

光伏板局部阴影遮蔽图像的边缘检测算法研究

吕科霏, 李 野*

长春理工大学, 理学院, 吉林 长春

Email: lvkefei0515@163.com, *liyecust@163.com

收稿日期: 2021年3月14日; 录用日期: 2021年4月2日; 发布日期: 2021年4月9日

摘 要

为大幅降低光伏板受阴影遮蔽影响导致的热斑效应以及功率损失, 本文把研究对象定为局部阴影条件下的光伏组件, 通过对光伏组件上不同的位置进行随机遮挡, 得到多种阴影条件下的阴影图像, 用不同的算法对所得数据进行对比分析。利用图像配准、图像增强、图像分割等数字图像处理技术来分辨阴影区, 采用中值滤波对光伏板条纹复杂所造成的影响进行去噪处理。研究实验结果表明: 在模拟实验空间内, canny边缘检测法可精确分割阴影, 准确得出阴影区域, 不会因膨胀使得阴影区域扩大。精确的阴影区域定位有利于研究光伏组件的输出特性, 提升光伏板发电效率。

关键词

光伏组件, 局部阴影, 图像处理, canny边缘检测算法

Research on Edge Detection Algorithm of Photovoltaic Panel's Partial Shadow Shading Image

Kefei Lv, Ye Li*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Email: lvkefei0515@163.com, *liyecust@163.com

Received: Mar. 14th, 2021; accepted: Apr. 2nd, 2021; published: Apr. 9th, 2021

Abstract

In order to greatly reduce the hot spot effect and power loss caused by the shadow shading of

*通讯作者。

photovoltaic panels, this paper sets the research object as the photovoltaic modules under partial shadow conditions. By randomly shielding different positions on the photovoltaic modules, various shadow conditions are obtained. Different algorithms are used to compare and analyze the obtained data. Digital image processing technologies, such as image registration, image enhancement, and image segmentation, are used to distinguish shadow areas, and median filtering is used to denoise the effects of complex stripes on photovoltaic panels. The experimental results show that: in the simulated experimental space, the canny edge detection method can accurately segment the shadow and accurately obtain the shadow area without expanding the shadow area due to expansion. Precise positioning of the shaded area is conducive to studying the output characteristics of photovoltaic modules and improving the power generation efficiency of photovoltaic panels.

Keywords

Photovoltaic Modules, Partial Shadows, Image Processing, Canny Edge Detection Algorithm

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

太阳能电池板长时间置于室外, 鸟粪、积雪以及建筑物和云层的阴影都成为太阳能电池板表面接收光照的障碍物。由于电池板内部的组成器件以及串并联连接方式的原因, 此类遮蔽物不仅会导致光伏板发电效率大幅下跌, 还可能会造成发电设备损坏甚至失灵[1]。由于阴影遮蔽导致的电气性能发生的变化: 输出电流 - 电压($I-V$)曲线变成阶梯状; 功率 - 电压($P-V$)曲线呈现多峰膝点, 常见的最大功率点跟踪 MPPT (maximum power point tracking)方法失效, 使得最大功率点跟踪的难度加大。目前, 对局部阴影下发电效率优化问题的研究, 在物理层面上, 虽然最初的建筑设计和定期清灰很有必要, 但无法避免云层阴影的问题, 而且不能及时地对阴影进行处理, 发电效率仍会受到影响。在电力系统层面上, 大多采用 MPPT 最大功率追踪法[2], 虽维持了功率基本稳定, 但不能及时缓解热斑效应对电池板的损害。

随科学技术的发展, 数字图像处理技术以处理精度高、适用面宽广等优点被应用在航空航天技术、生物医学研究等领域。目前, 数字图像处理技术研究可应用在光伏组件热斑诊断及优化控制系统中[3], 它是光伏发电系统中一个重要的应用检测系统。另外西安信息工程重点实验室提出基于图像形态学的方法求取光伏板表面阴影遮蔽的面积比例, 但由于膨胀导致阴影区域的占比会增加, 使得电池单元个数计算不准确。为了避免这个问题, 本文提出对采集的图像进行图像增强和 canny 边缘检测分割, 分割出太阳能电池板表面阴影区域, 采用中值滤波对光伏板条纹复杂所造成的影响进行去噪处理。

2. 不均匀光照条件下光伏阵列的输出特性

为了验证光伏阵列在阴影下的输出特性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了如图 1 所示的 3×3 阵列模型, 每个光伏电池两端并联了一个旁路二极管, 每个电池串串联一个阻塞二极管防止电流倒灌[4]。

该阵列在标准条件下($T = 25^\circ\text{C}$, $S = 1000 \text{ W/m}^2$)的输出 I-U 和 P-U 特性曲线[5]如图 2 所示。

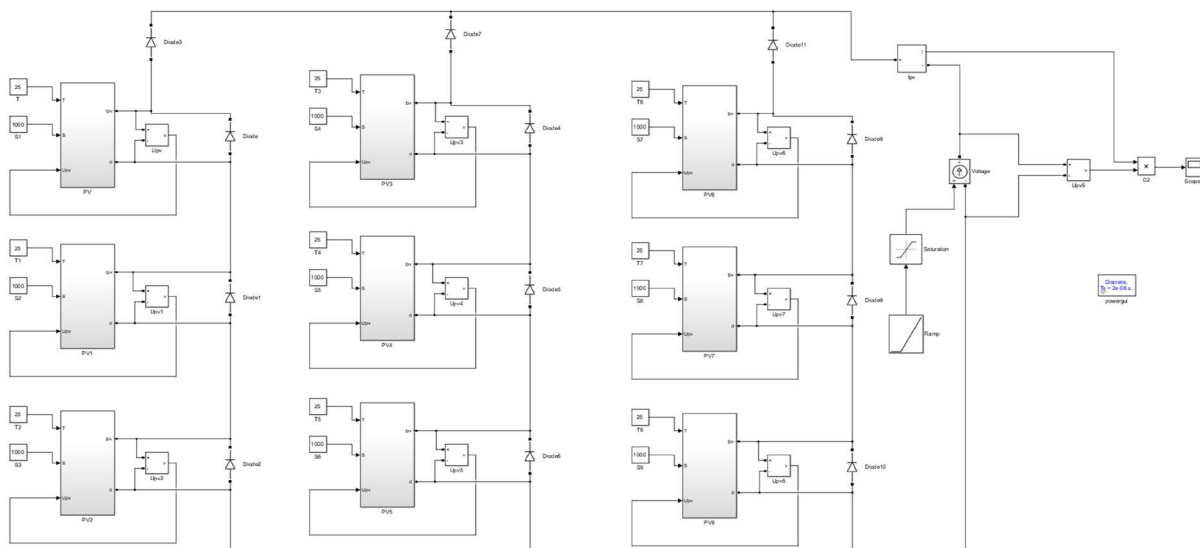


Figure 1. 3×3 photovoltaic array simulation model

图 1. 3×3 光伏阵列仿真模型

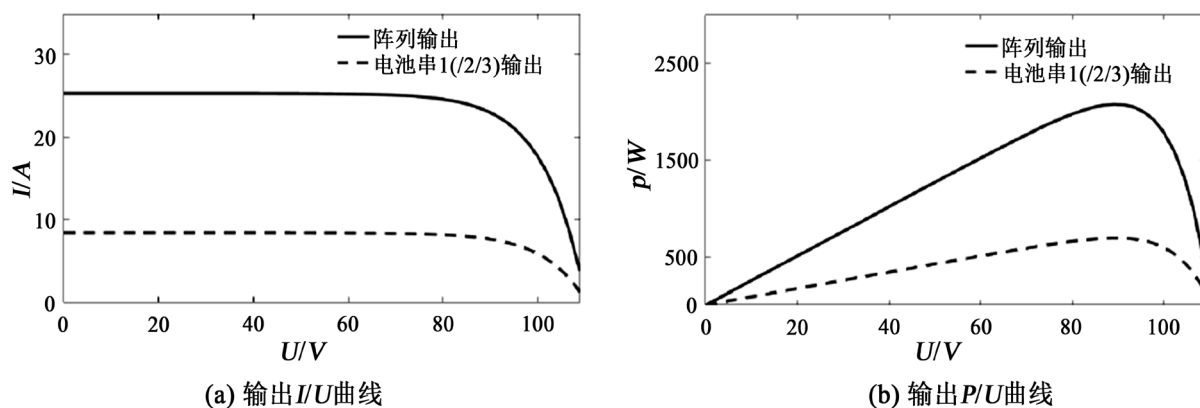


Figure 2. The output characteristics of the 3×3 array under standard conditions

图 2. 3×3 阵列在标准条件下的输出特性

该阵列在局部阴影下的输出 I-U 和 P-U 特性曲线如图 3 所示。

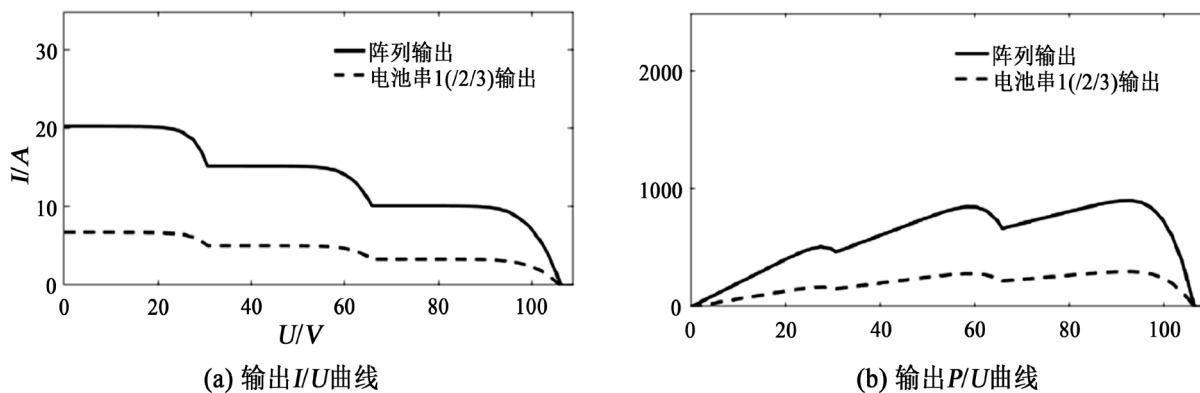


Figure 3. The output characteristics of the 3×3 array under random shading

图 3. 3×3 阵列在随机阴影下的输出特性

3. 实验步骤

- 1) 垂直角度架设摄像机, 采集光伏板图像, 基于 Matlab 对多帧图片进行筛选, 筛选出有阴影的图片进行图像处理。
- 2) 利用灰度变换和图像增强对图像进行预处理, 得到高信噪比且清晰度高的图像。
- 3) 讨论基于阈值的图像分割方法(形态学处理)和基于边缘的图像分割方法(边缘检测)两种方法的优缺点。
- 4) 对两种方法的误差进行对比分析。

3.1. 图像采集

3.1.1. 图像的采集

如图 4, 实验时, 规定摄像头正对光伏阵列, 为了更精确的观察阴影, 将信息获取范围限定在距离摄像头 d_1 和 d_2 之间。设定 $d_1 = 65 \text{ cm}$, $d_2 = 150 \text{ cm}$, 在此区间中值滤波可以很好的将阴影区间光伏板上的条纹很好的滤除, 最终获取较完整的阴影分割图。用 Matlab 软件将采集到的视频数据分离成图片, 并进行数字图像处理。

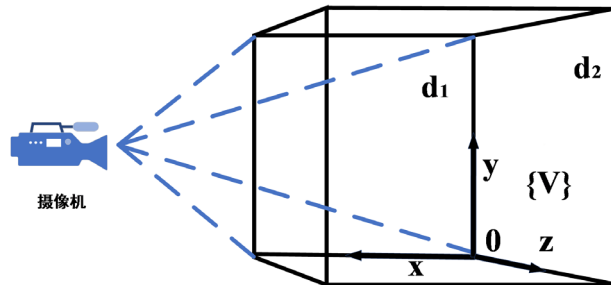


Figure 4. The experimental space construction
图 4. 实验空间搭建

3.1.2. 图像配准

受摄像机架设角度等影响, 拍摄到的图像往往存在一定的倾斜或形变, 同样大小的光伏板在图像中所占的像素比例不尽相同, 所以要对采集到的图像进行配准矫正。图像配准就是将两幅不同成像模式的图像由不同坐标系变换到同一坐标系中的过程。在图像配准中常用的几何变换模型主要有刚体变换、仿射变换、投影变换和非线性变换等[6]。下面的表 1 主要介绍前三种变换类型:

Table 1. Three transformation types of image registration

表 1. 图像配准三种变换类型

变换类型	变换参数	适用情况	图片示例
刚体变换	rigid	旋转、平移	
仿射变换	affine	平移、旋转、镜像、缩放等	
投影变换	projective	平移、旋转、镜像、投影等	

图像配准的 Matlab 实现过程:

- 1) 读入基准图像和要配准的输入图像。
- 2) 标注基准点对, 并将其保存至工作空间。
- 3) 指定要使用的变换类型。

例如: `tform=cp2tform(input_points,base_points,'affine')` %仿射变换类型

- 4) 根据变换结构对输入图像进行变换, 完成基于基准点的对准。

3.2. 图像增强

3.2.1. 灰度线性变换

灰度变换的定义就是灰度图像中的像素值作为一个非空集合, 按某一个对应关系使任一个像素值可以在新的图像中(另一集合)都有与之对应的唯一值, 属于点操作类算法。最常见的包括有线性变换、对数变换和伽马变换等[7]。

灰度线性变换就是将图像的像素值通过指定的线性函数进行变换, 以此增强或减弱图像的灰度。它的作用就是可以成倍地伸张或者缩小灰度值的基本范围, 公式如下:

$$g(x) = kx + b$$

$$T_B = g(T_A) = K^*T_A + b$$

其中, K ——方程的斜率; T_A ——初步输入的原图像灰度值; b ——方程 y 轴上的截距, 上述 K, b 不同大小值会使得最后输出图像的颜色或者分辨率发生变化; T_B ——最终输出图像灰度值。

当 $K < 0$ 时, 原来图像亮的区域变暗, 原来图像暗的区域变亮; $0 < K < 1$ 时, 图像的对比度会被削弱; $K = 1$, 时图像的对比度没有发生根本性地改变, 反而只会整体性地增大或缩小图像中所有的像素灰度值, 可以通过调整 b 实现对图像亮度的调整; $K > 1$ 时, 增大图像的对比度, 图像的像素值在变换后全部增大, 整体效果增强。

3.2.2. 中值滤波

中值滤波作为非线性滤波, 它用一个窗口(即一定大小的数值矩阵)在被研究图像的整个像素内移动, 用该矩阵内各个值按大小排序的中间序号所对应的值替换矩阵正中间的像素灰度值。中值滤波的公式如下所示:

$$g_i = Med \{f_{i-v}, f_i \cdots f_{i+v}\}$$

$i \in N$ ——自然数; $f_1, f_2 \cdots f_v$ ——一维按序排列的像素值, $v = \frac{m-1}{2}$ (m 为序列值, 且 m 是奇数)。

中值滤波的整体过程: 首先从输入图像的像素值中选择出 m 个数作为上述矩阵窗口, 选取矩阵序号的中心值, 再将这 m 个像素数值按由大到小排序, 则序号正中间的像素值就为中值滤波的输出值 g_i 。

对图像进行二维中值滤波时, 同上述一维中值滤波一样, 需将窗口内图像的像素值按由大到小进行排序得到递增的矩阵数值序列 $\{x_{ij}\}$, 选出中值作为输出, 但滤波窗口变成了二维矩阵矩阵, 二维中值滤波的公式如下所示:

$$g_j = Med \{x_{ij}\}$$

与其他去噪方法比, 中值滤波法的能力更强, 还可以很好地保存被处理图像的边缘和细节。在利用边缘检测分割图像时, 滤波就需要很好地保存光伏板上阴影的边缘, 为此采用中值滤波对图像进行平滑去噪处理。

3.3. 图像分割

3.3.1. 基于阈值的图像分割——形态学处理

形态学可分为两类, 二值形态学和灰度形态学, 本文对二值形态学进行展开讨论。二值形态学运算的对象是集合(而图像本身为像素数值集合), 其理论上主要运算过程包含有腐蚀、膨胀、开、闭、击中运算。

图像形态学的优点: 1) 形态学既可以较稳定地滤除掉噪声和畸变信号, 又能保全原图像中的全信号; 2) 提取图像边缘信息时, 其处理效果也较好(断点少)。根据下图可知道膨胀必然使所提取的阴影面积变大, 使得计算出的遮挡电池单元个数不准确[8]。图 5 为图像形态学处理的结果: 图 5(a)为原图的二值化图; 图 5(b)为进行图像膨胀后的边缘处理图。

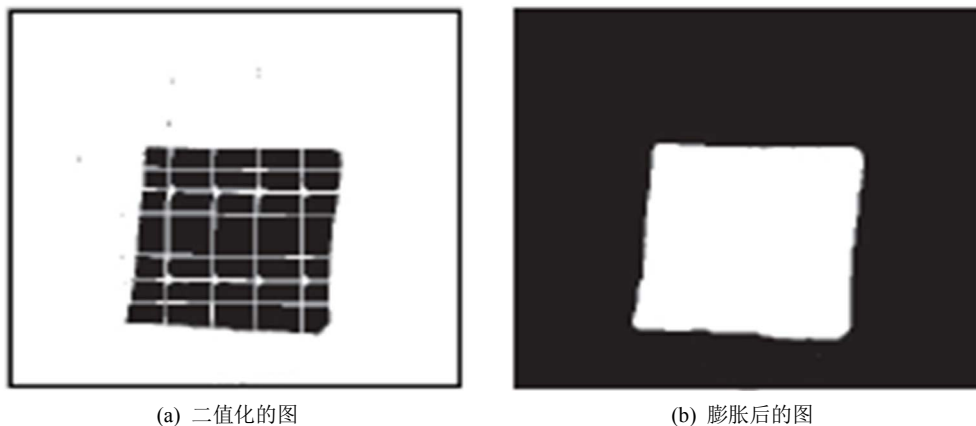


Figure 5. Image morphology processing
图 5. 图像形态学处理

3.3.2. 基于边缘的图像分割——边缘检测

边缘检测算法一般是将图像中有颜色差异较大的目标域的边缘给标记出来, 这种过程中使用了边缘检测的算子。最常用的一阶边缘算子有 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Canny 算子等。稀有算子还包含拉普拉斯算子和 LOG 算子。

Canny 方法不容易受噪声干扰, 能够检测到真正的弱边缘。优点在于, 使用两种不同的阈值分别检测强边缘和弱边缘, 并且当弱边缘和强边缘相连时, 才将弱边缘包含在输出图像中。因此采用 Canny 算子进行图像分割。Canny 边缘检测方法可以很好地过滤光伏表面条纹的干扰, 阴影识别检测能力很强。它具有 3 个特点:

- 1) 标错非边缘点和不标真实边缘点的概率较低;
- 2) 检测出来的边缘点靠近真实边缘的中心, 即所算出的面积更接近真实值;
- 3) 边缘响应值是单值。

Canny 边缘检测的具体步骤:

1) 彩色图像变换为灰度图像

RGB 转灰度的公式如下:

$$\text{gray} = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.14$$

将彩色图像中每个 RGB 像素转为灰度值, 当摄像头在 $d_1 \leq s \leq d_2$ 区域内, 对处理的灰度图像进行一定程度的灰度线性变换。其中线性变换的斜率 $K > 1$, 本文将图像灰度范围设定为 0.125~0.580。

下图 6(a)为只进行了灰度处理, 没有进行图像增强的 Canny 边缘处理图; 图 6(b)为进行了图像增强后的边缘处理图。由图比较可知在预处理中加入图像增强后, 可以很好地将阴影检测出来。

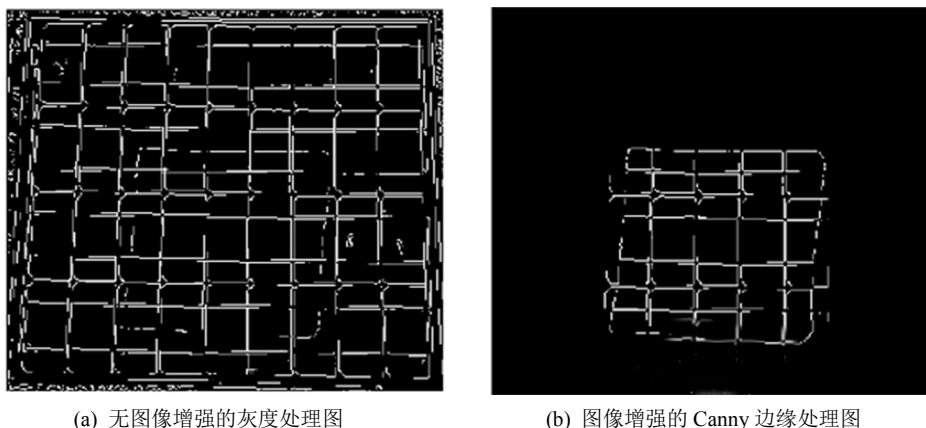


Figure 6. Canny edge detection
图 6. Canny 边缘检测

1) 对图像进行高斯模糊

用高斯滤波器来平滑图像的边缘毛刺和滤除外界噪声。 $f(i, j)$ 表示输入图像, 使用可分离滤波方法求图像与高斯平滑滤波器卷积, 得到的结果是一个平滑的数据矩阵如下所示:

$$S(i, j) = G(i, j; \sigma) * f(i, j)$$

其中, σ ——高斯函数的标准差。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right]$$

在某一方向 n 上对 $G(x, y)$ 求取一阶方向导数, 其表达式可由以下公式表示:

$$G_n = n\nabla G = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial G}{\partial x} \\ \frac{\partial G}{\partial y} \end{bmatrix}$$

将变量 x, y 用输入图像像素 i, j 代替, 将图像 $f(i, j)$ 与 G_n 作卷积, 同时改变 n 的方向, $S(i, j)$ 取得最大值时的 n 就是正交于检测边缘的方向。

2) 计算图像中各点梯度的幅值和方向

已知平滑数据矩阵 $S(i, j)$ 的梯度, 可根据梯度值计算出图像边缘的幅值与角度大小。上一步的高斯模糊主要目的就是为了降低图像噪声, 这样就可以根据图像梯度更精确地计算出图像梯度及边缘幅值。其数学表达如下所示:

$$P(x, y) \approx [S(i+1, j) - S(i+1, j+1) - S(i, j+1)]/2$$

$$Q(x, y) \approx [S(i, j+1) - S(i, j) + S(i+1, j+1) - S(i+1, j)]/2$$

则该图像的梯度幅值与角度如下所示:

$$M(i, j) = \sqrt{P(i, j)^2 + Q(i, j)^2}$$

$$\theta(i, j) = \arctan \frac{Q(i, j)}{P(i, j)}$$

3) 对梯度幅值进行非极大值抑制

非最大信号压制是数字信号学科中最常见的一种处理技术，其作用是对图像边缘进行细化，这样经处理后的边缘像素值会因细化而减小。

4) 双阈值边缘连接处理

图像经第四步骤处理以后，结果图中可能会有些许非边缘像素，这时需要阈值筛选才能将非边缘像素剔除。传统的方法是基于一个阈值，如果选取的阈值较小不能完全过滤非边缘，若选取的阈值较大会滤除掉所需图像分量的边缘，Canny 双阈值法很好地解决了上述问题。为了更好地检测出光伏板的阴影区域，系统需要准确地设定 Canny 的阈值范围。本文将取值范围定为 0.627~0.738。

3.4. 对比上述两种图像分割方法

算法对比流程图如下图 7，不同条件下分割对比如图 8：

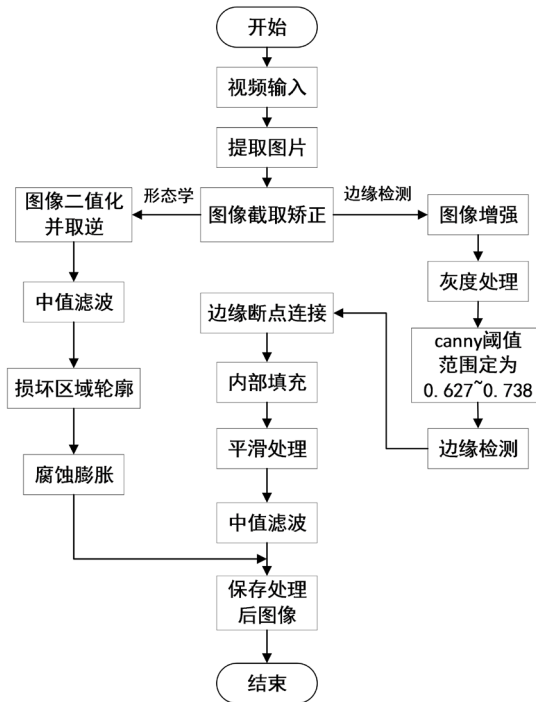


Figure 7. Algorithm comparison flowchart
图 7. 算法对比流程图

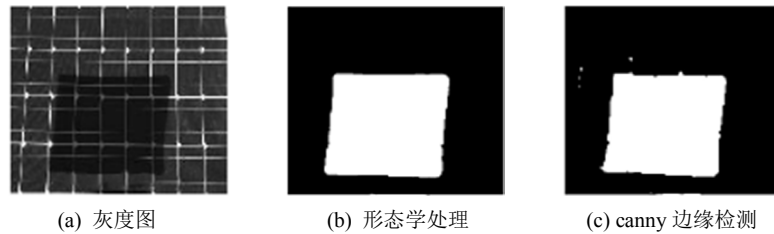


Figure 8. Segmentation comparison under different conditions
图 8. 不同条件下的分割对比

计算阴影面积占光伏板整个面积的百分比 percent , 绝对误差 δ 、平均误差 $\bar{\delta}$ 。

$$\text{percent} = \frac{S_d}{S_z} \times 100\%$$

$$\delta = |P_c - P_d|$$

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$$

其中, percent ——阴影面积占光伏板整个面积的百分比; S_d ——遮挡阴影面积(单位为像素); S_z ——光伏板的总面积(单位为像素); P_c ——阴影实测的百分比; P_d ——阴影实验百分比;

δ ——绝对误差; $\bar{\delta}$ ——平均误差。通过计算得出形态学分割平均误差 $\bar{\delta}$ 为 1.37%, 边缘检测算法分割的平均误差 $\bar{\delta}$ 为 0.56%。由此可知 canny 边缘检测法更为有效准确。

4. 结论

为了研究阴影遮蔽对光伏板发电效率的影响, 本文采用数字图像处理技术对阴影区域进行识别, 利用图像增强、边缘检测等技术来识别阴影区, 其中由于光伏板上表面条纹的影响, 本文还采用了中值滤波去噪。又通过形态学处理与边缘检测方法的实验对比分析, 由实验数据得出边缘检测算法求取的阴影百分比更接近实测值, 所以选定 canny 边缘检测算法作为图像分割的主要技术, 不会因膨胀使得阴影面积增大, 致使数据不准确。进而精确得出受遮蔽的电池单元个数和阴影遮蔽的光伏组件位置。

参考文献

- [1] Wang, Y.Y. (2014) Optimization Control of Photovoltaic Powergeneration System under Partial Shadow Condition. Qingdao University, Qingdao.
- [2] 严力兼, 徐迪, 葛爱明. 不均匀光照情况下太阳能最大功率追踪算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2173-2180.
- [3] 周笛青. 光伏组件局部阴影下热斑诊断及优化控制[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海大学, 2013.
- [4] 刘晓艳, 祁新梅, 郑寿森, 等. 局部阴影条件下光伏阵列的建模与分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 192-197.
- [5] 薛阳, 张佳栋. 部分阴影条件下的光伏阵列仿真建模与特性分析[J]. 华东电力, 2011, 36(6): 949-952.
- [6] 王俊影, 李扬, 袁浩期, 简单, 郝敏. 可见光与红外图像自动配准算法的设计与实现[J]. 机电工程技术, 2019, 48(11): 134-137.
- [7] 王飞. 图像增强算法及实现研究探讨[J]. 中国包装工业, 2014(20): 83-84+86.
- [8] 吉网存. 基于图像技术的太阳能电池表面缺陷检测[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2015.