

基于混合滤波 Canny 算子的汽车涂胶边缘提取^①



王 谦, 霍昶宇, 贾军营, 杨海波, 徐 展

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110870)

通信作者: 霍昶宇, E-mail: huochangyu@smail.sut.edu.cn

摘 要: 针对汽车涂胶图像边缘提取过程中, 由于生产工厂环境复杂、光线不均匀而产生噪声、伪边缘干扰的问题, 提出一种改进 Canny 算子的汽车涂胶图像边缘提取算法. 首先, 算法采用多级中值有理混合滤波和导向滤波的级联滤波器对图像进行去噪和平滑, 在降噪的同时保留目标边缘信息; 其次应用改进 Sobel 算子卷积模板, 从水平、垂直、45°、135°这 4 个方向提取梯度向量, 提高边缘定位精度; 最后在边缘连接阶段, 采用改进的最大类间方差法 (Otsu) 选择高低阈值, 增加算法的自适应性. 实验结果表明, 在图像降噪方面, 与传统的中值滤波相比, 该算法保证降噪后的图像的峰值信噪比高于 35 dB, 结构相似度大于 0.9, 整体峰值信噪比提升了 6% 以上, 结构相似度提高 6.5% 以上; 在边缘提取方面, 能够很好地减少伪边缘的干扰, 边缘连接程度较高.

关键词: 汽车涂胶; Canny 算法; 多级中值有理混合滤波; 导向滤波; 边缘提取

引用格式: 王谦, 霍昶宇, 贾军营, 杨海波, 徐展. 基于混合滤波 Canny 算子的汽车涂胶边缘提取. 计算机系统应用, 2025, 34(3): 229-238. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9790.html>

Automotive Coating Edge Extraction Based on Hybrid Filtering Canny Operator

WANG Qian, HUO Chang-Yu, JIA Jun-Ying, YANG Hai-Bo, XU Zhan

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Aiming at noise and pseudo-edge interference in the edge extraction process of automobile coating images caused by the complex environment and uneven lighting in production plants, an edge extraction algorithm for automobile coating images with an improved Canny operator is proposed. Firstly, the algorithm adopts a cascade filter composed of a multi-level median rational hybrid filter and a guided filter to denoise and smooth the image, while retaining the target edge information during noise reduction. Secondly, the improved Sobel operator convolution template is applied to extract the gradient vectors from four directions of horizontal, vertical, 45°, and 135°, so as to improve edge localization accuracy. Finally, in the edge connection stage, the improved Otsu method (maximum interclass variance method) is used to select high and low thresholds, increasing the adaptability of the algorithm. Experimental results show that in terms of image denoising, compared with traditional median filtering, the algorithm ensures that the peak signal-to-noise ratio of the denoised image is higher than 35 dB, and the structural similarity is greater than 0.9. The overall peak signal-to-noise ratio increases by more than 6%, and the structural similarity is improved by more than 6.5%. In the aspect of edge extraction, it can effectively reduce the interference of the pseudo-edge and has a high degree of edge connectivity.

Key words: automotive coating; Canny algorithm; multistage median rational mixture filtering; guided filtering; edge extraction

① 基金项目: 2022 年度沈阳市科学技术计划“揭榜挂帅”产业共性技术项目 (22-316-1-07); 辽宁省应用基础研究项目 (2022JH2/101300243)

收稿时间: 2024-08-11; 修改时间: 2024-09-03; 采用时间: 2024-09-30; csa 在线出版时间: 2025-01-17

CNKI 网络首发时间: 2025-01-17

汽车生产中,涂覆聚氯乙烯(PVC)密封胶是关键工艺之一,用于保护车身边缘、防止腐蚀和底盘受到硬物撞击。PVC胶的功能主要包括焊缝防水、隔音、密封和隔热,在车身组装、玻璃、橡胶密封件和发动机零部件的粘接过程中得到广泛应用。其质量直接关系到车辆的密封性能和整体效果^[1]。涂胶作业依赖机械臂完成,机械臂根据预设参数对指定位置进行喷涂。当机械臂出现喷嘴堵塞、喷涂压力不稳定、喷涂速度不均匀等情况时,胶条可能出现断胶、胶条过宽过窄等缺陷,这些缺陷会导致涂覆区域密封性能下降、结构强度减弱,从而影响汽车的安全性和耐久性^[2]。因此对胶条检测的工作必不可少,提取胶条边缘是最直接有效的方法,通过分析边缘信息可以进一步研究胶条是否存在缺陷,以及出现何种缺陷。

随着机器视觉的发展,边缘检测技术也在不断发展。这些技术大致可分为两类:基于传统视觉方法和基于深度学习方法。传统机器视觉方法的优势在于速度快、对小样本数据鲁棒性较好等特点,适用于汽车胶条检测场景。传统视觉边缘检测算子包括一阶算子如 Sobel、Kirsch、Prewitt,以及二阶算子如 Laplacian、LOG、DOG^[3]。这些算子简单易实现、处理图像速度较快,但可能导致边缘点漏检和抗干扰能力差。为解决这些问题,一种最优边缘检测算子——Canny 算子被提出,该算子具有高信噪比、高精度和单边响应的特点^[4]。然而,传统 Canny 算法在汽车涂装胶条检测中仍有改进空间,如抗噪能力不足、梯度计算不全面、需要手动选取轮廓阈值等。因此,本文针对这些问题提出了改进的 Canny 边缘检测算法。

1 相关工作

近年来,许多学者对 Canny 算法提出改进方法。于新善等^[5]使用自适应中值滤波预处理,滤波器中则使用柯西分布函数的一阶导数作为边缘检测函数;Zhu 等^[6]提出自适应中值滤波和导向滤波对图像进行去噪和平滑;Zhang 等^[7]采用均值滤波和非局部均值去噪来代替高斯滤波器,有效去除图像中的噪声;Wang 等^[8]提出自适应选择滤波函数和窗口的高斯滤波,在求解梯度时,将传统 2×2 邻域替换而 3×2 或 2×3 邻域,通过增强中间像素的影响来提高边缘检测的精度;Yu 等^[9]利用形态学开闭运算的形态滤波器去除图像噪声并加强对图像边缘的保护,并增加 45° 和 135° 方向卷积模板,改

善图像边缘定位;Zhu 等^[10]使用自适应双边滤波来提高降噪能力,通过拉普拉斯锐化和直方图均衡实现边缘轮廓的锐化和对比度增强,但引入双边滤波器会导致整体计算开销变大,处理非平稳图像效果不佳。

2 传统 Canny 算法及分析

2.1 传统 Canny 算法步骤

Canny 边缘检测算法是一种经典的图像处理技术,用于检测图像中的边缘,其具有平滑性、低错误率和准确性等优点,被广泛应用于计算机视觉和图像处理领域。以下是 Canny 算法的主要步骤。

(1) 降噪:首先,使用高斯滤波器对图像进行平滑处理,以减少噪声的影响。

(2) 计算梯度:然后,使用一种梯度算子(通常是 Sobel 算子)来计算图像中每个像素点的梯度和方向。

(3) 非极大值抑制:在这一步中,算法会对图像中的梯度幅值进行检查,并在局部最大值处保留边缘像素,以尽可能减少边缘的宽度。

(4) 双阈值检测:接下来,通过设定两个阈值(高阈值和低阈值),将边缘像素分类为强边缘、弱边缘和非边缘。强边缘像素被认为是真正的边缘,而弱边缘像素则可能是噪声或弱边缘。非边缘像素则排除。

(5) 边缘跟踪和连接:最后,通过分析弱边缘像素与强边缘像素的连接关系,将弱边缘像素转换为强边缘像素,从而形成完整的边缘线。

2.2 传统 Canny 算法的不足

在汽车涂胶检测场景中,使用传统 Canny 算子面临多项挑战,需要进行详细分析和改进。首先,检测环境的照明条件通常较差,容易引入各种噪声、灰尘和阴影。这些因素不仅会降低图像的质量,而且还可能对算法的性能产生负面影响,导致识别过程中出现伪边缘或漏检现象^[11]。这一问题在实际应用中尤为突出,因为它直接关系到检测的可靠性和精度。其次,传统 Canny 算子在梯度计算时仅使用 2×2 的邻域大小,这限制了算法捕捉细微边缘信息的能力。由于这种处理方式,算子很难准确地定位边缘,尤其是在复杂或低对比度的图像场景中,边缘的识别往往不够精准,影响最终的检测准确度。此外,传统 Canny 算子在设置轮廓阈值时缺乏足够的自适应性,不能根据不同的检测场景和变化的光照条件进行自动调整。这一缺陷使得算子在实际应用中的通用性和灵活性受限。

3 改进的 Canny 算法

针对传统 Canny 算法在汽车胶条检测场景的不足, 本文提出改进的 Canny 算法, 首先使用多级中值有理混合滤波和导向滤波的级联滤波器对图像进行处理; 其次在获取梯度幅值和方向时, 使用四方向 Sobel 算子模板, 可以全面捕捉图像边缘信息; 最后通过改进的 Otsu 算法自适应获取双阈值, 完成边缘连接. 改进过后的算法流程图如图 1 所示.

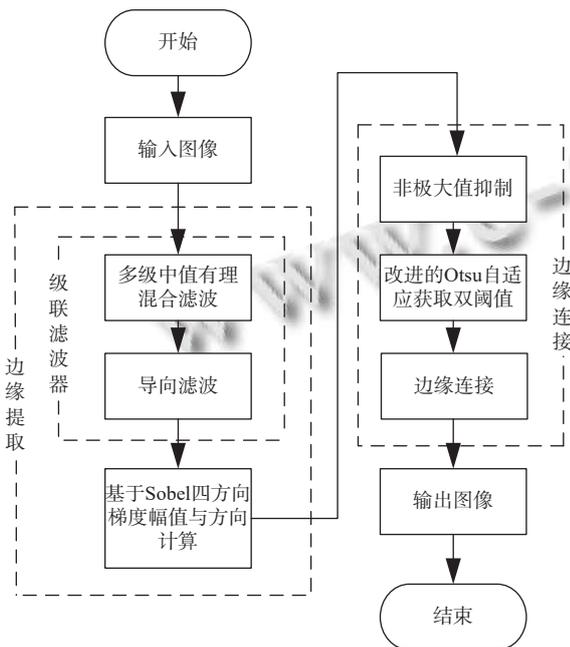


图 1 改进的 Canny 算法流程图

3.1 级联滤波器

为了提高边缘检测对椒盐噪声的抵抗能力, 并在噪声环境下实现更完整的边缘检测, 从而获得更丰富的图像边缘细节. 本文提出一种级联滤波器来替代高斯滤波器对图像进行去噪, 首先使用多级中值有理混合滤波来有效去除图像中的椒盐噪声, 并且可以一定程度上保留图像的清晰度^[12]; 再利用导向滤波对图像进行处理, 平滑图像的同时还能拥有保边效果.

3.1.1 多级中值有理混合滤波

传统中值滤波虽可以有效处理椒盐噪声, 但去除噪声的同时会让图像变得更加模糊, 损失边缘信息. 多级中值有理混合滤波在去除椒盐噪声的同时, 又可以保留图像清晰度. 本算法以 3×3 窗口滑动对整张图像进行滤波, 其基本逻辑如图 2 所示.

中心加权中值滤波 (center weighted median filter,

CWMF) 是指在加权中值滤波的基础上, 只对中心点进行加权, 再从加权后的窗口中取出中位值作为滤波后的值; 有理运算 (rational) 指对求出的 3 个窗口的中值 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 用式 (1) 进行有理运算, 公式中 h 和 k 是常数, 这里取 $h=2, k=0.001$.

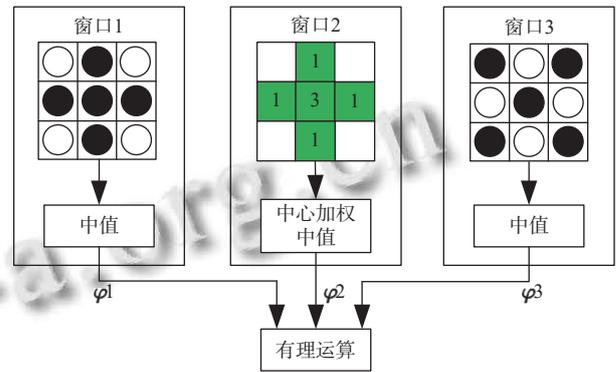


图 2 多级中值有理混合滤波

算法流程如下.

- (1) 求出窗口 1、3 中 5 个黑色标记的像素值的中位数 φ_1 、 φ_3 .
- (2) 求出窗口 2 中经过 CWMF 后的 5 个绿色标记的像素值的中位数 φ_2 .
- (3) 对以上求出的 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 用式 (1) 计算出一个新的值, 作为滤波后的值.

$$Rational = \varphi_2 + \frac{\varphi_1 - 2 \times \varphi_2 + \varphi_3}{h + k(\varphi_1 - \varphi_3)} \quad (1)$$

3.1.2 导向滤波

导向滤波是一种局部滤波技术, 利用线性模型计算窗口中的像素值^[13]. 导向滤波的特点在于利用引导图像来计算滤波输出, 这个引导图像可以是原始图像, 也可以是其他图像. 与同样具有保边特性的双边滤波相比, 导向滤波的保边性能更好, 并且具有快速和非近似线性时间算法. 导向滤波的过程如图 3 所示.

对于输入图像 p , 通过使用引导图像 I 进行滤波处理后, 可以得到输出图像 q . 这一过程基于的核心假设是: 在给定的局部窗口 ω_k 内, 引导图像 I 与输出图像 q 之间存在一种局部线性关系, 输出图像的值可以通过引导图像的值线性推算得出. 此假设是导向滤波技术能够有效工作的基础, 它允许算法在保持边缘清晰的同时, 有效地减少图像噪声, 其公式为:

$$q_i = a_k I_i + b_k \quad (2)$$

其中, $i \in \omega_k$, (a_k, b_k) 为假设中为常数的线性系数. 同时在窗口 ω_k 上, 为了求解 a_k 和 b_k , 需要建立一个约束, 假设 n_i 为窗口内不必要的噪声, 滤波后的图像 q 和输入图像 p 有如下关系:

$$q_i = p_i - n_i \quad (3)$$

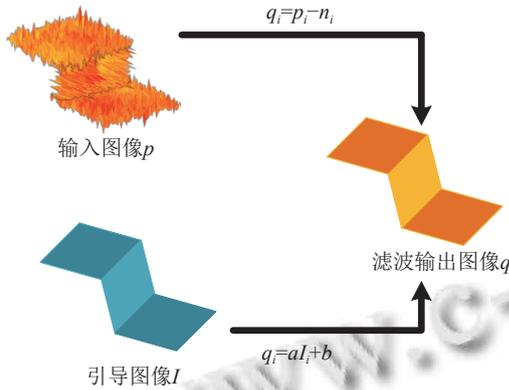


图3 导向滤波

结合式 (2) 和式 (3), 为了维护局部线性模型的完整性, 同时尽量减少滤波后输出图像 q 与原始输入图像 p 之间的差异, 以达到最大限度地减少滤波带来的信息损失. 采用最小二乘法进行数学表达:

$$\arg \min \sum_{i \in \omega_k} (q_i - p_i)^2 = \arg \min \sum_{i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k - p_i)^2 \quad (4)$$

这样问题转化为求解最值问题, 使用正则化参数 ξ 防止系数 a_k 过大, 得到损失函数:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \xi a_k^2) \quad (5)$$

式 (5) 构建了一个线性岭回归模型, 我们通过求解该模型以确定系数 a_k 和 b_k 的具体数值:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \xi} \quad (6)$$

$$b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k \quad (7)$$

其中, μ_k 和 σ_k^2 表示引导图像 I 在窗口 ω_k 中的均值和方差, $|\omega|$ 是窗口 ω_k 中像素的数量. 然而, 每个像素都被包含在多个窗口中, 都能计算出多个 (a_k, b_k) , 不同窗口在式 (2) 中的 q_i 值不同, 那么将多个 q_i 值求平均即可.

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k| i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i \quad (8)$$

至于导向滤波的保边性能, 当 $I \equiv p$ 时, 该算法就成为一个保边滤波器. 根据式 (6) 和式 (7), (a_k, b_k) 的计算公式变为:

$$a_k = \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \xi}, b_k = (1 - a_k) \mu_k \quad (9)$$

根据式 (9), 当 $\xi = 0$ 时, $a_k = 1, b_k = 0$, 此时滤波器无效. 当 $\xi > 0$ 时, 有如下两种情况.

情况 1: 平坦区域. 窗口内的区域相对平滑, 即局部方差 $\sigma_k^2 \ll \xi$, 因此 $a_k \approx 0, b_k \approx \mu_k$. 这种情况下, 导向滤波的效果类似于均值滤波, 旨在平滑图像中的噪声.

情况 2: 高方差区域. 高方差区域很可能是边缘区域, 即局部方差 $\sigma_k^2 \gg \xi$, 因此 $a_k \approx 1, b_k \approx 0$. 这表明滤波处理该区域时, 几乎保留了输入图像的原始梯度和边缘细节特征, 避免过度平滑导致的细节丢失^[14].

导向滤波的平滑与保边的权衡取决于参数 ξ , 方差较小区域的被平滑, 方差较大区域的被保留.

3.2 梯度幅值算子的改进

在常规的像素梯度计算过程中, 通常使用 2×2 的邻域进行一阶微分计算, 仅考虑水平和垂直两个方向的变化. 然而, 这种方法在捕捉图像中所有边缘信息方面存在局限性, 只能提取较为细小的边缘, 特别是对斜向方向的边缘检测效果不尽人意.

为了解决这些问题并全面提升边缘检测的准确性, 本文在传统 Sobel 算子水平和垂直两方向的基础上, 增加 45° 和 135° 方向两个斜向方向的 Sobel 梯度模板, 且计算的是 3×3 的邻域. 卷积模板的核心概念是计算图像中每个像素点的灰度值变化 (即梯度), 以检测图像的边缘. 算子通过对像素点周围的邻域进行加权求和来计算梯度, 这个求和的过程就是卷积运算. Sobel 梯度模板能够有效识别图像梯度方向和大小, 尤其在处理图像边缘时更为敏感. 通过将这两个新的方向融入传统的梯度计算方法中, 可以提高边缘检测的覆盖范围和准确性. 对应的四方向 Sobel 算子模板如图 4 所示, 4 个方向的计算如式 (10)–式 (13).

$$g_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times I(x, y) \quad (10)$$

$$g_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \times I(x, y) \quad (11)$$

$$g_{45^\circ} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \times I(x,y) \quad (12)$$

$$g_{135^\circ} = \begin{bmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \times I(x,y) \quad (13)$$

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

(a) 水平方向

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(b) 垂直方向

0	1	2
-1	0	1
-2	-1	0

(c) 45°方向

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2

(d) 135°方向

图4 四方向 Sobel 算子模板

图像分别对这4个方向的模板进行卷积,可以得到对应的梯度幅值 g_x 、 g_y 、 g_{45° 、 g_{135° 。则整体的梯度幅值为^[15]:

$$g(x,y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2 + g_{45^\circ}^2 + g_{135^\circ}^2} \quad (14)$$

梯度方向为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (15)$$

3.3 改进的 Otsu 算法获取双阈值

传统 Canny 算法需要人为设置高低阈值来完成边缘连接,这种方式会降低算法的自适应性和效率,因此需要分割图像的算法来自适应地获取阈值.一种最大类间方差法——Otsu 算法,被提出并广泛用于图像分割^[16]. Otsu 算法是将灰度图像,按照一个最合适的阈值 T ,把图像分割为目标和背景.但传统 Otsu 算法只考虑类间方差一个因素,忽略了目标和背景的内方差关系,且该算法要求图像的目标与背景像素灰度分布均匀,即基本符合正态分布.而现有的汽车涂胶图像,多拍摄于工厂内,背景偏暗,打光不均匀,传统的 Otsu 算法不太适用于此场景下的图像分割.传统的 Otsu 算法忽视了类内方差的信息,只注重类间方差.本文提出一种改进的 Otsu 算法,综合利用图像的边界特征与区

域特性,得到新的类间方差,并计算背景类和目标类的类内方差,将类间方差与类内方差的综合比值作为准则函数,求出让准则函数达到最大值的阈值 T ,即为所求阈值.

对于一幅灰度图像,其灰度等级为 $[0, L-1]$,图像中灰度值为 i 的像素个数记为 m_i ,设定一个阈值 T ,把图像分成两类: M_0 和 M_1 . 其中, M_0 类为背景(暗),对应的灰度值为 $[0, T-1]$; M_1 类为目标(亮),对应灰度值为 $[T, L-1]$.

图中的像素总数 m 为:

$$m = m_0 + m_1 + \dots + m_{L-1} \quad (16)$$

像素灰度级概率 p_i 为:

$$p_i = \frac{m_i}{m} \quad (17)$$

背景类和目标类的概率分别用 $P_0(T)$ 、 $P_1(T)$ 表示,这两个参数分别指示在阈值 T 下,图像中被划分为背景或目标的像素所占的比例.背景类和目标类的灰度均值分别由 $\mu_0(T)$ 、 $\mu_1(T)$ 表示,提供了一个全局的灰度参考.

背景类概率:

$$P_0(T) = \sum_{i=0}^{T-1} p_i \quad (18)$$

目标类概率:

$$P_1(T) = \sum_{i=T}^{L-1} p_i = 1 - P_0 \quad (19)$$

背景类灰度均值:

$$\mu_0(T) = \sum_{i=0}^{T-1} \frac{i p_i}{P_0} \quad (20)$$

目标类灰度均值:

$$\mu_1(T) = \sum_{i=T}^{L-1} \frac{i p_i}{P_1} \quad (21)$$

整图的灰度均值:

$$\mu(T) = P_0 \mu_0 + P_1 \mu_1 \quad (22)$$

一般而言,图像中不同对象内部灰度分布比较均匀,传统 Otsu 算法只注重灰度均值,而均方差又能衡量图像灰度的离散程度,因此均方差可以很好地反映边界灰度变换,本文增加了灰度均方差的计算.背景类与目标类的灰度均方差分别为 $\gamma_0(T)$ 、 $\gamma_1(T)$:

$$\gamma_0(T) = \frac{\sum_{i=0}^{T-1} (i - \mu)^2 p_i}{P_0} \quad (23)$$

$$\gamma_1(T) = \frac{\sum_{i=T}^{L-1} (i-\mu)^2 p_i}{P_1} \quad (24)$$

整图的灰度均方差:

$$\gamma(T) = P_0\gamma_0 + P_1\gamma_1 \quad (25)$$

将灰度均值和灰度均方差作为衡量参数,以 α 和 β 作为权重其进行调整,其中 $\alpha+\beta=1$,综合利用图像的边界特征,得到改进的类间方差 $\sigma_{\text{total}}^2(T)$,用来衡量两类像素灰度与图像总体像素灰度之间的差异度。

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{total}}^2(T) &= \alpha[P_0(\mu_0 - \mu)^2 + P_1(\mu_1 - \mu)^2] \\ &\quad + \beta[P_0(\gamma_0 - \gamma)^2 + P_1(\gamma_1 - \gamma)^2] \\ &= P_0P_1[\alpha(\mu_0 - \mu_1)^2 + \beta(\gamma_0 - \gamma_1)^2] \end{aligned} \quad (26)$$

此外,本文增加类内方差 $\sigma_0^2(T)$ 、 $\sigma_1^2(T)$ 来衡量每个类别内部像素灰度的一致性 or 离散程度,这些值反映了各自类别内部像素灰度的聚合程度。最后,背景类与目标类的概率比值用 η 表示。

背景类的类内方差:

$$\sigma_0^2(T) = \sum_{i=0}^{T-1} \frac{(i-\mu_0)^2 p_i}{P_0} \quad (27)$$

目标类的类内方差:

$$\sigma_1^2(T) = \sum_{i=T}^{L-1} \frac{(i-\mu_1)^2 p_i}{P_1} \quad (28)$$

背景类与目标类的概率之比:

$$\eta = \frac{P_0}{P_1} \quad (29)$$

通过式(26)–式(29),得到改进的类间方差 $\sigma_{\text{total}}^2(T)$ 、两类各自的类内方差与概率乘积之和 $P_0\sigma_0^2 + P_1\sigma_1^2$,求两者之比并乘上背景类与目标类的概率比 η ,得到最终的准则函数如下:

$$\begin{aligned} \delta^2(T) &= \frac{P_0P_1[\alpha(\mu_0 - \mu_1)^2 + \beta(\gamma_0 - \gamma_1)^2]\eta}{P_0\sigma_0^2 + P_1\sigma_1^2} \\ &\rightarrow \frac{P_0^2[\alpha(\mu_0 - \mu_1)^2 + \beta(\gamma_0 - \gamma_1)^2]}{P_0\sigma_0^2 + P_1\sigma_1^2} \\ &\rightarrow \frac{P_0(T)[\alpha(\mu_0(T) - \mu_1(T))^2 + \beta(\gamma_0(T) - \gamma_1(T))^2]}{P_0(T)[\sigma_0(T)]^2 + P_1(T)[\sigma_1(T)]^2} \end{aligned} \quad (30)$$

将上述准则函数带入 η 的值,并化简,把 T 作为自变量,从 $[1, L-1]$ 之间遍历,求出使得上述函数达到最大值时的 T ,也即求 $\max \delta^2(T)$ 时的 T^* 值,此时的 T^* 便是最优阈值。本文将 Canny 算法内的高阈值 T_H 设置为 $1.5T^*$,低阈值 T_L 设置为 $0.65T^*$ 。

4 实验结果及分析

为了验证改进的 Canny 算法在汽车胶条图像边缘提取方面的效果,本文设置了图像降噪实验、汽车胶条边缘提取实验和消融实验。实验是在汽车涂胶图像数据集上完成的。汽车涂胶图像数据集是汽车涂胶工厂采集到的真实图像,包含侧面、后左和后右 3 个方向,每个方向包含 110 张高分辨率图像,共计 330 张。在图像降噪实验中,本文对添加了噪声的汽车涂胶图像进行滤波处理,从而验证算法的可行性。在汽车胶条边缘提取实验中,本文对汽车的 3 个角度图像进行多种边缘提取算法对比,更直观了解本文算法的性能。算法采用 C++ 编写,软件平台为 Visual Studio 2019,使用 OpenCV 4.6.0 实现。

4.1 图像降噪实验

在昏暗的汽车涂胶车间中,由于光照不充足、传感器过热、电子信号干扰或静电放电等原因,会产生一定的噪声。为了验证本文级联滤波器中的多级中值有理混合滤波处理椒盐噪声的有效性,在汽车涂胶图像数据集上进行实验,依次对数据集中图像添加浓度为 10%、15%、20%、30% 的椒盐噪声,将这些图像分别使用高斯滤波器、中值滤波、多级中值有理混合滤波进行降噪,并做出对比,对比图如图 5 所示。图中可以看出,高斯滤波只是简单地平滑噪声,并不能很好的去除噪声;中值滤波虽然能去除噪声,但随着椒盐噪声密度的增加,图像整体会变得模糊;最后本文的多级中值有理混合滤波,在去除噪声的同时,也能一定程度保留图像的清晰度。

此外,为了更加客观展现上述滤波器效果,本文使用以下 4 项评价指标对滤波后的图像进行评估,在各个浓度噪声数据集中取所有图像的评价指标均值,将详细对比结果汇总到表 1 和表 2 中。4 项评价指标如下。

① 信噪比 (SNR)。SNR 表示信号与噪声之间的比例关系,SNR 越大表示信号越强,图像质量越高。

② 峰值信噪比 (PSNR)。PSNR 是信噪比的一种,通常用来衡量图像的失真程度,PSNR 越高,图像清晰度越好。

③ 均方误差 (MSE)。MSE 是衡量两个数据之间差异程度的指标,MSE 取值范围为 0 到正无穷,MSE 越小,表示图像更接近原图。

④ 结构相似度 (SSIM). SSIM 是一种全参考图像质量评价指标, 广泛用于衡量两幅图像之间的视觉相

似性, 其取值范围是[-1, 1], SSIM 数值越接近 1 表示两幅图像越相似.

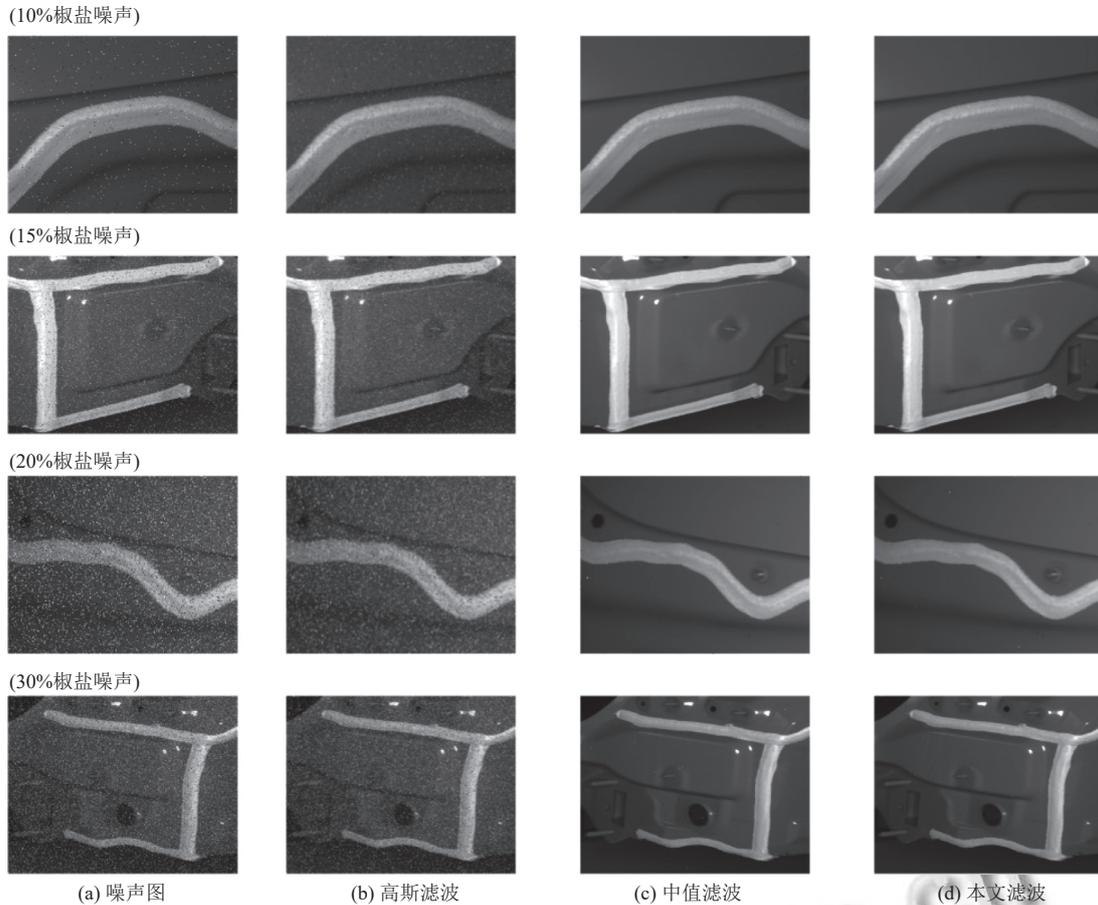


图5 降噪实验对比结果

表1 10%浓度和15%浓度噪声图像滤波后的各项指标数据

指标	10%椒盐噪声			15%椒盐噪声		
	高斯滤波	中值滤波	本文方法	高斯滤波	中值滤波	本文方法
SNR (dB)	11.221	11.927	15.470	8.346	11.681	16.032
PSNR (dB)	35.287	36.992	39.535	32.648	36.070	40.427
MSE	19.250	16.363	7.237	35.339	16.073	5.894
SSIM	0.805	0.820	0.919	0.619	0.850	0.961

表2 20%浓度和30%浓度噪声图像滤波后的各项指标数据

指标	20%椒盐噪声			30%椒盐噪声		
	高斯滤波	中值滤波	本文方法	高斯滤波	中值滤波	本文方法
SNR (dB)	7.155	13.652	17.200	4.250	9.614	11.857
PSNR (dB)	31.225	37.720	41.268	28.341	33.713	35.973
MSE	49.047	10.993	4.856	95.275	27.654	16.437
SSIM	0.469	0.896	0.954	0.398	0.763	0.907

由表1和表2可知, 这些添加了椒盐噪声的汽车涂胶图像, 随着噪声浓度增高至15%时, 算法的效果

最好, 当噪声浓度进一步增加时, 去噪效果会逐渐降低. 本文算法对比传统中值滤波, SNR 指标均值增长了23.3%–37.2%, PSNR 指标均值增长了6%–12.1%, MSE 指标均值降低了40.6%–63.3%, SSIM 指标均值增长了6.5%–18.9%. 验证了本文算法在去除椒盐噪声的同时, 能够保留较多图像原本信息.

4.2 边缘提取实验

为了验证本文改进的 Canny 算法在汽车涂胶图像边缘提取方面的优越性, 本文选取汽车涂胶图像数据集的侧面、后左和后右3个方向图像来进行验证, 分为 Cam1、Cam2 和 Cam3 这3个类别, 共计330张图. 本文与传统的 Canny 算法、基于双边滤波的 Canny 算法、文献[12]算法进行对比, 从两个方面开展边缘提取实验: 其一是进行直观的边缘检测, 结果如图6、图7所示, 再选取 Cam2 类图像中的汽车涂胶图像, 选取一

个具有代表性的胶条区域对其边缘提取和放大, 进行深入分析比较, 具体如图 8 所示. 其二, 为了客观评价

深算法的边缘检测结果, 本文使用林卉等^[17]提出的评价准则对检测结果进行分析, 具体结果数据见表 3.

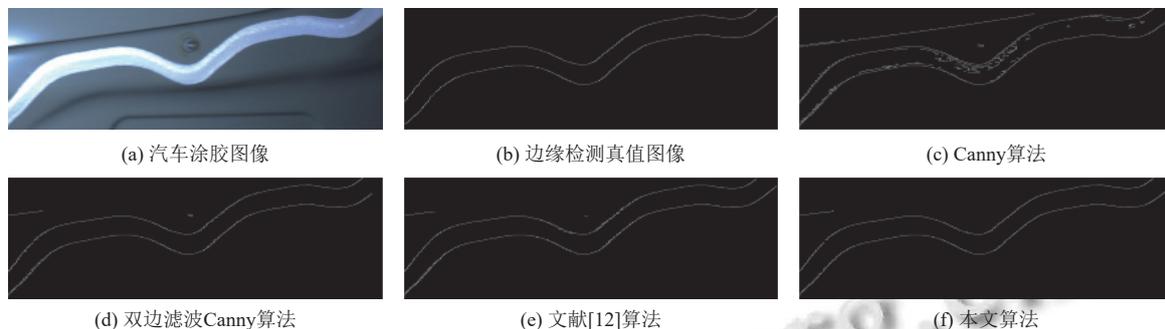


图 6 Cam1 边缘检测结果图

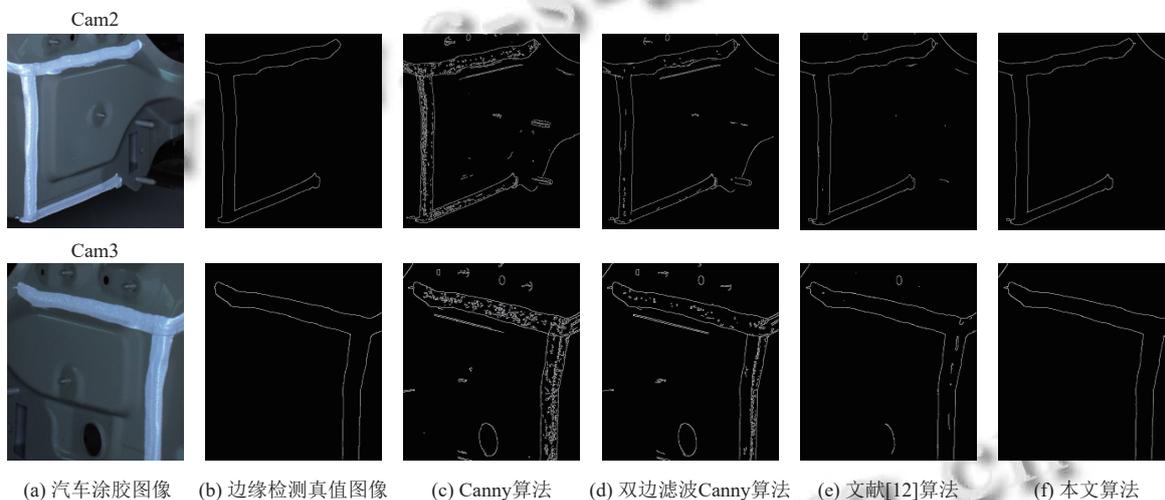


图 7 Cam2 和 Cam3 边缘检测结果

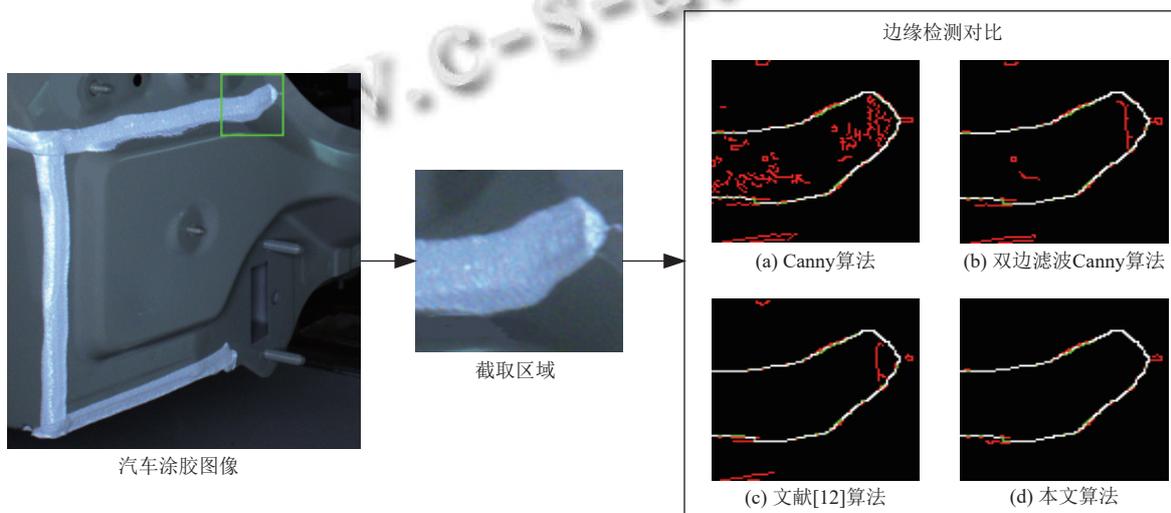


图 8 区域放大边缘检测对比结果

表3 边缘检测结果数据对比

类型	算法	C/A	C/B
Cam1	Canny算法	0.0738	0.3408
	双边Canny	0.0516	0.3143
	文献[12]	0.0289	0.2785
	本文算法	0.0241	0.2701
Cam2	Canny算法	0.0695	0.2994
	双边Canny	0.0574	0.2913
	文献[12]	0.0370	0.2745
	本文算法	0.0293	0.2691
Cam3	Canny算法	0.0726	0.3088
	双边Canny	0.0487	0.2850
	文献[12]	0.0278	0.2637
	本文算法	0.0232	0.2614

由于边缘图像是二值图像,像素值只有0或1,边缘点也即图像中像素值为1的点。对于一个像素集合,若集合内每个像素与其他像素连通,那么就称该集合为一个连通成分。该评价方法中,边缘点总数记为(A),边缘点的4邻域内连通成分数记为(B),边缘点的8邻域内连通成分数记为(C)。连通成分示意图如图9所示。

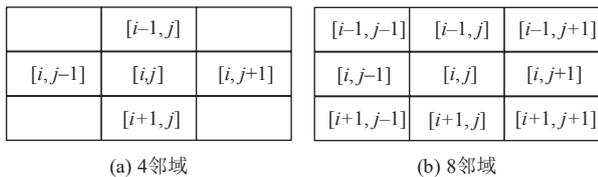


图9 连通成分示意图

当求出边缘图中的边缘点总数A、4邻域连通成分数B、8邻域连通成分数C后,考虑一种假设:边缘图中所有像素灰度值全为1,那么也即边缘点布满整图,此时的B和C均为1,比值C/A、C/B最小。因此得证在一般的边缘检测图中,比值C/A、C/B越小,其边缘线型连接程度越好,本文将比值C/A、C/B作为边缘检测的评价指标。其中C/A的数值越小,代表边缘提取图像中冗余的边缘点数越少,这就表明边缘连接程度高。C/B的数值越小,代表单边缘响应越好。

为了更深入地分析各个边缘提取算法的细节处理能力,在图7的Cam2汽车涂胶图像基础上,选择一个具有代表性的涂胶区域进行截取。然后,使用各个边缘检测算法处理该区域,得到对应的处理结果。在图8的边缘检测对比图中,白色边缘表示算法提取的真正边缘;红色边缘代表算法提取出的非真正边缘;绿色边缘代表真正边缘中未被算法提取出的部分。通过区域放大的边缘检测对比图进行分析,本文算法在处理边缘

检测细节方面占优势,在去除伪边缘的同时,能够较好地响应真实边缘。

图6和图7展示了4种不同算法在汽车涂胶图像数据集边缘提取上的检测结果:传统Canny算法、双边滤波Canny算法、文献[12]中提出的算法,以及本文所提出的改进算法。表3展示的是汽车涂胶图像数据集中, Cam1、Cam2、Cam3这3类汽车涂胶图像边缘检测结果的边缘评价价值C/A和C/B。通过对比分析,传统Canny算法虽然在响应边缘的数量上最多,但同时也产生了大量的伪边缘,导致其检测效果不甚理想。双边滤波Canny算法对图像进行了一定程度的平滑处理,减少了部分噪声,但在边缘检测准确性上仍有不足,伪边缘依然存在。与之相比,本文提出的算法和文献[12]中的算法表现出更为优越的性能。本文的算法,在平滑图像的同时,有效地保留了更多真实的边缘信息,并且具有更强的真实边缘响应能力,这一点在实验数据中得到验证。根据表3的数据,本文算法的边缘评价价值C/A和C/B均小于其他算法,边缘连接程度和单边响应程度较高。

5 消融实验

为进一步验证本文改进Canny算法在汽车涂胶图像边缘检测方面的效果,在汽车涂胶图像数据集上进行消融实验。消融实验围绕多级中值有理混合滤波和导向滤波的级联滤波器、改进Sobel算子模板、改进Otsu算法这3个模块,将逐步添加这些模块的Canny算法记为算法模块1、算法模块2、算法模块3(本文算法),对比基准为传统的Canny结合Otsu算法,具体如表4所示。消融实验使用的是汽车涂胶图像数据集中Cam1、Cam2、Cam3所有的图像,并以实验结果的边缘评价价值C/A和C/B作为评估指标。

表4 不同算法模块的消融实验结果

算法	级联滤波器	改进Sobel	改进Otsu	C/A	C/B
Canny+Otsu	—	—	—	0.0681	0.3284
算法模块1	√	—	—	0.0447	0.2830
算法模块2	√	√	—	0.0482	0.2913
算法模块3	√	√	√	0.0225	0.2597

在算法模块1中,增加级联滤波器后,能够显著提高算法的边缘响应能力;在算法模块2中,增加改进的四方向Sobel算子模板,算法获取边缘信息的能力得到提升,但相应地会增加伪边缘的产生,因而导致C/A

和 C/B 略微回升; 在算法模块 3 中, 增加改进 Otsu 算法, 提升算法自适应性并选取到最优的高低阈值, 此时算法的 C/A 和 C/B 值最低, 算法效果最好。

6 结论与展望

针对传统 Canny 算法在汽车胶条边缘提取过程中容易受到噪声干扰和产生伪边缘的问题, 本文提出一种改进的 Canny 算法。此改进算法引入了一个创新的级联滤波器, 结合了多级中值有理混合滤波和导向滤波, 旨在有效去除噪声的同时保持图像边缘的完整性。以及算法采用了改进的四方向 Sobel 卷积模板, 可以更全面地捕捉图像的梯度信息。进一步地, 本文算法还采用了改进的 Otsu 算法进行阈值的自适应选择, 这一改进使得算法在不同的图像条件下都能自动调整最佳的分割阈值, 极大提高了算法的适用性和灵活性。通过这些创新, 改进后的算法不仅在去噪方面表现出色, 而且能够显著提高图像的清晰度和边缘检测的精确度, 有效减少了伪边缘的产生, 从而实现对汽车胶条边缘的精准提取。因此, 本文提出的算法不仅能作为同类边缘检测算法的有效替代, 其改进思想具有一定的应用潜力, 适用于需要高准确性和可靠性的工业视觉检测系统, 可为机器视觉领域的相关研究提供参考和启示。

参考文献

- 1 朱立忠, 李肖静, 李文欣. 基于 Faster-RCNN 的汽车涂胶缺陷检测. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(3): 29–34.
- 2 王爽, 赵时璐, 张震, 等. 基于机器视觉的汽车轮罩 PVC 涂胶检测技术研究. 机械设计与制造, 2021(5): 184–188.
- 3 窦蕾萍, 吴君钦. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测. 软件导刊, 2023, 22(8): 216–220.
- 4 Tao NN. Enhanced canny algorithm for image edge detection in print quality assessment. Traitement du Signal, 2023, 40(3): 1281–1287. [doi: 10.18280/ts.400347]
- 5 于新善, 孟祥印, 金腾飞, 等. 基于改进 Canny 算法的物体边缘检测算法. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 2212002.
- 6 Zhu XY, Tang MN, Zhang KY, *et al.* Image detection method based on improved Canny algorithm. Proceedings of the 40th Chinese Control Conference. Shanghai: IEEE, 2021. 7033–7039.
- 7 Zhang CL, Li TH, Li JY. Detection of impurity rate of machine-picked cotton based on improved canny operator. Electronics, 2022, 11(7): 974. [doi: 10.3390/electronics11070974]
- 8 Wang Q, Chen WX, Peng HY. An intelligent image detection method using improved canny edge detection operator. International Journal of Information Technology and Management, 2022, 21(4): 369–381. [doi: 10.1504/IJITM.2022.126703]
- 9 Yu XK, Wang ZW, Wang YH, *et al.* Edge detection of agricultural products based on morphologically improved canny algorithm. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 6664970.
- 10 Zhu DR, Li JG, Wang FB, *et al.* A method for extracting contours of building facade hollowing defects using polarization thermal images based on improved canny algorithm. Buildings, 2023, 13(10): 2563. [doi: 10.3390/buildings13102563]
- 11 杨翊麟. 局部自适应阈值法改进 Canny 算子的图像边缘提取. 信息与电脑, 2023, 35(14): 78–80.
- 12 杨君, 郭佑民, 王建鑫, 等. 基于改进 Canny 算法的受电弓碳滑板边缘检测方法. 机车电传动, 2023(4): 90–97.
- 13 Lu ZW, Long BY, Li K, *et al.* Effective guided image filtering for contrast enhancement. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(10): 1585–1589. [doi: 10.1109/LSP.2018.2867896]
- 14 刘丽霞, 李宝文, 王阳萍, 等. 改进 Canny 边缘检测的遥感影像分割. 计算机工程与应用, 2019, 55(12): 54–58, 180.
- 15 杜春洋, 郭俊杰, 李昌非. 基于改进 Canny 算子的焊缝图像边缘提取研究. 激光杂志, 2023, 44(4): 74–79.
- 16 Wang YM, Lu MY, Feng PF. Research on road extraction algorithm based on improved Otsu's thresholding method. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2364: 012064. [doi: 10.1088/1742-6596/2364/1/012064]
- 17 林卉, 赵长胜, 舒宁. 基于 Canny 算子的边缘检测及评价. 黑龙江工程学院学报, 2003, 17(2): 3–6, 16. [doi: 10.3969/j.issn.1671-4679.2003.02.001]

(校对责编: 张重毅)