

# 基于色彩模型和纹理特征的输电线路 绝缘子串航拍图像识别

唐波<sup>1</sup>, 覃乔<sup>1</sup>, 黄力<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002)

**摘要:**随着智能电网的建设, 电网公司逐渐采用无人机(UAV)代替人工去巡视输电线路。提出一种对 UAV 拍摄到的输电线路绝缘子串航拍图像进行处理的方法。首先, 利用色彩模型中 RGB 各分量阈值和范围分割出目标和背景区域; 然后, 用数学形态学和不重叠窗口纹理特征的方法粗略标记目标区域; 最后, 生成最小外接水平矩形框, 并对所有最小外接水平矩形框内的图案进行纹理特征识别, 定位出绝缘子串航拍图像的最小水平矩形区域。该文用 2 幅图像进行算法验证, 并与文献算法进行对比, 结果显示该文算法能更好地识别出绝缘子串位置。

**关键词:**绝缘子串; 色彩模型; 最小外接水平矩形框; 灰度共生矩阵; 数学形态学

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.002 中图分类号:TM726 文章编号:1673-9140(2020)04-0013-07

## Transmission line aerial image recognition of insulator strings based on color model and texture features

TANG Bo<sup>1</sup>, QIN Qiao<sup>1</sup>, HUANG Li<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** With the construction of smart grid, power companies gradually use unmanned aerial vehicles (UAV) to replace manual inspection of transmission lines. This paper proposes a method for processing aerial images of transmission line insulators captured by UAV. Firstly, the threshold and range of RGB components in the color model are used to segment the target and background areas. Secondly, mathematical morphology and non-overlapping window texture features are applied to roughly mark the target area. Finally, a minimum circumscribed horizontal rectangular frame is generated. Then the texture features of all the patterns within the minimum circumscribed horizontal rectangular frame are identified to locate the minimum horizontal rectangular area of the aerial image of the insulator string. In the end, we use two images to verify the algorithm and compare with the algorithms in the literature. The results show that the algorithm proposed in this paper can better identify the position of insulator strings.

**Key words:** insulator string; color model; minimum external horizontal rectangular box; gray level co-occurrence matrix; mathematical morphology

收稿日期:2017-12-01;修回日期:2018-05-10

基金项目:梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学)资助(2018KJX09);湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)资助(2019KXL05)

通信作者:黄力(1980-),男,博士,讲师,主要从事输电线路工程、输电线路设备故障的智能检测等研究;E-mail:huangli@ctgu.edu.cn

绝缘子串是柔性悬挂输电线的组件,它具有电气绝缘和承担荷载的功能,既可以让导线与杆塔和大地绝缘,也能悬挂支撑导线,在输电线路中有着非常重要的地位。同时,绝缘子串大量投用到电网的各种电压等级线路上,数量极其庞大。传统检测绝缘子串方法是靠输电运检人员用望远镜在地面观测或登塔后近距离接触绝缘子串,这些传统方法费时、耗力,且有一定的安全隐患。随着科技的发展,近年来输电运检人员操控无人机(UAV)代替传统人工方式巡检已成趋势,从航拍图像中识别绝缘子串区域位置是实现绝缘子串故障智能诊断的前提,已有不少学者对航拍绝缘子串识别做了大量的研究,现有的绝缘子串识别方法主要有4类。

基于阈值分割的方法。文献[1]提出了基于协同随机游走的航拍绝缘子串协同分割方法;文献[2]提出用脉冲耦合神经网络(PCNN)来识别航拍绝缘子串图像;文献[3]提出结合遗传算法和最佳熵阈值法去分割饱和度分量图像;文献[4]的粗分割结合了Lab空间和灰度图。虽然这些文献的算法可以成功识别出绝缘子串,但阈值需要依靠人工去设定,给检测过程中增加了一些人工操作。

基于纹理特征的方法。文献[5]提出了活动轮廓模型纹理分割法,该方法对同型号绝缘子串图像识别较好,但对纹理性不明显的绝缘子串分割欠佳,且算法依赖人工确定初始轮廓,耗时较长,且绝缘子数量过多时识别效果不好;文献[6]对原图预处理,再用改进边缘直方图去提取绝缘子串纹理信息,该算法可有效地识别绝缘子串,但算法学习中必须要有大量轮廓清晰的样本图片,且样本图片中绝缘子串的位置对结果有影响。

基于特征点的方法。文献[7]提出同化核分割最小值算法(SUSAN)来表征绝缘子,先后用霍夫变换、随机采样一致性和边缘跟踪器进行粗细定位;文献[8]用尺度不变特征变换(SIFT)识别绝缘子串;文献[9]提取模板和待测图像的加速稳健特征(SURF)识别航拍绝缘子串图像。但SUSAN在处理存在形变目标时效果较差,易误判,SIFT描述子维数高,增加了计算量,同时描述子维数低的SURF过于依赖样本图像库。

基于形状特征的方法。文献[10]用线性不变

矩、形状、小波特征结合神经网络识别绝缘子;文献[11]用支持向量机(SVM)识别绝缘子。但这些方法需要大量样本学习,且识别速度较慢。文献[12]用灰度特征识别瓷绝缘子,但在绝缘子片不完整或是存在复杂背景时识别欠佳;文献[13]用二值形状来识别绝缘子,但算法对多串不同方位的绝缘子串难以精确定位,且计算量大。

在利用形状特征去识别绝缘子串的方法中,需要大量、清晰的绝缘子串样本,训练样本需要很长的时间;在找寻特征点去识别绝缘子串的方法中,绝缘子串航拍图像受UAV拍摄角度和拍摄距离的影响,图像中绝缘子串形状的改变会影响识别效果,且算法计算量大,还需要样本图像库。因此,该文考虑结合阈值和纹理的方法,采取先利用RGB各分量范围及关系滤除掉部分背景后标注,用数学形态学去噪,再用不重叠窗口划分二值图,对每块的图案与目标进行纹理特征对比,滤掉纹理特征相差大的区域,然后生成区域的最小外接水平矩形框,对框内图案进行纹理特征判别,标记出与目标纹理特征相近区域,最终识别出绝缘子串图案。

## 1 相关算法原理

### 1.1 色彩模型阈值选取

人眼感知物体的色彩是由反射光的特性决定的。图像处理中常用的色彩模型主要有RGB、HSV、Lab、YCbCr、HSI等<sup>[14]</sup>。其中RGB空间是由色彩发光原理设计,它把所有颜色看作3种原色的组合。人眼有3种锥体细胞,分别对红色、绿色、蓝色敏感。自然界中的所有颜色都可以通过混合3种不同比例的原色来构建。RGB模型转换为其他模型需要经过平方根和三角函数等操作,从而增加更多的计算量。直接利用RGB色彩模型运算速度最快,可以尽最大可能地满足实时性要求。

该文中UAV采集到的是彩色图像,尺寸为4 000像素×3 000像素,水平和垂直分辨率均为180 dpi,24位深度。在设定阈值中,包括R、G、B各分量在0~255之间的区间范围,以及分量两两之间的大小关系。

$$\sum_{i=1}^N \frac{R_{\min}(i)}{N} < r < \sum_{i=1}^N \frac{R_{\max}(i)}{N} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{G_{\min}(i)}{N} < g < \sum_{i=1}^N \frac{G_{\max}(i)}{N} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{B_{\min}(i)}{N} < b < \sum_{i=1}^N \frac{B_{\max}(i)}{N} \quad (3)$$

$$|r - g| \leq T_{rg} \quad (4)$$

$$|r - b| \leq T_{rb} \quad (5)$$

$$|g - b| \leq T_{gb} \quad (6)$$

式(1)~(6)中  $r, g, b$  分别为航拍图像中红、绿、蓝 3 种颜色分量;  $R, G, B$  的最大、最小值为历次 UAV 采集到的图像中指定铁塔上绝缘子串的三分量值;  $N$  为历次采集图像的总次数;  $i$  为采集的第  $i$  幅图像;  $T_{rg}, T_{rb}, T_{gb}$  分别代表红绿、红蓝、绿蓝之间差的绝对值的阈值。

在巡视指定铁塔上的绝缘子串时,可参考历次 UAV 采集到的图像,对新采集的航拍图像中  $r, g, b$  三分量阈值设定考虑历史巡视记录,即可滤掉部分背景,将剩下的区域标注。

## 1.2 纹理特征识别

纹理具有普遍性和多样性,与图像亮度和色彩特征无关,但反映了图像同质性。局部图案纹理具有周期性和随机性,并按照一定的规律排列<sup>[15-16]</sup>。因此,该文利用不同图案纹理的差异性来识别目标。

采用数学形态学处理图像后,小背景及噪声等在非目标处已减少,但为了精确地找到目标,首先进行不重叠窗口分块,对每块图案计算纹理特征值,与目标纹理特征对比,在删去差异大的二值区域后,由最终区域得到若干最小外接矩形<sup>[17]</sup>。考虑到超高压输电线路工程中铁塔上的绝缘子串大多是水平和铅垂位置安装,最小外接水平矩形框能够很好地定位出绝缘子串的整体,而少数绝缘子串的位置有所倾斜,采用最小外接水平矩形框使得下一步的纹理特征识别水平框内图案更加实时高效。因此,采用最小外接水平矩形框代替最小外接矩形框是可行的。如图 1 所示,最小外接矩形  $EFGH$  框住了内部

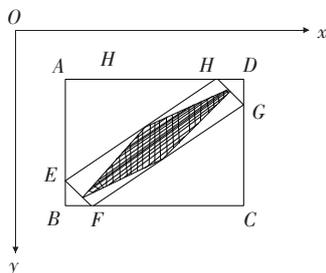


图 1 水平框示意

Figure 1 Sketch map of horizontal frame

的目标阴影形状,而最小外接水平矩形框  $ABCD$  进一步框住了内部的最小外接矩形框  $EFGH$ 。

图案纹理可由纹理特征来表征,而常用的特征提取方法有统计法、模型法、几何法等。该文采用灰度共生矩阵(GLCM)的纹理特征分析方法,用到了能量、对比度、相关性和均匀度 4 个特征值。

GLCM 严格的数学定义:从图像灰度值为  $i$  的像元  $(x, y)$  出发,统计与其距离为  $d$ 、灰度值为  $j$  的像元  $(x+a, y+b)$ ,同时,频度  $P(i, j, d, \theta)$  的数学表示可以理解为

$$G(K, Q) = \sum_{x=1}^v \sum_{y=1}^v P\{A=K \& B=Q\} \quad (7)$$

$$A = I_{(i,j)}(x, y)$$

$$B = I_{(i,j)}(x - d \sin \theta, y + d \cos \theta)$$

式中  $i, j$  为窗口位置;  $x, y$  为每一个窗口内的具体坐标;  $K, Q$  代表某一对数字;  $v$  为窗口的大小;  $I$  为原图像;  $G$  为某窗口灰度共生矩阵的灰度级数。这里的窗口是指把原图像分块成很多不重叠的矩形块。

GLCM 的生成与窗口的大小  $n$ 、方向  $\theta$ 、距离  $d$  以及灰度级数  $G$  相关,影响计算复杂度和分类性能。 $n$  大将使计算量和存储量大,但小的窗口很难包含完整的纹理性。该文在处理最终的二值区域时,将最小外接水平矩形框作为窗口的矩形大小。 $\theta$  为灰度共生矩阵的生成方向,即点点连线与坐标轴的夹角,该文考虑了  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  这 4 个角度。粗糙纹理用较小距离、平滑纹理用较大距离会有较好的表征效果,该文  $d$  取 1。灰度级决定 GLCM 的计算规模,其计算复杂度为  $O(G^2)$ 。灰度级小可提高计算速率,且恰当的灰度级数还可降低图像噪声,但过小的灰度级数会破坏纹理的某些成分,该文对二值图纹理识别时  $G$  取 2,灰度图纹理识别时  $G$  取 16。

根据 Haralick 等人的定义,GLCM 共有 14 个可用于纹理分析的特征,但在其中只有能量(ASM)、对比度(CON)、相关性(COR)、均匀度(IDM)4 个特征是互不相关的,它们能很好地描述纹理特征<sup>[18-19]</sup>。

ASM 反映图像灰度的均匀性和纹理的粗细情况。能量变小,则灰度变的更加均匀,纹理也变细

致;反之灰度分布更加集中,纹理也变粗糙。其公式为

$$ASM = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} [P(i, j, d, \theta)]^2 \quad (8)$$

CON 反映纹理的沟纹深浅和图像明晰度。对比度变大,则纹理的沟纹变深,图像越清楚;反之则沟纹浅,图像不清楚。其公式为

$$CON = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} (i-j)^2 P(i, j, d, \theta) \quad (9)$$

COR 反映共生矩阵元素在行或列方向上的相似度。当矩阵元素值相等时,相关值就大,否则相关值就小。其公式为

$$COR = \frac{\sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} ijP(i, j, d, \theta) - \mu_i \mu_j}{S_i S_j} \quad (10)$$

$$\mu_k = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} kP(i, j, d, \theta), k = i, j \quad (11)$$

$$S_k = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} P(i, j, d, \theta) (k - \mu_k)^2, k = i, j \quad (12)$$

IDM 反映图像纹理的局部变化大小。均匀度大则表明纹理不同部分间变化缓慢,即局部均匀性强。其公式为

$$IDM = \sum_{i=0}^{G-1} \sum_{j=0}^{G-1} \frac{P(i, j, d, \theta)}{1 + (i-j)^2} \quad (13)$$

式(8)~(13)中的  $i$  和  $j$  是灰度共生矩阵的坐标位置,  $G$  是图像的灰度级。

通过在色彩 RGB 模型中设定阈值过滤掉部分背景区域后,对最小外接水平矩形框内图案进行纹理特征判定,可以成功识别出航拍图像中的绝缘子串矩形区域。

## 2 该文算法

随着智能电网的发展,省检修公司人员在巡视超特高压输电线路时,通过 UAV 拍摄到的绝缘子串图像来判断绝缘子串运行状况。为了识别出输电线路复合绝缘子串图像的位置,该文提出的算法步骤如下:

1) 工作人员操控 UAV 采集指定铁塔上的复合绝缘子串航拍图像,将图像缩小为原图像的 0.2 倍。

2) 参考历次采集的航拍图像记录,计算出  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三分量的最大和最小值的平均值,定为该次识

别绝缘子串相应分量的区间范围(式(1)~(3));并结合设定分量两两之间的差值关系(式(4)~(6))进行阈值分割,标注有可能是绝缘子串的区域。

3) 利用数学形态学中的开启、闭合、填充进一步处理步骤 1 中的二值图<sup>[20]</sup>。对二值图先腐蚀后膨胀的运算叫开启运算,顺序相反的运算为闭合运算。膨胀是指将某图像的像素添加到图像中一个物体的边缘,从而填充对象中的孔洞。腐蚀是删除物体的边缘轮廓,可以用来消除图像中的小面积点的干扰<sup>[21]</sup>。

在数学中,膨胀运算符为  $\oplus$ ,用  $B$  对  $A$  进行膨胀可以记为  $A \oplus B$ ,其定义为

$$A \oplus B = \{x \mid [(\hat{B})_x \cap A] \neq \emptyset\} \quad (14)$$

式中  $\hat{B}$  为集合  $B$  的反射;  $(\hat{B})_x$  为对  $B$  的反射进行位移  $x$ 。

在边界内以某点开始进行区域填充,并将二值图像中的一值扩散到整个图像区域。其定义为

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A^c, k = 1, 2, \dots \quad (15)$$

在数学中,腐蚀运算符是  $\ominus$ ,用  $B$  对  $A$  进行腐蚀可以记为  $A \ominus B$ ,其定义为

$$A \ominus B = \{x \mid (B)_x \subseteq A\} \quad (16)$$

表明用  $B$  集合腐蚀的过程就是对  $B$  集合进行平移运算  $x$ ,结果是  $B$  集合平移  $x$  后仍在  $A$  集合中。

在数学形态学处理二值图后,过滤掉了部分干扰背景和噪声区域,同时将小面积对象去除,得到了新的二值图。

4) 对新的二值图进行不重叠窗口的分块,如图 2 所示,该文划分成  $20 \times 20$  个窗口,对每个图案计算其灰度共生矩阵 4 个特征值,与目标图案的灰度共生矩阵 4 个特征值进行对比,删减掉与目标图案差别大的窗口内的二值图案,得到新的二值图。

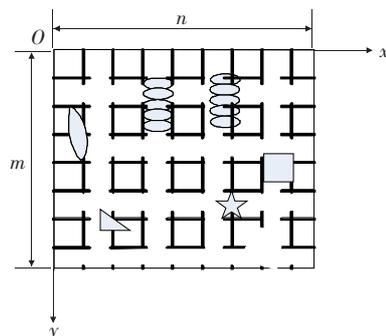


图 2 不重叠窗口示意

Figure 2 Sketch map of non-overlapping window

5)用最小外接水平矩形框框出步骤 4 中生成的二值图。

6)计算相应绝缘子串在样本图像库中的纹理特征值,包含 ASM、CON、COR、IDM 在  $\theta=0^\circ、45^\circ、90^\circ、135^\circ$  时的特征值,共计 16 个,记为  $YASM(\theta)、YCON(\theta)、YCOR(\theta)、YIDM(\theta)$ 。

7)计算步骤 5 中各最小外接水平矩形框内图案的 16 个纹理特征值,记为  $ASM_i(\theta)、CON_i(\theta)、COR_i(\theta)、IDM_i(\theta)$ , $i$  代表最小外接水平矩形框的序号, $\theta=0^\circ、45^\circ、90^\circ、135^\circ$ 。

8)比较步骤 6、7 的 16 个纹理特征值,设阈值为  $T_1、T_2、T_3、T_4$ ,只保留符合阈值条件的最小外接水平矩形框内的图案,采用公式:

$$|ASM_i(\theta) - YASM(\theta)| \leq T_1 \quad (17)$$

$$|CON_i(\theta) - YCON(\theta)| \leq T_2 \quad (18)$$

$$|COR_i(\theta) - YCOR(\theta)| \leq T_3 \quad (19)$$

$$|IDM_i(\theta) - YIDM(\theta)| \leq T_4 \quad (20)$$

9)在原航拍彩色图像中显示步骤 8 中保留的最小外接水平矩形框。

该文分别以大地和天空为背景,采集 2 幅含有绝缘子串的航拍图像验证算法的合理性,如图 3 所示。



(a)图像 1(以大地为背景)



(b)图像 2(以天空为背景)

图 3 以大地、天空为背景的绝缘子串航拍图像 1、2

Figure 3 Result map of insulator strings aerial images 1 and 2 under the background of the earth and sky

### 3 数据结果分析

通过比较文献[3]、[4]和该文算法结果,可以看出,文献[3]、[4]得到的结果中还有一部分背景区域,目标绝缘子串区域提取的效果也不太好,有遗漏部分绝缘子片的情况;而该文算法中的结果不仅没有背景区域,且目标绝缘子串全部提取成功。对比提取的绝缘子串串数、遗漏的绝缘子片片数,结果如表 1、2 所示,其中,航拍图像 1、2 中的串数均为 2,绝缘子片数分别为 27、34。

文献[3]、[4]在处理特定图像时能够收到满意的识别结果,但从表 1、2 中可以看出,在识别 2 个航拍图像时,文献中算法对航拍图像的处理效果不如该文算法,该文算法得到的数据结果非常好。因此,该文算法有一定的通用性和工程实用价值。

同时,在分析该文具有提取效果更优的现状下,应给出该文算法的进一步评价标准,先构建出标准数据,然后与算法得到的计算结果进行定量比较,其中,涉及到的物理量包括水平矩形框的竖直宽、水平宽、中心点坐标,并与标准数据进行对比,得到误差率。在航拍图像 2 中,由计算可知第 1、2 矩形框在同一个铅垂位置上,因此,可以合并与第 1 串标准位置进行对比,结果如表 3、4 所示。

表 1 利用文献中的算法与该文算法对航拍图像 1 进行识别的结果比较

Table 1 Comparison of the results of aerial images 1 using the algorithm in the literature and this paper

算法	串数/ 串	遗漏片 数/片	串数误 差率/%	片数遗 漏率/%
文献[3]	2	6	0	22.2
文献[4]	2	2	0	7.4
该文	2	0	0	0

表 2 利用文献中的算法与该文算法对航拍图像 2 进行识别的结果比较

Table 2 Comparison of the results of aerial images 2 using the algorithm in the literature and this paper

算法	串数/ 串	遗漏片 数/片	串数误 差率/%	片数遗 漏率/%
文献[3]	2	9	0	26.5
文献[4]	2	7	0	20.6
该文	2	0	0	0

表 3 该文算法处理图例 1 的数据

Table 3 Data of the algorithm dealings with legend 1

区域	标准竖 直宽/px	竖 直 宽/px	竖 直 宽 误差/%	标准水 平宽/px	水 平 宽/px	水 平 宽 误差/%	标准中 心坐标	中 心 坐标	标准中心与计 算中心间距/px
第 1 串	186	183.967 1	1.09	38	36.343 9	4.36	(314.0, 95.0)	(314.968 0, 96.655 6)	1.92
第 2 串	199	200.519 8	0.76	37	34.900 5	5.67	(419.5,100.5)	(419.982 0,101.083 0)	0.76

表 4 该文算法处理图例 2 的数据

Table 4 Data of the algorithm dealing with legend 2

区域	标准竖 直宽/px	竖 直 宽/px	竖 直 宽 误差/%	标准水 平宽/px	水 平 宽/ px	水 平 宽 误差/%	标准中 心坐标	中 心 坐标	标准中心与计 算中心间距/px
第 1 串	264	195 (第 1 矩形)	1.51	41 (第 1 矩形)	39 (第 1 矩形)	4.88 (第 1 矩形)	(381.5, 466)	(380.500 0, 465.500 0)	1.12
		73 (第 2 矩形)		41 (第 2 矩形)	39 (第 2 矩形)	4.88 (第 2 矩形)			
第 2 串	270	269.842 2	0.06	43	45.135 3	4.97	(491.5, 464)	(488.622 1, 465.078 9)	3.07

从表 3、4 中可以看出,用该文算法处理图例后得到的水平矩形框的竖直宽较精准,矩形框中心点与实际矩形框中心点距离接近,但水平矩形框的水平宽误差较大(在 5%左右)。

出现较大误差的原因:①在 RGB 模型阈值分割中,绝缘子串的侧面边缘部分处在目标与背景之间,由于受到光线或天气等的影响,这部分点的 R、G、B 三分量未满足阈值条件,被误判为背景剔除;②在标注可能是目标区域步骤前,对图像进行了数学形态学去噪,去噪的效果取决于结构元素类型和尺寸的选择,去噪的力度较大导致消去了一部分绝缘子串的边缘宽度,导致水平矩形框的水平宽于标准较小。

## 4 结语

该文提出了一种针对绝缘子串的航拍图像识别新算法,实现了航拍图像中绝缘子串的最小外接水平矩形框定位。在识别方法中,利用了基于色彩模型中 RGB 模型各分量的值,滤掉了部分背景;再用数学形态学和不重叠窗口纹理特征的方法对二值图进一步抑制噪声干扰,滤掉了部分与目标无关节区域;最后,在对所有的最小外接水平矩形框内的图案进行灰度图像的纹理特征对比,得到目标矩形框。该算法运算复杂度低、运算速度快。实验结果证明,该文提出的航拍绝缘子串图像识别算法快速有效。

但在处理绝缘子串与背景颜色相近区域较多的航拍图像时,得到的最小外接水平矩形框远大于真实绝缘子串的矩形区域。因此,对于靠色彩模型去识别绝缘子串矩形区域需要进一步改进,这也是今后需要深入研究的一个方面。

## 参考文献:

- [1] 徐磊. 基于超像素的航拍绝缘子图像协同分割方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] 郑涛. 基于 PCNN 的航拍绝缘子图像的分割及定位研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [3] 黄宵宁, 张真良. 直升机巡检航拍图像中绝缘子图像的提取算法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 194-197.  
HUANG Xiaoning, ZHANG Zhenliang. A method to extract insulator image from aerial image of helicopter patrol[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 194-197.
- [4] 王银立, 闫斌. 基于视觉的绝缘子“掉串”缺陷的检测与定位[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(2): 583-587.  
WANG Yinli, YAN Bin. Vision based detection and location for cracked insulator[J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(2): 583-587.
- [5] Wu Q G, An J B. An active contour model based on texture distribution for extracting inhomogeneous insulators from aerial images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3613-3626.
- [6] 李卫国, 叶高生, 黄锋, 等. 基于改进 MPEG-7 纹理特

- 征的绝缘子图像识别[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 65-68.
- LI Weiguo, YE Gaosheng, HUANG Feng, et al. Recognition of insulator based on developed MPEG-7 texture feature[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 65-68.
- [7] Zhang Jian, Yang Ruqing. Insulators recognition for 220 kV/330 kV high-voltage live-line cleaning robot [C]//The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR06), Hong Kong, China, 2006.
- [8] Zhao Z B, Liu N, Yuan Y P. The recognition and localization of insulators based on SIFT and RANSAC[C]//The 3rd International Conference on Multimedia Technology, Guangzhou, China, 2013.
- [9] Gui Y, Su A, Du J. Point-pattern matching method using SURF and Shape Context[J]. Optik, 2013, 124(14): 1869-1873.
- [10] Tong W G, Li B S, Pei Y L. Extraction and recognition of insulator based on aerial image[C]//IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering, Yichang, China, 2011.
- [11] Li B F, Wu D L, Cong Y, et al. A method of insulator detection from video sequence[C]//The 4th IEEE International Symposium on Information Science and Engineering, Shanghai, China, 2012.
- [12] Zhang X Y, An J B, Wu Q G. Method for recognizing insulator from airborne image[C]//The 5th IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Zhangjiajie, China, 2012.
- [13] 赵振兵, 王乐. 一种航拍绝缘子串图像自动定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 558-565.
- ZHAO Zhenbing, WANG Le. Aerial insulator string image automatic location method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 558-565.
- [14] 高飞. MATLAB 图像处理 375 例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- [15] 赵泉华, 高郡, 李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2519-2530.
- ZHAO Quanhua, GAO Jun, LI Yu. Multi-feature texture image segmentation based on tessellation technique[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2519-2530.
- [16] 颜志强. 毛竹竹片弦切面图像纹理特征分析与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [17] 裴伟, 王晓林. 基于图像信息的茶叶二维采摘坐标的提取[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(3): 522-527.
- PEI Wei, WANG Xiaolin. The two-dimension coordinates extraction of tea shoots picking based on image information[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, 28(3): 522-527.
- [18] 张宁, 潘如如, 高卫东. 采用图像处理的织物缝纫平整度自动评估[J]. 纺织学报, 2017, 38(4): 145-150.
- ZHANG Ning, PAN Ruru, GAO Weidong. Automatic seam-puckering evaluation using image processing [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(4): 145-150.
- [19] 方志坚, 傅仰耿, 陈建华. 纹理图像分类的置信规则库推理方法[J]. 应用科学学报, 2017, 35(5): 545-558.
- FANG Zhijian, FU Yanggeng, CHEN Jianhua. Belief rule base inference for texture image classification[J]. Journal of Applied Sciences, 2017, 35(5): 545-558.
- [20] 周臻, 陈冬林, 谢孝君. 燃烧器射流图像几何参数提取的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(2): 51-55.
- ZHOU Zhen, CHEN Donglin, XIE Xiaojun. Research on geometry parameter extraction for burner's jet images[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(2): 51-55.
- [21] 闫康, 汪佛池, 张重远. 基于 Canny 算子的复合绝缘子憎水性图像边缘检测[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(3): 45-49+56.
- YAN Kang, WANG Fochi, ZHANG Zhongyuan. Hydrophobic image edge detection for composite insulator based on Canny operator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(3): 45-49+56.