

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518879

基于 YOLOv11 的光伏板缺陷检测与定位系统*

崔建伟 王月明

(内蒙古科技大学自动化与电气工程学院 包头 014010)

摘要: 针对无人机巡检集中式光伏板中检测出缺陷并确定其相对距离的问题,提出基于深度学习 YOLOv11n 的光伏板缺陷检测与定位系统。利用 YOLOv11n 结合切片辅助超推理对高分辨率光伏板图像进行缺陷检测。通过检测结果在集中式光伏板阵列中设立参考点与目标点,将检测结果信息与无人机设备信息、数据集可交换图像文件格式信息进行融合,计算参考点与目标点的经纬度,从而计算二者间的相对距离,实现光伏板缺陷定位。实验结果表明,YOLOv11n 训练结果的 mAP50 与 mAP50:95 分别为 67.1% 与 49.5%;结合切片辅助超推理进行目标检测的准确率为 88.73%;在可见光与热成像相机下缺陷定位算法误差在 0~4 m 之间的准确率分别为 96.73% 与 97.64%,基本满足运维需求。最后结合 JavaScript 等前端开发语言构建可交互式管理系统页面,利用数据库存储检测信息,系统通过对光伏板的故障检测、定位及信息储存实现了光伏板缺陷检测与定位的智能化,为集中式光伏板的检修提供了技术保障。

关键词: 光伏板;缺陷检测;缺陷定位;深度学习;系统

中图分类号: TM914;TN911.73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

Photovoltaic panel defect detection and location system based on YOLOv11

Cui Jianwei Wang Yue ming

(Faculty of Automation and Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Aiming at the problem of detecting defects and determining their relative distances in centralized photovoltaic panels inspected by unmanned aerial vehicles, a photovoltaic panel defect detection and location system based on deep learning YOLOv11n is proposed. Defect detection of high-resolution photovoltaic panel images is carried out by using YOLOv11n combined with slicing assisted hyperreasoning. Reference points and target points are set up in the centralized photovoltaic panel array based on the detection results. The detection result information is integrated with the information of unmanned aerial vehicle equipment and the exchangeable image file format information of the data set to calculate the longitude and latitude of the reference points and target points, thereby calculating the relative distance between them and achieving the defect location of photovoltaic panels. The experimental results show that the mAP50 and mAP50:95 of the YOLOv11n training results are 67.1% and 49.5% respectively; the accuracy rate of target detection combined with slicing assisted hyperreasoning is 88.73%. The accuracy rates of the defect location algorithm with errors ranging from 0 to 4 meters under visible light and thermal imaging cameras were 96.73% and 97.64% respectively, basically meeting the operation and maintenance requirements. Finally, an interactive management system page is constructed by combining front-end development languages such as JavaScript, and the detection information is stored in the database. The system realizes the intelligence of defect detection and location of photovoltaic panels through fault detection, location and information storage of photovoltaic panels, providing technical support for the maintenance of centralized photovoltaic panels.

Keywords: photovoltaic panels; defect detection; defect localisation; deep learning; system

0 引言

随着可再生能源重要性提升,集中式光伏电站规模快

速扩大,但光伏板常受异物遮挡或二极管损坏的影响,可能引发火灾隐患^[1]。传统人工巡检集工作强度大,虽已采用无人机结合人工智能进行检测,但实际应用中仍存在缺陷

收稿日期:2025-05-21

* 基金项目:内蒙古自治区科技计划(2021GG0045)项目资助

信息与位置信息缺失等问题^[2]。故如何构建深度学习系统实现光伏板的缺陷检测与定位仍是亟待解决的问题。

近年来,从人工目视巡检到基于人工智能的巡检系统,巡检方案正逐步迈向智能化。在目标检测方面,吕游等^[3]提出改进高效卷积神经网络(efficient convolutional neural network, EfficientNet)的光伏组件故障识别,利用图像分割和数据增强对数据集进行预处理,构建故障识别模型,引入双通道注意力模块,增强模型对空间特征信息的提取能力。王海群等^[4]提出改进 YOLOv10(you only look once v10, YOLOv10)的光伏电池缺陷检测算法,设计部分多尺度特征提取模块、聚合金字塔共享模块、融合频率感知模块、频率感知特征融合模块并引入特征金字塔网络,降低类别不一致性,增强高频细节的缺陷信息。Ledmaoui 等^[5]使用增强卷积神经网络和视觉几何组架构检测太阳能光伏板。在缺陷定位方面,张白等^[6]采用无人机飞控、视觉模块进行图像识别,利用阈值分割法与边缘识别法构建引导标识识别算法,提高引导标志的定位精度与抗干扰性。Hadroug 等^[7]通过 AlexNet 架构的预训练卷积神经网络处理热成像数据进行故障的精确提取。苏懿生等^[8]设计了基于意法半导体 32 位系列微控制器芯片的光伏阵列无线传感节点及故障诊断系统,以其为核心控制器,通过无线传感节点测得的电压波形。在系统设计方面,Ágreda 等^[9]通过光伏电池板的车载电子进行异常检测,利用无人机进行红外和可见光检查,从而促进无缝数据交换和系统集成。楼梁^[10]基于数字孪生技术设计了光伏电站智慧化管控系统,实现对光伏电站全面监测和实时状态评估。Xie 等^[11]在系统中采用 Sobel 算子与 canny 算子获取光伏小板区域,实现对光伏板区域的异常检测。

以上研究为光伏板缺陷检测与定位提供了先进的技术支持,但对于缺陷的检测与定位仍存在如下问题:首先,传统算法对高分辨率图像上的小目标缺陷检测准确率不足;其次,全球定位系统坐标难以关联实际光伏组件位置,导致运维效率低下。针对上述问题,提出光伏板缺陷检测与定位系统。该系统通过 YOLOv11n 结合切片辅助超推理(slicing aided hyper inference, SAHI)进行光伏板缺陷检测,有效提升了检测准确率。通过检测结果设立参考点与目标点,基于检测结果等计算二者的距离与方向,解决了关联实际位置的问题。系统采用前后端一体化架构,形成从缺陷识别到定位的闭环流程。相较于传统人工巡检,该系统通过检测与定位生成相应指引,为大规模光伏电站的智能运维提供技术支持。

1 实现方案

光伏板缺陷检测与定位系统由前端和后端两部分组成。在系统前端,利用 JavaScript、超文本标签(hyper text markup language, HTML)、层叠样式表(cascading style sheets, CSS)设计系统页面,包括检测定位、数据回看、等功能。在系统后端,首先在缺陷检测模块,对无采集的数据进行切图后标注,利用 YOLOv11n 进行训练,训练权重结合 SAHI 进行检测;在定位模块,利用无人机设备信息、检测结果等信息,通过计算地面分辨率、像素偏移量^[12]、像素与经纬度转换关系从而计算目标点距离参考点的相对距离以及经纬度;在数据库模块,利用数据库管理系统(my structured query language, MySQL)^[13]储存了包括参考点与目标点在内的检测结果信息以及定位信息,并支持数据交互与查看。光伏板缺陷检测与定位系统整体框架如图 1 所示。

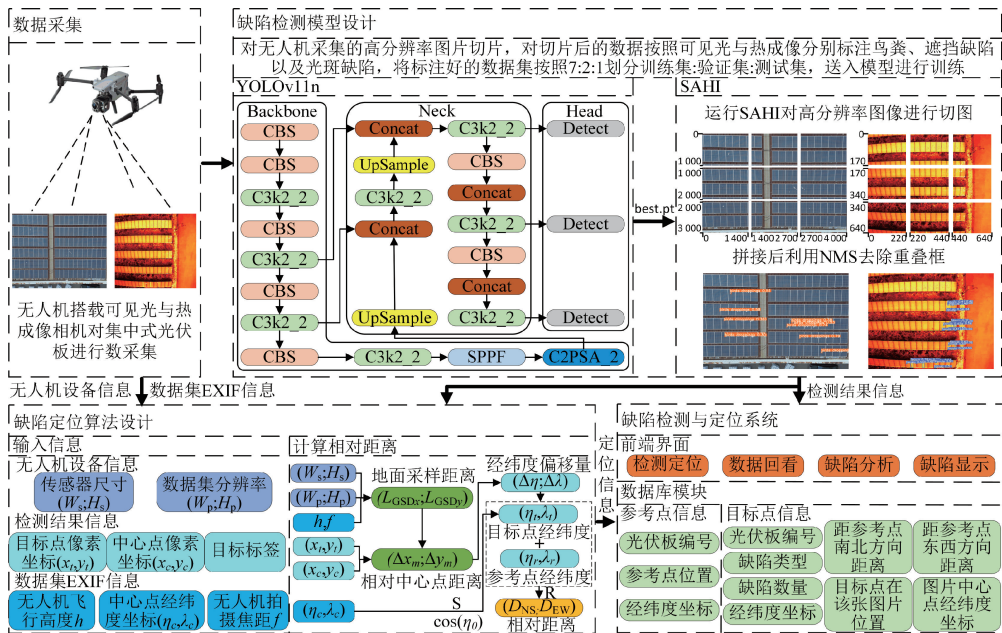


图 1 整体框架图

Fig. 1 Overall framework diagram

1.1 缺陷检测模型设计

通过无人机搭载的双光相机对集中式光伏板数据进行采集,采集数据为 $4\ 000\ \text{pixel} \times 3\ 000\ \text{pixel}$ 的高分辨率数据集,需检测目标分辨率一般为 $80\ \text{pixel} \times 40\ \text{pixel}$,二者形成较大的分辨率差。YOLO 系列对于输入图像分辨率默认为 $640\ \text{pixel} \times 640\ \text{pixel}$,大于其分辨率的图像会进行等比例压缩,使本次实验的目标特征不清晰、边缘模糊,从而影响目标检测精度。针对上述问题,提出利用YOLOv11n结合SAHI进行检测。在数据标注部分将高分辨率数据集切片为 $800\ \text{pixel} \times 600\ \text{pixel}$ 分辨率的切片数据集。训练部分利用YOLOv11n对标注后的切片数据集进行训练;检测部分利用YOLOv11n结合SAHI对高分辨率数据集进行检测。

综合模型检测效率、针对小目标的检测准确率问题,考虑利用SAHI的滑动切片功能对输入的高分辨率数据集进行切分后检测,滑动窗口重叠率设为0.1,结合YOLOv11n训练后产生的best.pt权重文件进行切片检测,同时对整张图片进行检测,最后结合二者的检测结果通过非极大值抑制(non-maximum suppression, NMS)^[14]将检测框进行整合。结合SAHI进行检测原理如图2所示。

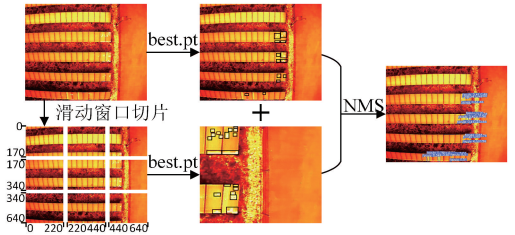


图2 切片辅助超推理原理图

Fig. 2 Slicing aided hyper inference schematic

1.2 缺陷定位算法设计

在数据标注时,除标注需检测的缺陷类型外,还需标注双光相机下的光伏板组件,通过YOLOv11n检测结果获取检测框的COCO(common objects in context, COCO)数据,选取光伏板检测框中心点像素坐标 x 与 y 同时最小的检测框,将其所对应的光伏板设为参考点,即为输入阵列第1行第1列的光伏板;选取包含缺陷检测框在内的光伏板检测框,其所对应的光伏板设为目标点。进行缺陷定位时,距离计算均为二者经度与纬度方向上的相对距离。后续为了观察方便,在检测结果图像上取消显示光伏板检测框及其相关信息。缺陷定位算法框架如图3所示。

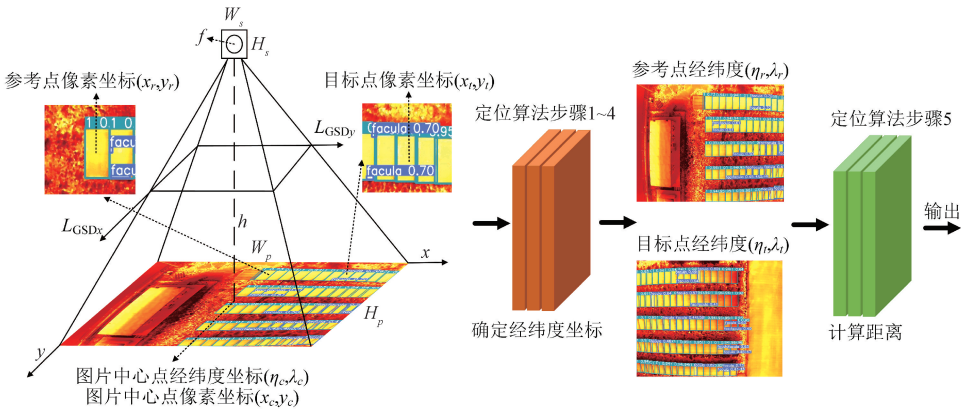


图3 缺陷定位算法框架图

Fig. 3 Defect location algorithm framework diagram

在计算同阵列的目标点与参考点的相对距离阶段,通过数据集的可交换图像文件格式(exchangeable image file format, EXIF)^[15]获取其采集时的无人机焦距 f 、无人机距目标飞行高度 h ,对目标点的经纬度以及相对距离进行计算,缺陷定位算法具体步骤为:

1)计算地面采样距离(ground sample distance, GSD) $L_{\text{GSD}x}$ 和 $L_{\text{GSD}y}$ (单位: m/pixel)。其计算公式如式(1)所示。

$$\begin{aligned} L_{\text{GSD}x} &= \frac{W_s \times h}{f \times W_p} \\ L_{\text{GSD}y} &= \frac{H_s \times h}{f \times H_p} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: W_s 为传感器宽度; H_s 为传感器高度; W_p 为图像分辨率宽度; H_p 为图像分辨率高度; $L_{\text{GSD}x}$ 为每个像素在经

度方向对应的地面距离; $L_{\text{GSD}y}$ 为每个像素在纬度方向对应的地面距离。

2)计算目标点相对中心点距离(Δx_m ; Δy_m):由目标检测部分获取目标点的像素坐标(x_t, y_t),由EXIF获取图片中心点的像素坐标(x_c, y_c),根据 L_{GSD} 计算目标点相对中心点的地面距离(单位: m)。其计算公式如式(2)所示。

$$\begin{aligned} \Delta x_m &= (x_t - x_c) \times L_{\text{GSD}x} \\ \Delta y_m &= (y_t - y_c) \times L_{\text{GSD}y} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Δx_m 为目标点相对中心点在经度方向上的距离; Δy_m 为目标点相对中心点在纬度方向上的距离。

3)计算经纬度偏移量($\Delta \eta_t$; $\Delta \lambda_t$): 1° 纬度 $\approx 111\ 320\ \text{m}$, 1° 经度对应地面长度取决于纬度(单位: $^\circ$)。其计算公式如

式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta\eta_i = \frac{\Delta y_m}{111\ 320} \\ Z_\lambda = \frac{S \times \cos(\eta_0)}{360} \\ \Delta\lambda_i = \frac{\Delta x_m}{Z_\lambda} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta\eta_i$ 为目标点纬度偏移量; Z_λ 为 1° 经度对应的地面长度; S 为地球赤道周长取 40 008 000 m; $\cos(\eta_0)$ 为缩放不同纬度下的经度单位长度; $\Delta\lambda_i$ 为目标点经度偏移量。

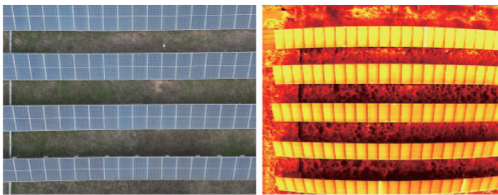
4) 计算目标点经纬度(η_i, λ_i): 根据数据集的 EXIF 信息获取其图片中心点经纬度坐标(η_c, λ_c), 以及步骤 3) 计算出的经纬度偏移量($\Delta\eta_i, \Delta\lambda_i$) 计算目标点经纬度, 单位: 度。其计算公式如式(4)所示。

$$\begin{cases} \eta_i = \eta_c + \Delta\eta_i \\ \lambda_i = \lambda_c + \Delta\lambda_i \end{cases} \quad (4)$$

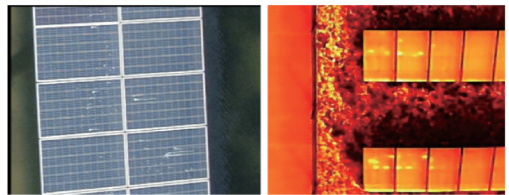
式中: η_i 为目标点纬度; λ_i 为目标点经度。

5) 计算相对距离($D_{NS}; D_{EW}$): 根据目标检测阶段确定参考点的像素坐标(x_r, y_r), 参考点的选取根据采集的光伏板阵列, 由第 1 个作为该阵列的参考点, 再将(x_r, y_r) 带入第 2)~4) 步计算参考点的经纬度(η_r, λ_r), 计算目标点距离参考点纬度、经度方向的距离(单位:m)。纬度与经度方向距离计算如式(5)所示。

$$\begin{cases} \Delta\eta = \eta_i - \eta_r \\ \Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_r \\ D_{NS} = R \times \Delta\eta \times \frac{\pi}{180} \\ D_{EW} = R \times \Delta\lambda \times \frac{\pi}{180} \times \cos(\eta_0) \end{cases} \quad (5)$$



(a) 高分辨数据集
(a) High-resolution dataset



(b) 切片数据集
(b) Sliced dataset

图 4 部分数据集图像

Fig. 4 Images of selected datasets

其中 epochs 为训练轮数、batch 为训练批次大小、imgsz 为指定输入图像尺寸、slice_height 为 SAHI 切片高度、slice_width 为 SAHI 切片宽度、overlap_height_ratio 为 SAHI 垂直切片重叠比例、overlap_width_ratio 为 SAHI 水平切片重叠比例、confidence_threshold 为模型检测置信度阈值、 W_s 为传感器宽度、 H_s 为传感器高度、 W_p 为图像分辨率宽度、 H_p 为图像分辨率高度。其中, 对于 SAHI 切片的重叠比例, 小目标检测为 0.2~0.3; 大目标为 0.1~0.15; 极端高分辨率图像为 0.25~0.35, 虽然本次需检测

式中: $\Delta\eta$ 为目标点与参考点纬度差; $\Delta\lambda$ 为目标点与参考点经度差; D_{NS} 为目标点距参考点纬度方向距离; D_{EW} 为目标点距参考点经度方向距离。 R 为地球半径取 6 371 000 m。

通过上述步骤计算存在鸟粪、遮挡与光斑缺陷的目标点光伏板的经纬度坐标信息, 并计算目标点距离参考点的经度以及纬度方向的相对距离。为工人进行维修提供了准确的数据支持, 大大缩减了日常巡检的工作强度。

2 数据集与实验结果分析

2.1 数据集制作

数据采集设备为 Autel Alpha 无人机, 搭载道通慧眼 L35T 云台双光相机对集中式光伏板进行数据采集, 共采集了 342 张 4 000 pixel×3 000 pixel 的高分辨率数据集, 用于缺陷检测与缺陷定位, 其部分数据集如图 4(a) 所示。为了提高模型对高分辨图像上小目标的检测能力, 将高分辨率数据集进行切片, 共 2 667 张 800 pixel×600 pixel 的切片数据集。使用 labelme 对切片数据集标注, 标签类型分别为可见光光伏板(0)、热成像光伏板(1)、鸟粪(birds droppings)、遮挡(keep out)、光斑(facula), 其中标注可见光与热成像光伏板目的是为了后续缺陷定位确定参考点与目标点。将切片数据集按照 7:2:1 划分为训练集、验证集、测试集, 切片数据集用于模型训练, 其部分数据集如图 4(b) 所示。

2.2 实验背景

实验中分别进行基于 YOLOv11n 与其他目标检测模型的对比实验; YOLOv11n 与是否添加 SAHI 的检测效果对比实验; 基于 YOLOv11n 的定位算法实验。实验具体配置与参数情况如表 1 所示, 其中缺陷定位参数由数据采集设备决定。

的缺陷目标为小目标, 但其中可见光光伏板(0)与热成像光伏板(1)为正常大目标, 由于是否完整检测到可见光光伏板(0)与热成像光伏板(1)会影响后续定位准确率, 因此, 为保证切片后的完整性, 以及后续定位的准确率, 故选取 SAHI 切片重叠比例为 0.1。

2.3 基于 YOLOv11n 的目标检测对比实验

为验证所选目标检测模型算法的优越性, 本实验使用切片数据集对当下经典目标检测模型根据评估指标按照控制变量法进行对比实验, 其实验结果如表 2 所示。

表1 实验配置与参数

Table 1 Experimental configuration and parameter

实验平台与硬件配置		训练与检测参数		缺陷定位参数	
参数	配置	参数	取值	参数	取值
操作系统	Ubuntu24.05.5 LTS	epochs	300	可见光 W_s	6.73 mm
GPU	NVIDIA RTX4090×2	batch	16	热成像 W_s	9.98 mm
GPU 运行内存	24 G×2	imgsz	640	可见光 H_s	4.49 mm
CUP	Intel(R) Core(TM)-i9-14900K	slice_height	640	热成像 H_s	7.98 mm
CUP 运行内存	64 G	slice_width	640	可见光 W_p	4 000 pixel
深度学习框架	torch2.5.1+cu124	overlap_height_ratio	0.1	热成像 W_p	640 pixel
深度学习环境	Python3.11.10	overlap_width_ratio	0.1	可见光 H_p	3 000 pixel
训练环境	CUDA11.7	confidence_threshold	0.4	热成像 H_p	512 pixel

表2 目标检测算法对比

Table 2 Comparison of target detection algorithms

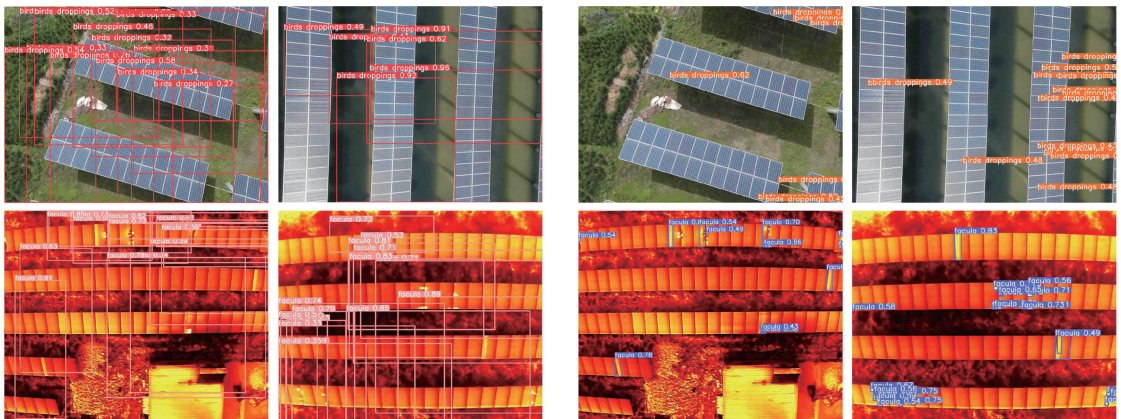
模型	mAP50/%	mAP50:95/%	权重/MB	参数量/ 10^6	计算量/GFLOPs
Fast R-CNN	65.5	47.5	97.2	7.57	139.0
SSD	65.6	47.8	60.8	6.87	61.3
YOLOv8n	65.6	48.7	6.2	3.01	8.2
YOLOv10n	64.9	48.4	5.8	2.71	8.4
YOLOv11n	67.1	49.5	5.5	2.59	6.4
YOLOv11s	67.9	49.8	19.2	9.43	21.6
YOLOv11x	68.1	50.2	114.4	56.88	195.5

由表2可知, YOLOv11n模型的检测精度mAP50与mAP50:95分别为67.1%与49.5%,并且保证了只有6.4 GFLOPs的计算量。相较于YOLOv11s与YOLOv11x模型,虽说检测精度略微降低,但其显著降低存储与内存占用,更符合轻量化部署在系统中。相较于快速区域卷积神经网络(fast region-based convolutional neural network, Fast R-CNN)等模型, YOLOv11n凭借其精简的运算结构与高效的注意力机制,在保证检测速度的同时具有较高的检测精度。故选取

YOLOv11n模型作为后续缺陷定位的检测模型。

2.4 基于YOLOv11n+SAHI的检测效果对比实验

由于无人机采集数据的图片分辨率为4 000 pixel×3 000 pixel,而本次实验中的目标分辨率多为80 pixel×40 pixel,输入模型经过等比例压缩后其目标特征会更加模糊,影响检测准确率以及后续缺陷定位的准确率,故提出在检测阶段结合SAHI进行检测。实验按照是否添加SAHI进行检测效果对比实验,检测效果如图5所示。



(a) YOLOv11n检测效果图
(a) YOLOv11n detection results

(b) YOLOv11n+SAHI检测效果图
(b) YOLOv11n+SAHI detection performance diagram

图5 检测效果实验对比图

Fig. 5 Comparison chart of detection effect experiment

由图 5 可知,由于被检测目标分辨率过小,而输入图像分辨率过大原因,YOLOv11n 在进行目标检测时,目标特征容易被忽视从而无法进行有效捕捉,导致如图 5(a)实验产生严重的漏检以及误检。为了解决上述问题提出结合 SAHI 进行检测,检测效果如图 5(b)实验所示。图 5(b)实验在 YOLOv11n 的基础上结合 SAHI,经过 SAHI 处理后模型大大提升了对高分辨率图像的检测能力,有效减少了漏检和误检,提升了模型整体的检测效果。

为验证添加 SAHI 的有效性,采用高分辨率数据集,按照是否添加 SAHI 对检测效果的准确率、误检率以及漏检率进行统计对比,统计结果如表 3 所示。

表 3 检测效果统计对比

Table 3 Statistical comparison of detection effect %

模型	准确率	误检率	漏检率
YOLOv11n	3.76	88.73	7.51
YOLOv11n+SAHI	84.22	11.61	4.17

表 4 缺陷定位算法实验

Table 4 Experiments with defect location algorithms

相机	MM/m	AM/m	ϵ /m	相机	MM/m	AM/m	ϵ /m
可见光	3.91;0.05	7.46;0.42	3.55;0.37	热成像	9.12;0.03	11.41;1.52	2.29;1.49
	13.03;7.15	18.32;6.02	5.29;-1.13		1.30;4.75	2.22;5.02	0.92;0.27
	10.42;11.92	8.54;12.98	-1.88;1.06		2.16;4.77	3.91;5.03	1.75;0.26
	13.13;12.01	16.25;13.31	3.12;1.30		5.21;9.54	7.67;11.89	2.46;2.35
	5.21;14.77	7.89;13.03	2.68;-1.74		11.73;9.56	14.21;10.60	2.48;1.04
	14.33;14.30	13.24;13.75	-1.09;-0.55		13.03;9.55	15.73;10.60	2.70;1.05
	15.64;14.31	14.76;13.65	-0.88;-0.66		14.33;9.54	17.15;10.57	2.82;1.03
	22.15;14.31	29.75;13.69	7.60;-0.62		15.64;9.58	18.52;10.53	2.88;0.95

像相机经度与纬度方向距离最大误差为 2.88 m 与 2.35 m。实验对象光伏板的实际尺寸为 2 384 mm \times 1 303 mm,摆放角度为朝南与地夹角 30°,摆放朝向为由西向东,由此可知,该定位算法误差约为 1~3 块光伏板,其误差范围在实际巡检的可控范围内。该缺陷定位算法为工人更好的明确缺陷位置提供了有利帮助。

为验证缺陷定位算法的有效性,对 10 个区域共 1 280 块目标点光伏板进行缺陷定位算法统计实验,参考光伏板实际尺寸,按照误差绝对值范围为 0~3 m、3~4 m、>4 m 共 3 种情况进行统计实验。定位算法统计结果如表 5 所示。

表 5 缺陷定位算法统计实验

Table 5 Statistical experiments on defect location algorithms

相机	%		
	0~3 m	3~4 m	>4 m
可见光	82.48	14.25	3.27
热成像	87.76	9.88	2.36

由表 3 可知,未添加切片辅助超推理时,模型检测准确率为 3.76%,当添加切片辅助超推理后,模型检测准确率为 84.22%,相较于基础模型提升了 80.46%,此对比实验充分证明添加 SAHI 对高分辨率数据集的检测有着较为明显的提升,既保证了检测光伏板阵列的高效性,又提升了检测准确率,为后续缺陷定位算法提供了良好基础。

2.5 基于 YOLOv11n+SAHI 的缺陷定位算法实验

为验证光伏板缺陷定位算法的准确性,按照无人机飞行高度为 45 m 以双光相机分别对 8 组光伏板进行定位算法实验。以缺陷定位算法计算目标点距参考点经度与纬度方向的相对距离。其中 MM(manual measurement)为人工测量 10 次平均值,AM(arithmetic measurement)为算法测量 10 次平均值, ϵ 为绝对误差,表中数据形式如 $x;y$, x 表示目标点距参考点经度方向; y 表示目标点距参考点纬度方向。缺陷定位算法实验如表 4 所示。

由表 4 可知,不同相机下的 8 组光伏板中,可见光相机经度与纬度方向距离最大误差为 7.60 m 与 -1.74 m,热成

由表 5 可知,在可见光与热成像相机下缺陷定位算法误差 <4 m 的准确率分别为 96.73%与 97.64%。由表 4 和 5 结合可知,对于 7.60 m 的最大误差,其原因是由于拍摄时对图像边缘存在视角误差,从而导致对边缘光伏板的检测容易产生偏差,以至于影响后续缺陷定位时计算参考点与目标点的相对距离。但通过对 1 280 个目标点的统计实验可知,在双光相机下 >4 m 即 2 块光伏板的最大误差概率为 3.27%。此实验结果充分证明了该算法在应对集中式光伏板的缺陷定位中有良好的定位准确率,该算法有效解决了集中式光伏板中检测出缺陷且需要确定相对距离的问题,为工人维修提供了有效的数据支撑。

3 缺陷检测与定位系统

为使工人更方便地使用该算法进行光伏板的缺陷检测与定位,结合 JavaScript、HTML 以及 CSS 开发系统网页前端设计光伏板缺陷检测与定位系统。该系统有助于工人更直观地进行光伏板维护工作。为了确保数据的准

确性和存储的高效性,使用MySQL数据库对缺陷数据与定位数据进行储存,系统主要实现对光伏板上的常见缺陷的检测与定位。系统提供数据库查询功能,通过将详细的缺陷数据存入数据库,系统能够实现对历史数据的高效回溯,便于后续对缺陷数据的查询。该系统能帮助运维工人

及时发现并处理故障问题。

系统界面由Web技术实现,使用JavaScript、HTML、CSS对系统界面进行设计。页面包括检测与定位模块、数据回看模块、缺陷分析模块,以实现对集中式光伏板的缺陷进行检测与定位。系统界面如图6所示。



图6 系统界面

Fig. 6 System interface

由图6可知,系统包含检测定位模块,其功能用于调用后端检测与定位系统,对输入数据集进行检测,支持拍摄设备与权重选择;数据回看模块,支持历史数据查看,链接数据库保存过往的检测结果并支持调用;缺陷分析模块,根据相应的缺陷类型,给出对应的形成原因与处理措施;缺陷显示模块,根据检测出缺陷的经纬度,映射在地图中,使工人可以进行更为直观的进行巡检。

由图7可知,对于目标点,输出其与参考点的相对距离,再以输出的目标点的经纬度坐标、存在目标点图片的中心点经纬度坐标、缺陷在当前图片的行列信息进行辅助定位,大大增加了工人的检修效率,使其能更快捷地到达目标点位置。系统通过输出缺陷类型与缺陷数量使工人提前知晓缺陷类型并作出相应的维修措施。该系统将检测与定位算法结合,使运维工人更直观的进行集中式光伏板的缺陷检测与定位,提升了运维效率,降低了工人的工作强度。

系统在输出检测结果的同时,输出参考点与目标点的定位信息,其定位信息输出结果如图7所示。

参考点

参考点	位置	经纬度
DJI_20230221141238_0001_T.JPG	(1,1)	(32.6703821303, 118.7854202612)

目标点

图片名称	中心点经纬度	本图位置	缺陷类型	数量	缺陷经纬度	距参考点东西距离/m	距参考点南北距离/m
DJI_20230221141238_0001_T.JPG	(32.67046386111111, 118.78543733333333)	(1,8)	facula	2	(32.67039582216414, 118.78554218814416)	11.41	1.52
DJI_20230221141238_0001_T.JPG	(32.67046386111111, 118.78543733333333)	(2,2)	facula	2	(32.670427317851605, 118.78544393792538)	2.22	5.02
DJI_20230221141238_0001_T.JPG	(32.67046386111111, 118.78543733333333)	(2,3)	facula	1	(32.67042736785229, 118.78546207069493)	3.91	5.03
DJI_20230221141238_0001_T.JPG	(32.67046386111111, 118.78543733333333)	(3,5)	facula	1	(32.67048908392561, 118.785502249537)	7.67	11.89

图7 参考点与目标点输出结果

Fig. 7 Reference point and target point output results

4 结 论

针对无人机巡检集中式光伏板中检测出缺陷并确定相对距离问题,提出了基于YOLOv11n的光伏板缺陷检测与定位系统。以YOLOv11n为基础模型,其训练结果结合SAHI进行目标检测;通过检测结果在集中式光伏板阵列中设立参考点与目标点,构建多源数据融合,综合无人机设备信息、检测结果信息、数据集图片的EXIF信息实现缺陷缺陷定位。最后基于目标检测与缺陷定位算法设计了光伏板缺陷检测与定位系统,系统包括交互界面与MySQL数据库且支持数据回看,工人可通过系统快速定位存在缺陷的目标点光伏板相对于参考点光伏板的位置。

由实验结果可知,本文选取的目标检测基础模型YOLOv11n的mAP50与mAP50:95最高,分别为67.1%与49.5%。从检测结果看,结合SAHI后在输入图像分辨率为4 000 pixel×3 000 pixel时,对小目标检测的准确率为84.22%,相较基础模型检测准确率提升了80.46%。从缺陷定位结果看,统计了1 280块存在缺陷的光伏板,在可见光与热成像相机下误差在0~4 m之间的准确率分别为96.73%与97.64%。相比传统人工巡检,基于YOLOv11n的光伏板缺陷检测与定位系统提高了工人对集中式光伏板的运维效率,对工人进行巡检维护有着更高效便捷的性能。

参考文献

- [1] 廖智兴,刘全兵,黄斯珉,等.基于表面改性的光伏组件冷凝除尘特性研究[J].太阳能学报,2022,43(11):33-40.
LIAO ZH X, LIU Q B, HUANG S M, et al. Investigation of condensation-induced dust removal on modified surface for PV module[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(11): 33-40.
- [2] 崔宪,石颖,孔令崧.光伏组件故障及检测方法研究进展[J].半导体技术,2025,50(7):649-665.
CUI X, SHI J, KONG L S. Research progress of photovoltaic module faults and detection methods[J]. Semiconductor Technology, 2025, 50(7): 649-665.
- [3] 吕游,郑茜,齐欣宇,等.基于改进 EfficientNet 的红外图像光伏组件故障识别研究[J].仪器仪表学报,2024,45(4):175-184.
LYU Y, ZHENG Q, QI X Y, et al. A study on fault recognition of photovoltaic module with infrared images based on improved efficientnet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 175-184.
- [4] 王海群,武泽锴,于海峰.改进YOLOv10n的光伏电池缺陷检测算法[J].电子测量技术,2025,48(15):52-62.
WANG H Q, WU Z K, YU H F. Improved defect detection algorithm for YOLOv10n photovoltaic cells[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(15): 52-62.
- [5] LEDMAOUI Y, MAGHRAOUI E A, AROUSSI E M, et al. Enhanced fault detection in photovoltaic panels using CNN-based classification with PyQt5

- implementation[J]. Sensors, 2024, 24(22): 7407.
- [6] 张白,丁启翔,孔德超.基于无人机的光伏清洁机器人转运系统研究[J].电子测量技术,2025,48(12):9-15.
ZHANG B, DING Q X, KONG D CH. Research on transfer system of photovoltaic cleaning robot based on UAV[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(12):9-15.
- [7] HADROUG N, AMARI S A, ALAYED W, et al. Practical implementation based on histogram of oriented gradient descriptor combined with deep learning: Towards intelligent monitoring of a photovoltaic power plant with robust faults predictions [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2025, DOI: 10.1016/j. jii. 2024. 100760.
- [8] 苏懿生,郑子君,张经炜,等.光伏阵列无线传感节点设计及故障诊断应用[J].电子测量技术,2022,45(7):8-13.
SU Y SH, ZHENG Z J, ZHANG J W, et al. Design of photovoltaic array wireless sensor nodes and its application in fault diagnosis [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(7): 8-13.
- [9] ÁGREDA T M, PEREZ S C, BARRIOS H J P, et al. Framework for autonomous inspection of PV plants using IoT electronics on each PV panel and UAV collaboration[J]. Energy Conversion and Management: X, 2025, 26:100878.
- [10] 楼梁.浅析数字孪生光伏电站运维平台的设计与开发[J].中国设备工程,2024(19):92-94.
LOU L. A brief analysis of the design and development of a digital twin photovoltaic power plant operation and maintenance platform[J]. China Plant Engineering, 2024(19): 92-94.
- [11] XIE X, WEI X, WANG X, et al. Photovoltaic panel anomaly detection system based on unmanned aerial vehicle platform[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768(7): 072061.
- [12] LI X, HANDWERGERL A, PELTZER G, et al. Exploring the behaviors of initiated progressive failure and slow-moving landslides in los angeles using satellite InSAR and pixel offset tracking [J]. Geophysical Research Letters, 2024, 51(13), DOI: 10.1029/2024GL108267.
- [13] SALUNKE V S, OUDA A. A performance benchmark for the PostgreSQL and MySQL databases[J]. Future Internet, 2024, 16(10): 382.
- [14] 李宝奇,黄海宁,刘纪元,等.基于改进SSD的合成孔径声纳图像感兴趣小目标检测方法[J].电子学报,2024,52(3):762-771.
LI B Q, HUANG H N, LIU J Y, et al. Interested small target detection method based on improved SSD for synthetic aperture sonar image[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(3): 762-771.
- [15] 黎溢轩,李昊东,曾吉申,等.JPEG原图重构取证方法[J].信号处理,2024,40(6):1122-1140.
LI Y X, LI H D, ZENG J SH, et al. Forensic method for JPEG image reconstruction[J]. Journal of Signal Processing, 2024, 40(6): 1122-1140.

作者简介

崔建伟,硕士研究生,主要研究方向为计算机视觉。

E-mail:13789563602@163.com

王月明(通信作者),博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为智能信息处理技术等。

E-mail:wym20017@imust.edu.cn