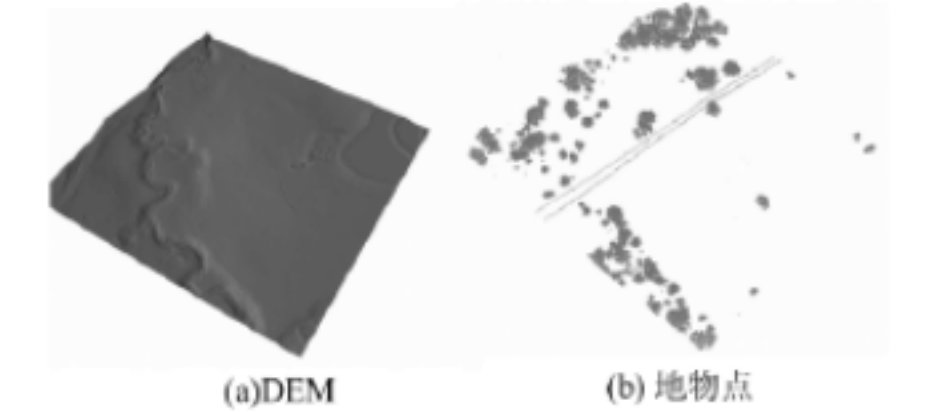


图 2 TIN 加密滤波后的结果
Fig. 2 TIN Densification Filtered Result

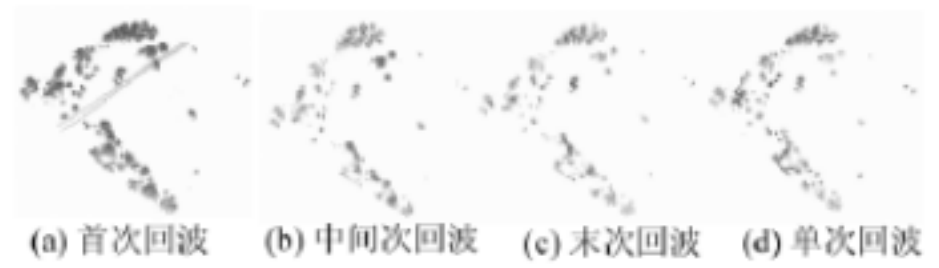


图 3 地物点中回波信息分离
Fig. 3 Object Points Separation Based on Return Attribute Values

由提取结果图 2 (a)可见 ,数据中的 6 条电力线在局部小面积区域 里的高程基本相等 ,而树木点在小面积区域里的高程相差较大 。图 4 是使用基于角度滤波后的结果 ,滤波半径为 5 m ,角度为 20°。由滤波结 果可知 ,大部分植被点被去除 ,少量残余植被点及电力线点被保留 。

为分离各条电力线点 ,将角度滤波后 的结果投射到二维 XY 平面 ,如图 5 (a)所示 ,经 Hough 变换后 ,提取的 6 条电力直线如图 5 (b)所示 。计算图 4 中每个点到 6 条电力线的距 离 ,因各条电力线间距大约为 1 m ,则距离阈值取 0.5 m ,将每



图 4 对首次回波数据角度滤波的结果
Fig. 4 Angle Filtering Result for First Return Points

个点归属到 不同的电力 线。6 条电力 线归类后 ,一共有 1 449 个电力 线点得到保留 ,电力 线点提取的正确率为 96.2% 。

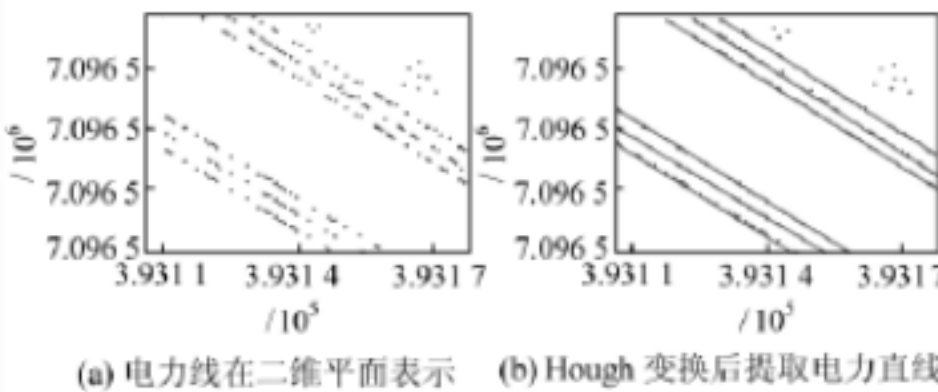


图 5 两次滤波后首次回波点在二维平面的表示
及 Hough 变换提取直线 (局部)
Fig. 5 Points in XY Plane After Two Filtered Method and Lines Extraction After Hough Transform

对于归类后的单条电力 线 ,需要找到 数据 中唯一的电力 线杆 的顶点位置 ,若某点的高程值大于其相邻的左右各 10 个点的高程值 ,判断该点为电线杆的顶点 。以第一条电力线为例 ,将电力线杆顶点 (或边缘点)之间的电力线点投影到该电力线直线方向与 z 轴所形成的平面 ,如图 6 所示 ,黑色框中的电力线点即为电线杆点或边缘点 。对该系列点在 Origin 8 数学软件里利用非线性曲线拟合工具分段进行 垂链线拟合 ,第一条电力线分段 (以中间电线杆顶点为界 ,分为左边的短段电力线和右边的长段电力线)拟合后的电力线如插页彩图 4 所示 ,同时可得到曲线的 3 个最佳拟合参数 a、b、c。6 条电力线分段拟合参数见表 1 ,表中的 Adj. R -sq 为校正决定系 数。最后根据 最佳拟合参数 ,将电力线进行三维重建 ,如图 7 所示 。

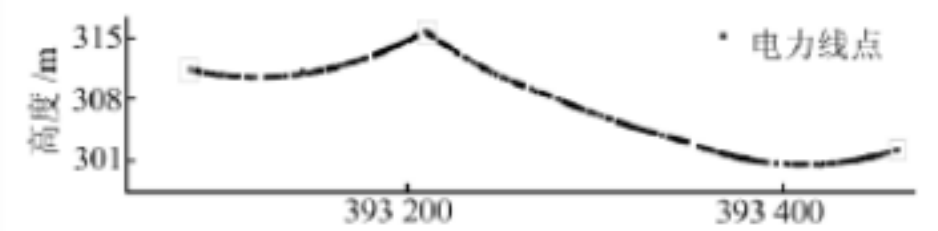


图 6 第一条电力线电线杆点与边缘点的判定
Fig. 6 Pole and Edge Points Discrimination for the First Line

表 1 6 条电力线曲线最佳拟合参数

Tab .1 Best Fitting Parameters for the Six Powerlines

参数	电力线短段				电力线长段			
	a	b	c	Adj .R -sq	a	b	c	Adj .R -sq
电力线 1	- 493 .59	393 118 .91	804 .12	0 .999 1	- 1 374 .76	393 433 .60	1 675 .76	0 .999 4
电力线 2	- 614 .27	393 115 .57	925 .09	0 .996 2	- 1 544 .82	393 439 .72	1 845 .97	0 .986 8
电力线 3	- 495 .53	393 118 .55	806 .18	0 .999 7	- 1 330 .78	393 429 .91	1 631 .84	0 .984 0
电力线 4	- 699 .83	393 114 .42	1 009 .3	0 .999 2	- 1 523 .46	393 419 .12	1 824 .85	0 .991 1
电力线 5	- 771 .99	383 111 .54	1 081 .51	0 .999 7	- 1 539 .31	393 418 .72	1 840 .80	0 .992 4
电力线 6	- 730 .25	393 112 .34	1 039 .78	0 .999 2	- 1 524 .27	393 419 .49	1 825 .64	0 .993 1



图 7 电力线走廊三维重建

Fig .7 3D R econstruction for the Powerlines Corridor

从实验结果可以看到 ,本文提出的方法只需设定少量阈值 ,即能够较好地提取 LiDAR 数据中的电力线点 ,并较精确地三维重建出电力线走廊。

需要说明的是 ,本算法在 TIN 加密滤波过程中 ,高度阈值 d 和角度的设置需完全滤除电力线正下方区域的地面点和植被点。否则进行第二次基于角度的滤波时 ,电力线下方的地面点和植被点与其形成角度 ,电力线点有可能被滤除。并且通过二维 Hough 变换分离各条电力线时 ,电力线下方的地面点或植被点也有可能被误分进电力线点 ,给曲线拟合带来误差。当然 ,如果实验区地势平坦 ,也可以考虑使用高程阈值滤波方法滤除地面点。

通过基于角度的滤波方法 ,目的是分离电力线点与植被点 ,如果数据中有少量树木生长进电力线的上层或下层 ,使用基于角度滤波方法时 ,树木点与电力线点均被滤除 ,会造成电力线的局部断裂 ,但电力线拟合采取回归分析方法 ,所以局部的断裂对电力线的拟合精度影响不大。

通过二维 Hough 变换检测直线的方法来分离归类各条电力线点 ,对于电线杆左右两端呈一定的角度的电力线也是适用的。

本文获取的数据是通往农村的 10 ~ 110 kV 高压电力线点云数据 ,如果针对的是多层次的铁塔高压线数据 ,仍然可以通过 TIN 滤波或高程阈值分割方法 ,提取高程值远大于下方植被点和地面点的高压电力线点。然后利用本文提到的角度

滤波方法去除高压线铁架点 ,只是滤波半径应设置成窗口中只包含单条电力线。最后将剩下的高压线点投影到二维平面 ,检测电力铁塔之间的直线段 ,利用本文的方法将各条电力线点分离归类 ,最后进行拟合与三维重建。

3 结 语

随着激光雷达技术在电力巡线中应用的推广 ,需要自动重建电力线矢量 ,本文的研究充分利用了同档电力线在二维平面相互平行且近似直线 ,电力线横贯图像 ,没有中断 ,属于自然悬垂线等特性 ,提出了一套基于机载激光雷达数据的提取电力线方法流程 ,通过实验证明能取得较好的效果 ,对提取、三维重建其他类型的电力线有一定的借鉴意义和重要的实际参考价值。

致谢 :感谢澳大利亚国家空间信息合作研究中心 6 .07 项目组及昆士兰科技大学提供的机载激光雷达数据。

参 考 文 献

[1] 徐祖舰 ,王滋政 ,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 ,2009

[2] 曾齐红 ,毛建华 ,李先华 ,等 .机载 LiDAR 点云数据的建筑物重建研究 [J] .武汉大学学报 · 信息科学版 ,2011 36 (3) :321 -324

[3] 赖旭东 ,万幼川 .一种针对激光雷达强度图像的滤波算法研究 [J] .武汉大学学报 · 信息科学版 ,2005 ,30 (2) :158 -160

[4] 沈晶 ,刘纪平 ,林祥国 .用形态学重建方法进行机载 LiDAR 数据滤波 [J] .武汉大学学报 · 信息科学版 ,2011 36 (2) :167 -170

[5] Melzer T , Briese C . Extraction and Modeling of Power Lines from ALS Point Clouds [C] . The 28th Austrian Assoc Pattern Recog Workshop , Hagenberg , Austria , 2004

[6] Clode S , Rottensteiner F . Classification of Trees and Powerlines from Medium Resolution Airborne Laserscanner Data in Urban Environments [C] . A P -

