

激光点云中输电线拟合与杆塔定位方法研究

游安清¹ 韩晓言² 李世平³ 闫召进²

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)¹ (四川省电力公司绵阳电业局 绵阳 621000)²
(四川省电力公司 成都 610041)³

摘 要 通过竖直直方投影和均匀网格离散将激光雷达扫描得到的输电线路三维点云降维成二维灰度图像,提取其中直方响应最大的地方作为杆塔的水平位置,分离杆塔,输电线在走向上以杆塔为界分段;再沿其悬垂面的法线方向对各段输电线作正投影,对投影的散点进行迭代的鲁棒二次曲线拟合,实现在竖直方向上的各层输电线的分离。杆塔的提取和输电线的拟合是实现电力系统净空排查分析、输电线点云实体化和场景漫游的重要环节。

关键词 激光雷达,三维点云,杆塔定位,输电线拟合

中图分类号 TP301.6 **文献标识码** A

Transmission Lines Fitting and Towers Positioning in LiDAR Point Cloud

YOU An-qing¹ HAN Xiao-yan² LI Shi-ping³ YAN Zhao-jin²

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)¹

(Mianyang Power Bureau, Sichuan Power Company, Mianyang 621000, China)²

(Sichuan Power Company, Chengdu 610041, China)³

Abstract For 3D point cloud generated by LiDAR scanning electric power system, vertical projection and histogram were made to convert the cloud into 2D gray image which has even grids. Some highest histogram bins were determined as the horizontal position of electric towers. The towers were separated and meanwhile the lines were divided into several segments along their stretching direction. For each segment, projection was made along the normal direction of its pendent plane. Iterative robust quadratic fits were made on the projected points to divide them into different layers from the top down. Extraction of towers and fit of lines are important for spatial distance check, incarnation of lines point cloud and scene roam.

Keywords LiDAR, 3D point cloud, Tower positioning, Transmission line fitting

1 引言

在用激光雷达对电力系统进行巡检^[1-3]时,得到大量关于输电线、杆塔、地表植物、建筑物的三维离散点云,在实现不同对象的点云分类后,必须进行点云实体化才能实现三维场景的重建^[4,5]和漫游。对于电力巡检系统,最关心的是输电线和杆塔的状况。由于两者是相连的,点云分类时一般将它们分为同一类,这就需要另外设计算法来实现杆塔和输电线的分离。分离出杆塔后,在相应的空间位置用杆塔模型代替杆塔点云;输电线点云则需要通过曲线拟合才能实现实体化^[6,7]。拟合输电线包括 4 个步骤:将整个输电线在各杆塔处分离成段;将各段输电线在竖直方向上分离成层;将各层输电线在并排方向上分离成根;对每根线进行曲线拟合。为此,通过竖直直方投影和均匀网格离散,将三维点云降维成二维灰度图像,提取其中直方响应最大的地方作为杆塔的水平位置,分离出杆塔,将输电线在走向方向上以杆塔为界分段。对各

段输电线,再沿其悬垂面的法线方向作正投影,对投影点进行迭代的鲁棒二次曲线拟合,每次迭代,舍弃离拟合线太远的点(视为属于另一层的点),经过若干次迭代,即可实现上下层之间的分离。对同层内的点,在俯视图中通过 Hough 变换得到输电线的走向,再根据输电线的条数以两邻线间的中心平行线为界进行点云分离,从而实现每根线的独立。对分离出来的各独立线进行二次曲线拟合(也可以层为整体进行拟合,因为同段同层的线一般垂幅、垂形接近),即可很好地逼近真实线。

2 杆塔定位

图 1 是用三维激光雷达对某段输电线路进行扫描得到的三维点云图。通过变视角的三维浏览发现,该点云中共有 5 个杆塔,6 段线,每段线最多有 4 层,每层有 2 根并排线。该图中点云很不均匀,在有些部位有严重缺失,这就大大增加了杆塔分离和输电线拟合的难度。

到稿日期:2012-08-11 返修日期:2012-12-12 本文受国家“863”计划项目(2010AA7010419)资助。

游安清(1975—),男,博士,副研究员,主要研究方向为图像处理与计算机视觉技术,E-mail: anqingyou@163.com;韩晓言(1965—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制、智能电网技术;李世平(1963—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为高电压设备运行检修技术;闫召进(1963—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为继电保护与信息技术。

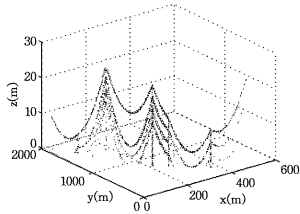


图1 某输电线路的三维激光点云

为了实现杆塔分离,先求出投影点位置的最左、右、上、下边界:

$$\begin{cases} x_{\min} = \min(x); x_{\max} = \max(x) \\ y_{\min} = \min(y); y_{\max} = \max(y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y, z) 为点云中任意一点 P 的三维坐标。

再设定一个细分尺度 $a(a=0.5\text{m})$, 将点云在水平面上所占的区域划分成均匀网格, 网格的总体宽度和高度为:

$$\begin{cases} W = (x_{\max} - x_{\min} + 0.001) / a \\ H = (y_{\max} - y_{\min} + 0.001) / a \end{cases} \quad (2)$$

式中, 0.001 是一个正的微小量, 其作用仅在于使下文的式(3)不漏掉区域右边界和上边界的点 P 。

然后将三维点云向水平面投影, 统计各细分格内所落的点数, 这样就得到一个以竖直投影直方量为灰度值的二维图像:

$$I(i, j) = \text{count}\{P | (i-1)a + x_{\min} \leq x < ia + x_{\min}, (j-1)a + y_{\min} \leq y < ja + y_{\min}, (i=1, 2, \dots, W; j=1, 2, \dots, H)\} \quad (3)$$

图2(a)即为前面所给点云生成的二维灰度图。在此图中, 找出5个最亮处, 即得杆塔的水平位置, 如图2(b)中的圆圈所示。

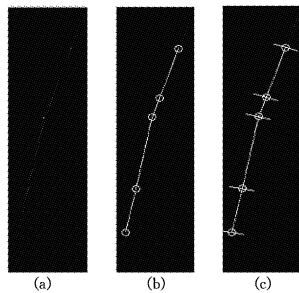


图2 激光点云中的杆塔定位

3 输电线分离与拟合

3.1 输电线分段

以杆塔为界, 将整个线路分成6段, 如图2(b)所示。由于电力线主要是在重力作用下下垂, 其弯曲仅发生在竖直面内, 在俯视图中都表现为直线, 因此可以对每段线通过Hough变换^[8]求出斜率 k_m 和倾角 $A_m (m=1, 2, \dots, M; M$ 为线段数)。对各相邻段以其角平分线方向建立分界线, 如图2(c)所示。

将各杆塔位置的某一邻域 ($r=5\text{m}$) 竖直向上拉伸成柱形, 落在此柱内的三维点云被认为属于杆塔。由于实际杆塔不会刚好是柱形, 因此这种处理会将一部分输电线点划为杆塔, 但这不会影响杆塔定位和输电线拟合。其余点云属于输电线; 再将图2(c)中得到的5条分界段向上拉伸成竖面, 夹在两竖面之间或落在首末两竖直面外侧的点云被认为分属不同的输电线段。图3中红色点(箭头所指)为杆塔点云, 其它不同颜色代表分段出来的不同输电线段点云。

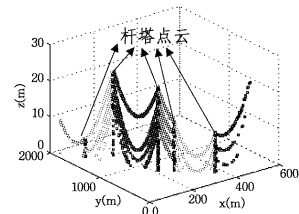


图3 三维点云中的输电线分段

3.2 同段分层

对于每段输电线点云, 前面已求得斜率 k_m , 将各段点云向平行于这些线的平面 $-k_m x + y = 0$ 投影, 得到各段输电线的悬线图。此投影过程本质上是做一次绕 z 轴的坐标旋转:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin A_m & -\cos A_m & 0 \\ \cos A_m & \sin A_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (4)$$

投影后, z 分量不变, y 分量都变成零, 得到关于 x 和 z 的二维散点悬线图。图4中的散点即为试验点云中一段向竖直面投影所得的悬线图。对悬线图用“迭代的鲁棒二次拟合^[9]”算法进行分层, 算法如下。

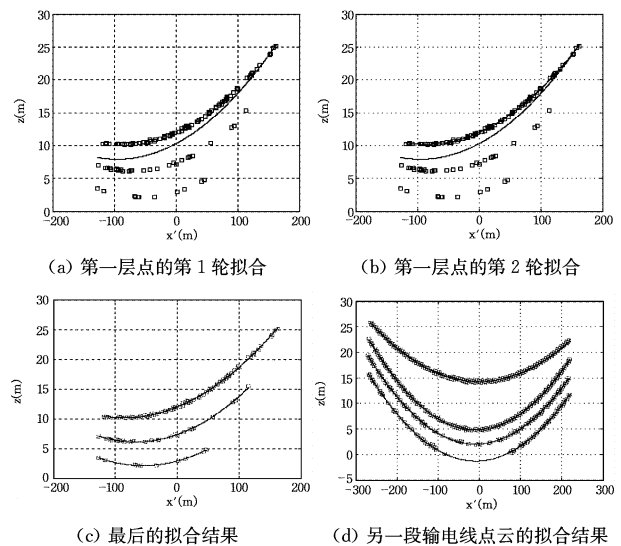


图4 输电线点云的分层

(1) 用 fit 函数进行二次曲线拟合, 并在函数参数中指定 Robust 类型, 得到一条描述悬垂线大概形状的曲线。Robust 拟合与 OLS(普通最小二乘)拟合的不同之处在于: 后者对各拟合点的误差累计是均匀无权重的, 而前者则根据点对拟合线的接近程度赋以反向权重, 越近点权重越大, 这样, 明显偏离的点会被视为野值而弱化其贡献, 这就使拟合线更倾向于穿过多数点所分布的带状区域。其中, 一般采用“双平方”权重函数:

$$w = \begin{cases} (1-r^2)^2, & \text{if } |r| < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $r=R/(ts \sqrt{1-h})$, R 为上一步迭代的残差; t 为调节常数, 一般取 4.685; h 是由普通最小二乘拟合得到的中心化杆塔值; s 为误差项的标准差估计。

(2) 找出实际 z 坐标比相同位置处拟合线 z 坐标小很多 (1m) 的点, 认为这些点属于另一层, 称之为预留点, 其余点称为预留点。

(3) 如果预留点超过拟合点数的 95%, 则认为本次拟合的所有点属于同一层线, 本次拟合线为一条终得目标线, 转

(4)。否则,将预留点转(1)。

(4)撇开已经确定属于某一层的点,如果还有剩余点,则将剩余点转(1),以确定另一层点及其拟合线;如果没有剩余点,则迭代结束。

此算法是一个二重循环:外循环控制输电线路层次,内循环通过鲁棒拟合不断舍弃远离拟合线的点,使拟合线逼近同一层。内循环的迭代并不需要很多次,一般2次就够了。

图4为实验过程图,其中图(a)给出了第一层点第1次拟合的结果(蓝实线),显然,因受其它几层点的影响,拟合线偏差很大。经过舍弃“预备点”后,再进行第2次拟合,得到了很好的结果(图(b)中上面一条蓝实线),图中绿点(第一层散列点)为终得拟合线所代表的点,红点(第二、三层散列点)为参与下一层线拟合的点。图(c)给出了分层拟合的最后结果,图(d)给出了另一段点云的拟合结果。可以看出,虽然有些地方点云缺失严重,但各拟合线还是很好地穿过了各层点云。表1给出了7条拟合线的拟合结果。

表1 图4中离散点云的曲线拟合结果

曲线	拟合结果函数	拟合残差(m)
(c)上	$z=0.00024x^2+0.0421x+11.974$	0.12
(c)中	$z=0.00027x^2+0.0366x+7.318$	0.11
(c)下	$z=0.00025x^2+0.0279x+2.868$	0.05
(d)上	$z=0.00016x^2-0.0001x+14.277$	0.13
(d)中上	$z=0.00026x^2+0.0048x+4.840$	0.09
(d)中下	$z=0.00025x^2+0.0043x+2.037$	0.10
(d)下	$z=0.00025x^2+0.0041x-1.292$	0.11

由表1和图4可以看出,二次曲线能很好地逼近真实电力线的形状。而且有了表中的函数式,就可以很容易计算各段电线的精确弧垂,这对分析输电线发热、雨淋、覆雪、结冰等情形下的变形很有用。

3.3 同层分离

点云分层的同时已经得到各层的拟合线,但同一层内往往包含几条并排线,还需继续分离,这一操作需在俯视图中完成,图5为其中一段。通过求二图像阶矩,可以很容易确定此段点云的中轴线:

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; y_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (6)$$

$$M_{11} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_c)(y_i - y_c) \quad (7)$$

$$M_{20} = \sum_{i=1}^n (x_i - x_c)^2; M_{02} = \sum_{i=1}^n (y_i - y_c)^2 \quad (8)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2M_{11}}{M_{20} - M_{02}} \right) \quad (9)$$

式中, (x_c, y_c) 为点云质心, M_{11} 、 M_{20} 、 M_{02} 为图像的3个二阶矩, θ 为主轴方向。由 (x_c, y_c) 和 θ 即可建立主轴线方程:

$$y - y_c = \tan\theta(x - x_c) \quad (10)$$

图5的中间一条蓝实线即为求得的中轴线。以中轴线为界,将线两侧的的点划为两条不同的输电线。至此,整个输电线分段、分层、分离、拟合过程结束。

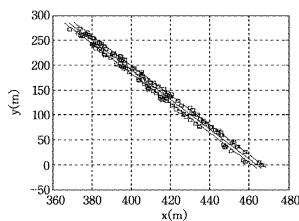


图5 并排线点云的分离

用前面所述的方法对所给的输电线路点云进行处理,得到的整体效果如图6所示,其中纵向分布的粗红点(箭头所指)为提取出来的杆塔点,绿点(串在细实线上的散点)为电线点,细实曲线为拟合得到的各段电力线。整个点云包含3014个点,用Matlab7.0编程,在一台主频2.33GHz、内存3.5GB的计算机上运行,完成全部分析任务耗时0.08秒。

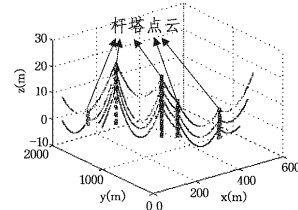


图6 杆塔定位与输电线拟合的综合结果

对比应用表明,本算法与激光点云专业处理软件 Terra-solid 都能实现输电线拟合,但是本算法能给出拟合线的函数表达式(见表1),这对自动计算输电线弧垂、输电线在不同内外力作用下的变形、不同走向的输电线间的交叉跨越等深层应用有重要意义。

另外,对于拟合精度,由于实际输电线在三维空间中的真实位置(即线上每一点的 x 、 y 、 z 坐标)很难用人工方法精确测得,因此也就无法给出本算法相对真实值的拟合精度,而只能从算法本身的拟合残差(见表1)和拟合线与离散点云的目测吻合程度(见图4)来基本认定本算法的可行性与有效性。

结束语 本算法通过综合运用竖直直方投影、Hough 变换、沿悬垂面法向投影、鲁棒二次拟合、中轴划分等技术实现了在输电线路激光雷达三维扫描点云中自动进行杆塔定位和输电线拟合的过程,算法效果良好,为定量分析输电线弧垂、变形、交叉跨越提供了依据。算法的不足之处在于还没有精细考虑穿在杆塔内部的电线段以及电线与杆塔的精确定位,这只有在高密度的激光点云中才能分辨。另外,不同发热状况和不同自然外力作用下的输电线变形也需要作更进一步的研究,以对智能电网运营与管理提供更多的依据。

参考文献

- [1] 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,2011,5:71-74
- [2] 张险峰,陈功,龙维,等.激光雷达直升机巡线技术的现状与应用前景[J].电力建设,2008,29(3):40-43
- [3] 周学文.LIDAR技术在电力线路工程中的应用[J].测绘科学,2010,35(5):83-85
- [4] 余辉,刘晓平,韩江洪,等.从稀疏LIDAR数据中重建居民区建筑物[J].中国图象图形学报,2011,16(9):1681-1688
- [5] 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
- [6] 刘光帅,李柏林,何朝明.离散点云原始形状及边界曲线提取算法[J].计算机科学,2011,38(5):279-282
- [7] 刘平.基于机载LIDAR数据电力线路自动提取与三维建模[D].武汉:武汉大学,2010
- [8] 时银水,姬红兵,王学青,等.基于随机Hough变换的航迹起始算法[J].模式识别与人工智能,2011,24(5):651-657
- [9] 王峰,丘广新,程效军.改进的鲁棒迭代最小二乘平面拟合算法[J].同济大学学报:自然科学版,2011,39(9):1350-1354
- [10] 张红民,王一博.一种改进的细胞图像分水岭分割方法[J].重庆理工大学学报:自然科学版,2012,26(11):59-62