

基于统计形状模型的绝缘子“掉串”检测算法

汪晓¹, 郭可贵¹, 王远¹, 陈江², 严波³, 姚强⁴

(1. 国网安徽省电力公司 检修公司, 合肥 230022; 2. 安徽南瑞继远电网技术有限公司, 合肥 230088;

3. 国网安徽省电力公司, 合肥 230061; 4. 安徽大学 电子信息工程学院, 合肥 230601)

摘要: 在电力系统中, 利用计算机视觉和图像处理技术对绝缘子的状态进行检测, 在保障电力系统的安全运行方面具有非常重要的作用; 针对玻璃绝缘子自爆导致其脱落的“掉串”问题, 文章提出了一种基于统计形状模型的绝缘子“掉串”检测算法, 该算法首先对输入图像进行预处理; 其次提取感兴趣的目标区域, 该区域内应包含绝缘子信息; 然后利用 GLOH 描述子来精确定位绝缘子, 再利用统计形状模型在图像分割方面的优势来精确分割绝缘子; 最后对分割出的绝缘子的位置进行分析, 以达到检测绝缘子是否存在脱落的目的; 实验结果说明了文章方法可以准确地判断出绝缘子是否存在脱落现象。

关键词: 绝缘子; 统计形状模型; GLOH 描述子; K-means 聚类

Detection Algorithm of Cracked Insulator Based on Statistical Shape Models

Wang Xiao¹, Guo Kegui¹, Wang Yuan¹, Chen Jiang², Yan Bo³, Yao Qiang⁴

(1. State Grid Anhui Electric Power Maintenance Company, Hefei 230022, China;

2. Anhui Nari Jiyuan Electric Network Technology Co., Ltd., Hefei 230088, China;

3. State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230061, China;

4. School of Electronics and information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In the power system, there is a very important role in the protection of the safe operation of the power system by using computer vision and image processing technology to detect the cracked Insulator. Aiming at the problem of the cracked insulator, this paper presents a detection algorithm of cracked insulator based on Statistical Shape Models (SSMs). The algorithm firstly preprocesses the input image. Secondly, we extract the interest target region which should contain insulator information. Then GLOH descriptor is used to accurately locate the insulator, and then the SSMs are used to accurately segment the insulator with their advantages in the image segmentation; Finally, that the insulator is cracked or not is determined by analyzing the positions of the separated insulators. The experimental results show that the algorithm can accurately locate the cracked insulator.

Keywords: insulator; statistical shape models; GLOH descriptor; K-means clustering

0 引言

在电力系统中, 绝缘子是一种十分重要的绝缘控件, 在保障输电线路的安全运行方面起着非常重要的作用。但是绝缘子长期暴露于自然环境中, 受到雨水、大气等腐蚀, 导致绝缘子出现劣化现象, 并导致“掉串”故障, 会使电网解裂, 并致使大面积停电, 对电力系统的安全稳定造成极大危害 [1]。依赖于人工对输电线路进行巡检和维护的方式不仅效率低、成本高, 而且存在着很大的安全性问题。随着智能技术的发展, 利用计算机视觉和图像处理技术对绝缘子状态的进行检测, 自动识别绝缘子缺陷, 在保障电力系统的安全运行方面具有非常重要的作用。

近期, 研究者们提出了许多识别检测绝缘子的算法。文献 [1] 提出一种基于视觉的绝缘子“掉串”缺陷识别算法, 该算法结合了 Lab 彩色空间、最大类间方差法以及面积形态学,

先对绝缘子图像进行粗分割, 然后根据分割所获取的绝缘子图像, 建立相应的数学模型, 通过数学公式计算绝缘子的中心位置坐标和区域坐标等方法判断绝缘子是否存在掉串现象。文献 [2] 通过提取航拍图像中绝缘子的不变矩、颜色、形状和小波系数等多种特征对绝缘子进行特征描述, 并对多特征进行特征融合, 并通过 RBF 神经网络进行绝缘子状态识别, 对常见的故障进行诊断。文献 [3] 利用脉冲耦合神经网络 (PCNN) 对航拍图像中的进行了分割, 对分割后的图像进行广义 Hough 变换, 最后返回原图, 在原图上识别绝缘子。文献 [4] 通过对伞裙比、平滑度和连通比这 3 个特征进行提取, 采用自适应的速率和附加动量相结合的 BP 算法来构建神经网络, 识别了绝缘子的污秽、裂纹和掉串 3 种缺陷。文献 [5] 通过霍夫变换检测图像中的直线方法来粗略定位绝缘子的位置, 然后通过 SVM 分类器对粗略定位的结果进行分类最终实现绝缘子的定位, 通过提取掉串绝缘子和相应裂纹的特征向量构建超完备字典, 识别故障绝缘子, 但该方法对图像质量要求较高。

由于绝缘子图像数据获取易受到传感器、拍摄环境、拍摄角度等多种因素的影响, 所获得的图像存在尺度旋转、缩放、光照变化等复杂情形, 同时现场的绝缘子图像都是在自然环境下拍摄的, 大都存在着复杂的背景, 在这种条件下, 上述方法

收稿日期: 2017-07-13; 修回日期: 2017-08-29。

基金项目: 国家自然科学基金(61772032); 国家电网公司科技项目(5212D01502DB)。

作者简介: 汪晓(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输电线路运检管理方向的研究。

存在着定位、提取不够准确等问题。因此,本文利用 GLOH 描述子结合 K-Means 聚类分析算法作为聚类方法进行精确定位绝缘子,去除背景因素的干扰,然后利用统计形状模型进行绝缘子的准确分割,最后对分割出的绝缘子的位置进行分析,以达到检测绝缘子是否存在脱落的目的。

1 图像预处理

由于图像获取的复杂性,直接对图像进行特征提取,往往难以获取比较理想的特征,在进行图像处理与分析之前,需要对包含绝缘子的图像进行必要的预处理以达到减少噪声等因素的影响。首先对图像进行中值滤波,中值滤波的基本原理是将数字图像中的像素点的值用该像素点的一个邻域中各像素点值的中值代替,让其像素值更接近真实值,从而消除孤立的噪声点,并且也可以有效地去除边缘模糊等不利因素,并且同时可以较好地保留绝缘子的边缘信息;其次利用直方图均衡化来增强图像的对比度,以方便绝缘子的定位。

2 绝缘子定位

绝缘子的定位是绝缘子状态检测的重要步骤,精确定位绝缘子与否可以直接影响到绝缘子状态检测的成败。考虑到拍摄图像时易受到光照、角度等因素的影响,这些因素都会影响对绝缘子的检测效果,因此在检测定位阶段,需要具有一定的尺度、亮度、旋转、遮挡不变的鲁棒性较高的局部特征帮助定位绝缘子,本文采用了梯度定位方向直方图^[6](gradient location-orientation histogram, GLOH)描述子来进行特征描述。

在描述子构造之前,需要进行局部特征检测,研究者们提出了很多局部特征检测的方法,例如:Harris角点检测^[7]、Harris-affine区域检测^[8]、DoG(difference of gaussian)特征检测^[9]、Hessian-affine区域检测算法^[10]等。由于Hessian-Affine区域检测算法所检测的仿射协变区域的形状能够自适应于图像几何形变、视角变化和亮度变化等,并且其所运用多尺度迭代算法获得仿射不变特征,能有效解决图像遮挡或局部畸变的问题,因此本文采用Hessian-Affine区域检测算法来获取特征和特征区域。

在检测局部特征点后,需要对特征点进行描述。GLOH是一种由SIFT描述子扩展而来的,旨在增强其鲁棒性和独特性图像描述算子,并在刚性物体识别领域获得了很大的成功。GLOH算子所提取的图像特征,对尺度旋转、缩放、光照变化能够保持不变性,具有较强的抗噪能力^[11]。

在训练阶段,提取大量特征作为训练集,为了减少冗余的特征,首先利用聚类分析方法来选择代表性的特征即视觉字典,本文使用K-Means作为聚类方法,K-Means聚类^[12]的是一种无监督学习方法,应用非常广的,是一个迭代的算法,其学习策略是最小化所有样本到对应聚类中心的聚类的平方和,从而使生成的相同类簇的样本尽可能紧凑,不同类别之间的样本尽可能分开。它是一种简单、快速的空间聚类方法,也是较为实用的聚类算法。K-Means算法描述如下^[13]:

- 1) 首先随机初始化K个中心点 $\tilde{T}_1, \tilde{T}_2, \dots, \tilde{T}_K$;
- 2) 其次计算每个样本点分别到K个中心点的距离,

$$d_i = T_C - \tilde{T}_i, i = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$
 并把每个样本标记为离它最近的中心点那一类;

- 3) 根据当前样本的类别更新中心点
 - 4) 如果中心点没更新则结束否则转到2)继续迭代
- 最后电力线的视觉字典可以表示为:

$$L = \{(T_1, \mu_1), (T_2, \mu_2), \dots, (T_k, \mu_k)\} \quad (2)$$

其中: T_k 表示第k个视觉单词的直方图向量,它是第k类中所有特征向量的平均值。 $\mu_i (i = 1, \dots, k)$ 为匹配阈值,通过训练样本来获得。

在匹配阶段,对任意输入图像均可可以得到一系列特征描述子,注意其中包含许多绝缘子特征描述子,记为 $\{T^1, T^2, \dots, T^i\}$ 。然后将这些特征与L中每个视觉单词进行匹配,并用L中对应的阈值来判断其是否为绝缘子的特征,这样就可以排除大多数非绝缘子的特征,留下所有绝缘子的特征。

经过特征匹配后,目标的位置是显而易见的,根据获得的局部特征点定义投票矩阵^[14]:

$$V(x, y) = \sum_i \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

其中: σ 表示支持区域的尺度。使用阈值对投票矩阵进行处理,便可以获得绝缘子的区域。

3 基于统计形状模型绝缘子“掉串”检测

3.1 统计形状模型

统计形状模型(statistical shape models, SSMs)^[15]是一种在医学图像领域中应用非常广泛的图像分割算法。文献[16]提出一种基于SIMs(statistical interspace models)的人体脊柱分割算法,该算法以SSMs为基础,主要区别是SIMs解决了椎骨重合遮挡问题。受此启发,考虑到绝缘子串的形状特征以及单个绝缘子之间的相似性,本文选用SSMs来分割绝缘子。该模型通过表面上的一系列标记点来描述形状,一般采用网格化的方法来选取标记点,假设一个形状可以用k个n维的标记点来表示,则可以用一个kn维的向量来表示该形状。例如:若k个二维标记点坐标为 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, k$,则可以用 $(x_1, y_1, \dots, x_k, y_k)$ 通过点分布模型^[17](point distribution model, PDM)来描述该形状。

但不同图像中的形状样本往往存在着尺寸、位置和方向上的差异,需要通过形状对齐将训练集中的所有形状对齐在统一的坐标系下,最常用的对齐方法是广义普氏分析^[18],其过程是最小化每个形状 s_i 和平均形状 \bar{s} 之间的差距 $D = \sum_i |s_i - \bar{s}|$ 作为目标对齐形状。整个对齐基本过程如下所示^[19]:

- 1) 计算每个形状样本中心点 $(\bar{x}, \bar{y}) = (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i)$,并且将所有中心点移动至坐标原点;
- 2) 任选一个样本,一般选择第一个进行缩放,使得 $R(s) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2]}$ 为1,将其作为初始的平均形状;
- 3) 通过旋转、缩放和平移等全局变换使得训练集中所有样本均与当前平均形状对齐;
- 4) 重新计算对齐的所有样本的平均样本;

5) 计算当前训练平均样本形状和上次的差异, 如果没有达到一定的误差 ϵ , 则转至 3), 若收敛至 ϵ 则停止;

其中平均形状 \bar{s} 定义为

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, N \text{ 为样本总数。} \quad (4)$$

然后对对齐后的形状进行主成分分析 (principal component analysis, PCA), 经过统计分析后, 得到一个统计模型来描述形状。最后, 使用模型指导分割的过程中, 通过调整模型特征参数, 迭代模型使之不断与目标匹配而达到分割目标的目的, 详见文献 [15]。

3.2 绝缘子“掉串”检测

对于一副输入图像, 首先利用第 1 节中图像预处理方法对其进行预处理, 然后通过第 2 节中绝缘子定位方法进行定位, 再通过 3.1 节的统计形状模型对绝缘子串进行分割, 以获得单个绝缘子的完整图像。

在获取单个绝缘子的完整图像之后, 统计绝缘子的个数, 假设有 m 个绝缘子, 记为 I_1, I_2, \dots, I_m , 并计算相邻绝缘子之间的距离 $d_i = |I_{i+1} - I_i|, (i = 1, 2, \dots, m-1)$, d_i 表示第 $i+1$ 个绝缘子到第 i 个绝缘子中心之间的距离。将 d_i 进行分类统计, 假设分为 p 类, 考虑到计算的误差, 按照下述方法进行归类, 即取较小的数 ϵ' , 若 $|d_i - d_j| < \epsilon', (i, j = 1, 2, \dots, m-1)$, 则认为 d_i 与 d_j 为同一类 $D_k, (1 \leq k \leq p)$, 将:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{h=1}^D d'_h}{D} \quad (5)$$

作为绝缘子之间的真实距离, 其中 $D = \arg \max_{D_k} D_k, (k = 1, 2, \dots, p), D$ 表示集合 D 中元素的个数。令 $n_i = \text{round}(d_i / \bar{d})$, 其中 $\text{round}(t)$ 表示与 t 最接近的整数, 若 $n_i \geq 2$, 则认为绝缘子 I_i 与 I_{i+1} 之间存在脱落。并且脱落绝缘子个数为 $n_i - 1$ 。从该方法描述可以看出, 若脱落现象很严重, 则 \bar{d} 的计算不准确, 该判断方法可能不适用, 此时需要依据经验人为设定 \bar{d} 。但这种情况并不多见, 即使存在也很容易判断存在脱落现象。

本文算法的流程图如图 1。

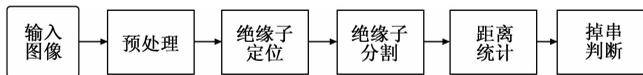


图 1 本文算法流程图

4 实验结果与分析

本文使用大量含有绝缘子的图像作为训练样本, 实验是在 windows 7 环境下, 编译软件为 Visual Studio 2010 和 matlab 2012 (b) _ , 电脑配置为 Intel core i7 - 4790 CPU @ 3.6 GHz, 8 核。

图 2 是本文算法对绝缘子脱落的检测结果。图 2 (a) 是原始图像, 从图中可以看出, 图像中含有两个绝缘子串, 并且还有导线、植被等复杂背景。图 2 (b) 是利用 GLOH 描述子定位出的含有绝缘子的区域, 可以看出虽然定位出的区域内含有少量背景, 但基本上包含了所有绝缘子, 为后续的绝缘子分割奠定了较好的基础。图 2 (c) 是利用统计形状模型分割出的单个绝缘子, 从图中可以发现, 绝缘子串中的单个绝缘子均

得到了准确的提取, 用红色框标出。从图 2 (c) 中容易发现若相邻两个绝缘子之间若存在脱落现象, 则这两个绝缘子之间的距离会成倍地增加, 根据 3.2 节中的判断方法, 两个绝缘子串中绝含有 23 个绝缘子, 经过对分割出的绝缘子的位置进行分析、计算, 最终检测出脱落 1 个绝缘子, 如图 2 (d) 所示, 脱落位置用蓝色框标出。图 3 是其他两组实验检测结果, 图 3 (a) 所示绝缘子串中脱落 2 个绝缘子, 图 3 (b) 所示绝缘子串中脱落 3 个绝缘子, 脱落情况均得到了正确的检测。

从上述实验可以看出, 如果直接从图像中去检测绝缘子, 图像中的复杂背景会干扰检测, 而绝缘子定位可以有效去除大部分的干扰背景, 绝缘子串中的绝缘子大部分情况下都是同类型的绝缘子, 这是利用统计形状模型分割绝缘子的先决条件, 从实验中可以看出, 统计形状模型能够准确地分割出绝缘子, 同时绝缘子串中的绝缘子呈直线状排列, 这为计算绝缘子之间的距离提供了方便, 在分割出绝缘子之后, 依据绝缘子的位置计算绝缘子中心之间的距离, 通过距离可以判断出是否脱落情况, 若存在脱落情况, 也可以计算出脱落多少个绝缘子。

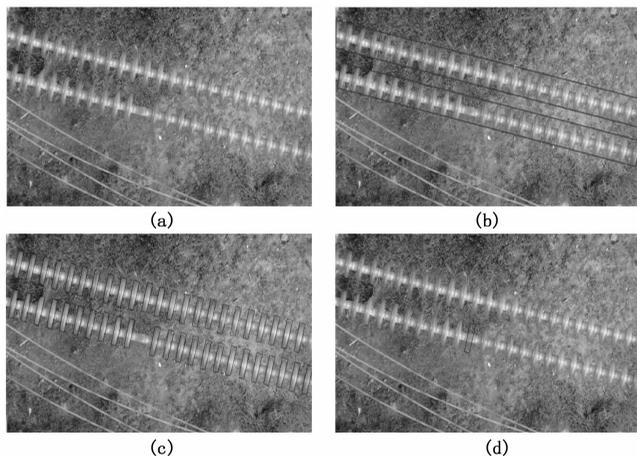


图 2 绝缘子脱落检测过程

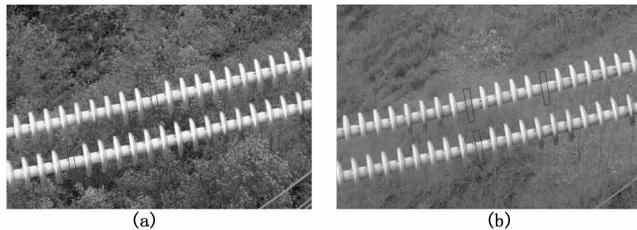


图 3 绝缘子脱落检测结果

5 结论

绝缘子检测是电力传输系统中非常重要的问题, 本文提出了一种基于统计形状模型绝缘子“掉串”检测算法, 该算法首先对输入图像进行预处理, 提取感兴趣的目标区域; 然后利用 GLOH 描述子来精确定位绝缘子, 再利用统计形状模型在图像分割方面的优势来精确分割绝缘子; 最后对分割出的绝缘子的位置进行分析、计算, 依据绝缘子中心之间的距离来检测绝缘子是否存在脱落现象, 该算法融合了 GLOH 描述子、K-means 聚类分析方法、形状统计模型等技术, 实验结果也证实了本文算法的有效性。

(下转第 34 页)