

基于选择增强的光伏阵列遮挡分割研究

李喆雨¹, 丁坤^{1*}, 张经纬¹, 李辰阳², 黎彰², 刘永杰²

¹河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;

²常州市光伏系统集成与生产装备技术重点实验室, 江苏 常州 213022

摘要 针对光伏阵列阴影及树叶等遮挡识别的准确率有待提高的问题, 提出一种基于选择增强的图像分割算法。该算法在 HSV 颜色空间对图片进行增强处理, 得到“苔衣图像”, 达到遮挡变色的效果, 提高遮挡部分与未遮挡部分的对比度。最后对“苔衣图像”进行图像分割, 得到遮挡轮廓。结果表明, 所提基于选择增强的图像分割算法得到的阴影和附着遮挡物(树叶等)的位置、面积更加准确, 便于清除遮挡, 同时也为光伏阵列局部阴影下的精准建模提供基础。

关键词 图像处理; 选择增强; 光伏阵列; “苔衣图像”

中图分类号 TP391.41; TM615

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2410006

Selective Enhancement-Based Shade Segmentation of Photovoltaic Array

Li Zheyu¹, Ding Kun^{1*}, Zhang Jingwei¹, Li Chenyang², Li Zhang², Liu Yongjie²

¹College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

²Changzhou Key Laboratory of Photovoltaic System Integration and Production Equipment Technology, Changzhou, Jiangsu 213022, China

Abstract An image segmentation algorithm based on selective enhancement is proposed to improve the occlusion recognition accuracy of shadows and leaves for photovoltaic (PV) arrays. The proposed algorithm enhances module images in the HSV color space to acquire “moss images”, to realize discoloration of shade and improve the contrast between shaded and unshaded parts. Then, the “moss images” are segmented to acquire the shaded outlines. Experimental results demonstrate that the position and areas of shadows and attached shelters (leaves, etc.) are more accurate after being processed by the proposed algorithm, which gets convenient conditions for the removal of shades and provides a basis for accurate modeling of PV arrays under partial shadow conditions.

Key words image processing; selective enhancement; photovoltaic array; “moss image”

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 350.6050

1 引言

光伏阵列的发电效率与环境息息相关^[1]。随着太阳的移动, 组件易受树荫、树叶、周围建筑物等遮挡而接收非均匀辐照度, 短暂影响整个阵列的输出功率, 严重情况下会形成热斑^[2]。严重的热斑效应可导致电池局部烧毁等永久性损坏, 降低光伏组件

输出功率和使用寿命^[2]。当存在遮挡时需要获得遮挡的类型、面积和位置, 以便清除遮挡。

光伏阵列遮挡主要分为阴影遮挡和附着物遮挡(树叶等)。目前常见分析方法有理论公式计算法、仪器测量法和软件模拟法等, 但这些方法的计算量大^[3]。图像处理拥有处理能力强、适应面广等优点, 逐渐应用在光伏组件表面缺陷检测中^[3]。图像分割

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-02-23; 录用日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51777059)、江苏高校“青蓝工程”、常州市科技计划(CJ20200074)

通信作者: *dingk@hhu.edu.cn

是图像处理的重要内容之一,可以将图像划分成互不相交的区域,便于进行遮挡的面积提取和定位。

图像分割方法种类繁多,主要包括区域分割^[4]、边缘分割^[5]、阈值分割^[6]、深度学习分割^[7]等,其中阈值分割由于简单快速且实用性强而被广泛运用^[6]。现有许多关于影子、树叶等面积提取和定位的研究。文献[8]提出图像形态学技术检测,使用膨胀操作,导致所求取的影子面积会增大;文献[9]提出阴影识别算法,该算法分割的图像噪声较大,整块组件遮挡和半块遮挡的表现形式存在差异;文献[3]提出改进边缘检测算法,改进上述问题,但其分割的图像噪声较大;文献[10-13]提出的算法可以分割出树叶的细节轮廓,但要求原始图片没有其他干扰、背景与树叶对比明显;文献[14]提出的 HSV 图像分割算法可直接应用到光伏上,但分割的图像噪声较大。上述算法中影子提取算法和树叶提取算法都有值得改进的地方。为解决上述问题,本文提出一种基于选择增强的图像分割算法,选择遮挡的部分进行增强处理,分割的结果更加精准,从而获得更准确的面积和位置。

2 基于选择增强的图像分割

2.1 图像预处理

为排除环境因素、拍摄角度的影响,在遮挡诊断时首先要对拍摄的图像进行图像预处理,获得单个组件的图片。处理流程如图 1 所示。

根据图 1 可知,预处理过程主要包括以下内容。

1) 灰度处理^[15]

$$V_{\text{gray}} = R \times 0.30 + G \times 0.59 + B \times 0.11, \quad (1)$$

式中: R 、 G 、 B 为 RGB 颜色空间各通道数值。

2) 滤波

为消除灰度图中的噪声且尽量保留边缘信息,进行双边滤波^[16]:

$$\bar{I}_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q, \quad (2)$$

式中: W_p 为权重之和; $G_{\sigma_s}(\|p - q\|)$ 为空间权重(空间距离相似性); $G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|)$ 为阈值权重(颜色相似性); s 为空间域; r 为像素域。

3) 二值化

为使图像中数据量减少、组件轮廓更加清晰,对灰度图进行二值处理。

4) 直线检测

在二值图中,组件轮廓全为直线,通过霍夫变换直线检测便获得全部轮廓线^[17]。由于轮廓线会受

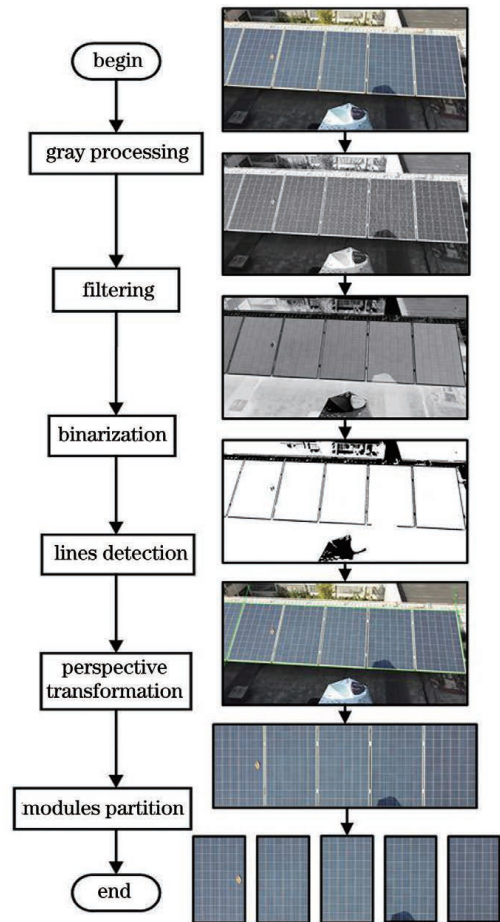


图 1 图像预处理流程

Fig. 1 Flow chart of image preprocessing

到环境等因素的影响,还需根据直线斜率的众数排除干扰因素。

5) 透视变换

由于拍摄的组件不是正投影的形式,需要通过透视变换^[18]对轮廓线的交点进行调整:

$$[x', y', w'] = [u, v, w] \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$x = \frac{x'}{w'}; y = \frac{y'}{w'}, \quad (4)$$

式中: u 、 v 、 w 为初始坐标; x 、 y 为变换后的横、纵坐标;

标; $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 为透视变换矩阵。

6) 组件划分

将多个组件图划分成单个组件图。

2.2 选择增强因子

选择增强因子可以选择遮挡部分进行增强,计算流程如图 2 所示。

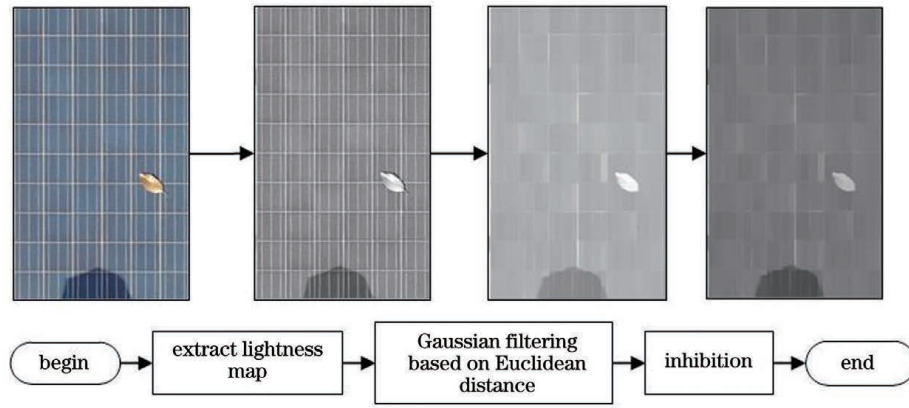


图 2 选择增强因子计算流程

Fig. 2 Flow chart of selective enhancement factor

1) 提取明度图

从 RGB 颜色空间提取 V 分量^[14]：

$$V = \max(R, G, B). \quad (5)$$

2) 基于欧氏距离的高斯滤波

由于明度图各像素点之间存在某些关系,为保证在计算高斯权重时尽量保留原像素点间的关系,在高斯权重中加入欧氏距离^[19]：

$$G(p, q) = \exp \left[-\frac{D(p, q)}{2\sigma^2} \right], \quad (6)$$

式中: p, q 为明度图中两个不同像素点; $D(p, q)$ 为明度图中 p, q 的欧氏距离; σ 为标准差,参考文献^[19]中取值为 3。

明度图中 x, y 轴的平滑权重^[19]为

$$\begin{cases} w_{x,p} = \frac{T_{x,p}}{|\partial_x V|_p + \epsilon} \\ w_{y,p} = \frac{T_{y,p}}{|\partial_y V|_p + \epsilon} \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_{x,p} = \sum_{q \in \Omega_p} \frac{G(p, q)}{\left| \sum_{q \in \Omega_p} G(p, q) (\partial_x V)_q \right| + \epsilon} \\ T_{y,p} = \sum_{q \in \Omega_p} \frac{G(p, q)}{\left| \sum_{q \in \Omega_p} G(p, q) (\partial_y V)_q \right| + \epsilon} \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $T_{x,p}, T_{y,p}$ 为明度图 x, y 方向上的边缘平滑权重; $(\partial_x V)_p, (\partial_y V)_p$ 为明度图中点 p 在 x, y 方向上的导数; $G(p, q)$ 为明度图中 p, q 两点基于欧氏距离的高斯权重; $G(p, q) (\partial_x V)_q, G(p, q) (\partial_y V)_q$ 为高斯处理后点 p 在 x, y 方向上的导数; ϵ 为缓和系数,参考文献^[19]中取值为 10^{-3} 。

得到某像素点在 x, y 轴的平滑权重后,需要进行滤波。为使选择增强因子与明度图尽量相似,且在边缘部分尽量保持现状,使用公式^[19]：

$$\sum_p \left\{ (V_p - L_p)^2 + \lambda \left[w_{x,p} (\partial_x L)_p^2 + w_{y,p} (\partial_y L)_p^2 \right] \right\} = 0, \quad (9)$$

式中: L 为选择增强因子; λ 为权重系数,参考文献^[19]中取值为 0.6; $(\partial_x L)_p, (\partial_y L)_p$ 为选择增强因子中像素点 p 值沿 x, y 方向上的导数。

3) 抑制处理

由于 HSV 颜色空间中只有 H 值会影响颜色的变化,相对于其他颜色空间更可控,故增强处理在 HSV 颜色空间进行。为避免增强的组件变色,还需进行抑制处理,计算公式为

$$H_i = (1 - \alpha)H_i + \alpha \times L_i, \quad i \in \Omega_{\text{module}}, \quad (10)$$

$$L' = L \times \alpha, \quad (11)$$

式中: i 为组件中的像素点; H_i 为原图中 i 点的 H 值; L_i 为增强因子中 i 点的数值; α 为抑制因子,计算结果为 0.85; L' 为经抑制处理后的选择增强因子。

2.3 基于选择增强的图像分割

选择增强的目的是减少遮挡分割的干扰因素,提高遮挡部分与未遮挡部分的对比度,主要考虑以下几个内容。

1) 由于地处南方,多数附着遮挡物均为绿色,故选择在 RGB 颜色空间的绿通道进行遮挡分割。为降低遮挡分割的难度,在选择增强过程中还需要把附着遮挡物变为绿色。

2) 光伏组件由多个电池片拼接而成,电池片的饱和度不一致,会导致组件的不同位置存在色差^[20]。为防止色差对遮挡的分割造成影响,在选择增强过程中需要平衡组件的饱和度。

3) 在附着遮挡物识别中,栅线的影响最大。栅线是白色的,在 HSV 颜色空间中只有降低其明度可以使其略微变色。

选择增强就是一种选择增强因子在 HSV 颜色空间的 H 、 S 、 V 三个通道分别选择附着遮挡物、组件和栅线进行处理的方法,增强影子与组件、附着遮挡物与栅线的对比度。增强成功的标志是附着遮挡物变为绿色,影子变亮,组件和栅线变暗,且组件颜色均匀。

在得到选择增强因子后,需要利用其对 HSV 颜色空间各通道进行增强:

$$\begin{cases} H_{\text{new}} = a \times H + (1 - a) \times L' \\ S_{\text{new}} = b \times S + (1 - b) \times L' \\ V_{\text{new}} = c \times V + (1 - c) \times L' \end{cases}, \quad (12)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为 H 、 S 、 V 调整系数。其中 a 、 b 、 c 的计算公式为

$$\begin{cases} H_{\text{green}} = a \times H_j + (1 - a) \times L'_j, j \in \Omega_{\text{shadow}} \\ S_{\text{max}} = b \times S_k + (1 - b) \times L'_k, k \in \Omega_{\text{module}} \\ V_{\text{min}} + 1 = b \times V_l + (1 - b) \times L'_l, l \in \Omega_{\text{line}} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: H_{green} 是绿色的 H 值; H_j 是原图中附着遮挡物的 H 值; j 为原图中附着遮挡物的像素点; S_{max} 是原图组件的最高饱和度; S_k 是原图组件任意点的饱和度; k 为原图中组件的像素点; V_{min} 是白色的最低明度; V_l 是原图中白色的明度; l 为原图中栅线的像素点。

在选择增强后,将 H 、 S 、 V 三个通道合并、转化为 RGB 颜色空间,再进行图像分割,流程如图 3 所示。在选择增强得到的图片中,附着遮挡物变成绿色,如同青苔生长,故称“苔衣图像”。

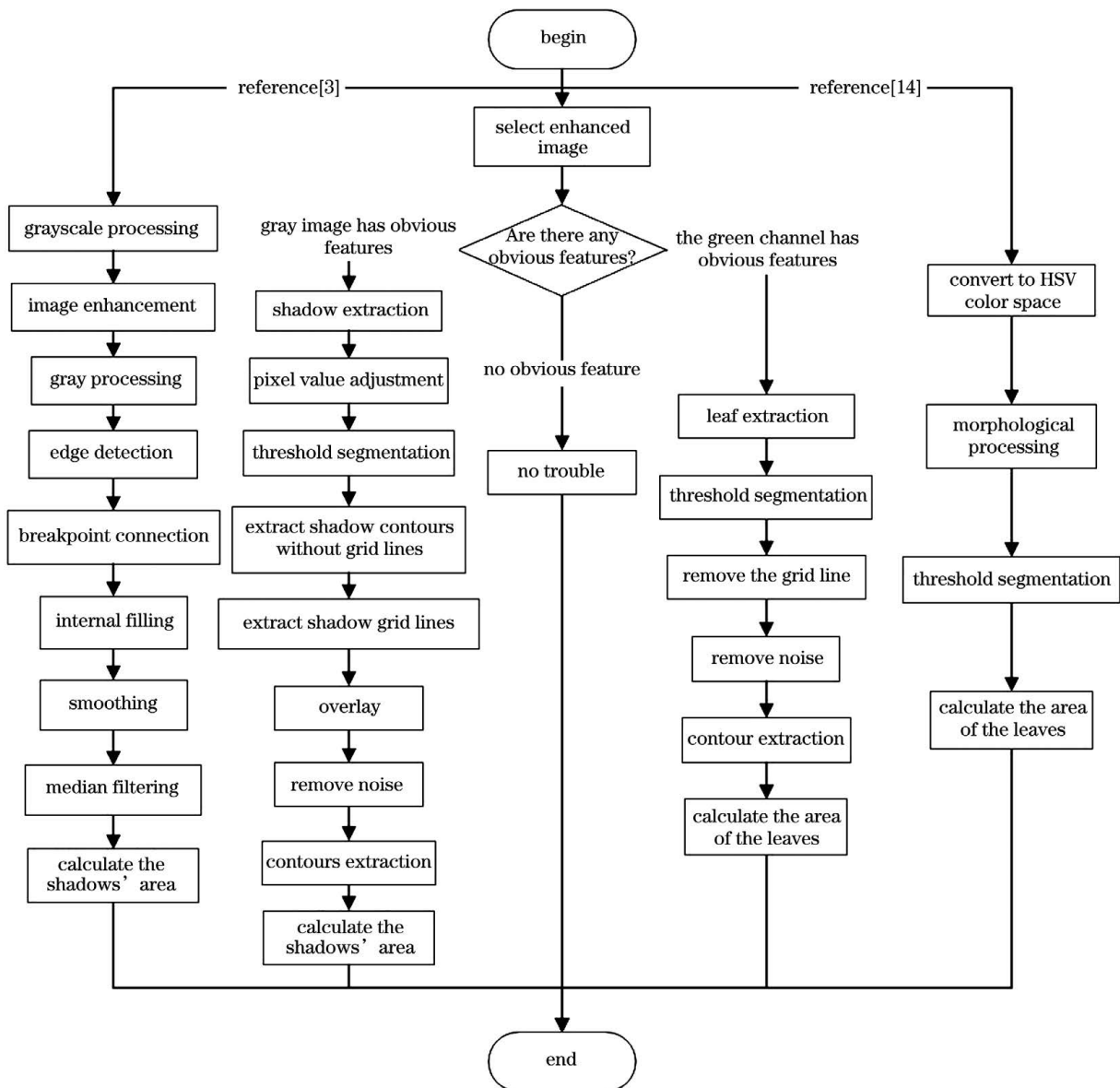


图 3 图像分割流程

Fig. 3 Flow chart of image segmentation

3 实验比较与分析

3.1 增强实验

将得到的“苔衣图像”和原图对比,结果如图 4

所示。经过选择增强处理后,附着遮挡物全部变为绿色,原颜色为绿的树叶颜色会略微加深,如图 4(a)所示。阴影变亮,组件和栅线变暗,且组件整体颜色比原图更均匀。

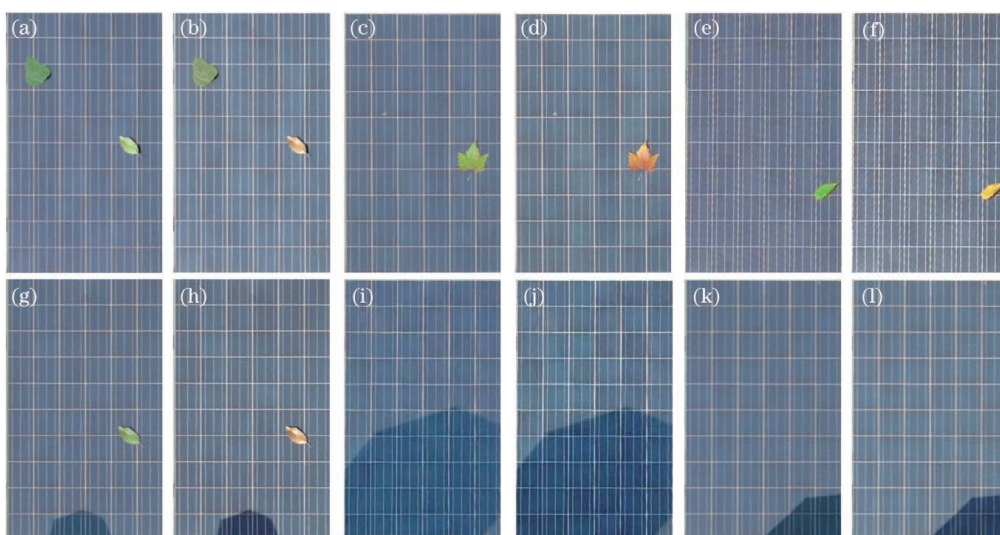


图 4 苔衣图片和原图对比。(a)树叶增强图片 1;(b)原图 1;(c)树叶增强图片 2;(d)原图 2;(e)树叶增强图片 3;(f)原图 3;
(g)树叶和影子增强图片;(h)原图 4;(i) 影子增强图片 5;(j)原图 5;(k)影子增强图片 6;(l)原图 6

Fig. 4 Comparison of the moss images and the original images. (a) Enhanced leaf image 1; (b) original image 1; (c) enhanced leaf image 2; (d) original image 2; (e) enhanced leaf image 3; (f) original image 3; (g) enhanced leaf and shadow image; (h) original image 4; (i) enhanced shadow image 5; (j) original image 5; (k) enhanced shadow image 6; (l) original image 6

3.2 主观对比

按照图 3 流程对多张光伏组件的图像进行分

割,获得遮挡轮廓,放大截取遮挡部分的细节,结果如图 5、6 所示。

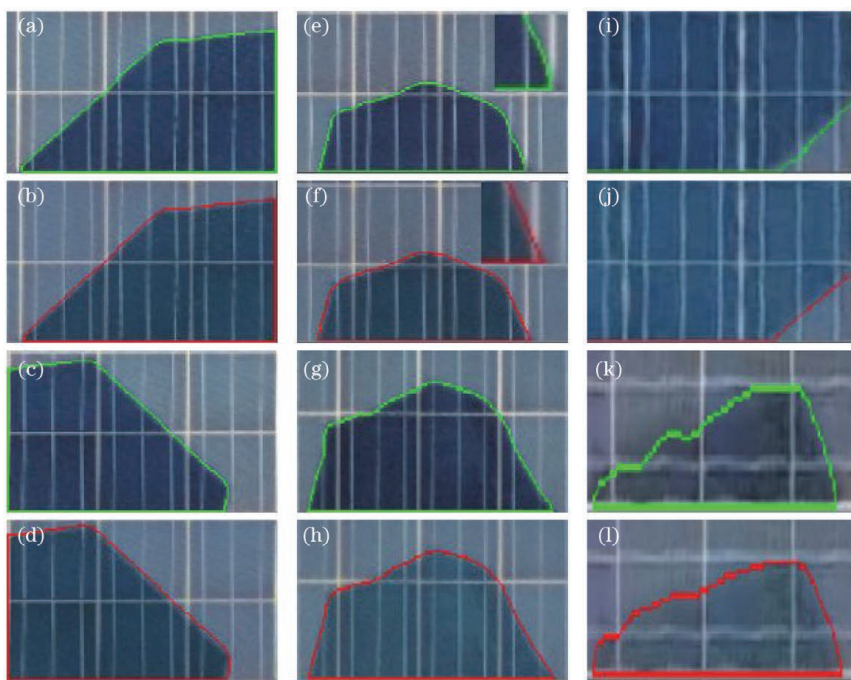


图 5 阴影分割对比。(a)(c)(e)(g)(i)(k)文献[3]算法影子分割;(b)(d)(f)(h)(j)(l)所提算法影子分割

Fig. 5 Comparison of shadow segmentation. (a)(c)(e)(g)(i)(k) Shadow segmentation based on the algorithm in Ref. [3]; (b)(d)(f)(h)(j)(l) shadow segmentation based on the proposed algorithm

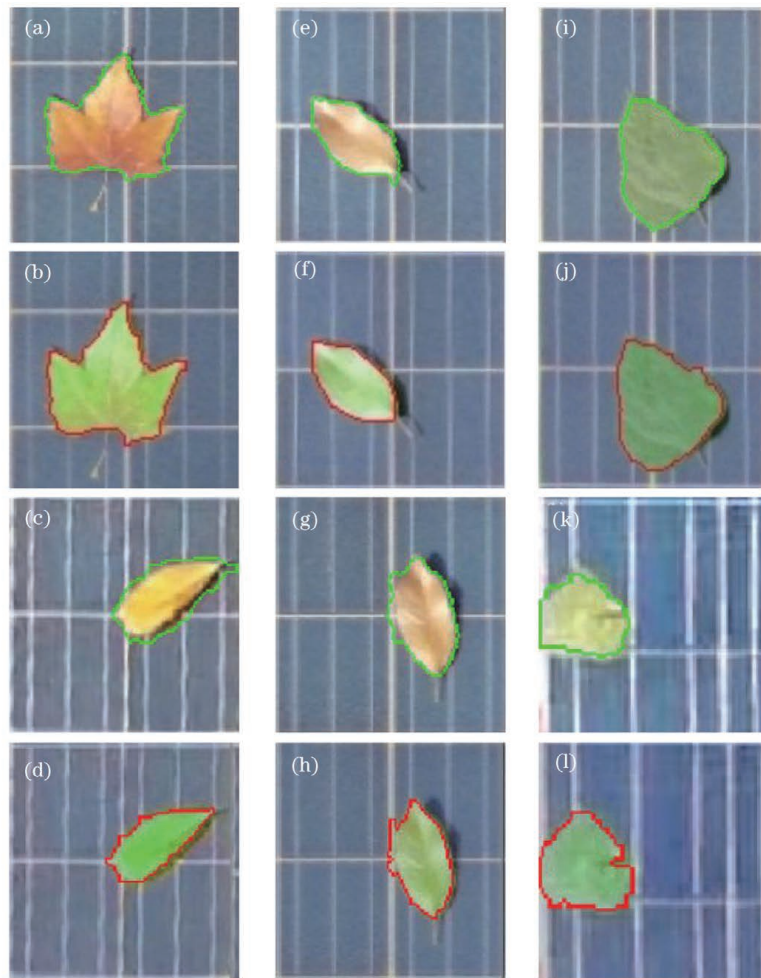


图 6 树叶分割对比。(a)(c)(e)(g)(i)(k)文献[14]算法树叶分割;(b)(d)(f)(h)(j)(l)所提算法树叶分割
Fig. 6 Comparison of leaf segmentation. (a)(c)(e)(g)(i)(k) leaf segmentation based on the algorithm in Ref. [14];
(b)(d)(f)(h)(j)(l) leaf segmentation based on the proposed algorithm

文献[3]中的阴影分割算法对直线边界掌握不足,导致图 5(e)、(i)的右下角部分过于弯曲,而所提算法提高了直线边界的识别准确率,如图 5(f)、(j)的右下角部分所示;文献[3]中的算法在小阴影识别中会丢失细节,导致图 5(k)的部分影子未能被识别,而所提算法对细节掌控更精准,如图 5(l)所示;其他情况下文献[3]中的算法与所提算法在视觉上差距不大。

在复杂树叶分割时,文献[14]中的算法提取的轮廓基本完全包含树叶,但轮廓中也包含未遮挡的部分,所提算法提取的轮廓细节更加丰富,如图 6(a)和图 6(b)所示;在简单树叶分割时,文献[14]中的算法提取的轮廓仍会出现上述问题,而所提算法提取的轮廓更准确,如图 6(c)、(e)、(g)和图 6(d)、(f)、(h)所示;根据图 6(i)、(k)和图 6(j)、(l)可知,在原颜色为绿的树叶分割中,文献[14]中的算法在边界处理上略有误差,所提算法提取的边

界更加完整。

综上,相对于文献[3]中的算法,所提算法提取的影子轮廓更平滑,对细节掌握更加优秀;相对于文献[14]中的算法,所提算法提取的树叶轮廓更精准、细节更丰富,原颜色为绿的树叶的对比结果不太明显。

3.3 客观对比

为了客观评价文献[3]算法、文献[14]算法与所提算法的准确性,采用准确率、精确率、召回率和交并比(IoU)为评价指标,公式^[21]分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{N_{TP} + N_{TN}}{N_{TP} + N_{TN} + N_{FP} + N_{FN}} \\ P = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \\ R = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \\ R_{IoU} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP} + N_{FN}} \end{array} \right. , \quad (14)$$

式中: N_{TP} 为遮挡正确分类的像素数目; N_{TN} 为未遮挡正确分类的像素数目; N_{FN} 为遮挡判定为未遮挡的像素数; N_{FP} 为未遮挡判定为遮挡的像素数目。

表 1 为文献[3]中的算法与所提算法关于影子识别的对比,表 2 为文献[14]中的算法与所提算法关于树叶识别的对比。

表 1 影子识别对比

Table 1 Comparisons of shadow distinguish

Shadow	A / %		P / %		R / %		R_{IoU} / %	
	Ref. [3]	Proposed algorithm	Ref. [3]	Proposed algorithm	Ref. [3]	Proposed algorithm	Ref. [3]	Proposed algorithm
Shadow 1	97.54	97.63	94.85	97.39	97.98	98.13	94.42	95.09
Shadow 2	97.52	98.12	98.13	97.89	97.53	97.54	96.05	96.67
Shadow 3	94.16	94.01	92.51	96.47	95.81	95.19	90.81	92.15
Shadow 4	91.22	97.62	94.67	95.44	96.33	96.74	92.05	93.17
Shadow 5	90.53	92.24	91.57	93.55	98.95	99.06	93.49	94.56
Shadow 6	87.52	93.86	93.70	90.38	84.58	92.72	83.43	89.74
Average	94.08	95.58	94.24	95.19	95.20	96.56	91.71	93.56

表 2 树叶识别对比

Table 2 Comparisons of leaf distinguish

Leaf	A / %		P / %		R / %		R_{IoU} / %	
	Ref. [14]	Proposed algorithm	Ref. [14]	Proposed algorithm	Ref. [14]	Proposed algorithm	Ref. [14]	Proposed algorithm
Leaf 1	94.88	95.90	90.14	92.61	94.31	94.73	91.30	92.42
Leaf 2	90.98	96.83	84.37	92.75	99.99	98.26	84.65	93.25
Leaf 3	97.99	99.13	89.76	95.03	99.09	99.42	87.64	92.47
Leaf 4	89.79	90.90	88.78	96.81	84.72	92.38	85.11	92.15
Leaf 5	90.29	93.08	91.97	96.81	97.32	96.40	88.88	90.04
Leaf 6	84.23	90.07	95.23	97.52	78.45	85.41	80.11	89.66
Average	91.36	94.32	90.04	95.26	92.31	94.43	86.28	91.67

由表 1 可知,文献[3]提出的算法的平均准确率、平均精确率、平均召回率和平均交并比都比所提算法要低,即所提算法在影子识别中的综合性能要优于文献[3]中的算法。在某些情况下,如 shadow 6,文献[3]中的算法的精确率比所提算法要高,但其阴影轮廓并不完整,遗漏的细节过多;如 shadow 1、shadow 2,文献[3]中的算法与所提算法性能接近,但整体而言还是所提算法略优。

由表 2 可知,文献[14]提出的算法的平均准确率、平均精确率、平均召回率和平均交并比都比所提算法要低,即所提算法在影子识别中的综合性能要优于文献[14]中的算法。在栅线干扰小的时候,两种算法差距小,如 leaf 1、leaf 5;在栅线干扰较严重时,所提算法优于文献[14]中的算法,如 leaf 3、

leaf 4;在小树叶分割时,所提算法也明显优于文献[14]中的算法,如 leaf 2、leaf 6。整体而言,所提算法在识别影子、树叶方面的性能优异。

4 结 论

在改进树叶、阴影识别算法的基础上,提出基于选择增强的图像分割算法。首先对光伏阵列的图像进行预处理,获得光伏组件的图片;接着根据明度图提出增强因子,对光伏组件图片进行选择增强,得到“苔衣图像”;然后对其进行图像分割,实现了遮挡的类型识别、面积提取和定位。结果表明,所提算法有效可行,在影子识别中,所提算法的 4 种指标比文献[3]中的算法均提高了 1%左右,在树叶识别中,比文献[14]中的算法均提高了 4%左右。下一步研

究是进行阴影遮挡下的仿真建模。

参 考 文 献

- [1] Ma J, Yuan J H, Li Y J, et al. The application of image recognition in mobile solar power device based on light intensity detection in shaded area[J]. *Electrical Engineering*, 2014(6): 93-95, 119.
马健, 袁建华, 李云建, 等. 图像识别在可移动太阳能发电装置上的应用—基于阴影区域光强检测[J]. *电气技术*, 2014(6): 93-95, 119.
- [2] Li S M, Xi W H. Influence of hot spot on power generation performance of photovoltaic module [J]. *Power Equipment*, 2013, 27(1): 61-63.
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] Wang J L, Liu L Q, Zhang C M. Application of image processing in shadow of photovoltaic panels [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(2): 284-289.
王建丽, 刘立群, 张聪明. 图像处理在光伏局部阴影中的应用[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 284-289.
- [4] Kanade T. Region segmentation: signal vs semantics [J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1980, 13(4): 279-297.
- [5] Gandhi N J, Shah V J, Kshirsagar R. Mean shift technique for image segmentation and modified canny edge detection algorithm for circle detection[C]//2014 International Conference on Communication and Signal Processing, April 3-5, 2014, Melmaruvathur, India. New York: IEEE Press, 2014: 246-250.
- [6] Zhao Q S, Wang Y Y, Wang X P, et al. Substation infrared image segmentation based on novel threshold selection method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0810002.
赵庆生, 王雨滢, 王旭平, 等. 基于新型阈值选择方法的变电站红外图像分割[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0810002.
- [7] Charles R Q, Hao S, Mo K C, et al. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 2017: 77-85.
- [8] Ji W C. The solar cell surface defect detection based on image technology[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015: 5-17.
吉网存. 基于图像技术的太阳能电池表面缺陷检测[D]. 上海: 华东理工大学, 2015: 5-17.
- [9] Qi J, Ye B J, Li Y C, et al. A simplified simulation method for PV array's output characteristics based on shadow recognition[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2020, 30(2): 185-195.
戚军, 叶培佳, 李袁超, 等. 基于阴影识别的光伏阵列输出特性简化仿真方法[J]. *高技术通讯*, 2020, 30(2): 185-195.
- [10] Wang J, Liang C J, Guo J X, et al. Measurement of plant leaf area based on OpenCV[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(6): 2023-2027.
王键, 梁春娇, 郭俊先, 等. 基于 OpenCV 确定植物叶片面积[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(6): 2023-2027.
- [11] Choudhury S D, Yu J G, Samal A. Leaf recognition using contour unwrapping and apex alignment with tuned random subspace method [J]. *Biosystems Engineering*, 2018, 170: 72-84.
- [12] Diaz G. Contour recognition of complex leaf shapes [J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0189427.
- [13] Watchareeruetai U, Dittthawibun M, Phanjan K. Detection of leaf apex and base by using contour and symmetry analysis[C]//2015 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), November 23-26, 2015, Chiang Mai, Thailand. New York: IEEE Press, 2015.
- [14] Li C C, Zhang Y D, Wang C L. Research on HSV model for identifying and locating round plants[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(6): 220-223.
李超超, 张远东, 王昌龙. 圆形植物识别定位的 HSV 模型研究[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(6): 220-223.
- [15] Wang Y, Li C. Point cloud adaptive registration algorithm based on color information and geometric information[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201015.
王勇, 黎春. 基于颜色信息和几何信息的点云自适应配准算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201015.
- [16] Zhang X L. Acceleration research and application of bilateral filtering[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019: 6-9.
张雪利. 双边滤波加速研究及其应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2019: 6-9.
- [17] Zhang L Y, Han Y, Zhao Y X, et al. Hough transform and Faster-RCNN method for detecting pedestrians on rails [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2020, 41(2): 100-103.
张丽艳, 韩熠, 赵艺璇, 等. 霍夫变换和 Faster-RCNN 铁轨上行人检测方法[J]. *大连交通大学学报*, 2020, 41(2): 100-103.
- [18] Liu J L, Wang H Q, Wang K, et al. Spectral image registration method based on SURF maximum submatrix [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,

2019, 56(6): 063002.

刘加林, 王慧琴, 王可, 等. 基于快速稳健特征最大子矩阵的光谱图像配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 063002.

[19] Zhang Q, Nie Y W, Zheng W S. Dual illumination estimation for robust exposure correction [J]. Computer Graphics Forum, 2019, 38(7): 243-252.

[20] Cao Y X, Zhang Q Y, Luo G, et al. The application of precision colorimeter in the photovoltaic modules chromatic aberration phenomenon [J]. Electronics

Quality, 2017(9): 43-46.

曹一歆, 张秋艳, 罗刚, 等. 简述便携式精密色差仪在光伏组件色差问题上的应用[J]. 电子质量, 2017(9): 43-46.

[21] Liu H, Wang X L. Remote sensing image segmentation model based on attention mechanism [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041015.

刘航, 汪西莉. 基于注意力机制的遥感图像分割模型[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041015.