# 基于改进 Canny 算法的焊缝图像边缘检测

缪红超[1],窦易文[1,2],张丽平[1],龚佳乐[1],高依婷[1]
1. 安徽工程大学 计算机与信息学院,安徽 芜湖 241000
2. 安徽工程大学 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室,安徽 芜湖 241000

**摘 要:目的** 针对复杂环境下焊缝图像的边缘检测问题,基于传统的 Canny 算法,将中值滤波替换高斯滤波,并将非极大值抑制(NMS)进行改进,得到一种面向复杂环境的改进 Canny 算法的焊缝图像边缘检测方法。**方法** 对焊缝图像进行中值滤波,保留图像的边缘信息,平滑区域内的细节,接着利用梯度方向局部均值偏差进行改进的非极大值抑制,综合考虑梯度幅值的大小和梯度方向对焊缝边缘检测的影响,最后使用双阈值法检测和连接边缘,根据焊缝图像的特点选择相应的阈值,既可以保证边缘检测的结果的准确性,也可以有效地避免一些噪声干扰。**结果** 与传统的 Canny 算法和其他一些滤波器改进的 Canny 算法等进行对比分析,所提出的方法的边缘保持度和边缘线性连接程度效果是最好的,边缘保持可以使检测结果保留原始焊缝图像的 60%左右,同时边缘的连接程度相较于传统的 Canny 算法均有所提升,并且对焊缝图像中伪边缘的抑制效果也有所改善。**结论** 所提出的改进的 Canny 算法通过对滤波、NMS 算法的综合优化,可以有效地检测出焊缝图像中的边缘信息,且有良好的焊缝图像边缘检测效果。

**关键词:**边缘检测;中值滤波;非极大值抑制;双阈值法
**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0005.007

## Edge Detection of Weld Seam Images Based on Improved Canny Algorithm

MIAO Hongchao[1], DOU Yiwen[1,2], ZHANG Liping[1], GONG Jiale[1], GAO Yiting[1]
1. School of Computer and Information, Anhui University of Engineering, Anhui Wuhu 241000, China
2. Key Laboratory of Advanced Perception and Intelligent Control of High-end Equipment, Ministry of Education, Anhui University of Engineering, Anhui Wuhu 241000, China

**Abstract: Objective** In response to the edge detection of weld seam images in complex environments, an improved Canny algorithm for edge detection of weld seam images in complex environments was proposed based on the traditional Canny algorithm, replacing Gaussian filtering with median filtering and improving the non-maximum suppression (NMS). **Methods** The weld seam image was subjected to median filtering to preserve edge information and smooth details within the area, followed by improved NMS using the local mean deviation of the gradient directions. The influence of gradient amplitude and gradient direction on weld seam edge detection was considered. Finally, the dual-threshold method was used to detect and connect edges. The appropriate threshold was selected based on the characteristics of the weld seam image to ensure the accuracy of edge detection results while effectively avoiding some noise interference. **Results** Compared with the traditional Canny algorithm and other Canny algorithms with improved filters, the proposed

**收稿日期:**2023-03-05 **修回日期:**2023-05-18 **文章编号:**1672-058X(2024)05-0058-07
**基金项目:**安徽省高校协同创新计划项目(GXXT-2019-007);安徽工程大学校级科研项目(XJKY072019A02).
**作者简介:**缪红超(1999—),男,江苏连云港人,硕士研究生,从事图像处理与模式识别研究.
**通讯作者:**窦易文(1972—),男,江苏无锡人,副教授,博士,从事图像处理研究. Email: douyw@ahpu.edu.cn.
**引用格式:**缪红超,窦易文,张丽平,等. 基于改进 Canny 算法的焊缝图像边缘检测[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(5):58—64.
MIAO Hongchao, DOU Yiwen, ZHANG Liping, et al. Edge detection of weld seam images based on improved Canny algorithm [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(5): 58—64.

method achieves the best edge retention and edge linearity. Edge retention can preserve approximately 60% of the original weld seam image, and the degree of edge connection is improved compared with the traditional Canny algorithm, with enhanced suppression of pseudo edges in the weld seam images. **Conclusion** The improved Canny algorithm, through comprehensive optimization of filtering and NMS algorithms, can effectively detect edge information in weld seam images and achieve good edge detection results for weld seam images.

**Keywords:** edge detection; median filtering; non-maximum suppression; dual-threshold method

## 1 引　言

自动焊接技术可以通过计算机视觉系统实现实时监测焊接过程中的焊缝形状、位置和尺寸等信息,然后根据预设的焊接参数自动调整焊接设备的参数,实现自动化控制焊接过程。这种技术的应用可以大大提高焊接的精度和一致性,减少焊接中的人为误差和浪费,同时也可以提高生产效率和降低生产成本。通过视觉传感器采集焊缝的图像数据,结合图像处理算法进行分析和识别,可以实现焊缝的自动跟踪和位置控制,从而提高焊接的精度和一致性。此外,基于视觉传感器的自动化控制系统具有实时性强、可靠性高、操作简便等优点,可以有效地降低焊接过程中的人为误差和操作难度,提高生产效率和质量。因此,视觉传感器在自动焊接技术中的应用越来越广泛,成为实现自动化控制的重要手段之一。主要包括图像增强[1]、边缘检测[2]、二值化[3]、形态学运算[4]等步骤,旨在对从视觉传感器采集的焊缝图像进行处理,以提取出焊缝的特征信息,如位置、曲率、宽度等,焊缝中心的偏差信号是通过分析特征信息来获得的。在焊缝跟踪[5]过程中,用图像处理技术来获取准确的焊缝中心位置对于焊缝识别[6]、焊接路径选择以及提高焊接跟踪精度非常重要。

通常焊缝图像往往伴随着周围的复杂环境,比如光照强度低,噪声多导致更多假边缘干扰真实边缘,边缘难以分辨等,由于焊缝图像受到外界环境干扰,存在大量噪音,这对焊缝图像的边缘检测工作十分不利。

为了获得焊缝图像边缘的检测结果,人们采用了许多方法,盘莉莉等[7]使用 Roberts 算子识别焊缝区工件间隙,该算法执行效率高,时间成本低,但是对噪声十分敏感,不适用于复杂环境。Roberts 算子对垂直边缘的检测效果优于斜向边缘,定位精度高然而对噪声敏感,无法抑制噪声影响,提取到的边缘比较粗。蒋华军等[8]采用 Sobel 算子对复杂环境下的焊缝进行边缘检测和区域标记,并在标记位置对原始焊缝图像横轴与纵轴方向的灰度梯度进行分析,以增强边缘的识别能力,但 Sobel 算子只关注像素值的梯度信息,而不是像素值本身,所以对灰度的变化不敏感,易造成漏检或误检。白东阳等[9]使用 Canny 算子检测焊缝边缘,虽然可以得到较为准确的焊缝信息,但在复杂环境下不仅易使高频边缘被平滑掉,从而造成边缘丢失,而且难以克服幅值较高的噪声影响。尽管有些文献认为传统的 Canny 算子是最优算子[10],但在复杂环境下,不仅易导致图像中的高频边缘信息被模糊掉,从而无法正确地进行边缘检测,而且难以克服幅值较高的噪声的影响。这种情况会降低图像处理和检测技术[11]的准确性和可靠性,特别是针对焊缝图像边缘检测这类高精度的任务,这种边缘丢失的问题会显得更加突出。

近年来,深度学习在图像处理领域起到了越来越重要的作用。叶应辉等[12]利用 Softmax 分类器结构,对提取到的图像信息进行卷积和池化处理,接着基于 CV 算法进行图像识别,从而获得较为清晰的边缘图像,但是由于深度网络计算量较大,以及分割任务通常需要对整个图像进行像素级的预测,需要投入较大计算资源和时间成本;徐威等[13]在 U-Net 的基础上,提出了多层感知注意力的图像分割方法,改善了提取图像模糊和伪边缘等问题,但数据集单一且缺乏代表性,导致整体实验缺乏普遍性,无法很好地适应其他复杂环境下的图像。

以传统的 Canny 算法为基础,作出的改进有以下两点:

(1) 将中值滤波替换高斯滤波[14],能够更好地保留焊缝图像细节,且对于多种类型地噪声,都有比较好的去除效果。

(2) 将非极大值抑制进行改进,由传统的 8 邻域提升至 32 邻域,可以在一定程度上增加算法的准确度和鲁棒性,使得非极大值抑制能够更好地适应不同复杂环境下的焊缝图像。

总之,增加邻域数量可以使得算法更加容易确定像素间的细线型边缘,从而降低对焊缝边缘的误判率,

最终得到一种面向复杂环境的改进 Canny 算法的焊缝图像边缘检测方法。

## 2 改进的焊缝图像边缘检测算法

传统的 Canny 算法[15]在实现边缘检测[16]过程中,主要包括 4 个步骤:高斯滤波[17],计算梯度幅值和方向,抑制局部像素非极大梯度点[18],双阈值方法搜索边界起点和跟踪并连接边缘。但在复杂环境下传统的 Canny 算法检测到的效果往往不是很好。因此提出一种面向复杂环境的新型焊缝图像边缘检测方法,对焊缝图像进行中值滤波算法保留图像的边缘信息,平滑区域内的细节,接着基于梯度方向和局部均值偏差改进的非极大值抑制方法,结合双阈值法检测和连接边缘(图 1)。

**图 1 改进的焊缝图像边缘检测算法**

**Fig. 1 Improved edge detection algorithm for weld seam images**

### 2.1 中值滤波

中值滤波[19]是一种广泛应用的图像处理滤波方法,它能够去除图像中的噪声和细小的不连续性。该方法通过将每个像素点的灰度值替换为该像素点周围邻域中的中值,来实现对图像的滤波处理。

中值滤波的核心概念是在该点四周邻域内,取所有像素值的中值来替换该点的初值。这样做的原因是噪声往往会导致像素值的突变,而中值操作可以有效地消除这种突变,从而实现去噪的效果。中值滤波可以有效地去除脉冲噪声和椒盐噪声等离散噪声[20],对保留焊缝图像真实的边缘信息具有一定的效果。

方法基于统计排序理论[21],可以通过将像素点的邻域像素值按照大小进行排序,然后取排序后的中值作为该像素点的新值,接着重复上述步骤,对焊缝图像中的每一个像素点进行处理二维中值滤波的输出如式(1)所示:

$$g(x,y)=\mathrm{mid}\{f(x-k,y-l),(k,l\in W)\} \tag{1}$$

其中,$f(x,y)$,$g(x,y)$分别是原始图像和滤波处理后图像,$W$ 是二维滑动模板。

### 2.2 改进的非极大值抑制

焊缝图像周围往往有许多噪声,利用非极大值抑制能够消除部分非边缘点,8 邻域内比较易造成边缘点被噪声抑制,从而导致误判。针对此问题,文献[22]对 8 邻域扩张至 16 邻域,提出一种基于多尺度分析的图像边缘检测算法,对不同尺度范围内像素强度变化量采用梯度幅值作为衡量指标,通过选取合适大小窗口来确定最佳分割阈值。在此基础上进行了改进,将 16 邻域继续扩张至 32 邻域, 且同时满足:

$$P(x,y)>M(x+i,y+j)+D(x+i,y+j) \tag{2}$$

$$P(x,y)>M(x-i,y-j)+D(x-i,y-j) \tag{3}$$

$$M(x,y)=\frac{1}{5^2}\sum_{x-\frac{5}{4}}^{x+\frac{5}{4}}\sum_{y-\frac{5}{4}}^{y+\frac{5}{4}}P(x,y) \tag{4}$$

$$D(x,y)=\frac{1}{5^2}\sum_{x-\frac{5}{4}}^{x+\frac{5}{4}}\sum_{y-\frac{5}{4}}^{y+\frac{5}{4}}\left|M(x,y)-P(x,y)\right| \tag{5}$$

其中,$M$ 为邻域局部均值,$M(x,y)$ 为将当前像素 $(x,y)$ 周围一定范围内的所有像素值求平均数,将这个平均值作为当前像素点的新灰度值,$D$ 为局部邻域偏值均值,用于确定像素是否为极大值点。

本文提出的改进的非极大值抑制如图 2 和图 3 所示,在对图像进行梯度求取之后,在梯度方向进行运算,以中心点的梯度方向做一条斜线,通过比较斜线与周围梯度值的交点和中心点的梯度值,来判断是否为最大值。将当前位置的梯度值与梯度方向上两侧的梯度值进行比较,以搜索局部极大值,并抑制非极大值元素。

**图 2　梯度方向对应(5×5)邻域**

**Fig. 2　Gradient direction (5×5) neighborhood**

**图 3　梯度方向 $\theta$ 对应邻域中心点编号**

**Fig. 3　Numbers of the center point in the neighborhood on gradient direction $\theta$**

## 2.3　双阈值法

Canny 算法中的双阈值法是一种非常常用的边缘检测方法,其基本思想是将检测到的边缘像素点分为强边缘和弱边缘两类,并根据不同的阈值进行进一步的筛选和处理。

具体来讲,将原始图像经过高斯滤波等预处理之后,计算其梯度幅值与方向,然后利用一个滞后阈值的机制对其进行非极大值抑制。使用两个不同的阈值对采样点处的梯度幅值进行判断:若其超过高阈值,则标记为强边缘;若在高低阈值之间,则标记为弱边缘;否则则被视为背景噪声而被舍弃。最后,可以通过一些后处理方法如连接分析、边缘消除等手段,来进一步完善和优化检测结果。双阈值法的使用可以有效地减少误检率以及漏检率,从而获得更加精确和清晰的边缘信息。需要注意的是,不同的应用场景可能需要调整不同的阈值大小和比例,以便充分利用求解器的能力并避免出现过度检测或欠检测等问题。

## 3　实验及结果分析

实验算法在 Matlab2016a 平台上进行验证,实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-9300H 2.40GHz 8G 内存。实验数据来源为飞浆数据集,为了验证算法针对焊缝图像边缘检测中的改进,选取 191 张不同的焊缝图像,对这些焊缝图像首先采用传统 Canny 算法即高斯滤波+8 邻域的非极大值抑制,接着分别采用局部边缘保持滤波(LEP)、非负矩阵分解滤波(NMF)、小波滤波以及中值滤波替换传统 Canny 算法中的高斯滤波,然后分别将非极大值抑制中的 8 邻域扩张至 16 邻域以及 32 邻域。每张焊缝图像即可得到 15 种不同的实验结果,选取的焊缝图像示例如图 4 所示。

**图 4　焊缝图像示例**

**Fig. 4　Example of a weld image**

表 1 为图 4 焊缝图像示例得到的边缘检测结果示例,由表 1 的检测结果可以看出,由于传统 Canny 算法灵敏度不够,焊缝图像往往处在复杂环境下,焊缝周围

存在的噪声会对梯度计算和边缘幅值产生干扰,从而导致一些伪边缘被检测出来;受到火花、照度低等复杂的纹理或细节干扰时,局部边缘保持滤波可能无法完全区分真实边缘和纹理结果,从而产生伪边缘;非负矩阵分解滤波通过将输入的焊缝图像表示为非负权重和基向量的线性组合来提取特征,会导致边缘连接性较低的结果;小波滤波对边缘信号具有较强感应,因此在边缘附近容易出现伪边缘。

**表 1 焊缝边缘检测结果示例**

**Table 1 Weld edge test results of sample I**

| 滤波器 | 8 邻域 | 16 邻域 | 32 邻域 |
|---|---|---|---|
| 高斯滤波 | | | |
| LEP 滤波 | | | |
| NMF 滤波 | | | |
| 小波滤波 | | | |
| 中值滤波 | | | |

本文算法采用的中值滤波是一种非线性滤波方法,在抑制伪边缘和去除噪声方面具有良好的效果,且随着非极大值抑制中邻域数量的增加,所得到的实验结果更加清晰,边缘细节更加完整。

为使实验结果更加具有普遍性,表 2、表 3 中数据是由选取的 191 张不同的焊缝图像所得到的实验结果的平均值,由实验结果可得,在针对焊缝图像边缘检测的问题中,中值滤波相较于传统 Canny 算法中的高斯滤波以及其他一些常见的滤波器,所得到的边缘保持度以及边缘线性连接程度均有所提升,且算法中的 32 邻域的非极大值抑制相较于 8 领域和 16 邻域,边缘保持度和边缘线性连接程度也均有所提升。

**表 2 焊缝图像边缘保持度(EPI)平均值**

**Table 2 Average edge preservation index (EPI) of weld seam images**

| 滤波器 | 8 邻域 | 16 邻域 | 32 邻域 |
|---|---|---|---|
| 高斯滤波 | 0.606 91 | 0.616 41 | 0.619 99 |
| LEP 滤波 | 0.614 31 | 0.614 53 | 0.621 7 |
| NMF 滤波 | 0.591 62 | 0.600 65 | 0.604 49 |
| 小波滤波 | 0.611 69 | 0.618 42 | 0.621 38 |
| 中值滤波 | 0.605 16 | 0.618 27 | **0.623 68** |

**表 3　焊缝图像边缘线性连接程度平均值**

**Table 3　Mean value of the degree of linear connection at the edges of the weld image**

| 滤波器 | 8 邻域 | 16 邻域 | 32 邻域 |
|---|---|---|---|
| 高斯滤波 | 0.864 15 | 0.891 53 | 0.899 43 |
| LEP 滤波 | 0.826 4 | 0.829 27 | 0.810 08 |
| NMF 滤波 | 0.860 67 | 0.862 16 | 0.886 08 |
| 小波滤波 | 0.870 31 | 0.88 | 0.863 98 |
| 中值滤波 | 0.909 48 | 0.958 36 | **0.964 74** |

文献[23]介绍了一种评价图像边缘检测效果的方法,其表达式为

$$Q=y/x \tag{6}$$

其中,$x$ 为检测到的边缘像素点的数量,$y$ 为满足单连通条件的边缘像素点的数量,而 $Q$ 则反映了边缘线形连接的程度,$Q$ 的数值越高则表示连接程度越高,反之则表示连接程度较差。当边缘的连通性达到较高水平时,其错检和漏检的数量相对较少,这表明边缘连接程度的提高可以促进边缘的完整性。随着数值 $Q$ 的增大,连接的紧密程度也随之提升,从而使得边缘提取的效果更加显著[21],从表 2 可以看出改进后算法的优越性。

由表 2 和表 3 可以看出,算法的边缘保持可以使检测结果保留原始焊缝图像的 60%左右,同时边缘的连接程度相较于其他几种算法均有所提升。

## 4　结　论

针对焊缝图像边缘检测过程中易受到外界复杂环境如光照条件不足等因素干扰,对传统 Canny 算法做出改进。改进算法将中值滤波替换高斯滤波,能够更好地保留焊缝图像细节,且对于多种类型地噪声,都有比较好的去除效果。然后将非极大值抑制进行改进,由传统的 8 邻域提升至 32 邻域,可以在一定程度上增加算法的准确度和鲁棒性,使得非极大值抑制能够更好地适应不同复杂环境下的焊缝图像,具体而言,增加邻域数量可以使得算法更加容易确定像素间的细线型边缘,从而降低对焊缝边缘的误判率。最终得到一种面向复杂环境的改进 Canny 算法的焊缝图像边缘检测方法。

实验结果表明:使用中值滤波算法有效保留焊缝图像的边缘信息,并且有效提高了对焊缝边缘信息检测的准确性。通过局部均值偏差进行非极大值抑制比传统 8 邻域内直接比较和进行插值的非极大值抑制能够更有效地保留边缘点信息和抑制噪声。所提出的改进的 Canny 算法通过对滤波,NMS 算法的综合优化,可以有效地检测出焊缝图像中的边缘信息,有良好的焊缝图像边缘检测效果。可以有效提高焊缝图像边缘检测的准确性,进而使边缘检测结果更加可靠。

随着自动控制技术与智能制造的发展,焊接过程中焊缝图像边缘检测也得到了越来越广泛的应用,尤其有助于实现焊接自动化和智能化,并为相关行业和企业带来更多商业价值和社会效益,随之带来对焊缝图像边缘检测的准确性要求更高,对检测环境的依赖性更低。在进一步的实验中,设想将双阈值法改进成三阈值或更多阈值,以便提高焊缝边缘检测鲁棒性与准确性。

**参考文献**(References):


[1] 蔡秀梅, 刘航, 吴成茂, 等. 基于分数阶 Retinex 的低照度图像增强方法[J]. 光电子・激光, 2023, 34(5): 482—488.
CAI Xiu-mei, LIU Hang, WU Cheng-mao, et al. Low illumination image enhancement method based on fractional retinex[J]. Optoelectronics Laser, 2023, 34(5): 482—488.

[2] 闫浩国. 基于 GHT 的公路隧道衬砌裂缝图像边缘检测系统[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(4): 49—52.
YAN Hao-guo. GHT based road tunnel lining crack image edge detection system[J]. Automation Technology and Applications, 2023, 42(4): 49—52.

[3] 冯炎, 陈汝真. 基于离线参数调整的古籍图像二值化算法[J]. 计算机工程与设计, 2022, 43(3): 794—799.
FENG Yan, CHEN Ru-zhen. Ancient document image binarization using offline parameter tuning [J]. Computer Engineering and Design, 2022, 43(3): 794—799.

[4] WU S, YANG L, XU W, et al. A mutual local-ternary-pattern based method for aligning differently exposed images [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2016, 152 (C): 67—78.

[5] 王晓撰, 洪涛, 史宝均, 等. 激光焊缝跟踪技术在船用管材自动焊系统中的应用[J]. 焊接技术, 2022, 51(10): 72—75.
WANG Xiao-zhuan, HONG Tao, SHI Bao-jun, et al. Application of laser weld tracking technology in automatic welding system for marine pipe[J]. Welding Technology, 2022, 51(10): 72—75.

[6] 鲁金云, 潘海鹏, 夏永明. 结合 CANNY 算子和数学形态学的焊缝图像边缘检测算法[C]//第三十二届中国控制会议论文集(C 卷). 2013: 1169—1172.
LUJin-yun, PAN Hai-peng, XIA Yong-ming. The weld image edge-detection algorithm combined with canny operator and mathematical morphology [C]//Proceedings of 32nd Chinese Control Conference (Volume C). 2013: 1169—1172.

[7] 盘莉莉, 刘晓刚, 胡庆辉. 一种改进的 roberts 算法在焊缝识别中的应用研究[J]. 电焊机, 2010, 40(7): 42—44.
PAN Li-li, LIU Xiao-gang, HU Qing-hui. Research on an improved roberts algorithms used in welding line identification

[J]. Welding Machine, 2010, 40(7): 42—44.

[8] 蒋华军, 蔡艳, 李超豪, 等. 基于改进 Sobel 算法的焊缝 X 射线图像气孔识别方法[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(6): 665—671.
JIANG Hua-jun, CAI Yan, LI Chao-hao, et al. Recognition method for gas pores on X-Ray image of lap joints based on the improved Sobel algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(6): 665—671.

[9] 白东阳, 刘健, 王晓曼, 等. Canny 算子检测焊缝的 GPU 并行加速研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(5): 93—96.
BAI Dong-yang, LIU Jian, WANG Xiao-man, et al. Research on canny operator welding detection based on GPU parallel acceleration[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(5): 93—96.

[10] 于兵. 基于机器视觉的直缝焊管焊缝位置识别研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
YU Bing. Research and application of weld seam position recognition of longitudinal welded pipe based on machine vision[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.

[11] 金灵, 陈曹阳. 裂缝检测中的图像处理技术[J]. 山西建筑, 2023, 49(1): 193—195.
JIN Ling, CHEN Cao-yang. Image processing technology in crack detection[J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(1): 193—195.

[12] 叶应辉. 基于深度学习的卫星遥感图像边缘检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 39—44.
YE Ying-hui. Satellite remote sensing image edge detection method based on deep learning[J]. Computer Measurement and Control, 2022, 30(10): 39—44.

[13] 徐威, 付晓薇, 李曦, 等. 融合多层感知注意力的电极微观图像分割方法[J]. 计算机工程, 2023, 21(6): 1—12.
XU Wei, FU Xiao-wei, LI Xi, et al. Electrode microscopic image segmentation method based on multi-layer perceptual attention fusion[J]. Computer Engineering, 2023, 21(6): 1—12.

[14] 宋大成, 张兴媛, 王啸伟, 等. 基于 Canny 的小资源占用边缘检测改进算法[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(1): 168—172.
SONG Da-cheng, ZHANG Xing-yuan, WANG Xiao-wei, et al. An improved edge detection algorithm based on canny for small resource occupancy[J]. Intelligent Computing and Applications, 2020, 10(1): 168—172.

[15] 王纪刚, 陈家新. 基于改进滤波的 Canny 医学图像边缘检测算法[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(6): 1577—1579.
WANG Ji-gang, CHEN Jia-xin. Canny medical image edge detection algorithm based on improved filter[J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(6): 1577—1579.

[16] 郝利华, 王明泉. 改进的 Canny 算法在直焊缝图像缺陷边缘检测中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(7): 52—55.
HAO Li-hua, WANG Ming-quan. Application of improved canny algorithm in defect edge detection of straight weld image[J]. Firepower and Command Control, 2017, 42(7): 52—55.

[17] MORA J P, BEDLE H, MARFURT K J. Fault enhancement using probabilistic neural networks and Laplacian of a Gaussian filter: A case study in the Great South Basin, New Zealand[J]. Interpretation, 2022(2): 10—15.

[18] BAI J, ZHU J, ZHAO R, et al. Area-based non-maximum suppression algorithm for multi-object fault detection[J]. 光电子学前沿(英文版), 2020, 13(4): 8—13.

[19] WANG T, LIU C, WANG L, et al. Evolution modeling with multi-scale smoothing for action recognition[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation (English edition), 2018, 55(AUG.): 778—788.

[20] 王卫星, 王李平, 员志超. 一种基于最大类间后验概率的 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(4): 962—965.
WANG Wei-xing, WANG Li-ping, YUAN Zhi-chao. Edge detection algorithm of canny based on maximum between-class posterior probability[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(4): 962—965.

[21] 程昊坤, 和晓军. 一种改进中值滤波算法的 FPGA 硬件实现[J]. 通信与信息技术, 2023(3): 23—26.
CHENG Hao-kun, HE Xiao-jun. Implementation of an improved median filtering algorithm based on FPGA[J]. Communication and Information Technology, 2023(3): 23—26.

[22] 于兵, 程建邦, 姚爱英, 等. 改进 Canny 算法检测直缝焊管焊缝位置[J]. 机械设计与制造, 2023, 21(2): 24—27.
YU Bing, CHENG Jian-bang, YAO Ai-ying, et al. Improved canny operator to detect the weld position of straight seam welded pipe[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2023, 21(2): 24—27.

[23] 李旭, 王正勇, 吴晓红, 等. 一种改进非极大值抑制的 Canny 边缘检测算法[J]. 成都信息工程学院学报, 2011, 26(5): 564—569.
LI Xu, WANG Zheng-yong, WU Xiao-hong, et al. A Canny edge detection algorithm based on improved non-maximum suppression[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2011, 26(5): 564—569.

**责任编辑:田 静**