

基于三维重建的绝缘子爬电距离计算方法

彭刚¹ 李贤靓² 钟振鑫¹

(1. 广东电网有限责任公司 惠州供电局试验研究所 惠州 516001;

2. 北京普锐电子有限公司 技术部 北京 100070)

摘要: 提出了一种基于三维重建技术计算绝缘子爬电距离的方法。该方法首先在 KinectFusion 算法框架下获得三维体素网格的有向距离函数(TSDF)数据,然后在对称切割所得的二维截面中提取表示爬电距离的有效轮廓点,最后遍历有效轮廓点计算爬电距离。其创新点在于构建绝缘子的三维模型,将形状不规则的实物转化成体素进行计算处理。实验证明该方法既快又准,平均误差为 2.7%,节省了制作人员和测量人员的时间,同时避免了由于结果不准确而进行的反复测量。

关键词: 绝缘子;爬电距离;三维重建;Kinect

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Insulator's creepage distance calculation based on three-dimensional reconstruction

Peng Gang¹ Li Xianliang² Zhong Zhenxin¹

(1. Test Research Institute of Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou 516001, China;

2. Department of Technique, Beijing Purui Electronic Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: In this paper, a method of calculating the creepage distance of insulators based on 3D reconstruction technique is proposed. First of all, the TSDF data within the three-dimensional voxel grid are obtained by the framework of KinectFusion algorithm. Then the effective contour points representing the creepage distance are extracted in the two-dimensional section obtained by symmetrical cutting. Then we traverse the effective contour points to calculate the creepage distance of insulators. The innovation lies in the construction of three-dimensional model of the insulator, changing the shape of irregular objects into voxel to compute and process. The experiments show that the method is fast and accurate, and the average error remained at about 2.7%. Validated by experiments, our approach can bring the convenience to the measurement and production. In addition, the repeated measurements due to the inaccurate result are avoided.

Keywords: insulator; creepage distance; three-dimensional reconstruction; Kinect

1 引言

绝缘子是一种特殊的绝缘控件,在架空输电线中起到了重要的作用。爬电距离是考核绝缘子安全的重要指标,指正常承受运行电压的两电极沿绝缘件外表面轮廓的最短距离^[1-2],简称爬距。如果爬电距离过小,电源两极之间、带电部件和外壳之间容易短路,使电源短路、外壳带电,严重危害人身安全。在实际应用中,根据工作电压和绝缘等级来决定所需绝缘子的爬电距离。

由于绝缘子的伞裙是由很多圆弧和直线组合而成的复杂的几何形状,难以直接对爬电距离进行数学计算,如何获

取高精度的绝缘子爬距是目前尚未解决的难题,面临的最大困难是外轮廓形状复杂,没有精确的方法进行测量。在实际中人们通常用胶带贴合伞裙等方法进行近似测量,费时费力并且不准确。目前已有研究人员提出计算爬距的方法,文献[3]利用曲线方程和几何关系推导出爬电距离的计算公式,但此方法计算复杂,公式的输入量需要手工测量,准确度不够。文献[4]在 AutoCAD 中通过编辑截取等操作计算爬距,但此方法需要人为找出适合爬距计算的绝缘子剖面,增加了人工的难度。

另一方面,基于机器视觉和三维重建的非接触测量技术被广泛应用于工业测量^[5-6]。文献[6-7]都采用了双目立

体视觉的方法对被测物体进行三维重建。他们在一定的控制条件下得到了不错的测量结果。但该方法需要前期复杂的相机校准和极线矫正等操作,而且对于纹理信息单一的物体(例如本文研究的绝缘子)重建效果不佳。

针对目前存在的问题,本文提出了基于 Kinect 的三维重建来计算绝缘子的爬电距离的方法。首先利用 KinectFusion 算法对绝缘子进行三维重建,得到体素网格形式的三维模型,然后对体素网格做切割处理,最终在得到的二维截面上遍历有效轮廓点计算出爬电距离。实验证明该方法操作简便,计算结果精确,为绝缘子的制作部门和使用部门提供了很大的便利。

2 算法描述

绝缘子的截面图和有效爬电距离如图 1 所示,截面图中 A、B 两点之间,沿绝缘子表面的最短距离即为爬电距离。本文采用三维重建的技术还原绝缘子的真实模型,并测量爬电距离。

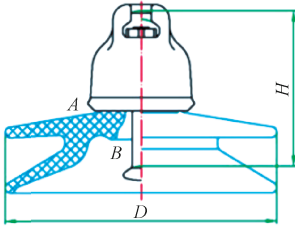


图 1 绝缘子的爬电距离

算法流程如图 2 所示,首先用 Kinect 对绝缘子进行 360°扫描,采集深度图像,通过 KinectFusion 算法将采集到的图像融合成一个完整的三维模型,然后沿着经过绝缘子伞盘面直径的平面进行切割,将绝缘子分成互相对称的两部分,得到包含爬电距离的二维截面,最后提取表示爬距的有效轮廓点,将爬电距离转化为两体素之间沿物体轮廓的距离进行计算。

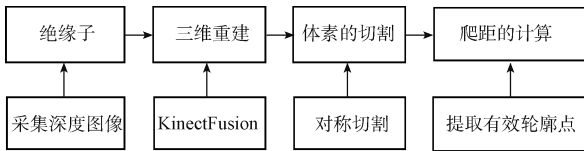


图 2 算法流程

2.1 三维重建

随着 2011 年微软的消费级彩色-深度传感器(Kinect)的面世,涌现了许多基于低成本高帧速的传感器进行三维重建的研究。第一代 Kinect 用红外散斑确定物体的深度,第二代结合了飞行时间(TOF)技术测量三维点云。

本文基于 Newcombe 等人^[8]提出的 KinectFusion 算法框架进行三维重建。该算法是基于体素网格数据的重建,主要包括 4 部分:双边滤波、迭代最近点(ICP)^[9]、截断有向

距离函数(TSDF)^[10]、光线投射(Ray-cast),工作流程如图 3 所示。为了将各个视点下获取的深度数据融合在一起,该文提出了利用迭代最近点方法配准当前深度帧与全局模型(frame-model),用于实时估计相机的位姿,计算出由第 k 帧视点向全局变换的转移矩阵 $T_{g,k}$,并结合有向距离函数在三维体素网格上融合各个视点下的三维数据,更新全局模型。此外,它用双边滤波将 Kinect 获得的原始数据去噪,为 ICP 步骤中的寻找最近点奠定基础;用场景渲染获取当前视点下观察到的模型点云,与下一帧的深度帧进行新一轮的配准。

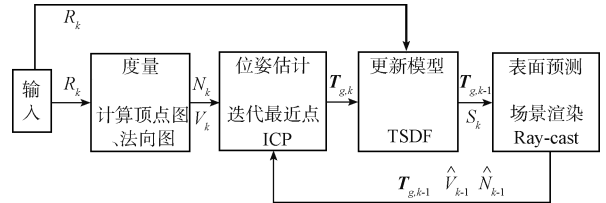


图 3 KinectFusion 工作流程

其中 TSDF 是用一个数值来表示该点到最近的物体表面的远近程度,物体内部和外部的点用数值的正负来表征(图 4)。如果物体表面以内的点的有向距离函数值是正值,那么物体表面以外的点的有向距离函数值就是负值,因此,有向距离函数值为 0 的点(过零点)即为物体表面上的点。

1	1	1	1	0.9	0.3	0	-0.5	-1
1	1	1	1	0.7	0.2	0	-0.1	-0.8
1	1	1	0.7	0.3	0.1	0	-0.2	-0.8
1	1	1	0.6	0.2	0	0	-0.4	-0.9
1	1	1	0.6	0.2	0	0	-0.4	-0.9
1	1	1	0.6	0.2	0	0	-0.3	-0.9
1	1	1	0.8	0.3	0.1	0	-0.1	-0.7
1	1	1	0.9	0.4	0.2	0	-0.1	-0.6
1	1	1	0.8	0.3	0.1	0	-0.2	-0.7

图 4 二维 TSDF 示意图

2.2 体素的切割

三维扫描过后,原始的体素网格中获得了以 TSDF 形式存储的三维模型信息。要准确计算绝缘子的爬电距离,首先应当在体素网格中正对绝缘子伞盘的某条直径切割出一个截面,然后在二维空间计算感兴趣曲线的弧长。本节将讨论如何正确地切割体素。

体素切割的关键是找到切割面的平面方程:

$$Ax + By + Cz + D = 0 \tag{1}$$

设绝缘子伞盘盘面的方程为 α ,其法向量为 n ,三维坐标系如图 5 右下角所示。首先考虑面 α 垂直或者平行于坐标平面的情况,易于选择平行于坐标面的平面来切割体素,减少切割面方程的未知量,即:

$$\begin{cases} A = B = 0, & n \perp XOY \\ B = C = 0, & n \perp YOZ \\ A = C = 0, & n \perp XOZ \end{cases} \quad (2)$$

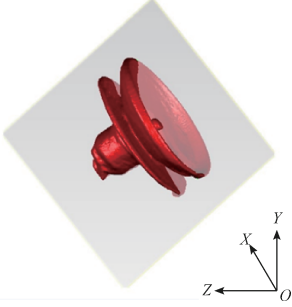


图5 切割面的选择

但是 $n \perp XOY$ 和 $n \perp YOZ$ 这两种情况无法稳定放置绝缘子, $n \perp XOZ$ 是把绝缘子伞盘朝下扣放在电动转台上, 这样采集到的图像缺少伞盘内部细节, 所以采集时绝缘子只能如图6稳定放置。因此, 法向量 n 不垂直于任何一个坐标平面, 直接求切割面方程有一定难度。为了减少计算复杂度, 本算法中选择的切割面是平行于 YOZ 面并经过伞盘直径的平面, 如图5所示。

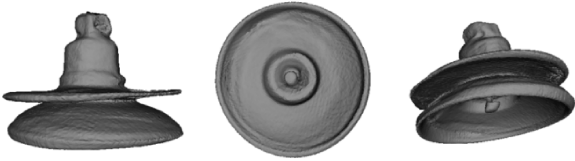


图6 绝缘子的三维模型

因为三维坐标是以第一帧数据建立的, 所以在采集的深度数据中, 将切割面与像平面垂直的时刻作为第一帧, 以此建立三维坐标。由于切割面平行于 YOZ 面, 所以 $B = C = 0$, 切割面的平面方程可以简化为:

$$Ax + D = 0 \Rightarrow x = -\frac{D}{A} \quad (3)$$

调整 $-D/A$ (常数) 直到切割面将绝缘子分成互相对称的两部分为止, 切割之后得到二维截面。

2.3 爬距的计算

由于经过体素切割之后, 得到的是一幅整齐排列的二维图像数据, 相比离散的点云数据^[11], 无需复杂的曲线方程拟合, 只需要简单地二值化, 轮廓提取等操作来计算爬距。

得到二维截面之后, 需要在截面中找出表示轮廓的点, 并将这些点连接起来计算其中的爬距。首先将截面点二值化, 这里需要利用三维重建过程中的 TSDF。设某点 x 的 TSDF 值为 $f(x)$, 若 $f(x)$ 大于或小于 0, 说明点 x 属于被重建物体内部或者背景部分; 若 $f(x)$ 的值为 0, 说明点 x 是物体轮廓点。如图4所示, 过零点的连线表示物体的轮廓。

但是在采集计算过程中, 单个点的 TSDF 可能产生误

差, 为了防止漏选轮廓点, 本算法以体元为单位筛选轮廓点。

体元是三维网格中由相邻的 8 个体素点组成的小立方体, 属于物体内部的体素点被称为实点, 反之落在物体外部的被称为虚点; 大多数的体元的 8 个体素都是虚点或者都是实点, 这些体元被称作虚体元和实体元, 如图7所示, 体元是既含有实点和虚点, 它们被称为边界体元。

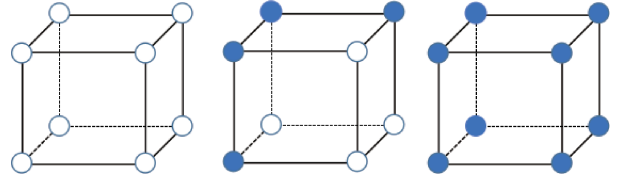


图7 体素网格和体元

不妨设某个体元为 X_j , 它是一个包含 8 个体素的集合:

$$X_j = \{x_0, x_1, \dots, x_7\}, x \in \mathbb{R}^3 \quad (4)$$

那么边界体元集合理论可以表示为:

$$C = \{X_j \mid 0 < g(X_j) < 8\} \quad (5)$$

$$g(X_j) = \sum_{x_i \in X_j} \hat{f}(x_i) \quad (6)$$

$\hat{f}(x_i)$ 表示二值化操作:

$$\hat{f}(x_i) = \begin{cases} 1, & f(x_i) \geq 0 \\ 0, & f(x_i) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$\hat{f}(x_i)$ 代表某个体素的截断有向距离函数。设感兴趣区域为 I , 则感兴趣的边界体元为:

$$\tilde{C} = C \cap I \quad (8)$$

从而得到感兴趣体素边界集合为:

$$V = \{v_i \mid v_i \in \tilde{C}\} \quad (9)$$

遍历 V 中的边界体素, 在遍历过程中累加相邻体素之间的欧式距离来计算爬电距离:

$$L = \sum_{v_i \in V, i > 0} \|p(v_i) - p(v_{i-1})\|_2 \quad (10)$$

实际操作中, 将起点赋给当前像素点, 在该点的八邻域范围内寻找候选点 p_i , 若找不到这样的候选点, 则扩大邻域范围直至寻找到候选点。找到候选点之后计算当前点与候选点之间的欧氏距离, 然后将候选点赋给当前点。重复上述过程, 将当前点与候选点之间的距离 l 累加起来, 循环到设定的终点 p_1 时结束, 累加的距离之和即为爬电距离。算法流程见算法1。

算法1. 二维图像上根据有效轮廓点的爬电距离计算

输入: 有效轮廓点集合 $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, p_0 为起点, p_n 为终点, 当前点为 p_c , 候选点为 p_i 。

输出: 爬电距离 L 。

初始化: 令 $p_c = p_0$ 。

While $p_c \neq p_n$

```

If 在  $p_c$  的八邻域中  $\exists p_i \in P$ 
    选择其中最近的  $p_i$ ;
     $L \leftarrow L + \|p_i - p_c\|_2$ ;
     $p_c \leftarrow p_i$ ;  $P \leftarrow P - p_i$ ;
Else
    扩大邻域继续寻找  $p_i$ ;
End If
End While
    
```

3 实验分析

本文实验在自然场景下进行,绝缘子无约束地被摆放,实验设备包括电动转台、深度摄像机 Kinect v2 和计算机,如图 8 所示。本文算法通过 C++ 语言实现。

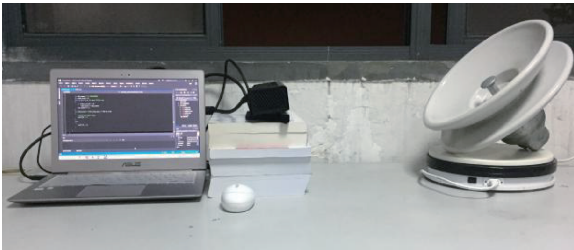


图 8 实验场景

对于绝缘子的扫描可以通过两种方式,一种是由用户手持 Kinect 相机缓缓围绕绝缘子运动一周来覆盖物体的整个表面;另一种是将绝缘子摆放在一个电动转台上进行采集。本文采取后者。

将绝缘子放在电动转台上匀速旋转一周,在此期间用 Kinect 采集 600 幅深度图像,图像分辨率为 512×424 ,每秒采集 30 帧,采集完成之后输入到实验程序中进行三维重建,通过 KinectFusion 算法融合得到绝缘子的三维模型,分别从三个角度下观察到的模型如图 6 所示。

实际操作中,切割面方程设为 $x=36.5$,若该常数设置得过大或者过小,切割面不会经过伞盘盘面直径,无法得到准确的爬电距离,如图 9(a)所示,准确的切割效果如图 9(b)所示。

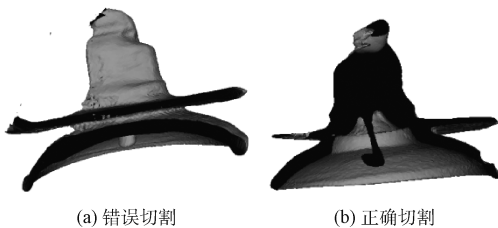


图 9 模型切割

体素之间沿轮廓的距离即为爬电距离。

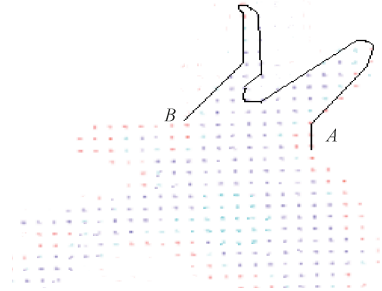


图 10 体素截面

将截面中的点二值化,找出物体轮廓点,然后设置爬距的起点和终点,选出表示爬距的有效轮廓点,从起点到终点迭代累加计算爬电距离,如图 11 所示。



图 11 截面轮廓点与爬距的有效轮廓点

实验中选用型号为 U120BP 的绝缘子作为实验对象,它的爬电距离的标称值为 450 mm。首先使用手工测量的方法(用绳子与尺)测得爬电距离为 436.05 mm。为了多次实验评估本文算法的测量误差,在每次实验中分别调整 Kinect 相机距离绝缘子的距离和绝缘子摆放的初始角度,然后运用本文提出的方法进行测量,实验结果如表 1 所示。其中距离和角度值都是大约的估算值。最终测得,手工测量的相对误差为 3.1%,通过本文方法测量得到的平均相对误差为 2.7%。

表 1 基于三维重建的绝缘子爬电距离测量误差

测量距离/m	初始角度/(°)	测量值/mm	相对误差/%
1.0	0	439.46	2.3
1.0	120	440.02	2.2
1.0	240	438.77	2.5
1.5	0	440.67	2.1
1.5	120	441.08	2.0
1.5	240	436.95	2.9
2.0	0	438.29	2.6
2.0	120	434.26	3.5
2.0	240	437.41	2.8
2.5	0	433.32	3.7
2.5	120	433.36	3.7
2.5	240	435.14	3.3

切割之后得到的体素截面如图 10 所示,图中 A、B 两

4 总 结

本文提出了利用三维重建计算绝缘子爬电距离的算法,先对绝缘子进行三维重建,然后依赖体素网格的数据类型,截取正确的二维截面,并在二维图像上计算爬距。实验结果表明,该算法可以快速准确地得到绝缘子的爬距参数,平均误差为2.7%,能够在绝缘子的生产和检验线上充分发挥作用。

参考文献

- [1] 丘志贤. 绝缘子的爬电距离、表面积、体积及形状因数的计算[J]. 电瓷避雷器, 1998(3): 14-20.
- [2] 杨彩霞. 电气间隙和爬电距离测量方法的研究[J]. 工程技术:全文版, 2016(11):00236-00236.
- [3] 张顶峰, 张嘉楠. 复合绝缘子爬电距离计算公式推导及应用[J]. 河南科技, 2014(11X): 109-111.
- [4] 王志宁. 用 AutoCAD 计算绝缘子爬距, 重量及表面积[J]. 电瓷避雷器, 2012(5): 11-16.
- [5] 赵振兵, 徐磊, 戚银城, 等. 基于 Hough 检测和 C-V 模型的航拍绝缘子自动协同分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(2):395-403.
- [6] 张瑞峰, 张巍. 改进双目视觉在柴油机缸盖毛坯检测中的应用[J]. 电子测量技术, 2011, 34(8):48-51.
- [7] 杨浩, 吴畏. 基于三维重建的绝缘子覆冰图像监

测[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2):92-98.

- [8] NEWCOMBE R A, IZADI S, HILLIGES O, et al. KinectFusion: Real-time dense surface mapping and tracking[C]. 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, IEEE, 2011: 127-136.
- [9] BESL P J, MCKAY H. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] CURLESS B, LEVOY M. A volumetric method for building complex models from range images [C]. Computer Graphics, 1996: 303-312.
- [11] 杨振清, 雍永磊. 基于点云切片的边界提取[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(1): 222-224.

作者简介

彭刚, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运维管理与图像三维重建。

李贤靓, 本科, 高级工程师, 主要从事电力技术仪表测量工作。

钟振鑫, 本科, 高级工程师, 主要从事电力技术仪表测量工作。

(上接第 158 页)

- [8] SIMEONE O, STANOJEV I, SAVAZZI S, et al. Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(1):203-213.
- [9] DO C T, TRAN N H, ZHU H, et al. Optimal pricing for duopoly in cognitive radio networks: Cooperate or not cooperate? [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2014, 13(5): 2574-2587.
- [10] JAGANNATHAN K, MENACHE I, ZUSSMAN G, et al. Noncooperative spectrum access: The dedicated vs. free spectrum choice [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Commucation, 2012, 30(11): 2251-2261.
- [11] LIU C, BERRY R A. A priority queue model for competition with shared spectrum [C]. 52nd Annual Allerton Conference, 2014:629-636.
- [12] ELIAS J, MARTIGNON F, CHEN L, et al. Joint operator pricing and network selection game in cognitive radio networks; Equilibrium, system

dynamics and price of anarchy[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2013, 62(9):4576-4589.

- [13] KUMAR A, MALLIK R K, SCHOBER R. Duopoly price competition of WLAN service providers in presence of heterogeneous user demand [C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2012:2384-2389.
- [14] PELEGB B, SUDHOLTER P. Introduction to the Theory of Cooperative Games [M]. Newyork: Springer, 2007.
- [15] 张羽, 叶芝慧. 星间通信中带宽和功率联合分配算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(8):181-185.

作者简介

黄丽湾, 上海大学硕士研究生, 主要研究方向为认知无线电、排队论、博弈论。

E-mail:18717928956@163.com

邹君妮, 上海大学教授, 博士生导师, 研究方向为视频编码、认知无线电等。

E-mail:zoujn@shu.edu.cn