

DOI: 10.7672/sgjs2026130036

基于目标检测算法与模糊逻辑推理的焊点智能 检测技术评价与分析*

刘 泉^{1,2}, 陈晓明^{2,3}

(1. 上海市机械施工集团有限公司, 上海 200072; 2. 上海面向典型建筑应用机器人工程技术研究中心, 上海 200072;
3. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080)

[摘要] 针对钢筋笼焊点人工检测费时费力、效率低的问题, 提出基于目标检测算法与模糊逻辑推理的智能检测技术。首先采用改进的 YOLOv5 算法对焊点图像进行采集与特征提取, 引入 RepVGG 模块提升检测效率; 然后结合模糊逻辑推理, 构建焊点特征模糊集与模糊关系矩阵, 对翘曲、体积收缩等多缺陷进行综合评判。实践表明, 该方法相比单一 YOLOv5 模型显著提高了检测精度, 为焊点质量自动检测提供了有效技术支撑。

[关键词] 智能建造; 焊接; 机器人; 目标检测算法; 模糊逻辑推理; 检测

[中图分类号] TU476.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0036-06

Evaluation and Analysis of Intelligent Detection Technology for Solder Joints Based on Object Detection Algorithm and Fuzzy Logic Inference

LIU Quan^{1,2}, CHEN Xiaoming^{2,3}

(1. Shanghai Mechanized Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Oriented in Typical Building Application Robot, Shanghai 200072, China;
3. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: To address the time-consuming, labor-intensive, and inefficient nature of manual inspection of welded joints in reinforcement cages, this paper proposes an intelligent detection technology based on object detection algorithms and fuzzy logic reasoning. Firstly, an improved YOLOv5 algorithm was used to capture images of the welded joints and extract features, with the introduction of a RepVGG module to enhance detection efficiency. Next, by integrating fuzzy logic reasoning, a fuzzy set of joint features and a fuzzy relationship matrix were constructed to comprehensively evaluate multiple defects, such as warping and volumetric shrinkage. Practical results demonstrate that this method significantly improves detection accuracy compared to the standalone YOLOv5 model, providing effective technical support for the automatic inspection of weld joint quality.

Keywords: intelligent construction; welding; robots; target detection algorithm; fuzzy logic reasoning; detection

0 引言

钢筋笼焊点的质量检验在制造业中占有非常重要的地位, 但目前很多企业仍然以手工检验为主, 工作效率低下, 难以满足生产需要。为了提高

产品检测效率, 许多研究团队尝试采用机器视觉和人工智能技术, 实现对焊点缺陷的自动检测^[1]。

本文以钢筋笼焊点为例, 针对拼焊件高节拍闭环生产线上焊点质量得不到检测的问题, 提出以目标检测算法为基础, 结合模糊逻辑推理的焊点智能检测技术, 能够充分检测焊点质量, 提升质检效率。

1 焊点智能检测技术分析

1.1 基于 YOLOv5 的目标检测算法

YOLOv5 采用新的架构 CSPNe, 采用了一种新

* 上海市国有资产监督管理委员会基金项目: 钢筋工程数字化柔性生产线关键装备技术及智能质检平台(2021005); 上海建工集团股份有限公司科研课题: 基于深度学习与机器视觉的焊接缺陷智能检测系统开发(21YJKF-13)

[作者简介] 刘 泉, 高级工程师, E-mail: 241128759@qq.com

[收稿日期] 2026-01-20

的跨阶段局部连接方式,减少了计算量和内存使用,从而加速模型的训练和推理过程^[2]。其次,YOLOv5 引入 PANet 特征融合技术,有效地融合了不同尺度的特征图,YOLOv5 网络结构如图 1 所示。

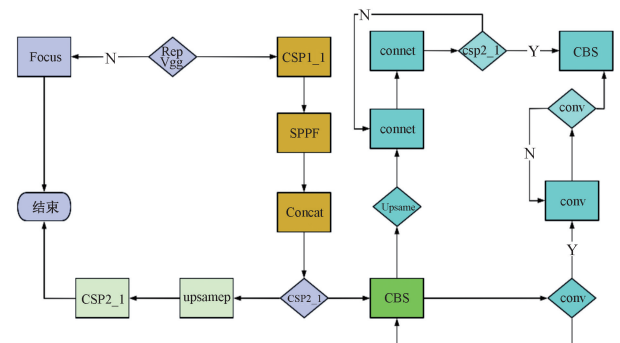


图 1 YOLOv5 网络结构

Fig. 1 YOLOv5 network structure

由图 1 可知, YOLOv5 根据 CSP 模块参数量配置, 分为 5 个版本, 区别在于网络规模和参数的差异^[3]。考虑到网络规模、训练时长及准确率等因素, 本文选择了轻量级的 YOLOv5s 进行改进。通过调整特征提取网络的 3×3 卷积结构, 引入 RepVGG 进行模块融合, 从而使得检测效率得以提升^[4]。

RepVGG 重参数化思想是通过使用简单、可重复的卷积构建网络, 本文将 RepVGG 模块融合到 YOLOv5s 骨干网络, 替换原有的 3×3 卷积^[5]。RepVGG 结构如图 2 所示。训练时, RepVGG 使用多分支模型, 增加模型的表征能力, 图 2 是进行下采样时的结构, 其中并行了 1 个卷积核大小为 3×3 的主分支和 1 个卷积核大小为 1×1 的 shortcut 分支^[6]。在推理时转化为单路模型, 从而以更高的速度进行推理, 同时节省内存 RepVGG 具有可分离的卷积结构, 可以轻松部署到移动设备等资源受限的环境, 适应性更广^[7]。

通常目标检测网络的 Loss 由分类损失、置信度损失和定位损失 3 部分组成。本文目标检测仅为包裹,为单目标检测,并无类别损失,检测任务的 Loss 由包裹框损失和置信度损失组成^[8]。第 1 部分为包裹框损失,记为 Loss_{obj} ,损失函数为二元交叉熵:

$$\text{Lossobj} = - \{ z \log[\text{Sigmoid}(x)] \} + (1 - z) \log[\text{Sigmoid}(1 - x)] \quad (1)$$

$$z = \log(x, \gamma) - g(x, \gamma) + (1 - x) \quad (2)$$

式中: x 为网络的预测值,使用 Sigmoid 函数将实数 x 映射到 $0 \sim 1$, 反应当前类别概率;本文使用的边界框损失函数为 SIoU,它引入真实框和预测框之间的向量角度,有助于提高焊点检测的准确性和稳定性,且计算速度较快^[9]。SIoU 具体包含 4 部分,分别是

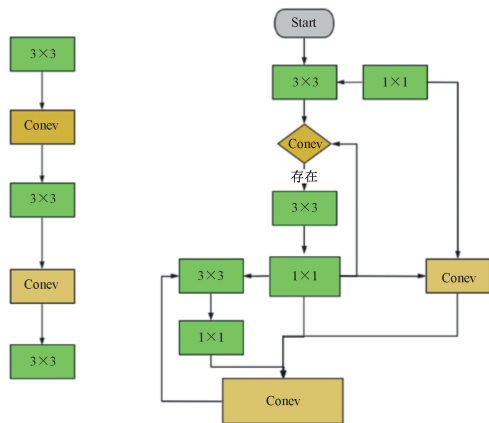


图 2 RepVGG 结构

Fig. 2 RepVGG structure

角度成本、距离成本、形状成本、交并比成本。角度成本 Δ 的计算公式:

$$\Lambda = 1 - 2\sin^2\left[\arctan\left(\frac{c_h}{\sigma}\right) - \frac{\pi}{4}\right]\left[\arctan\left(\frac{c_h}{\sigma}\right) + \frac{\pi}{2}\right] \quad (3)$$

式中: c_h 为两框中心点在垂直方向上的绝对插值; σ 为两框中心点之间的欧氏距离。

1.2 特征检测结果的模糊逻辑推理

1.2.1 构造焊点特征模糊集

对于焊点,不论是人工还是计算机完成检测的过程,都必须以特征作为基础数据^[10]。因此,要进行特征选择。特征选取主要是从众多的特征中选取有效的特征值,在不影响焊点检测效果的情况下,降低特征空间的维数,提高执行效率^[11],如图3所示。

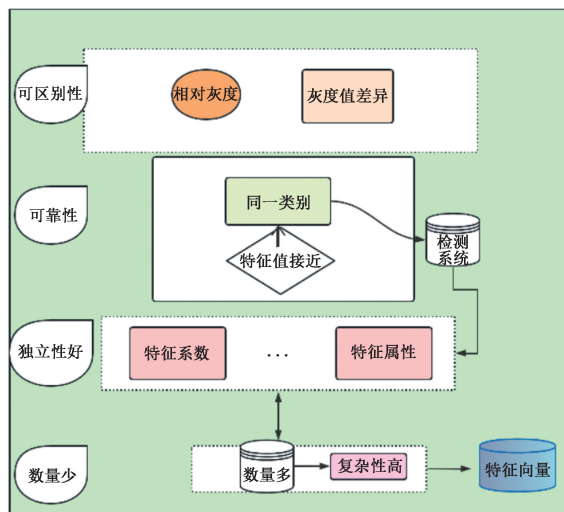


图 3 模糊集特征

Fig. 3 Fuzzy set characteristics

1.2.2 构造模糊关系矩阵

为了保证焊点的成型精度和外观质量,选取翘

曲、体积收缩、缩痕等为试验目标^[12]。依据工艺焊点的推荐范围、参数、实践经验等因素,选取熔体温度、模具温度、焊接时间、焊压压力、焊压时间、 V/P (V 为速度, P 为压力)切换等 6 个工艺参数为试验因素,各因素划分 5 个水平^[13]。实测焊点的实际相关参数:翘曲变形量、体积收缩率、焊点深度作为模糊关系的输出,设计模糊关系矩阵如表 1 所示。

1.2.3 隶属度确定

模糊推理系统是建立基于模糊逻辑推理的故障智能检测系统的一种广泛应用的基本形式^[14]。模糊推理系统可以看做是从论域 U 到论域 V 的隶属度表^[15]。根据上述模糊关系矩阵里的相关数据,进行归一化处理,然后定义输出的模糊关系隶属度函数,如图 4 所示。通过模糊化、模糊推理和解模糊化等步骤,实现焊点因素域到焊点质量域的非线性映射,类似于人工神经网络^[16]。智能检测系统可以近似对一个给定的非线性函数在任意精度水平进行计算求解,其独特之处在于可以充分有效使用各种语言或者知识信息^[17]。

1.2.4 模糊推理示例

该系统的主要作用是利用一种基于模糊规则的原始资料及相应条件进行逻辑推断,并给出最后的运算结果。根据该算法的运行规律,将其转化为具有类似于映射关系的模糊化规则。该推理引擎可以采用对应的推理方式,并在同一时间进行输

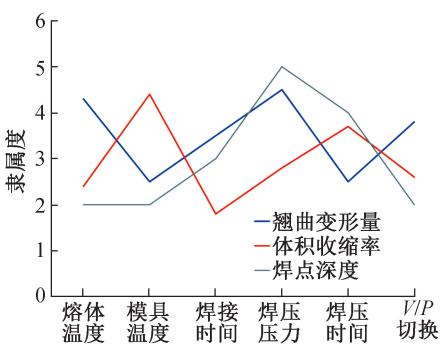


图 4 输出的隶属函数

Fig. 4 The membership function of the output

出,对于某个焊点的 6 个输入因素,计算得到焊点输出结果 $y_i(i=3)$,如下所示:

$$y_i = \frac{X_1P_1 + X_2P_2 + X_3P_3 + X_4P_4 + X_5P_5 + X_6P_6}{X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6} \tag{4}$$

式中: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ 分别对应熔体温度、模具温度、焊接时间、焊压压力、焊压时间、 V/P 的因素水平等级的算数均值; $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$ 分别对应上述模糊关系对应的隶属度值。

其中输入 X 为当前输入值 x_{in} 与下一时刻的输入 $x_i^{(n+1)}$ 值进行算数平均,如下所示:

$$X = \frac{1}{2} [x_{in} + x_i^{(n+1)}] \tag{5}$$

最后,对计算得到的 $y_i(i=3)$ 再进行均值计算,4 组工艺参数得到的焊点均值如表 2 所示。

表 1 模糊关系设计矩阵
Table 1 Fuzzy relation design matrix

号码	熔体温度	模具温度	焊接时间	焊压压力	焊压时间	V/P 切换	翘曲变形量/mm	体积收缩率/%	焊点深度/mm
1	1	2	1	3	1	2	0.71	11.31	51.7
2	1	2	2	4	1	3	0.46	11.13	21.3
3	1	1	3	3	2	1	0.36	7.091	4.5
4	1	1	1	2	2	2	0.68	11.29	34.4
5	1	1	1	1	3	3	0.51	11.39	26.4
6	2	2	3	2	4	4	0.44	11.43	18.0
7	2	2	3	3	2	1	0.69	11.63	42.6
8	3	1	2	4	1	2	0.51	11.88	30.2
9	3	3	1	5	2	4	0.44	11.53	25.4

表 2 焊点均值
Table 2 Welding spot mean value

工艺参数	熔体温度	模具温度	焊点时间	保压压力	保压时间	V/P 切换
1 组	0.630	0.672	0.625	0.651	0.554	0.637
2 组	0.686	0.675	0.616	0.641	0.663	0.661
3 组	0.624	0.633	0.651	0.682	0.693	0.675
4 组	0.646	0.653	0.672	0.668	0.679	0.661
均值	0.610	0.420	0.910	0.750	0.190	0.590
(结果)	(合格)	(较差)	(好)	(较好)	(差)	(较差)

2 焊点智能检测系统

2.1 智能检测系统总架构

针对实际环境中焊点数据质量参差不齐、批次效应明显以及数据时序信息提取不足等问题,提出目标检测算法下的焊点质量检测模型,总架构如图 5 所示。

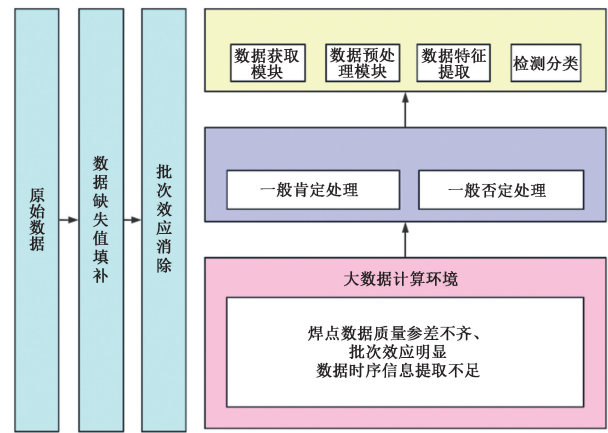


图 5 智能检测系统总架构

Fig. 5 General architecture of intelligent detection system

数据获取模块基于点焊试验平台,通过传感器采集点焊过程信号得到原始数据,如图 6 所示。数据预处理模块主要是对原始数据进行处理,使得传入平台系统层的数据更加可靠,主要包括数据缺失值填补和焊点数据批次效应消除两部分。数据缺失值填补用来解决数据质量参差不齐问题,保证数据的有效性;点焊批次效应消除用来解决数据分布不一致导致历史模型泛化能力低的问题。

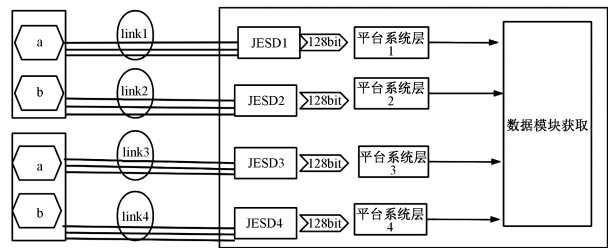


图 6 数据获取模块结构

Fig. 6 Data acquisition module structure

2.2 机器视觉硬件组成

焊接质量检测系统是一种用于测试焊接接头质量的方法。在此基础上,本文介绍了一套基于工业摄像机及镜头、工业光源和 PC 等设备搭建的检测系统,并对焊接过程进行了分析。其中,工业摄像机的优势在于快门速度快、影像捕捉品质高。

2.3 智能检测系统软件

2.3.1 软件模型设计

根据前面点焊质量检测的需求分析,软件模型的整体架构设计主要分为 4 层,分别是页面展示层、

业务逻辑层、数据持久层和数据采集层,如图 7 所示,不同的架构层面有着不同的作用。

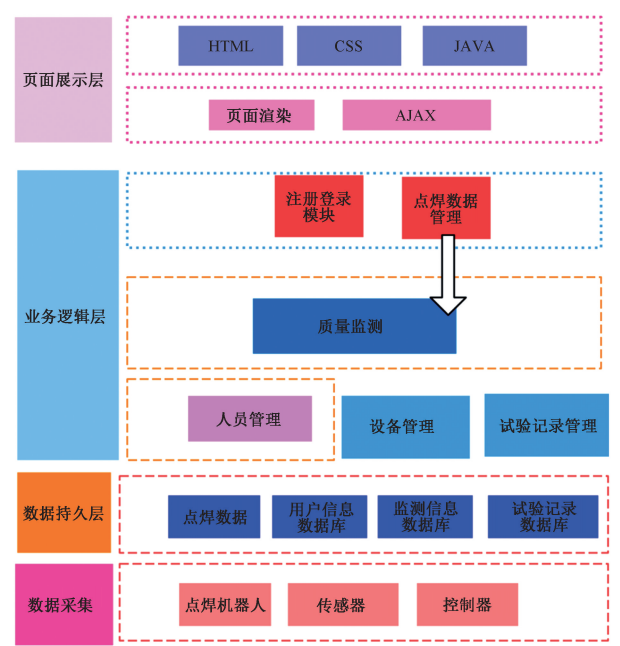


图 7 软件模型架构

Fig. 7 Software model architecture

2.3.2 数据处理

1) 数据预处理

首先,对训练集和测试集 A, B 进行数据预处理操作,提高样本质量。其中衡量分类方法性能综合度量的定义如下:

$$\text{accuracy} = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN} \tag{6}$$

式中: TP 为实际为正类且被模型预测为正类的样本数量; TN 为实际为负类且被模型预测为负类的样本数量; FP 为实际为负类但被模型预测为正类的样本数量; FN 为实际为正类但被模型预测为负类的样本数量。

分类器选用贝叶斯方法进行概率估计:

$$P(z_j = i | x_j) = \frac{p(z_j = i)p_m(x_j | z_j = i)}{p_m(x_j)} \tag{7}$$

上式中: z_j 为第 j 个样本的真实类别标签; i 为某一具体类别; x_j 为第 j 个样本的特征向量; $p(z_j = i)$ 指类别 i 的先验概率; $p_m(x_j | z_j = i)$ 指在类别 i 下特征 x_j 的类条件概率密度; $p_m(x_j)$ 指特征 x_j 的边缘概率。

2) 数据集

本系统通过样本数据集的均匀分配,可以很好地解决焊点质量参差不齐、批次效应明显等问题,采用基于目标检测算法的点焊故障样本生成模型扩充样本集,采用模糊逻辑推理的焊点质量检测模型判断焊点质量,如表 3 所示。

表 3 试验数据
Table 3 Test data

焊点类型	数据集	测试集	验证集
正常样本	400	20	20
焊点爆焊	400	20	20
焊点偏位	400	20	20
焊核偏小	400	20	20
焊核空洞	400	20	20

3)数据优化

为了让传入检测系统的数据更加可靠,对原始数据进行了优化处理,主要包括数据缺失值填补和点焊数据批次效应消除两部分。结果如表 4 所示,智能检测技术可以很好地检测焊点质量。

表 4 对比结果
Table 4 Comparison result

序号	结构		准确率/%	
	缺失值 填补	批次效应 消除	测试集 A	验证集 B
1	×	×	89.7	80.0
2	√	×	90.7	86.3
3	×	√	93.5	90.6
4	√	√	95.5	94.3

2.3.3 检测系统主功能界面

焊点质量检测软件采用前后端分离,对前端和后端分别开发,再通过接口完成前后端数据交互,检测系统主界面如图 8 所示,主要由 5 部分组成,分别是焊接任务信息、检测图像、实时产量、相机图像和检测记录。



图 8 检测系统主界面

Fig. 8 The main interface of the detection system

2.4 实施效果

本文以某实际工程地下连续墙钢筋笼钢筋网片自动焊接生产线为例,通过在该网片焊接机器人的每个焊接执行端配置了 1 路工业相机用于采集图像,另外配置了 1 台高性能的主控计算机用于数据处理与实时检测。首先对相机采集的焊点样本进行分类并标注,如图 9 所示。接着,将标注后的图像传入 YOLOv5 模型进行训练。在训练过程中,密切监控训练集上的损失函数变化曲线与验证集上的

性能指标至关重要。当观察到验证集性能不再提升,甚至开始下降时,应果断停止训练。

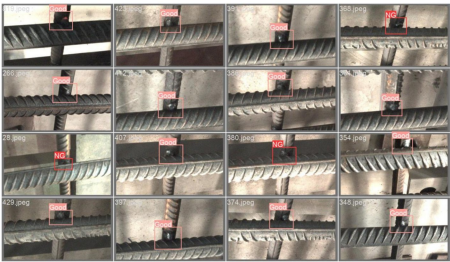


图 9 焊点样本标注

Fig. 9 Solder joint sample labeling

将训练好的模型部署到实际生产环境前,往往需要对其进行轻量化处理。可综合运用模型剪枝、量化及知识蒸馏等技术,在尽量保持精度的前提下,减小模型体积、降低计算复杂度,从而提升在边缘设备上的推理效率,满足实时性要求。当直接使用 YOLOv5 检测焊点质量时,结果显示可以较好检测到具有明显缺陷的图像,如图 10 所示,对于明显开裂的焊点可以有效检测。



图 10 YOLOv5 的检测效果

Fig. 10 Detection effect of YOLOv5

然而,在实际应用后发现,实际焊点缺陷往往是多个不同缺陷同时存在。将 YOLOv5 的检测结果传入模糊推理规则计算,就可以得到一个综合评价结果。对比了仅使用 YOLOv5 检测结果与基于 YOLOv5 的特征提取并融合焊接工艺参数进行模糊逻辑推理的检测结果,经模糊逻辑推理后的检测结果精度大幅度提高,如表 5 所示。

表 5 准确率对比

Table 5 Accuracy comparison

网片序号	地下连续 墙型号	准确率/%	
		YOLOv5	YOLOv5+模糊逻辑
1	E1 上	85.2	96.3
2	E1 下	87.8	96.5
3	E2 上	80.1	96.4
4	E2 下	90.7	97.5
5	E3 上	88.9	97.7
6	E3 下	78.9	97.1
7	D4 上	92.1	97.3
8	D4 下	85.5	96.5
9	Ca3 上	86.3	96.3
10	Ca3 下	87.4	96.1

3 结语

本文以焊点智能质检为研究方向,基于真实的点焊平台,对焊点质量检测展开研究。一是针对实际生产中点焊故障样本稀少而难以进行点焊质量检测的难题,提出一种基于目标检测算法的点焊故障样本生成模型,解决故障样本不足的问题。二是针对目前点焊质量检测模型对智能化不足以及实际环境中焊点数据质量参差不齐、批次效应明显等问题,提出一种融合目标检测与模糊逻辑推理的焊点智能检测技术,实现更高的检测准确率。

本文未对焊点检测结果的缺陷分布进行权重判断,而且检测准确率也无法保证 100%。实际工程中,工程人员应对主受力关键节点采用其他更完善的检测方法进行复检,以确保工程安全。

参考文献:

[1] 刘志霞,王炜,仇焕龙. 基于相机与激光雷达融合多目标检测算法研究[J]. 中国汽车,2024,34(4):36-42.
LIU Z X,WANG W,QIU H L. Research on multi-target detection algorithm based on camera and LiDAR fusion[J]. China auto, 2024,34(4):36-42.

[2] 邵振峰,张红萍,吴长枝,等. 深度学习技术在复杂信息保障中的应用现状与趋势[J]. 测绘地理信息,2024,49(6):8-13.
SHAO Z F,ZHANG H P,WU C Z, et al. Current situation and future development of deep learning technology in complex information support [J]. Journal of geomatics, 2024, 49 (6): 8-13.

[3] 蒋宇亮,孙卫红,梁曼,等. 基于图像增强与改进 YOLOv5s 的斜纹针织物疵点检测算法[J]. 棉纺织技术,2024,52(7):40-46.
JIANG Y L,SUN W H,LIANG M, et al. Detection algorithm for twill knitted fabric defect based on image enhancement and improved YOLOv5s[J]. Cotton textile technology,2024,52(7):40-46.

[4] 朱国晖,杨瑛. 基于模糊逻辑推理系统的簇首选择算法[J]. 西安邮电大学学报,2021,26(6):97-103.
ZHU G H,YANG Y. A cluster head selection algorithm based on fuzzy logic inference system[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications,2021,26(6):97-103.

[5] 孙晓军,宋恩哲,姚崇,等. 基于模糊逻辑推理的船舶并联气电混合动力系统能量最优分配研究[J]. 推进技术,2022,43(6):392-404.
SUN X J,SONG E Z,YAO C, et al. Optimal energy allocation of ship parallel gas electric hybrid power system based on fuzzy logic reasoning[J]. Journal of propulsion technology, 2022, 43 (6): 392-404.

[6] 谷丰盈. 基于犹豫模糊决策的多响应参数优化研究[D]. 郑

州:郑州航空工业管理学院,2020.

GU F Y. Study on parameter optimization for multi-response using hesitant fuzzy decision making methodology [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Aeronautics ,2020.

[7] 杨明亮,王鹏,渠晓刚,等. 基于模糊逻辑推理的风机塔筒半主动控制[J]. 现代制造工程,2020(1):118-125.
YANG M L,WANG P,QU X G, et al. Semi-active control of wind turbine tower based on fuzzy logic inference [J]. Modern manufacturing engineering,2020(1):118-125.

[8] GIORDANO L,THESEIDER DUPRÉ D. An ASP approach for reasoning on neural networks under a finitely many-valued semantics for weighted conditional knowledge bases[J]. Theory and practice of logic programming,2022,22(4):589-605.

[9] SRIVASTAVA G,SRIVASTAVA R. An efficient modification of generalized gradient vector flow using directional contrast for salient object detection and intelligent scene analysis [J]. Multimedia tools and applications,2020,79(19):13599-13619.

[10] DEVI S K,ABDULRAHMAN ALBRAIKAN A,AL-WESABI F N, et al. Intelligent deep convolutional neural network based object detection model for visually challenged people [J]. Computer systems science and engineering, 2023, 46 (3): 3191-3207.

[11] PARMAR Y, NATARAJAN S, SOBHA G. DeepRange: deep-learning-based object detection and ranging in autonomous driving [J]. IET intelligent transport systems,2019,13(8):1256-1264.

[12] MUHAMMAD I, YING K, NITHISH M, et al. Robot-assisted object detection for construction automation; data and information-driven approach[J]. ASME transactions on mechatronics,2021,26(6):2845-2856.

[13] PRASAD D K,DONG H X,RAJAN D, et al. Are object detection assessment criteria ready for maritime computer vision[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems,2020,21(12):5295-5304.

[14] SARKAR S,TOTARO M W,KUMAR A, et al. Real-time object processing and routing for intelligent drones: a novel approach [J]. Computer,2020,53(12):80-89.

[15] ISMAIL N, JALAR A, ABU BAKAR M, et al. Effect of flux functional group for solder paste formulation towards soldering quality of SAC305/CNT/Cu [J]. Soldering & surface mount technology,2020,32(3):157-164.

[16] KUZNETSOVA A,ROM H,ALLDRIN N, et al. The open images dataset V4: unified image classification, object detection, and visual relationship detection at scale[J]. International journal of computer vision,2020,128(7):1956-1981.

[17] TOM A J,GEORGE S N. A three-way optimization technique for noise robust moving object detection using tensor low-rank approximation, l1/2, and TTV regularizations [J]. IEEE transactions on cybernetics,2021,51(2):1004-1014.