

基于周期性结构特征的绝缘子掉片检测算法

王海涛, 龚浩, 王乐希, 冯智慧, 梁文勇

(国网电力科学院 武汉南瑞科技有限责任公司, 武汉 430074)

摘要: 目前, 目标检测已于广泛应用于飞行器定位与导航、汽车自动驾驶、工业自动化控制以及产品质量监测等领域; 然而, 对于不仅具有平移、尺度、旋转和光照变化, 而且具有纹理和形态变化的目标检测仍然面临很大的挑战, 根据绝缘子相邻伞裙间距的不变性特点, 提出了一种绝缘子的掉片缺陷检测新算法, 首先, 采用基于直方图的自适应分割方法, 提取绝缘子区域图像, 并进行水平倾斜校正, 然后, 利用灰度归一化相关匹配方法, 估计绝缘子几何结构的周期性参数, 最后, 利用灰度归一化相关匹配方法, 检测绝缘子掉片位置; 针对无人机巡检的 809 张缺陷绝缘子数据集, 绝缘子掉片检测的准确率和召回率分别达到 95.8% 和 91.9%。与现有的缺陷检测方法相比, 其优点是不需要事先利用大样本进行统计学习, 对尺度、旋转、光照、背景以及绝缘子种类的变化均具有很强的适应性。

关键词: 周期性结构特性; 水平几何校正; 彩色直方图匹配; 绝缘子缺陷检测

An Algorithm of Detecting Insulator Piece Missing Based on Periodic Structural Features

Wang Haitao, Gong Hao, Wang Lexi, Feng Zhihui, Liang Wenyong

(Wuhan Nanri Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: At present, target detection has been widely used in the fields of aircraft positioning and navigation, auto vehicle driving, industrial automation control and product quality monitoring. However, it still faces great challenges for detecting some targets with various texture and geometric shape as well as different translation, scale, rotation, and illumination. According to the distance invariance between two adjacent umbrellas in an insulator, this paper presents a novel algorithm of detecting the lost umbrellas of an insulator. Firstly, an image of insulator regions is extracted using an adaptive histogram-based segmentation method (ACHS), and its horizontal tilt is corrected. Secondly, the periodic parameters of the geometric structure of insulators are estimated by gray normalized correlation matching method. Finally, gray normalized correlation matching method is also used to detect the position of missing pieces of insulators. This proposed method is tested on 809 data set captured from unmanned aerial vehicle inspection, the accuracy and recall of the insulator drop detection are 95.8% and 91.9%, respectively. Compared with the existing methods of fault detection, the advantage of this method is that there is no need to use large samples for statistical learning in advance and it has strong adaptability to the changes of scale, rotation, illumination, background and the variety of insulators.

Keywords: periodic structure characteristics; horizontal geometric correction; color histogram matching; insulator defect detection

0 引言

绝缘子作为输电线路固定和绝缘的重要部件。由于其长期工作于强电场、机械应力、污秽及温湿度等复杂恶劣环境, 经常出现内部裂缝、表面破损、绝缘阻抗降低及污闪等现象, 进而造成电网停电事故。因此, 自动检测绝缘子的服役状态, 及时发现绝缘子异常, 对保障输电网络的安全运行具有重要的应用价值。

目前, 绝缘子缺陷检测方法主要有在线检测和离线检测两大类^[1-3], 其中, 在线检测主要有紫外脉冲法、电磁波法、声发射法和泄漏电流法等, 该类检测方法不需要停运

电力系统, 大大减少了维护的工作量和登高检测的危险, 但在线检测系统规模大, 建设的硬件成本; 而离线检测包括观察法、电压分布检测法、敏感电阻检测法、电场分布检测法、红外成像检测、紫外成像检测、超声波检测、激光多普勒振动、计算机断层扫描、当值盐密法、表面污层电导率检测法、微波辐射法以及憎水性图像检测法等, 离线检测不仅巡检工作量巨大, 检测效率低, 而且登高检测也存在一定的安全隐患^[1-3]。近年来, 随着航空拍摄测量技术、机器视觉技术以及计算机技术的快速发展, 出现了直升机或无人机电力线路巡检系统, 极大地提高了巡检的工作效率。然而实际应用中, 由于绝缘子种类多、结构复杂、视点、光照以及所处环境复杂多变, 绝缘子及其缺陷的图像特征是复杂多变的, 绝缘子缺陷异常检测精度低, 对于航拍绝缘子巡检图像, 仍主要靠人工进行绝缘子定位和异常检测, 自动化和智能化程度低^[3], 因而, 如何从线路场景图像中快速、准确的检测绝缘子异常已成为电力巡检技

收稿日期: 2018-01-18; 修回日期: 2018-02-23。

作者简介: 王海涛(1977-), 男, 山东文登人, 硕士, 高工, 主要从事输电线路雷电监测与线路运智能维技术的研究和工程应用工作。

术研究的热点和难点。

1 相关研究工作

近年来,绝缘子及其缺陷图像检测技术研究已成为国内外电力系统巡检应用研究的热点。绝缘子及其缺陷图像检测主要包括绝缘子及其缺陷特征选择、抽取、目标分割和识别 4 个处理步骤。针对航拍巡检图像,阳武将绝缘子缺陷检测当作目标分类问题,提出了基于差异特征的绝缘子区域分割和基于稀疏化差异深度置信网络(D-DBN)的绝缘子及缺陷分类方法^[3],绝缘子及缺陷的分类正确率达到 92.98%,提高了绝缘子缺陷检测对光照、尺度、旋转变化的适应性,其缺点是不能明确给出绝缘子缺陷的位置;赵振兵根据绝缘子轮廓线的几何结构特点,提出一种基于 Hough 检测和轮廓 C-V 模型的绝缘子图像协同分割方法^[4],首先,利用 Hough 检测方法,解决输电线与绝缘子的粘连问题,然后,利用 SLIC 超像素分割和 GHT 广义霍夫变换选取 C-V 模型的初始轮廓,最后,根据航拍绝缘子图像帧之间的关系,利用基于帧间图像 C-V 模型的绝缘子协同分割方法,抑制了背景、杆塔以及输电线等伪目标干扰;高俊平根据绝缘子区域的纹理和形态特点,提出了一种基于不变矩特征 Adaboost 分类器的绝缘子定位和基于相邻绝缘子欧氏距离的缺陷检测方法^[5],绝缘子自爆点缺陷检测的准确率达到 87%;陈庆根据绝缘子图像的深度稳定特征,提出了一种航拍图像绝缘子卷积神经网络检测方法^[6],首先利用自组织特征映射网络,实现绝缘子区域的显著性检测,然后,通过超像素分割和轮廓检测的绝缘子建模,提出一种绝缘子的自爆故障识别算法,绝缘子检测的精度达 90% 以上,自爆缺陷识别准确率达 85% 以上。针对红外图像绝缘子检测应用,文献 [8] 提出了红外图像深度卷积特征图和支撑向量机的绝缘子检测方法,实验结果达到了 93% 的检测精度;文献 [9] 利用 FPGA 电路实现技术,设计了一种高压绝缘子探测机器人检测系统,提高了绝缘子检测的速度;文献 [10] 针对航拍巡检,采用 HOG 特征、LBP 特征和 PCA 主分量分析方法,提出了特征融合的绝缘子检测算法,提高了复杂背景下的绝缘子检测能力;此外,文献 [11] 利用多尺度局部特征和空间秩序,也提出了一种航拍图像的鲁棒的绝缘子检测方法。然而由于实际应用中绝缘子所处背景、类型、视点、姿态以及光照复杂多变,绝缘子及其缺陷的纹理和形态特征也千变万化,完备的绝缘子图像训练样本制备困难,绝缘子缺陷检测的正确率较低,导致传统的基于绝缘子及其缺陷浅层稳定特征人工设计提取方法和基于绝缘子及其缺陷深度特征的绝缘子缺陷识别方法均难以满足实际无人机巡检应用的需要。

本文将根据绝缘子结构的对称性和伞裙间距的周期性具有尺度、旋转、光照以及背景变化不变的特点,提出一种基于彩色直方图的输电线路场景图像绝缘子掉片检测算法,首先,采用基于彩色直方图的自适应分割方法,提取绝缘子区域图像,并进行水平倾斜校正,然后,利用归一

化彩色直方图匹配方法,估计绝缘子几何结构的周期性参数,最后,利用归一化彩色直方图周期性异常,检测绝缘子掉片的位置,以提高检测对背景、类型、视点、姿态以及光变化的适应性。

2 基于彩色直方图的绝缘子分割与倾斜校正算法

由于绝缘子的类型,所处背景、视点、姿态以及光照等复杂的多变性,绝缘子的图像纹理和几何形态会出现很大的变化,因而如何快速、准确地提取和识别绝缘子的稳定不变特征,已经成为国外学者研究的热点和难点。在绝缘子航拍巡检实践中,我们发现单个绝缘子的组成材料相同,区域呈狭长条形态,其图像纹理不仅具有很好的相似性,而且,与其邻近背景具有很大的差异性,因此,本文将根据具有尺度、旋转和光照变化不变的归一化彩色直方图统计特征,利用基于直方图自适应聚类的分割方法,粗略地提取绝缘子区域,然后,针对提取的绝缘子区域,估计和校正绝缘子图像的水平倾斜失真,以提高绝缘子种类、尺度、旋转、光照以及所处背景变化条件下绝缘子缺陷检测的精确性和鲁棒性。

2.1 彩色直方图的相似性评估方法

假设 H_1, H_2 分别为两个直方图统计特征, $H_1 = \{h_{11}, h_{12}, \dots, h_{1N}\}$, $H_2 = \{h_{21}, h_{22}, \dots, h_{2N}\}$, 其维数均为 N 。考虑到同一幅绝缘子图像中光照比较均匀,绝缘子伞裙图像不仅分布均匀,而且,与其背景存在着显著的差异,因而本文采用去均值归一化互相关方法,来计算两彩色直方图间的相似性度量:

$$D = \text{dis}\{H_1, H_2\} = \frac{\sum_{i=1}^N (h_{1i} - \bar{h}_1)(h_{2i} - \bar{h}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (h_{1i} - \bar{h}_1)^2 \sum_{i=1}^N (h_{2i} - \bar{h}_2)^2}} \quad (1)$$

2.2 基于彩色直方图自适应聚类的绝缘子分割算法

2.2.1 绝缘子子区域的直方图初始化

如图 1 所示,一般情况下绝缘子的长宽比大于 4。假设绝缘子图像的长度和宽度分别为 L 和 W , 直方图统计的子块大小为 $d \times d$, 其大小为,

$$d = \min\left\{\frac{L}{4}, \frac{W}{4}\right\} \quad (2)$$

假设绝缘子彩色图像的 RGB 分量都是 8 比特的分辨率。考虑到人眼对颜色分辨率较低,在彩色直方图统计时,本文采用颜色分辨率处理技术,使单分量直方图统计的维数为 32, 则子区域的彩色直方图统计可得到 $32 \times 3 = 96$ 维的特征矢量,以绝缘子图像中心 4 个子块 A、B、C、D 作为绝缘子区域的候选子块,其直方图统计特征做均值平滑滤波处理后作为绝缘子区域的统计特征 h_i , 以与其距离最大的图像子块直方图统计特征作为背景特征 h_b 。

2.2.2 基于彩色直方图最近自适应聚类的绝缘子分割算法

首先,以上述 h_i 和 h_b 两个直方图特征计算绝缘子和背

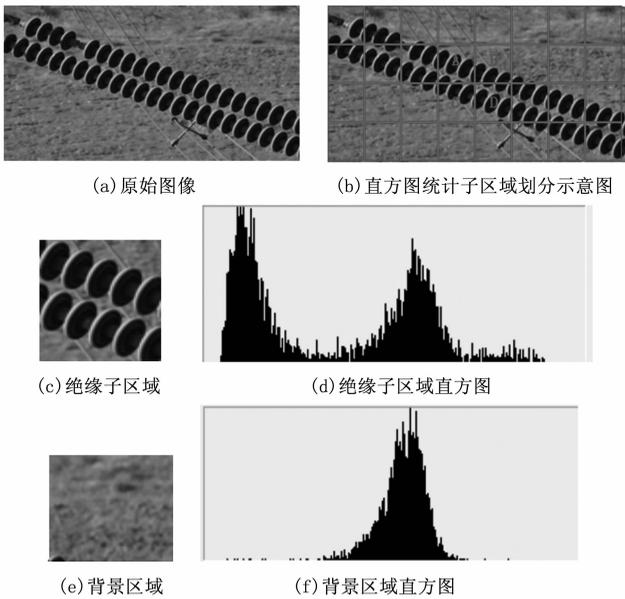


图 1 绝缘子图像各子区域直方图统计特征分析

景的初始类中心 m_1, m_b ,

$$\begin{cases} m_1 = \int_0^{255} h_1(x) dx \\ m_b = \int_0^{255} h_b(x) dx \end{cases} \quad (3)$$

设定聚类分析判别门限为,

$$Th_d = |m_1 - m_b| / 4 \quad (4)$$

再对绝缘子图像各子区域进行最近邻聚类分析。如果 $D_1 = dis\{h_1, h_1\}$ 和 $D_b = dis\{h_1, h_b\}$ 小于 Th_d , 则将该子区域判断为较小者的类; 如果 $D_1 = dis\{h_1, h_1\}$ 和 $D_b = dis\{h_1, h_b\}$ 均大于 Th_d , 则将该子区域判断为未分类子区。然后, 再对所有已分类的子区作直方图统计, 得到更新后的 h_1, h_b, m_1, m_b ; 然后, 将未分类子区分成成分子区, 再对绝缘子图像各未分类子区域进行最近邻聚类分析。如果 $D_1 < D_b$, 将该子区域判定属于绝缘子区域, 否则为背景区域。图 2 为基于彩色直方图最近自适应聚类的绝缘子分割结果图像。

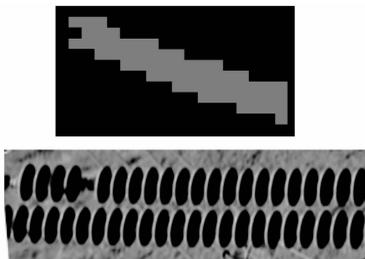


图 2 基于彩色直方图自适应聚类的绝缘子分割和校正结果

2.3 绝缘子区域的倾斜估计与校正算法

针对上述提取的绝缘子区域分割结构, 利用连通域分析方法, 提取最大的连通区域, 然后, 利用最小外接矩形方法, 估计绝缘子区域最小外接矩形的中心坐标、长度、

宽度和水平倾斜姿态角度 $\theta^{[7]}$, 最后, 再利用旋转变换公式 (5) 和双线性差值方法进行水平倾斜失真校正。图 3 为校正后的绝缘子彩色图像。

$$\begin{cases} x' = x \cos\theta + y \sin\theta \\ y' = -x \sin\theta + y \cos\theta \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

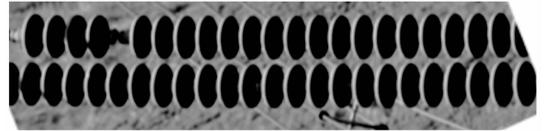


图 3 校正后的绝缘子彩色图像

3 基于灰度归一化相关匹配的绝缘子掉片检测算法

3.1 绝缘子子区域图像的初始化

首先针对校正后的绝缘子彩色图像, 计算整体直方图统计特征; 然后, 将绝缘子彩色图像水平均匀分成个子段区域, 取与整体直方图统计特征最相似的子段作为匹配的参考子区域。图 4 给出了正常区域和缺陷区域的原始图像和直方图。

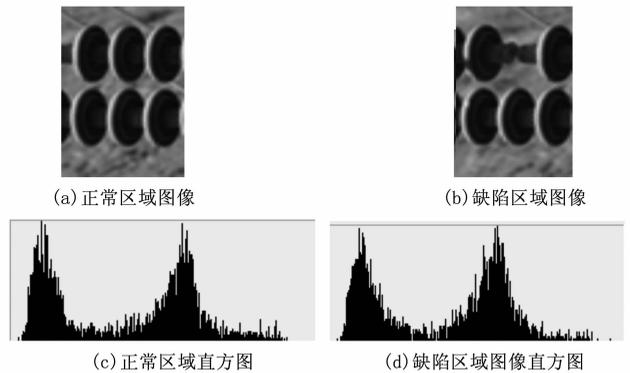


图 4 绝缘子不同部位直方图统计特征

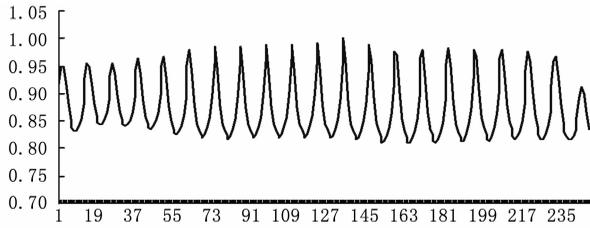
3.2 基于灰度归一化相关匹配的相似性估计

首先, 计算参考子区域的直方图统计特征 h_r ; 然后, 针对校正后的绝缘子彩色图像, h_r 作为匹配的参考特征沿水平方向进行相关匹配, 估计水平方向的直方图匹配的相关函数曲线 $c(x)$, 取相关函数门限 t_p 为 0.8, 并按照下式 (6) 得到相关函数峰值曲线 $c_p(x)$,

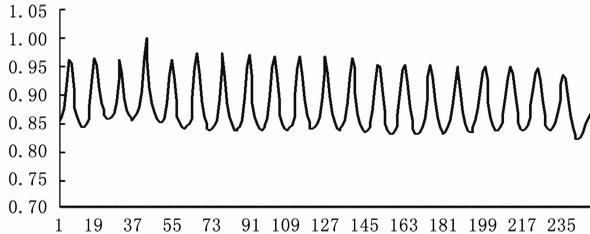
$$c_p(x) = \begin{cases} c(x) & c(x) > t_p \\ 0 & c(x) \leq t_p \end{cases} \quad (6)$$

针对相关函数曲线 $c_p(x)$ 进行平滑滤波处理, 得到平滑后的相关函数曲线。图 6 (a) 为正常子块图像直方图匹配的相关函数曲线, 图 6 (b) 为异常子块图像直方图匹配的相关函数曲线。从图中可以看出, 与正常子块相比, 异常子块的相关函数最大值显著高于其他周期性的峰值, 此外, 利用局部极大值点检测方法, 还可以计算出各个相邻相关峰之间的距离, 进而估计相关峰值间的周期均值 m_d ,

它可作为周期异常的判别门限。



(a) 正常子块的归一化互相关函数曲线



(b) 异常子块的归一化互相关函数曲线

图 6 基于直方图匹配的相关函数曲线

3.3 绝缘字伞裙间距周期异常检测

首先，根据 m_d 的大小，选择周期异常检测匹配参考子块，然后，计算相邻相关峰的间距 d_i ，并以 d_i 的平均值 m_d 作为绝缘字伞裙间距判别门限 t_d ，即有， $t_d = 1.5 m_d$ 。若 $d_i > t_d$ ，则判断该位置出现绝缘字伞裙间距周期异常。图 7 基于直方图匹配的缺陷检测结果。

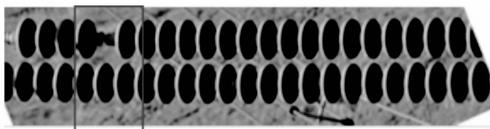


图 7 基于直方图匹配的缺陷检测结果

4 实验结果与分析

我们针对几种不同场景下巡检无人机航拍采集到的 809 张含绝缘子缺陷的图片数据，利用本文提出的算法进行绝缘子缺陷检测试验。即首先，利用基于彩色直方图自适应聚类的绝缘子分割算法进行绝缘子图像分割，并利用绝缘子区域的倾斜估计与校正算法对绝缘子区域进行水平几何失真校正（如图 3 所示）；然后，从校正后的绝缘子区域图像中左、中、右部分选择 3 个子块（如图 4 所示），并分别利用这 3 个子块从左到右移动滑动串口，利用基于灰度归一化相关匹配的相似性估计算法，计算各子块的归一化互相关函数曲线（如图 6 所示），从 3 个相关曲线中选择周期性良好的作为基准，再根据归一化互相关函数曲线估计相邻相关峰的平均间距 d_i ；最后，利用相应的子块以平均间距 d_i 搜索校正后的绝缘子区域图像；当相邻灰度相关峰值之间的间距大于 1.5 倍平均间距 d_i 时，则认为该相邻灰度相关峰值之间出现绝缘子周期性异常。针对几种不同场景下巡检无人机航拍采集到的 809 张含绝缘子缺陷的图片数据，成功检测出缺陷 775 张，漏检 34 张，准确率和召回率

分别达到了 95.8% 和 91.9%，与传统的基于绝缘子及其缺陷浅层稳定特征人工设计提取方法和基于绝缘子及其缺陷深度特征的绝缘子缺陷检测方法相比，本文提出的方法利用了绝缘子伞裙间距的周期性深度稳定特征，绝缘子缺陷检测的漏检率低，不仅对尺度、旋转、光照以及背景变化具有良好的适应性，而且，对不同类型绝缘子的纹理和形态变化也具有很好的适应性，可满足高压输电线路巡检实际应用的需要。

表 1 绝缘子爆片缺陷检测对比 %

| | 准确率 | 召回率 |
|-------|------|-------|
| 文献[3] | 92 | — |
| 文献[5] | 87 | — |
| 文献[6] | 85 | — |
| 本文方法 | 95.8 | 91.90 |

5 结论

本文根据绝缘子结构的对称性和伞裙间距的周期性具有尺度、旋转、光照以及背景变化不变的特点，提出一种基于彩色直方图的绝缘子掉片检测算法，首先，采用基于彩色直方图的自适应分割方法，提取绝缘子区域图像，并进行水平倾斜校正，然后，利用绝缘子伞裙间距的周期性结构特点，利用归一化彩色灰度匹配方法，估计绝缘子几何结构的周期性参数，最后，利用归一化彩色灰度相关匹配的周期性异常，来检测绝缘子掉片的位置。其优点是不需要事先利用大样本进行统计学习，就可准确检测绝缘子掉片的位置，缺陷检测处理速度快、精度高，不仅提高了尺度、旋转、光照、背景变化条件下绝缘子掉片检测的适应性，而且对绝缘子种类的纹理和形态多样性变化也具有极强的适应性。

参考文献:

[1] 朱 虎, 李卫国, 林冶, 绝缘子检测方法的现状与发展 [J]. 电瓷避雷器, 2006, 214 (6): 13-17.

[2] 马世伟, 张 鑫, 范兴明, 等, 电力绝缘子检测方法及其应用现状 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2013, 33 (6): 456-460.

[3] 阳 武, 基于航拍图像的绝缘子识别与状态检测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

[4] 赵振兵, 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.

[5] 商俊平, 基于视觉的绝缘子定位与自爆缺陷检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (6): 844-849.

[6] 陈 庆, 航拍绝缘子卷积神经网络检测及自爆识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31 (6): 942-953.

[7] Toussaint G. Solving geometric problems with the rotating calipers [A]. Proceedings of IEEE MELECON' 83 [C]. Athens, Greece, 1983: 1-8.

[8] Zhao Z B, Fan X Q, Xu G Z, et al. Aggregating deep convolutional feature maps for insulator detection in infrared images [J]. IEEE Access, 2017, 5: 21831-21839.

(下转第 221 页)