基于无人机与 HSV 空间的光伏电池板检测分析

赵玲玲，汪 烨，刘 俊
（上海电机学院 机械学院，上海 201306）

摘要：针对复杂环境下图像分析的困难性，研究了一种基于 HSV 空间模型的图像分割与检测方法。首先，利用无人机采集图像，区域分割提取出光伏电池板区域。其次，运用高斯卷积检测裂纹图像的梯度。最后，应用形态学图像处理与 HSV 空间模型的方法提取遮挡物，计算最小外接矩形面积与其占光伏电池板的比例。该方法能有效地对复杂背景下的光伏图像进行区域分割与检测，具有一定创新性和实用价值。

关键词：工业无人机；HSV 空间模型；图像分割；区域检测；形态学处理
中图分类号：TN219 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-8891(2020)10-0978-05

Detection and Analysis of Photovoltaic Panels Based on UAV and HSV Space

ZHAO Lingling，WANG Ye，LIU Jun
(*School of Mechanical Engineering*, *Shanghai Dianji University*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract：To address the difficulty of image analysis in a complex environment, an image segmentation and detection method of an HSV spatial model was studied. First, a UAV was used to collect images. Second, Gaussian convolution was used to detect the gradient of the cracked image after the photovoltaic (PV) panel area was extracted. Finally, morphological image processing and the HSV spatial model were applied to extract the occlusion, and the ratio of the minimum external rectangle area to the PV panel area was calculated. This method can effectively segment and detect PV images in complex backgrounds and provides certain innovative and practical value.

Keywords：industrial UAV, HSV space model, image segmentation, area detection, morphological processing

0 引言

能源危机与环境问题受全球重视，光伏产业技术的发展也备受关注[1]。光伏电站分布着大面积的太阳能电池板，电池板的发电效率直接影响着光伏电站的发电量，准确高效地监测维护电池板对光伏电站意义重大[2]。目前的检测方法主要有人工勘测方法[3]、电致发光检测 EL（electro luminescence）法、超声波检测法等。近年来，人们开始利用工业无人机对规模大、危险性高的监测目标进行巡检。

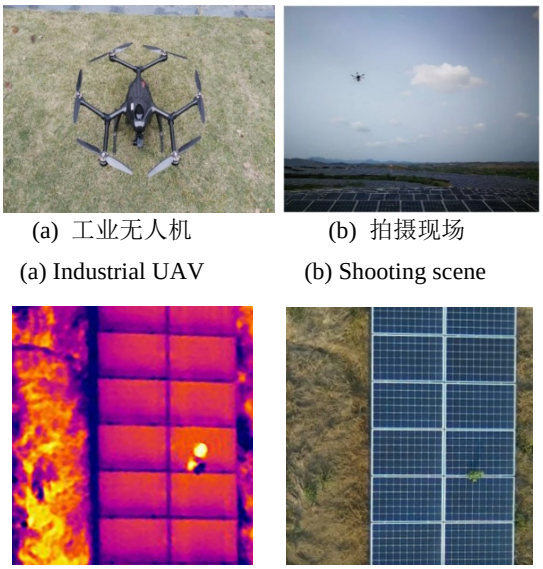
当无人机采集到光伏图像后需要进行区域分割与检测。文献[4]提出一种准确有效的统计红外热斑图像中局部特征的分割算法。文献[5]提出基于概率模型改进的 PV 性能评估阈值方法，识别功率损耗超出了基于自适应阈值的方法。文献[6]提出一种新的缺陷检测方法，通过前景分割，求灰度差分图、形态学开运算等步骤准确完整地分割出缺陷位置。文献[7]从对人眼吸引程度的角度出发，提出一种视觉显著性缺陷检测算法，在含有多种缺陷的图片库上进行实验证明了该算法的有效性。文献[8]利用无人机设备巡检绝缘子，采用阈值分割、形态学与边缘检测等技术对绝缘子进行图像识别。然而，实际图像包含有复杂的背景信息会给后续图像分析带来一定的困难，因此有效的图像分割方法是光伏电池板检测与分析的重要保障。

基于以上原因，本文在利用工业无人机采集图像的基础上提出一种基于 HSV 空间模型的图像分割与检测方法。

收稿日期：2019-11-28；**修订日期**：2019-12-20.
作者简介：赵玲玲（1996-），女，硕士研究生，主要研究方向为光伏电站、变电站等故障图像检测分析，E-mail：angelj00@163.com。
通信作者：刘俊（1971-），女，硕士，副教授，副院长，主要研究方向为机器人视觉导引与位姿控制。
基金项目：国家自然科学基金（51809161）。

1 图像获取

本文基于工业无人机采集光伏电池板图像，如图 1(a)所示。搭载可见光与红外一体的云台相机，通过通信系统将图像数据实时传输至地面站。该无人机最大载重为 6 kg，定点悬停精度水平方向≤1.15 m，垂直方向≤0.25 m。可见光相机的分辨率为 1920×1080，红外相机的分辨率为 640×512，波长范围为 8～14 μm，焦距为 19 mm。规划飞行路径后让无人机在合适的高度采集图像。图 1(b)为无人机图片采集现场。图 1(c)与图 1(d)分别为红外图像与可见光图像。



(a) 工业无人机 (b) 拍摄现场

(a) Industrial UAV (b) Shooting scene

(c) 红外图像 (d) 可见光图像

(c) Infrared image (d) Visible light image

图 1 获取图像的工具以及现场图

Fig.1 Tools for acquiring images and site maps

2 HSV 空间模型与图像分割

2.1 HSV 与 RGB 空间模型

目前来看，在计算机视觉研究领域存在着多种类型的颜色空间模型，最熟悉的是以 R、G、B 三个分量为主色在三维坐标系中呈现为单位正方体模型，此外还有 HIS（Hue, Intensity, Saturation）与 HSV（Hue, Saturation, Value）两种以圆柱体三维坐标表示的颜色空间模型。由于 R、G、B 三个分量会随着光照变化而变化，相近颜色的 R、G、B 值差别可能会很大[9]，而 HSV 颜色空间模型在视觉上比 RGB 模型更具有直观性。因此，本文选择在 HSV 空间对图像进行处理。

图 2 为 HSV 模型，由 RGB 模型转换到 HSV 模型的转换表达式为：

$$H=\begin{cases} 0 & \Delta=0 \\ 60°\times\dfrac{G-B}{\Delta}+0 & \mathrm{Max}=R \\ 60°\times\dfrac{B-R}{\Delta}+120° & \mathrm{Max}=G \\ 60°\times\dfrac{R-G}{\Delta}+240° & \mathrm{Max}=B \end{cases} \tag{1}$$

$$S=\begin{cases} 0 & \mathrm{Max}=0 \\ \dfrac{\Delta}{\mathrm{Max}} & \mathrm{Max}\neq 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$V=\mathrm{Max} \tag{3}$$

式中：Δ为 RGB 三个分量最大与最小值之差，$\Delta=\max(R,G,B)-\min(R,G,B)$；Max 为 RGB 三个分量的最大值，$\mathrm{Max}=\max(R,G,B)$。

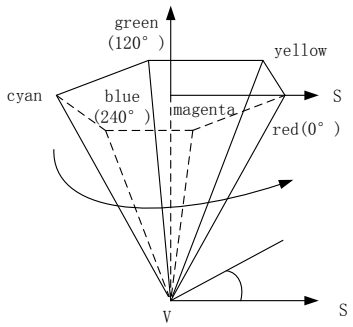


图 2 HSV 模型 Fig.2 HSV model

2.2 前景分割

通过对 HSV 与 RGB 空间模型的转换分析，将原始光伏面板 RGB 图像通过设定 HSV 蓝色取值范围对其进行分割，将面板从复杂的背景中提取出来。谢永祥等[10]基于 HSV 空间对汽车牌识别方法研究，通过二次标记车牌图片减少蓝色背景干扰的方法可以有效地分割出车牌。因此本文提出一种基于 HSV 颜色空间模型的 3 个分量取值的方法分割光伏面板，提取前景区域。蓝色与绿色区域在 HSV 空间取值范围如表 1 所示。

表 1 各 HSV 分量取值范围

Table 1 Value range of each HSV component

Components	*H*	*S*	*V*
Blue	[0.56-0.71]	[0.36-1]	[0.36-1]
Green	[0.19-0.50]	[0.17-1]	[0.18-1]

依据上述 HSV 空间模型取值范围对原始图像进行区域分割。设原始图像为 $f(x,y)$，其大小为 $[m,n,l]$，参照表 1 中蓝色分量的 HSV 取值范围，区域分割的步骤为：

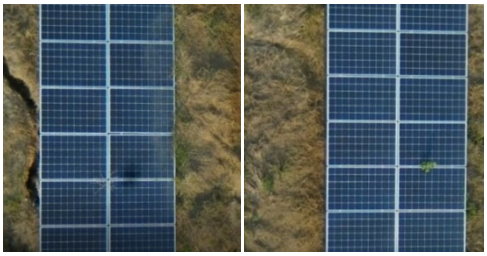
1）将原始图像 $f(x,y)$从 RGB 空间转换到 HSV 空间，得到 HSV 空间图像 $G(x,y)$；

2）定义矩阵 target 1，大小为$[m,1]$，将图像 $G(x,y)$在[0.56～0.71]的 H 分量，[0.36～1]的 S 分量，[0.36～1]的 V 分量的像素点进行 y 方向上的标记，将标记结果复制到 target 1 中，定位区间位置为$[1: m]$；

3）定义矩阵 target 2，大小为$[1,n]$，重复步骤 2），对图像 $G(x,y)$的像素点进行 x 方向上的标记，将标记结果复制到 target 2 中，并寻找 target 2 中标记的蓝色像素点最小位置 pos1 与最大位置 pos2，定位区间位置为[pos1,pos2]；

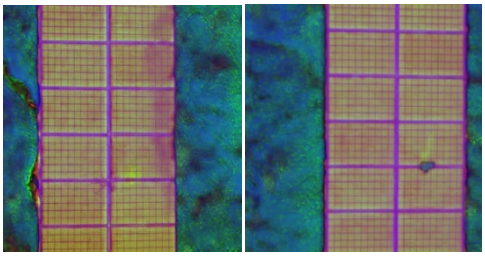
4）将标记的区间位置返回到原图像中得到分割结果。

在此项工作中，本文调查了两种光伏电池板缺陷绿植遮挡与裂纹。图 3(a)、(b)是含有裂纹、绿植遮挡的光伏电池板原图像。通过本文提出的图像分割方法将图 3(a)、(b)转换到 HSV 空间中如图 3(c)、(d)所示，视觉上的颜色效果要比在 RGB 空间中更具有直观性，有效地将光伏电池板从复杂的周围环境中提取出来，得到图 3(e)、(f)的分割结果，大大降低了图像处理计算与分析的冗余程度。



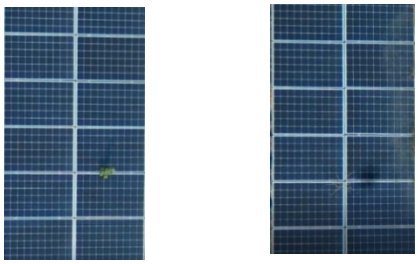
(a) 裂纹板 (b) 绿植板

(a) Cracked panel (b) Green panel



(c) HSV 裂纹板 (d) HSV 绿植板

(c) HSV cracked panel (d) HSV green panel



(e) 裂纹板分割结果 (f) 绿植板分割结果

(e) Crack panel segmentation results (f) Green panel segmentation results

图 3 HSV 空间中分割光伏太阳能电池板

Fig.3 Segmented photovoltaic solar panels in HSV

3 障碍缺陷分析

3.1 高斯滤波及裂纹分析

光伏电池板表面分布着横竖交错的栅极以及主电极线，用于输送光电转化的电流。当利用边缘检测、形态学方法、自适应阈值分割等图像处理方法时会影响结果的分析。因此，在将光伏电池板从复杂的背景环境中分割出来后，需要对其做进一步图像处理。Li X.等[11]提出一种 FODG（first-order derivative of Gaussian function）滤波方法，并基于无人机采用可见光相机对光伏电池板上存在的蜗牛印迹以及灰尘遮蔽区域进行缺陷检测。文献[12]提出一种改进的不规则区域的高斯滤波算法，该方法去除噪声的同时还保留纹理细节信息，相比较传统的高斯滤波效果更好。因此，本文采用高斯卷积滤波求取梯度的方法分别去除光伏电池板表面水平与垂直方向的栅极纹路，突出缺陷边缘。$g(x,y)$为高斯函数，$f(x,y)$为原图像函数，具体方法如下：

二维的高斯函数形式如式(2)所示，x、y 为自变量，δ为方差：

$$g(x,y)=\frac{1}{2\pi\delta^2}\mathrm{e}^{-(\frac{x^2+y^2}{2\delta^2})} \tag{4}$$

利用高斯函数与导数进行卷积求得 x、y 两个方向的卷积核 ker$x$、ker$y$：

$$\mathrm{ker}x(x,y;\delta)=\frac{\partial g(x,y)}{\partial x}=\frac{x}{2\pi\delta^4}\mathrm{e}^{-(\frac{x^2}{2\delta^2})} \tag{5}$$

$$\mathrm{ker}x(x,y;\delta)=\frac{\partial g(x,y)}{\partial y}=\frac{y}{2\pi\delta^4}\mathrm{e}^{-(\frac{y^2}{2\delta^2})} \tag{6}$$

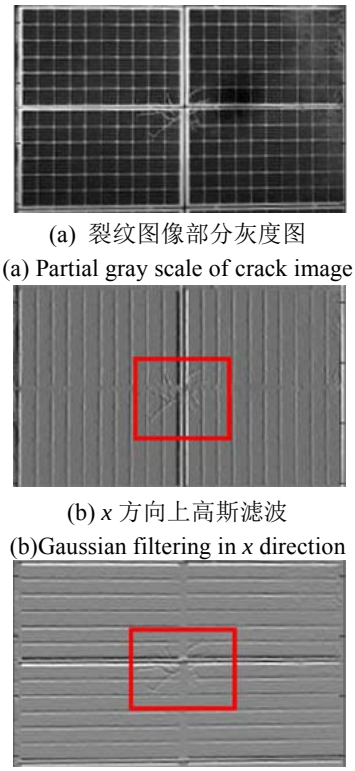
将原图像函数 $f(x,y)$与卷积核进行卷积：

$$f_{\mathrm{ker}x}=\mathrm{ker}x(x,y;\delta)\otimes f(x,y) \tag{7}$$

$$f_{\mathrm{ker}y}=\mathrm{ker}x(x,y;\delta)\otimes f(x,y) \tag{8}$$

通过图像滤波的方法去除光伏电池板表面的栅极条纹，减少图像计算的复杂度且该方法对噪声敏感程度低。δ参数控制图像的滤波模糊程度。

图 4(b)、(c)为图像在 x、y 方向上的高斯滤波结果。运用此方法可以从 x、y 两个方向分别将光伏电池板表面分布的栅极网格线去除，清楚地观察到裂纹的边缘及其发展趋势。



(a) 裂纹图像部分灰度图
(a) Partial gray scale of crack image

(b) x 方向上高斯滤波
(b)Gaussian filtering in x direction

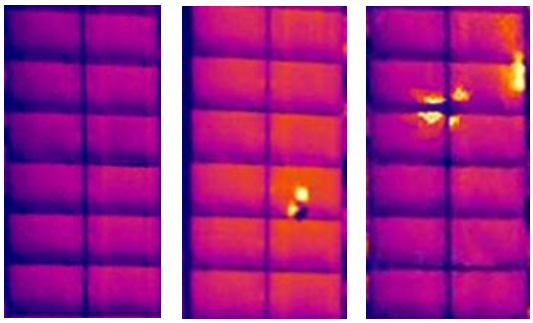
(c) y 方向上高斯滤波
(c) Gaussian filtering in y direction

图 4 滤波图像

Fig.4 Filtered image

3.2 遮挡物分析

光伏电池板除了有裂纹这样的可见缺陷外，绿植遮挡与常见的灰尘遮挡一样能使光伏电池板产生热斑效应。本文拍摄的红外图片如图 5 所示。



(a) 无灰尘遮掩 (b) 灰尘遮掩热斑 (c) 裂纹热斑
(a) Without dust (b) Dust occlusion (c) Crack

图 5 光伏电池板的红外图像

Fig.5 Infrared image of photovoltaic panels

光伏电池板红外图像如图 5 所示。其中，图 5(a)是无较多灰尘遮盖的光伏电池板的红外图像，整体呈现出粉紫色；图 5(b)是较重灰尘遮盖的电池板且有热斑，整体呈现出橘红色；图 5(c)是缺陷的地方呈现出块状的热斑。将红外图像与原图进行对比可以发现热斑出现的原因是由电池板出现裂纹或有绿植的遮挡造成。

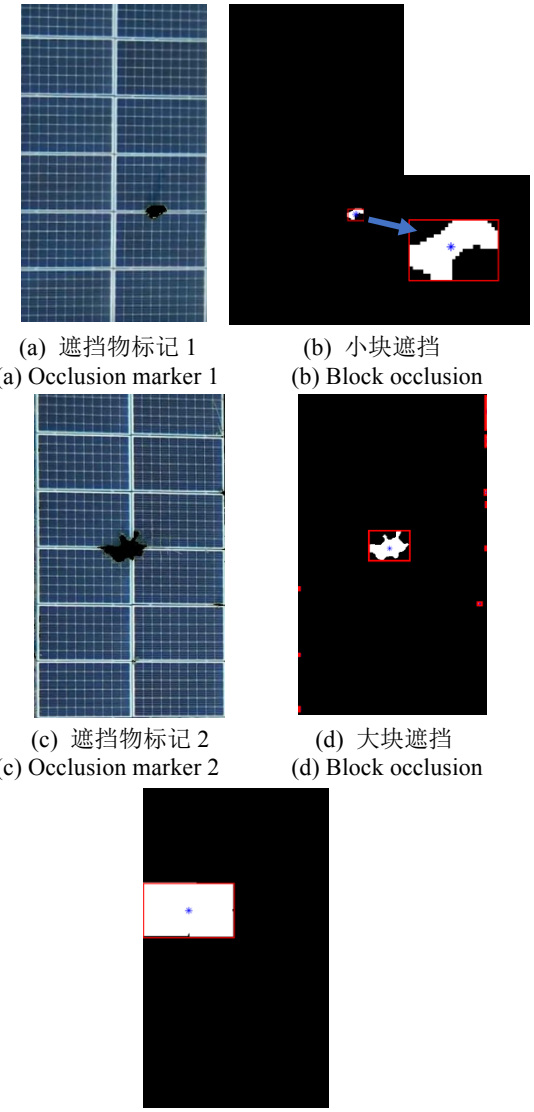
对绿植遮挡物的识别与分割方法步骤如下：

1）将图 3(e)与(f)转换到 HSV 空间中，结合表 1 中绿色分量的 HSV 取值范围作为标记条件，并将识别到的绿色像素点 3 个分量 $H(i,j)$、$S(i,j)$、$V(i,j)$ 的值都设置为 0。

2）采集的图像易出现光照不均等问题[13]，因此进行图像增强，从三通道图中提取出 H 单通道进行图像处理。设定 H 通道的取值范围为[0.43～0.689]，填充空洞并进行形态学开运算操作。形态学开运算中，用结构元素 S 来处理 H 图像，先腐蚀后膨胀，即：

$$H \circ S = (H \Theta S) \oplus S \tag{9}$$

3）形态学方法处理过图像后，求出遮挡区域的质心及其最小外接矩形面积以及每块光伏电池板的最小外接面积[14]。其中，矩形面积最大的即为遮挡最严重的位置。



(a) 遮挡物标记 1
(a) Occlusion marker 1

(b) 小块遮挡
(b) Block occlusion

(c) 遮挡物标记 2
(c) Occlusion marker 2

(d) 大块遮挡
(d) Block occlusion

(e) 单块光伏电池板(e) Single PV panel

图 6 绿植遮挡的分割

Fig.6 Segmentation of green plant occlusion

根据被标记图 6(a)、(c)的灰度直方图设定一个灰度阈值点进行二值化分割，并选取光伏电池板块中的单块区域作为区域生长算法的种子点，再运用形态学增强算法进行孔洞填充，计算单块面板的外接矩形面积，得到其总像素点为 127×81，如图 6(e)所示，且单块电池板共有 10×6 个网格方块。图 6(b)小块遮挡面积像素点经计算为 25×17，遮挡面积约占 2.47 个网格。图 6(d)大块遮挡面积像素点为 76×56，遮挡面积约占 24.8 个网格，遮挡面积约占单块面板面积的 2/3，此种情形，需要及时处理掉遮挡物避免长期遮挡导致严重损坏电池板。

实验证明，本文提出的基于 HSV 颜色空间模型的光伏电池板分割方法能实现有效的前景区域分割，并能应用到遮挡物检测分析当中且效果良好。

4 结论

本文根据光伏电池板图片的特点提出了一种基于 HSV 空间模型的图像分割与检测方法，有效地去除光伏电池板图像复杂的背景干扰信息。通过设定 HSV 三个分量的取值范围，识别并提取感兴趣区域，重点分析了光伏组件的 2 种典型缺陷类型，即裂纹与绿植遮挡，并对可见相机拍摄的图像进行基于 HSV 空间、高斯滤波以及形态学图像增强的处理。从计算机视觉角度出发，减小了复杂地形对图像处理造成的计算难度，在光伏电池板图像分割方面具有一定的鲁棒性，而且红外检测与可见光检测相辅相成，两者结合能更好地完成大型光伏电站的巡检工作。

参考文献：

[1] Romero-Cadaval E, Spagnuolo G, Franquelo L G, et al. Grid-connected photovoltaic generation plants: components and operation[J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2013, **7**(3):6-20.

[2] 洪向共, 周世芬. 基于灰度共生矩阵和区域生长算法的红外光伏面板图像分割[J]. **科学技术与工程**, 2018, **18**(34): 97-102.
HONG Xianggong, ZHOU Shifen. Infrared photoelectric panels image segmentation based on gray level co-occurrence matrix and region growing algorithm[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(34): 97-102.

[3] 刘磊, 王冲, 赵树旺, 等. 基于机器视觉的太阳能电池片缺陷检测技术的研究[J]. **电子测量与仪器学报**, 2018, **32**(10): 47-52.
LIU Lei, WANG Chong, ZHAO Shuwang, et al. Research on solar cells defect detection technology based on machine vision[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, **32**(10): 47-52.

[4] 毛峡, 石天朋. 光伏热斑图像有效区域分割算法研究[J]. **太阳能学报**, 2018, **39**(5): 1270-1276.
MAO Xia, SHI Tianpeng. Research on effective region segmentation algorithm of photovoltaic hot spot image[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, **39**(5): 1270-1276.

[5] WANG Jingyi, QIAN Zheng, Zareipour Hamidreza, et al. Performance assessment of photovoltaic modules based on daily energy generation estimation[J]. *Energy*, 2018, **165**(1085/1414): 1160-1172.

[6] 陈磊, 乔继红, 陈岩. 太阳能电池板缺陷分割技术研究[J]. **微电子学与计算机**, 2014, **31**(12): 98-102, 107.
CHEN Lei, QIAO Jihong, CHEN Yan. The algorithm research of solar cells defect segmentation[J]. *Microelectronics & Computer*, 2014, **31**(12): 98-102, 107.

[7] 钱晓亮, 张鹤庆, 张焕龙, 等. 基于视觉显著性的太阳能电池片表面缺陷检测[J]. **仪器仪表学报**, 2017, **38**(7): 1570-1578.
QIAN Xiaoliang, ZHANG Heqing, ZHANG Huanlong, et al. Solar cell surface defect detection based on visual saliency[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, **38**(7): 1570-1578.

[8] 王淼, 杜毅, 张忠瑞. 无人机辅助巡视及绝缘子缺陷图像识别研究[J]. **电子测量与仪器学报**, 2015, **29**(12): 1862-1869.
WANG Miao, DU Yi, ZHANG Zhongrui. Study on power transmission lines inspection using unmanned aerial vehicle and image recognition of insulator defect[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015, **29**(12): 1862-1869.

[9] 王夏黎, 周明全, 耿国华. 一种基于HSV颜色空间的车辆牌照提取方法[J]. **计算机工程**, 2004, **30**(17): 133-135.
WANG Xiali, ZHOU Mingquan, GENG Guohua. An approach of vehicle plate extract based on HSV color space[J]. *Computer Engineering*, 2004, **30**(17): 133-135.

[10] 谢永祥, 董兰芳. 复杂背景下基于 HSV 空间和模板匹配的车牌识别方法研究[J]. **图学学报**, 2014, **35**(4): 585-589.
XIE Yongxiang, DONG Lanfang. License plate recognition in complex background base on HSV space and template matching[J]. *Journal of Graphics*, 2014, **35**(4): 585-589.

[11] LI X, YANG Q, CHEN Z , et al. Visible defects detection based on UAV-based inspection in large-scale photovoltaic systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2017, **11**(10): 1234-1244.

[12] 姒绍辉, 胡伏原, 顾亚军, 等. 一种基于不规则区域的高斯滤波去噪算法[J]. **计算机科学**, 2014, **41**(11): 313-316.
SI Shaohui, HU Fuyuan, GU Yajun, et al. Improved denoising algorithm based on non-regular area Gaussian filtering[J]. *Computer Science*, 2014, **41**(11): 313-316.

[13] 黄钰雯. 基于无人机视觉的大规模光伏电池板检测技术研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
HUANG Yuwen. Research on Large-scale Photovoltaic Panel Detection Technology Based on UAV Vision[D]. Nanning: Guangxi University, 2017.

[14] 刘齐, 王茂军, 高强, 等. 基于红外成像技术的电气设备故障检测[J]. **电测与仪表**, 2019, **56**(10): 122-126, 152.
LIU Qi, WANG Maojun, GAO Qiang, et al. Fault detection of electrical equipment based on infrared imaging technology[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, **56**(10): 122-126, 152.