

航拍图像中绝缘子缺陷的检测与定位

方 挺 韩家明

(安徽工业大学电气与信息工程学院 马鞍山 243000)

摘 要 长期暴露在自然环境下的绝缘子易产生自爆缺失故障,对此提出了一种绝缘子缺陷检测和定位的图像处理方法。依据绝缘子在航拍图像中的形态特征,采用最大类间方差法以及中值滤波进行图像预处理,提出基于粒子群优化参数的蚁群算法来检测其中的绝缘子轮廓及其数目,最终在原图中标记出缺陷绝缘子所在位置的目的。该方法针对简单背景下绝缘子缺陷的标记具有良好的效果,并为进一步实现复杂背景下绝缘子缺陷检测和定位提供了预研基础。

关键词 最大类间方差法,粒子群算法,蚁群算法,绝缘子缺陷检测和定位

中图法分类号 TP391.4 文献标识码 A

Detection and Localization of Insulator Defects in Aerial Images

FANG Ting HAN Jia-ming

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China)

Abstract The insulator is easy to result in self-shattering fault if exposed in the natural environment for long time. For this situation, this paper presented an image processing method for insulator defect detection and location. Based on the pattern characteristics of insulator in aerial image, the between-cluster variance method and median filtering were used to preprocess the image. The ant colony algorithm with optimized parameters obtained by particle swarm optimization algorithm was proposed to detect the contour and number of insulator in the aerial image. At last, the location of defective insulator was marked in the original image. This method has good effect for defective insulator detection under simple background, and establishes pre-research foundation to realize insulator defect detection and localization under complex background.

Keywords Between-cluster variance method, Particle swarm optimization algorithm, Ant colony algorithm, Insulator defect detection and location

1 引言

电力线路走廊需要经常穿越山川河流,传统的人力巡线已经很难满足要求。一些发达国家将无人机巡线技术投入到电力设备的日常维护中,这样可以大大降低巡线周期及误检率^[1]。我国山东省于 2013 年率先实现了无人机巡线常态化,针对无人机巡检中较难解决的精确定位问题,南京航空航天大学杨忠教授研发的旋翼无人机精确视觉定位定向方法^[2]在无人机输电线路巡检工作中也取得了良好的实验效果。

在无人机输电线路巡检中,基于图像处理的绝缘子缺陷检测和定位是较为新颖的技术手段,文献^[3]提出基于边缘链码的玻璃绝缘子形状识别方法,能快速排除大量正常玻璃绝缘子图片,但该文并未对有故障的绝缘子图片进行研究,文献^[4]提出在图像的 S 空间中运用最佳熵阈值方法进行图像分割的方法,该方法在图像预处理的过程中会带来大量噪声,不利于后期绝缘子轮廓的提取以及缺陷的定位。

椭圆形的绝缘子单体在输电线路中呈等间距串状排列,

本文基于其外型特点,提出一种基于粒子群优化参数的蚁群算法检测其中绝缘子的轮廓,通过改进传统蚁群算法的信息素更新及挥发率更新公式,使用粒子群调用蚁群算法迭代的方式训练出蚁群算法概率转移公式中的参数,最终在提取航拍图像中绝缘子轮廓的同时以遍历各轮廓连通域之间距离的检测方式实现了在原图中标记出缺陷绝缘子所在位置。

2 航拍图像预处理

大部分航拍图像都以颜色统一、色调相似的块状农田和山川湖泊为主,利用其色度和色调信息更有利于目标与背景的区别,分别对航拍图像的 H 分量及 S 分量图像采用最大类间方差法^[5]处理,经中值滤波后将两幅图像做“与”运算,可获取绝缘子外型初步轮廓。最大类间方差法在 $0 \sim m-1$ 预设灰度范围内对图像进行处理,灰度为 i 的出现概率为 p_i ,灰度均值为 μ ,假设存在灰度阈值 T 能将图像中目标与背景分离为 $G_0 = \{0 \sim T-1\}$ 和 $G_1 = \{T \sim m-1\}$ 两个灰度区间,且 G_0 出现的概率为 w_0 , G_1 出现的概率为 w_1 ,那么两区间平均灰

本文受国家自然科学基金资助项目(51007002)资助。

方 挺(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail:flyting-69@163.com;韩家明(1990—),男,硕士生,主要研究方向为模式识别与智能系统,E-mail:564908510@qq.com(通信作者)。

度 μ_0, μ_1 以及方差 $\delta^2(T)$ 为:

$$\begin{cases} \mu_0 = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} i p_i}{\sum_{i=0}^{T-1} w_0} = \frac{\mu(T)}{w(T)}, \mu_1 = \frac{\mu - \mu(T)}{1 - w(T)} \\ \delta^2(T) = w_0 (\mu_0 - \mu)^2 + w_1 (\mu_1 - \mu)^2 \end{cases} \quad (1)$$

随着 T 在预设灰度范围内的变化, 求解出 $\max \delta^2(T)$, 此时的 T 值即为最佳分割阈值。

图 1(a)、(b) 为未经处理的原航拍图像, 图 1(c)、(d) 所示分别为经过图像预处理后初步得到的绝缘子轮廓。

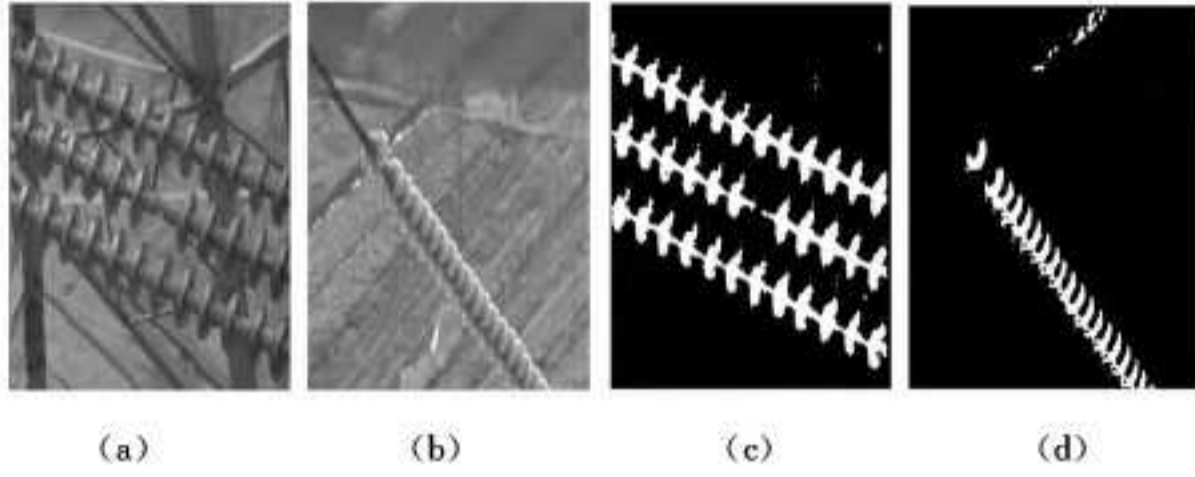


图 1 图像与经图像预处理后的图像

3 基于粒子群优化参数的蚁群算法在绝缘子轮廓提取中的应用

传统蚁群算法随机放置 num 个蚂蚁在图像的像素点上, 并按照转移概率的大小对下一步运动进行决策^[6], 即:

$$P_{(m,n)(l,f)}^{(t+1)} = \frac{(\tau_{l,f}^{(t)})^\alpha \cdot (\eta_{l,f})^\beta}{\sum_{(l,f) \in \Omega(m,n)} (\tau_{l,f}^{(t)})^\alpha \cdot (\eta_{l,f})^\beta} \quad (2)$$

其中, t 为迭代次数, (m,n) 为蚂蚁当前所在像素点, (l,f) 代表以 (m,n) 为中心点的 8 邻域像素, $\Omega(m,n)$ 为所有 8 邻域像素集合, $\eta_{l,f}$ 为点 (l,f) 处的启发函数, $\tau_{l,f}^{(t)}$ 表示点 (l,f) 处信息素强度大小, α 以及 β 分别为信息素强度和启发函数的权重因子。

一次迭代过程中, 每只蚂蚁都会发生移动, 并在新的位置产生信息素, 蚂蚁从 (l,f) 点移动到 (m,n) 点局部路径信息素更新的公式是:

$$\begin{aligned} \tau_{(m,n)(l,f)}(t+1) &= (1-\xi) \tau_{(m,n)(l,f)}(t) + \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}(t) \\ \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}(t) &= \sum_{k=1}^{num} \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}^{(k)}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\xi \in [0, 1]$ 为信息素挥发率, $\Delta \tau_{(m,n)(l,f)}^{(k)}(t)$ 为蚂蚁 k 在该次迭代中释放的信息素总量, $\Delta \tau_{(m,n)(l,f)}(t)$ 为该次迭代中所有途径 (m,n) 至 (l,f) 路径上蚂蚁释放的信息素总量。

每次迭代发生时, 所有的蚂蚁都按照式(2)计算出的概率最大方向移动, 并且每条路径上的局部信息素都按照式(3)产生一次更新。当人为地指定迭代次数 t 执行完毕或现有适应度到达某一值后, 由最终生成的信息素矩阵计算出图像分割的阈值, 将需要的边缘从中提取出来。传统的蚁群算法运算周期较长, 并且容易在局部产生最优伪解。本文基于上述情况, 将传统蚁群算法进行改进, 并综合提出一种基于粒子群优化参数的蚁群算法用于提取航拍图像中绝缘子的轮廓。

一幅 $M \times N$ 大小的航拍图像最多可以放下等像素量只蚂蚁, 然而蚂蚁越多就会造成每次迭代的时间越长, 在实际处理中可以选用 $num = (M/2) \times (N/2)$ 只蚂蚁, 将算法启动初始值设为一个大于零的极小值即可, 本文设 $\tau_0 = 10^{-3}$ 。

目标轮廓边缘部分灰度变化较为剧烈, 以每只蚂蚁所在位置 (m,n) 处的灰度梯度值 $\nabla I(m,n)$ 作为启发引导函数,

记为:

$$\eta(m,n) = c \star \nabla I(m,n) \quad (4)$$

其中, c 为放大系数。

为了防止搜索陷入局部最优伪解, 采用精英策略来处理最差路径上蚂蚁释放的信息素, 同时放大最优路径上的蚂蚁释放的信息素浓度, 这样可以将误检为轮廓上的信息素量降到最低, 从而增加轮廓检测的准确率, 按照上述思想优化后的局部信息素更新公式为:

$$\begin{aligned} \tau_{(m,n)(l,f)}(t+1) &= (1-\xi(t)) \tau_{(m,n)(l,f)}(t) + \sum_{k=1}^{(M/2) \times (N/2)} \\ &\quad \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}^{(k)}(t) + \Delta^1 \tau_{(m,n)(l,f)}(t) - \\ &\quad \Delta^2 \tau_{(m,n)(l,f)}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Delta^1 \tau_{(m,n)(l,f)}(t) = \phi(t) \star \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}^{(k)}(t) / L_1 \quad (6)$$

$$\Delta^2 \tau_{(m,n)(l,f)}(t) = \varphi(t) \star \Delta \tau_{(m,n)(l,f)}^{(k)}(t) / L_2 \quad (7)$$

式(5)~式(7)中, $\Delta^1 \tau_{(m,n)(l,f)}(t)$ 和 $\Delta^2 \tau_{(m,n)(l,f)}(t)$ 分别为局部最优路径以及局部最差路径上产生的信息素总量, $\phi(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别为本次迭代中走过最优路径 L_1 上和最差路径 L_2 上蚂蚁的数量。在初始化时, 可将挥发率初始值 $\xi(0)$ 设为一个相对较大并且随时间衰减的值, 这样算法即可实现全局搜索下的快速收敛, 挥发率衰减方程如下:

$$\begin{aligned} \xi(t+1) &= \frac{\text{MAX}(\Delta \tau_{(m,n)(l,f)}(t)) - \text{MIN}(\Delta \tau_{(m,n)(l,f)}(t))}{t_n} \star \\ &\quad \xi(t) + J \\ J &= \begin{cases} \frac{\sum_{t=0}^{t_n} \xi(t+1) - \xi(t)}{t}, & t \geq 1 \\ 0, & t = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

其中, t 和 t_n 分别为算法当前循环次数和算法期望循环次数, J 为挥发率修正值。

针对尚未确定的参数 α, β , 使用粒子群算法^[7,8]对上述改进的蚁群算法进行参数训练优化。

步骤 1: 初始化 i 个随机解向量 $\theta_i = (\alpha_i, \beta_i)$ 作为随机粒子, 将其视为一个点在二维空间中的位置, 设置 i 与蚂蚁的个数相等, 即 $i = (M/2) \times (N/2)$, 其中第 i 个随机粒子拥有自己的速度矢量 $v_i = (v_{\alpha_i}, v_{\beta_i})$ 。

步骤 2: 每个粒子通过调用 f 次蚁群算法进行训练, f 为递增的正实数, 记第 i 个粒子经一次迭代后可得到其最优的粒子位置为 P_{best} , 此时整个粒子群所找到的最优粒子位置为 G_{best} , 该粒子在每次迭代中更新自己的空间位置和速度的标准为:

$$\begin{aligned} v_i(f+1) &= \omega v_i(f) + c_1 s_1 (P_{best} - \theta_i(f)) + \\ &\quad c_2 s_2 (G_{best} - \theta_i(f)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta_i(f+1) = \theta_i(f) + v_i(f+1)$$

其中, ω 为惯性权重, 常数 c_1, c_2 分别决定了一个粒子选择 P_{best} 或 G_{best} 的倾向, 常数 s_1, s_2 为 $[0, 1]$ 内相互独立的随机数, 在实验中设置 $f_{max} = 15$ 进行实验。

步骤 3: 当粒子调用蚁群算法检测绝缘子轮廓且运动更新达到最大迭代次数 f_{max} 或再次迭代的结果与上次迭代结果一致时则停止迭代, 此时以寻找到的轮廓长度最小为标准, 更新变量 G_{best} 并做记录, 同时返回该粒子的空间位置 $\theta_i(f) = (\alpha_i, \beta_i)$ 。

步骤 4: 更换粒子再次重复上述步骤 2、步骤 3, 最终得到

的 G_{best} 即为最优粒子群位置,此时针对整个粒子群所找到的信息素浓度矩阵图像使用最大类间方差法选择最佳分割信息素浓度阈值,经阈值分割后即可得到绝缘子轮廓。

该算法的流程如图 2 所示。

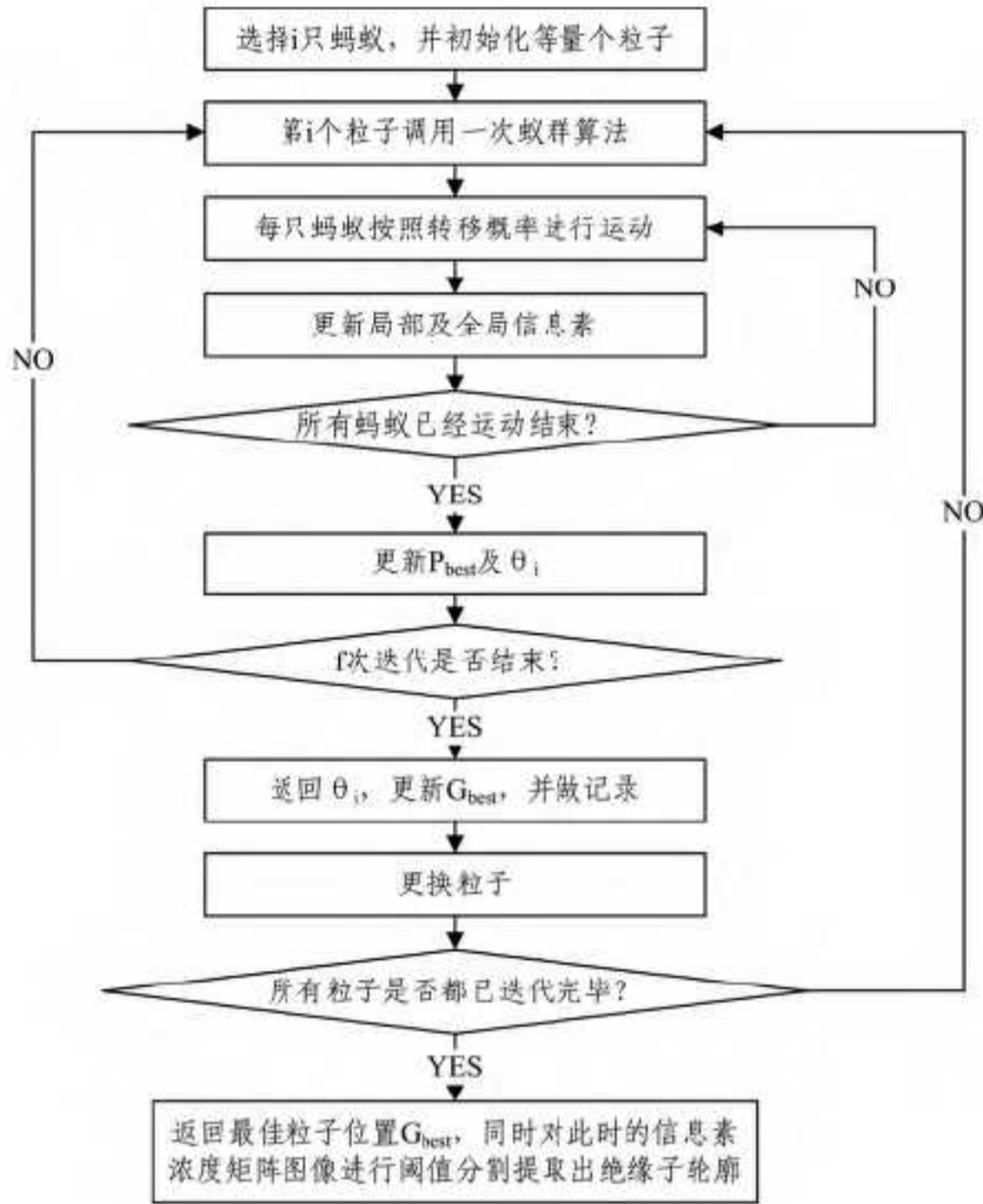


图 2 本算法流程

图 3(a)、(b) 分别为算法运行结束后提取出的绝缘子轮廓,遍历每个绝缘子轮廓的中心点坐标及长短轴长度,利用最小二乘椭圆拟合法对绝缘子轮廓进行椭圆拟合^[9],并设置变量用以计算图像中连通域数目^[10],绝缘子轮廓椭圆拟合图像见图 3(c)、(d),表 1 所列为固定粒子数量 ($i = (M/2) * (N/2)$) 下选取不同的迭代次数 f 后训练出的 α 、 β 值及训练所需时间。

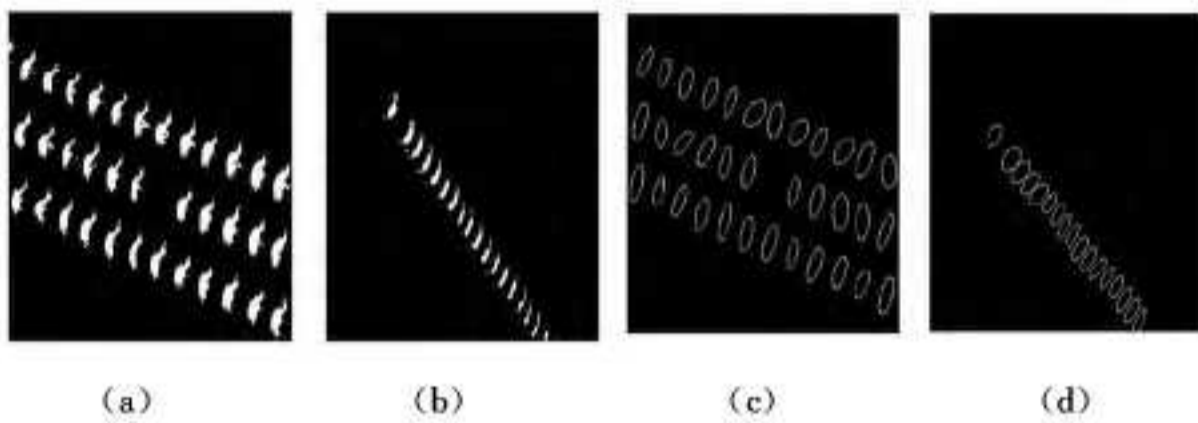


图 3 粒子群寻找到的绝缘子轮廓及其椭圆拟合图像

表 1 固定粒子数量下选取不同的迭代次数 f 后训练出的 α 、 β 值及训练所需时间

训练次数 (f)	α 值	β 值	训练时间 (ms)	是否产生 局部最优伪解
3	0.228	0.436	387.2	是
4	0.671	0.592	822.3	否
5	0.935	1.188	1030.5	否
6	1.267	1.560	1622.7	否
7	1.328	2.099	2358.1	否
8	1.589	2.427	3123.2	否
9	1.967	2.931	3730.8	否
10	2.438	3.391	4914.7	是
11	2.709	3.809	5092.8	是

分析表 1 可以看出,当选取 $f \in [4, 9]$ 、 $\alpha \in [0.671,$

$1.967]$ 、 $\beta \in [0.592, 2.931]$ 范围内时算法实时性较好,且不易产生局部最优伪解,有利于绝缘子轮廓的提取。

4 缺陷标记

绝缘子成串排列,同串绝缘子单体之间间距相等,可以采用检测相邻绝缘子之间间距的方式来检测绝缘子缺陷,过程如下。

步骤 1: 由于绝缘子成等间距串状排列,且相邻绝缘子串的斜率 k 相同,利用 hough 变换^[11] 拟合出 3 条直线分别表示 3 条平行的绝缘子串。

$$y = \begin{cases} k_1 x + b_1 \\ k_2 x + b_2 \\ k_3 x + b_3 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $k_1 = k_2 = k_3$ 。

遍历图 3(a) 中绝缘子轮廓中心坐标点,并将同一直线上的绝缘子中心坐标存储到数组 $A[x][y]$ 、 $B[x][y]$ 、 $C[x][y]$ 中,同时分别计算图 3(a) 中各绝缘子轮廓宽度之和以及高度之和并求取平均值,作为单个绝缘子轮廓宽度和高度的参考值,将宽度参考值记为 D ,高度参考值记为 H 。

步骤 2: 将同一直线上的绝缘子轮廓中心点 x 坐标按照冒泡排序法依次从小到大排列,并按照式(11)计算出相邻绝缘子之间的间距 R :

$$R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \approx \lambda D \quad (11)$$

若 $\lambda > 1$ 则说明相邻绝缘子 $A[x_1][y_1]$ 和 $A[x_0][y_0]$ 之间存在 λ 个绝缘子缺失,此时根据相邻绝缘子坐标求取其间 λ 个伪绝缘子中心位置,并按宽度参考值 D 、高度参考值 H 在原图中绘制出缺陷绝缘子轮廓。

步骤 3: 依次遍历 3 个数组 $A[x][y]$ 、 $B[x][y]$ 、 $C[x][y]$, 求出缺陷位置及缺陷个数。

图 4 所示为 Windows XP 系统下基于 QT 软件的绝缘子缺陷检测与定位处理平台,图 4(a) 为航拍原图,图 4(b) 为处理后的图片,同时列出了检测到的绝缘子总数为 35,绝缘子缺陷总数为 1。

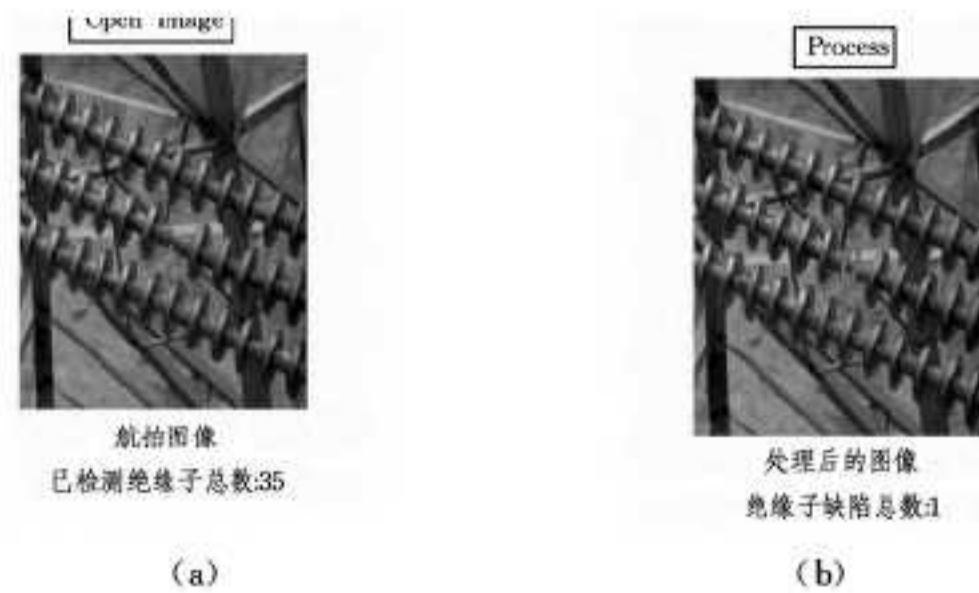


图 4 处理平台

结束语 绝缘子的自爆缺失故障检测的实时性和高效性关系到整个电网运行的稳定性,本文针对航拍图像中绝缘子自爆缺失的情况提出了一种基于粒子群优化参数的蚁群算法检测其缺陷数量及缺陷位置实验表明,该算法针对简单背景下航拍图像绝缘子缺陷的检测和定位具有较好的效果,并为下一步将其投入工程应用打下了基础。

参考文献

[1] 吴光亚. 我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J]. 电磁避雷

器,2010,4(2):7-11

[2] 胡国雄,杨忠.旋翼无人机精确视觉定位定向方法,中国, CN104298248A[P]. 2015-01-21

[3] 林聚财,韩军,陈航明,等.基于彩色图像的玻璃绝缘子缺陷诊断[J]. 电网技术,2011,35(1):127-133

[4] 姚春雨,金立军,闫书佳.电网巡检图像中绝缘子的识别[J]. 系统仿真学报,2012(9):1818-1822

[5] 程中.基于改进的最大类间方差算法的图像分割研究[J]. 计算机科学,2009,36(5):276-278

[6] Huang Lan, Zhou Chun-guang, Wang Kang-ping. Hybrid ant colony algorithm for traveling salesman problem[J]. Progress in Natural Science,2003,13(4):295-299

[7] Van den BERGH F. An analysis of particle swarm optimizers

[D]. Pretoria;University of Preteria,2001

[8] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C] // Proc. of the IEEE Conf. on Neural Networks, IV. Perth: IEEE Press,1995:1942-1948

[9] Lei Zhi-shu, Zhang Yan-bo. Oval shaped curve fitting problem of several new algorithms [J]. Journal of Shanghai jiaotong, university,2002,8:1210-1210

雷志术,张雁波.椭圆定形曲线拟合问题若干新型算法[J]. 上海交通大学学报,2002,8:1210-1213

[10] 张修军,郭霞,金心宇.带标记矫正的二值图像连通域像素标记算法[J]. 中国图象图形学报,2003,8(2):198-202

[11] 黎自强,腾弘飞.广义 hough 变换,多个圆的快速随机检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2006,18:27-33

(上接第 186 页)

图像提前与对应的参考图像进行配准,并预处理为二值图像。检测结果如图 10 所示,各种缺陷均被检出。

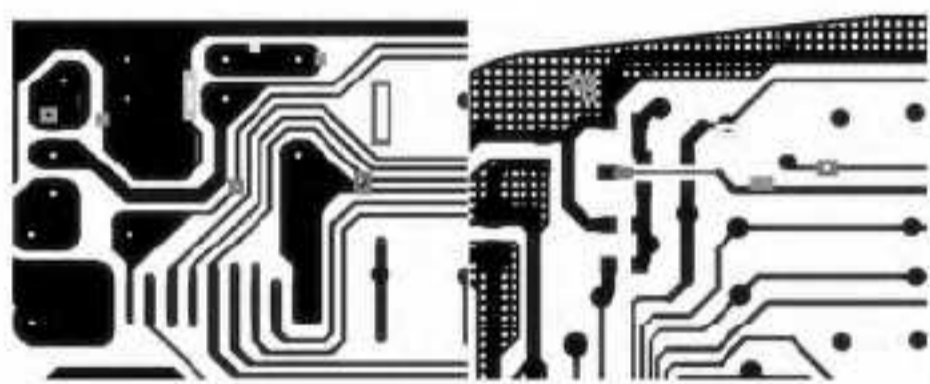


图 10 缺陷检测及类型识别结果

图中对不同类型的缺陷分别进行了标记,缺陷具体参数如表 2 所列。

表 2 缺陷具体参数

编号	缺陷外接矩形 rect=x,y,w,h	类型	编号	缺陷外接矩形 rect=x,y,w,h	类型
1	175,133,24,24	8	1	210,98,22,21	8
2	247,145,11,14	6	2	224,98,22,21	8
3	355,90,11,58	4	3	224,112,22,21	8
4	434,48,18,11	1	4	271,215,18,12	1
5	414,233,14,18	5	5	392,162,33,17	4
6	518,61,12,18	6	6	437,233,29,11	3
7	571,226,27,25	2	7	525,212,18,11	1
8	589,111,29,74	10			

结束语 实验证明了该算法能够检测出 PCB 图像中的各种缺陷,并能对缺陷类型进行自动识别,具有简单直观、检测速度快、检测结果可以量化分析和缺陷分类准确等优点。而且检测结果受光照变化和图像配准精度低等因素的影响小,算法鲁棒性较强。

参 考 文 献

[1] Tatibana M H, Lotufo R, de A. Novel Automatic PCB Inspection Technique Based on Connectivity[C] // Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing,1997. 1997:187-194

[2] Moganti M, Ercal F, Dagil C H, et al. Automatic PCB Inspection algorithms: A survey[J]. Computer Vision and Image Under-

standing,1996,6(2):287-313

[3] Lin Li-zong, Zhou Luo-shan, Wan Jian-ding, et al. Study of PCB Automatic Optical Inspection System Based on Mathematical Morphology[C] // International Conference on Computer Technology and Development. 2009:405-408

[4] Guo Feng-lin, Guan Shu-an. Research of the Machine Vision Based PCB Defect Inspection System[C] // International Conference on Intelligence Science and Information Engineering. 2011: 472-475

[5] Kaur B, Kaur G, Kaur A. Detection and classification of Printed circuit board defects using image subtraction method[C] // Recent Advances in Engineer and Computational Sciences (RAECS). 2014:1-5

[6] Putera S H I, Ibrahim Z. Printed circuit board defect detection using mathematical morphology and MATLAB image processing tools[C] // IEEE 2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer (ICETC). 2010:359-363

[7] 刘尚军,程宪平. PCB 瑕疵图象实时视觉检测方法的研究[J]. 计算机工程与应用,2002,16:71-74

[8] 熊邦书,熊振姣,莫燕,等.线路板缺陷的图像检测方法[J]. 半导体光电,2012,33(2):303-306

[9] Kumar M, Singh N K, Kumar M, et al. A Novel Approach of Standard Data Base Generation for Defect Detection in Bare PCB [C] // IEEE International Conference on Computing, Communication & Automation (ICCCA). 2015:11-15

[10] Ibrahim Z, Al-Attas S A R, Aspar Z. Analysis of the wavelet-based image difference algorithm for PCB inspection[J]. IEEE Proceedings of the 41st SICE Annual Conference,2002,4(5-7): 2108-2113

[11] Soille P. Morphology Image Analysis(2 edition)[M]. Berlin: Springer-Verlag,2003

[12] Ma Can, Mao Jian-xu, Mao Jian-ping. Research and Develop on PCB Defect Intelligent Visual Inspection Robot[C] // Symposium on Photonics and Optoelectronics (SOPO). 2012:1-4