

一种高精度的光伏阵列红外图像分割算法

陈文勤, 郝慧杰, 肖建, 郭宇锋

(南京邮电大学 电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023)

摘要:随着化石能源短缺,且其燃烧带来的环境污染问题,清洁的太阳能发电得到更广泛的使用。然而光伏阵列长期处于恶劣环境中,导致光伏组件容易出现损坏。传统光伏故障检测方法效率较低、准确率不高,难以满足实际需求。因此在分析光伏阵列图像特征的基础上,提出基于光伏阵列区域局部灰度特征的高精度分割算法。通过使用 5×5 的滑动窗口计算 Gaussian 处理后的灰度图像的局部标准差,以此衡量局部灰度一致性,提取出灰度一致性高的区域。应用形态学膨胀处理所得区域,并使用基于尺寸的筛选方法去除孤立小区域,得到最终分割结果。实验结果表明,该算法对于光伏阵列的识别准确率达到96%以上,同时降低了背景区域的误检率。算法可精确、有效地分割出光伏阵列区域,分割效果优于边缘检测和 Otsu 算法。

关键词:红外图像;光伏阵列;图像分割;局部标准差;高精度

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2020)11-0153-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2020.11.028

A High-precision Photovoltaic Array Infrared Image Segmentation Algorithm

CHEN Wen-qin, HAO Hui-jie, XIAO Jian, GUO Yu-feng

(School of Electronic and Optical Engineering, School of Microelectronic, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the shortage of fossil energy and the environmental pollution caused by its combustion, clean solar power has been widely used. However, the photovoltaic array has been in a harsh environment for a long time, causing the photovoltaic modules to be easily damaged. Traditional photovoltaic fault detection methods have low efficiency and low accuracy, which is difficult to meet actual needs. Therefore, based on the analysis of the photovoltaic array image characteristics, we propose a high-precision segmentation algorithm based on local gray features of the photovoltaic array region. By using a 5×5 sliding window to calculate the local standard deviation of the gray image after Gaussian to measure local gray consistency, the regions with high gray consistency are extracted. Apply the morphological expansion process to the region obtained, and propose a size-based filtering method to remove the isolated small regions to obtain the final segmentation result. The proposed algorithm achieves a recognition accuracy of more than 96% for the photovoltaic array, while reducing the false detection rate of the background region. The algorithm can accurately and effectively segment the photovoltaic array region, and the segmentation effect is better than traditional algorithm, such as the edge detection and Otsu algorithm.

Key words: infrared image; photovoltaic array; image segmentation; local standard deviation; high precision

0 引言

随着太阳能电池使用量的不断增加,光伏阵列模块的发电和寿命已受到越来越多的关注,其中光伏热斑效应^[1]的检测尤为重要^[2]。目前常用的检测方法有两类:(1)基于太阳能电池片发电时的物理特性进行监控的检测方法^[3-4];(2)基于图像处理算法对红外图像中热斑进行识别。该文针对图像处理算法进行重

点研究和实现。

近年来,通过无人机搭载可见光、红外设备进行自动巡检获取热斑图像的方法得到较为广泛的使用^[5-6]。越来越多的科研人员将目光聚焦到了图像识别算法领域,通过外部手段监测光伏电池的运行状况。文献[7]在分析 Otsu 法和最大散度阈值法的基础上,提出自适应最大散度阈值差法。文献中经过多次图像

收稿日期:2019-12-16

修回日期:2020-04-17

基金项目:国家自然科学基金(61874059)

作者简介:陈文勤(1994-),男,硕士研究生,研究方向为图像算法研究与实现;肖建,博士,副教授,硕导,CCF 会员(A8837M),研究方向为嵌入式系统应用、可重构计算;郭宇锋,博士,教授,博导,研究方向为集成电路设计。

分割实验尝试,总结了得到最大散度阈值的快速方法,此方法可以更有效地识别光伏热斑。文献[8]基于边缘检测方式,使用 Canny 边缘检测算子作为诊断模块进行光伏热斑识别。文献[9]先对光伏电池片的各种运行状态进行状态分类编码,然后通过可扩展脉冲神经网络的方法实现光伏热斑识别。以上方法虽然都可以对热斑进行较为准确的检测,但是在实际运用过程中,通过无人机拍摄的图片里除了有数量不等的光伏阵列,光伏阵列之间还有复杂多变的各种背景信息,包括土地、建筑物等。因此在进行光伏热斑检测前,需要对图片进行预处理,分割出需要检测的光伏阵列区域。

该文首先进行光伏阵列图像特征分析,并在此基础上提出基于光伏阵列区域局部灰度特征的高精度区域分割算法。

1 无人机拍摄的红外图像特征分析

通过无人机搭载热成像相机,预设无人机巡航线路^[10],可以依次获取光伏电站对应区域的光伏阵列红外图像。图 1 为其中一张典型的光伏阵列红外图像,内容包含多块光伏阵列和背景信息,圆圈部分为光伏热斑区域。由图片展示内容可以判断出目标区域内的局部灰度一致性较好,而背景区域因为路面凹凸不平,导致光照产生的阴影和高亮区域不一致,局部灰度一致性较差。



图 1 光伏阵列红外图像

图 2 为图 1 的灰度直方图,图像的灰度值主要集中在 0~80 和 160~255 这两个区间,对照图 1,可以看出背景区域和背景区域的间隙在 0~80 之间,故目标区域与背景区域存在混淆。

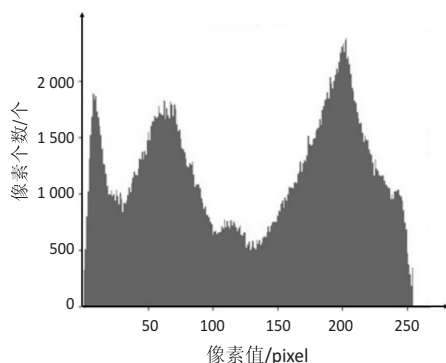


图 2 灰度直方图

2 基于光伏阵列区域局部灰度特征的高精度分割算法介绍

该文根据无人机拍摄的红外图像特征分析结果中,光伏阵列区域局部灰度一致性好的先验条件,采取以下几个步骤:(1)应用高斯滤波器对原始图像进行预处理,提高图像的信噪比;(2)建立二维矩阵 $I_{M \times N}$,使用 5×5 的滑动窗口计算去噪后的灰度图像的局部标准差并填入二维矩阵 $I_{M \times N}$ 中,并设置阈值 T ,将光伏阵列与背景区域进行区分后,转换为二值化图像输出;(3)基于图像形态学膨胀,对二值化图像中的光伏阵列的孔洞进行填充;(4)采用基于尺寸的筛选方法,对区域外的存在的孤立小区域进行去除;(5)根据各个光伏阵列的水平或垂直基准信息,重新调整光伏阵列的区域,得到最终分割结果。算法框图如图 3 所示,本节以下内容将对该算法的各个步骤进行详细介绍。

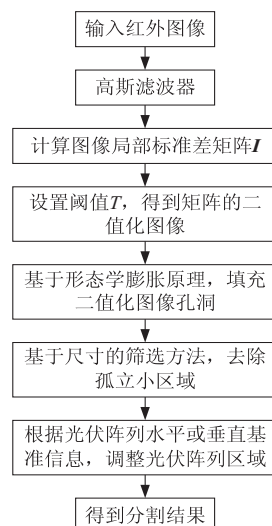


图 3 算法框图

2.1 应用高斯滤波器进行图像预处理

为了保证较高的数据采集速率和节约无人机的耗电量,无人机通常位于光伏电站上空几十米甚至上百米的高度实时采集光伏电站红外图像。然而,在无人机执行图像收集过程中,存在大气吸收、光线反射等原因,导致光伏电站红外图像存在较多的噪声,尤其是高斯噪声^[11-12]。此处采用核数为 5×5 的二维高斯滤波器:

$$F(x, y) = f(x, y) * G(x, y)$$

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

二维高斯函数有个重要的特性是旋转对称性,使得处理后的图像能在降噪的同时保留丰富的边缘细节。

2.2 使用滑动窗口方式计算灰度图像的局部标准差矩阵

因为目标区域内的局部灰度一致性较好,目标区

域局部校准差较小。该步骤会计算出每个像素的局部标准差,并生成新的局部标准差矩阵。

(1) 创建一个 $M \times N$ 二维矩阵 $I_{M \times N}$, M 和 N 的维度与原图像相同, M 和 N 的大小为 640 和 480。

(2) 设置一个 $K \times K$ 的滑动窗口, 这个滑动窗口以图像每个像素为中心选取 $K \times K$ 的区域, 作为基本计算单元, 求取局部标准差。在图像处理中, 当前像素宜位于滑动窗口中心, 所以图像处理窗口尺寸一般选择奇数, 并且滑动窗口的大小还跟运算速率相关联, 选择窗口越大, 完成计算耗费的时间就越多。基于以上原因以及实际操作经验, 选取 5×5 的滑动窗口, 如图 4 所示。

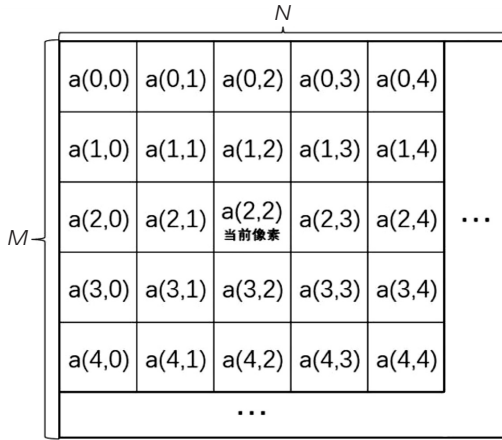


图 4 第一个滑动窗口的 5×5 模板

(3) 图 4 展示了一个滑动计算窗口, 通过平均值计算公式(2)和标准差计算公式(3)得到当前窗口中局部标准差, 填入到二维矩阵 $I_{M \times N}$ 的 $[(K-1)/2, (K-1)/2]$ 位置中。计算公式如下:

$$\bar{a}(i,j) = \frac{1}{K^2} \sum_{s=i-\frac{K-1}{2}}^{i+\frac{K-1}{2}} \sum_{t=j-\frac{K-1}{2}}^{j+\frac{K-1}{2}} a(s,t) \quad (2)$$

$$G(i,j) = \sqrt{\frac{1}{K^2} \sum_{s=i-\frac{K-1}{2}}^{i+\frac{K-1}{2}} \sum_{t=j-\frac{K-1}{2}}^{j+\frac{K-1}{2}} [a(s,t) - \bar{a}(i,j)]^2} \quad (3)$$

其中, $a(s,t)$ 为对应位置的灰度值; $\bar{a}(i,j)$ 为图 4 中滑动窗口包含的 25 个像素的平均值; $G(i,j)$ 为图 4 中滑动窗口包含的 25 个像素的标准差。

因为 5×5 的滑动窗口具有一定的宽度, 导致图像边缘位置存在一部分无效像素。该文使用边界像素处理的简单方法, 超出的部分使用中心对称的方式进行灰度值的填补。

(4) 通过阈值函数 $\text{threshold}()$ 设置阈值 T , 将二维矩阵进行公式(4)的二值化操作, 并输出对应的二值化图像 f 。阈值 T 取值为局部标准差矩阵 $I_{M \times N}$ 所有元素的均值。阈值条件如下:

$$f(m,n) = \begin{cases} 0, & I(m,n) > T \\ 255, & I(m,n) \leq T \end{cases} \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{640 \times 480} \sum_{m=1}^{640} \sum_{n=1}^{480} I(m,n) \quad (5)$$

阈值条件中 255 所代表的颜色为白色, 所以局部灰度一致性较好的光伏阵列区域会显示为白色, 而背景区域显示为黑色, 如图 5 所示。

但是, 部分光伏阵列区域因为某些原因而呈现出黑色区域(圆框); 部分背景区域因为反射光照较好呈现白色区域(方框)。以下步骤是将这部分区域进行修正操作。

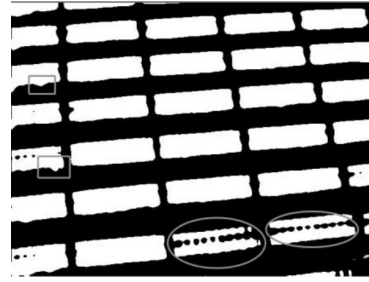


图 5 二值化图像 f

2.3 基于图像形态学膨胀的光伏阵列填充

经过 2.2 节局部标准差矩阵生成的图像二值化操作后, 仍有部分区域因为当时的光照等原因导致输出的结果不太理想。

由于图片噪声或阴影, 大型光伏阵列被分裂成多个小区域。本节将利用形态学膨胀的方式:

$$\text{dst}(x,y) = \max_{(x',y'): \text{element}(x',y') \neq 0} \text{src}(x+x', y+y') \quad (6)$$

形态学膨胀操作后将填充图 5 的孔洞, 以形成完整的光伏阵列区域。填充情况如图 6 所示。

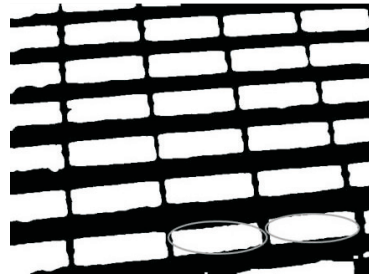


图 6 光伏阵列填充情况

2.4 基于图像轮廓的光伏阵列分割

通过图像预处理操作后, 从图中可以看出光伏阵列的轮廓已经比较明显, 通过 2.2 节的阈值化函数 $\text{threshold}()$ 得到的图像, 这时边缘是正负区域之间的边界。

(1) 首先, 需要对所有光伏阵列进行定位, 并取最小外接矩形轮廓, 得到多个用规则矩形包裹的光伏阵列区域, 作为待确认区域。

(2) 由于部分背景区域比较平整, 导致部分区域的灰度一致性较好, 即可能出现非光伏阵列大小的矩

形区域(如图 5 的右下角位置),因此需要对待确认区域进行筛选。采用基于尺寸的筛选方法,对每一个待确认区域获取长、宽、面积参数作为阈值,与光伏阵列预测数据进行对比,排除不满阈值范围的待确认矩形位置。使用 $R(i)$ 代表每个确认区域位置,具体规则如式(7)所示:

$$R(i) = \begin{cases} R(i), & \begin{cases} t_1 < H < t_2 \\ t_1 < W < t_2 \end{cases} \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

如果待确认区域长度、宽度都在 t_1 、 t_2 范围以内,则将其作为目标区域,范围外的部分作为背景区域。

(3)区域裁剪:因为某些灰度一致性较好的背景区域可能与光伏阵列紧靠,导致光伏阵列的上边缘或者下边缘容易出现较多的背景区域,如图 5 中方框中的内容。为了提取更有效的光伏阵列区域,首先根据水平或垂直基准信息,确定光伏阵列区域的包含背景区域的是上边缘还是下边缘。其次,获取光伏阵列区域的平均高度作为参考,如果是下边缘包含地面背景区域时,则从光伏阵列的上边缘部分开始,向下取高度为光伏阵列的平均高度的区域作为裁剪区域,并以此作为新的光伏阵列的识别结果。

经过如上操作,文中算法获取的光伏阵列如图 7 所示。



图 7 最终分割结果

3 实验结果与分析

与传统图像分割算法的比较。

本节将与传统图像分割算法中的边缘检测算法和 Otsu 算法所得到的分割结果进行比较。边缘检测算法

表 1 基于光伏阵列局部灰度特征的高精度分割算法,边缘检测和 Otsu 算法的定量比较结果

指标	边缘检测算法		Otsu 算法		文中算法	
	图 8(c)	图 9(c)	图 8(d)	图 9(d)	图 8(b)	图 9(b)
准确率/%	82.36	89.63	90.16	91.31	96.08	96.73
漏检率/%	17.64	10.37	9.84	8.69	3.92	3.27
误检率/%	1.26	8.91	0	12.8	0	0

准确率是衡量光伏阵列分割有效性的一项指标,其中数值代表图像分割算法准确识别到的光伏阵列面积与真实光伏阵列面积的比值,并且准确率越高,说明

的核心是获得目标区域的边缘,然后根据边缘划定闭合区域进行分割^[13-14]。Otsu 算法的原理是遍历所有可能的阈值,然后对每个阈值结果的两类像素计算方差,然后自动决定最优的阈值^[15]。

为验证文中算法的有效性和可靠性,选取 2 张尺寸为 640×480 像素的图像,如图 8(a) 和图 9(a) 所示。分别应用文中算法、边缘检测算法和 Otsu 算法进行图像处理,最终分割结果如下所示:

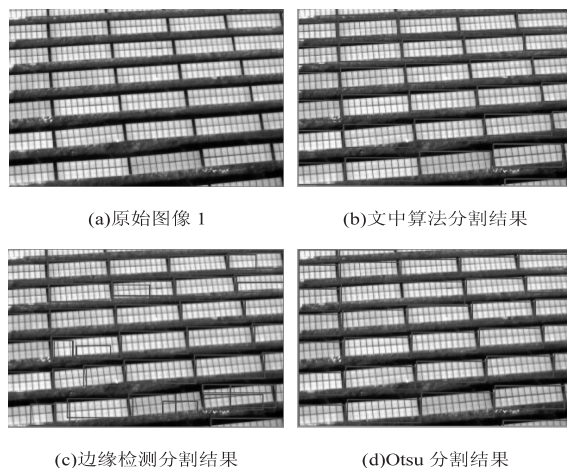


图 8 算法对比 1

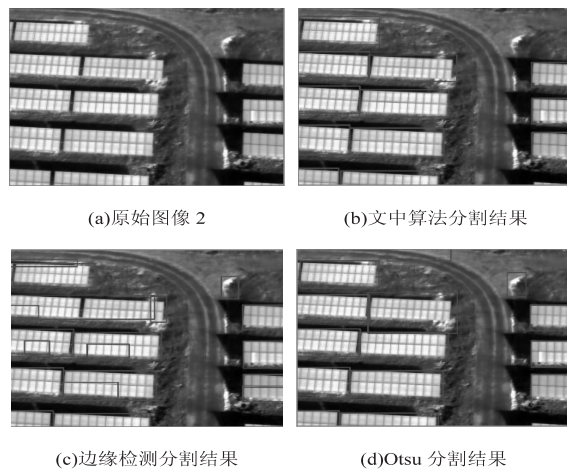


图 9 算法对比 2

为了定量分析文中算法与传统算法识别的有效性,在表 1 中选取了准确率、漏检率和误检率这三项测试指标。

有效性越高;漏检率也是光伏阵列分割有效性的一项指标,数值代表没有准确识别到的光伏阵列面积与真实光伏阵列面积的比值,准确率和漏检率之和等于

100%; 误检率是衡量算法可靠性的一项指标,数值等于算法将背景区域当成光伏阵列的面积与真实光伏阵列总面积的比值,并且漏检率越低,说明算法的可靠性越高。

边缘检测算法:通过查看图 8(c)、图 9(c)及表 1 的数据,发现经过边缘检测后的光伏阵列边缘信息保持较好,目标轮廓清晰。但是因为此时拍摄位置偏高,目标区域分辨能力偏低,此时的分割结果会将同一块光伏阵列分割为多块,还会保存少量背景信息,分割效果不理想。

Otsu 算法:通过查看图 8(d)、图 9(d)及表 1 的数据,在光照均匀条件下,发现 Otsu 算法分割的图像比边缘检测法更规则,可以获取比较理想的分割效果。但是此方法也存在一定的缺点:如图 8(d)所示,基本上所有光伏阵列的右上边缘信息都没有得到良好的处理,导致漏检率升高。

通过表 1 可看出,文中方法的分割效果比边缘检测和 Otsu 算法更优秀,在对光伏阵列进行准确分割的同时,还能更好地保存边缘信息。

综上所述,基于边缘检测的图像分割算法更适合用于边缘信息完整的图像上,只有当图像拥有明显的边缘信息、目标有清晰轮廓时才能达到最好的分割效果。基于 Otsu 的图像分割算法会丢失部分边缘信息,且在算法运行时需要遍历所有可能的阈值,不是一个高效的过程。相比之下,文中算法运行对于光伏阵列分割完整,运行效率高,更适合用于光伏阵列的有效区域分割。

4 结束语

基于光伏阵列红外图像的光伏阵列局部灰度一致性较好的特点,提出基于的局部标准差特征的算法,辅以形态学膨胀、基于尺寸和位置信息筛选算法实现了对光伏阵列区域的精确分割。通过与边缘检测分割算法和 Otsu 分割算法的定量比较。结果表明,该算法能够准确、有效地对光伏阵列区域进行分割,分割效果优于传统算法。

参考文献:

[1] SOLHEIM H J, FJÆR H G, SØRHEIM E A. Measurement

and simulation of hot spots in solar cells[J]. *Energy Procedia*, 2013, 38:183–189.

[2] 李世民,喜文华. 光伏组件热斑对发电性能的影响[J]. *发电设备*, 2013, 27(1):61–63.

[3] ZHAO Ye, YANG Ling, LEHMAN B, et al. Decision tree based fault detection and classification in solar photovoltaic arrays[C]//2012 twenty seventh annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC). Orlando, FL, USA:IEEE, 2012:93–99.

[4] CHENG Ze, ZHONG Dan, LI Baolin, et al. Research on fault detection of PV array based on data fusion and fuzzy mathematics[C]//2011 Asia-Pacific power and energy engineering conference (APPEEC). Wuhan:IEEE, 2011:1–4.

[5] 谌守禄,吴文宝,裴名华,等. 基于航拍图像的无人机光伏组件巡检策略研究及运用[J]. *江西电力*, 2019, 43(4):18–20.

[6] VERGURA S. A Finite-element approach to analyze the thermal effect of defects on silicon-based PV cells[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(10):3860–3867.

[7] 郭宝柱. 光伏阵列热斑的红外图像处理的研究[D]. 天津:天津理工大学, 2016.

[8] TSANAKAS J A, CHRYSOSTOMOU D, BOTSARIS P N, et al. Fault diagnosis of photovoltaic modules through image processing and Canny edge detection on field thermographic measurements[J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2015, 36(6):351–372.

[9] 车曦. 基于红外图像识别的光伏组件热斑故障检测方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.

[10] 王立春,刘宁钟,李强懿. 基于无人机航拍图像的公路标线检测算法[J]. *计算机技术与发展*, 2018, 28(9):138–142.

[11] 王培珍,郑诗程. 基于红外图像的太阳能光伏阵列故障分析[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(2):197–202.

[12] ZHAO Jufeng, CHEN Yueting, FENG Huajun, et al. Infrared image enhancement through saliency feature analysis based on multi-scale decomposition[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, 62(1):86–93.

[13] 覃禹舜. 基于深度神经网络的图像边缘检测算法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.

[14] 喻建锋,吕毅斌,房巾莉,等. 基于 Canny 算子的 C-V 水平集模型[J]. *计算机技术与发展*, 2019, 29(7):145–149.

[15] 杨亚楠. 太阳能光伏阵列识别及热斑检测技术的研究与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2018.