

基于改进 Canny 算法的滑块边缘检测研究

熊金华¹ 于 慧¹ 李 斐¹ 白 瑀¹
XIONG Jinhua YU Hui LI Fei BAI Yu

摘 要

针对 Canny 算子提取粉末冶金滑块边缘时存在伪边缘、边缘缺失以及定位精度低的问题,提出了一种改进 Canny 的边缘检测算法。首先,提出基于边缘感知的改进方差加权引导滤波代替高斯滤波,保护边缘信息并提高了算法的抗噪性能;其次应用 Scharr 算子并额外计算图像 45° 和 135° 方向的梯度幅值,提高边缘定位准确性;最后提出改进的迭代式 Otus 算法,并使用 Hough 变换结合总体最小二乘法提取滑块特征,提高特征定位精度;实验表明,改进滤波算法相比于引导滤波,信噪比提升了 9.03%,结构相似性提升了 28.13%,同时改进 Canny 算法提取了更完整的滑块边缘,尺寸测量最小误差为 0.01 mm,最大误差为 0.16 mm,满足滑块尺寸测量的精度要求。

关键词

Canny 算子; 引导滤波; 阈值分割; 边缘检测; 尺寸测量

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.041

0 引言

滑块是滚动直线导轨副的重要组成部分,对导轨系统的运动平稳性有很大影响,为检验滑块是否满足使用要求,需要对滑块提出高效的质量检测方法,其中,基于机器视觉的边缘检测技术具有速度快、精度高和自动化程度高等优点,在工业领域应用广泛。通过图像处理技术^[1]准确地获取滑块边缘信息在尺寸测量、图像识别等领域发挥着重要作用^[2-3]。

常用的边缘检测算子有 Roberts、Sobel、Log、Laplacian、Canny 算子等^[4],其中 Canny 算子因检测效果好、抗干扰性强等优点,在各个行业应用广泛^[5]。针对 Canny 算子在实际应用中存在的问题,许多学者对 Canny 算子进行了改进:文献[6]使用柯西分布的一阶导数作为边缘检测函数来设计滤波器,提出一种基于二维柯西分布的 Canny-like 边缘检测算法,但该算法易受椒盐噪声干扰。文献[7]使用加权引导滤波的 Canny 算法进行光照估计,令算法具有更强的边缘保持特性,但降噪效果有待提升。文献[8]将阈值细分为全局阈值和局部阈值,对边缘类型进行了更细致的划分,从亮度变化的图像中提取到更平滑、连续的边缘。

针对 Canny 算法处理过程中出现边缘定位精度不足、阈值选取以及噪声、伪边缘干扰问题,本文提出了一种改进

Canny 边缘提取算法,提升图像降噪效果并保证边缘的定位精度,增加算法的自适应性,为后续精确测量边缘数据奠定基础。

1 改进 Canny 算法提取滑块边缘

1.1 改进 Canny 算法流程

针对传统 Canny 提取边缘时存在的不足,本文提出基于边缘感知的改进方差决策引导滤波算法,用来替代高斯滤波进行滤波降噪;其次使用四方向 Scharr 算子获取更丰富的图像梯度信息;对梯度图像非极大值抑制处理后,提出一种局部迭代的 Otus 算法自适应获取最佳分割阈值;最后结合霍夫变换和总体最小二乘法(TLS)提取滑块的直线特征,提高特征定位精度。改进 Canny 算法流程如图 1 所示。

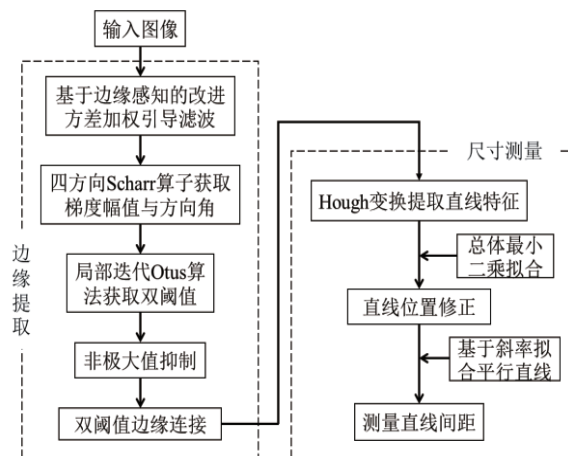


图 1 改进 Canny 算法流程图

1. 西安工业大学机电工程学院 陕西西安 710000

[基金项目] 复杂型面粉粉末冶金零件形位误差控制与应用研究(K20230019)

1.2 改进 Canny 算法原理

1.2.1 基于边缘感知的改进方差加权引导滤波

在引导滤波的基础上, 本文引入了边缘感知函数和方差加权策略, 提高了算法的保边性能, 同时改进方差计算方法, 改善噪声残留问题, 进一步提高算法的稳定性和性能。

基于边缘感知的引导滤波是为提升保边性能引入了权重感知因子 w , 其表达式为:

$$Q = f_{\text{GF}}(P, G, r, \frac{\varepsilon}{w}) \quad (1)$$

式中: P 、 Q 、 G 分别为输入、输出和引导图像; r 为滤波窗口半径; ε 为正归化参数, 与 w 共同决定滤波平滑度。

假设图像在以像素 k 为中心的方形滤波窗口 w_k 内, 滤波输出图像 Q 与引导图像 G 呈一种线性变换关系, 表示为:

$$Q_i = a_k G_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (2)$$

式中: a_k 、 b_k 为窗口 w_k 的线性系数; i 为窗口内的索引; Q_i 为输出图像像素值。

为求取线性系数的最优解, 使得输出图像 Q 与输入图像 P 之间的差异最小, 定义一个代价函数 $E(a_k, b_k)$, 表示为:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k G_i + b_k - P_i)^2 + \frac{\varepsilon}{w} a_k^2) \quad (3)$$

通过最小二乘法可以得到窗口中性线性系数值为:

$$\begin{cases} a_k = \text{cov}_k(P, G) / (\sigma_k^2 + \varepsilon/w) \\ b_k = \bar{P}_k - a_k \bar{G}_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\bar{P}_k$ 、 $\bar{G}_k$ 分别为输入图像、引导图像在 w_k 内的均值; $w = \sigma_k^2 / \sigma^2$ 是窗口 w_k 内的局部方差 σ_k^2 与图像全局方差 σ^2 的比值, w 的值越大, 表明该点是边缘点的概率越高, 此时平滑力度 ε/w 较小, 边缘受到保护。

文献 [9] 所提出的 VWGF 算法为改善图像的光晕效应提出了以局部方差作指数映射并对各窗口分配聚合权重, 其表达式为:

$$e_k = \exp\left(-\frac{\sigma_k^2}{\lambda}\right) \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{k \in w_i} e_k (a_k G_i + b_k) / \sum_{k \in w_i} e_k \quad (6)$$

式中: λ 为小于 1 的正常数; e_k 为窗口聚合权重。

VWGF 算法不仅具有优良的保边性能, 而且对高斯噪声的滤除效果好, 但对椒盐噪声比较敏感, 引入的边缘感知权重会降低边缘附近的平滑效果, 从而导致边缘附近出现噪声残留。针对这一问题, VWGF 算法采用图像融合的方法进行处理, 但该方法依赖于根据权重图区分出边缘点和非边缘点, 否则无法达到理想的检测效果, 具有局限性。

为了解决图像噪声残留问题, 本文对 σ_k^2 的计算方法

进行改进: 设滤波窗口 w_k 的半径为 r , 首先对窗口内的所有点按像素值大小排序, 然后剔除其中 r 个最小值和 r 个最大值, 最后使用剩余点计算局部方差, 即可大幅降低椒盐噪声的干扰。具体计算过程使用 MATLAB 语言描述, 如方法 1 所示。

方法 1: 改进的方差计算策略

输入: 窗口 w_k 的中心像素 k 的坐标 (i, j) , 引导图像 P 。

输出: 引导图像局部方差 σ_k^2 。

$$(1) A_0 = P(i-r:i+r, j-r:j+r); \quad (7)$$

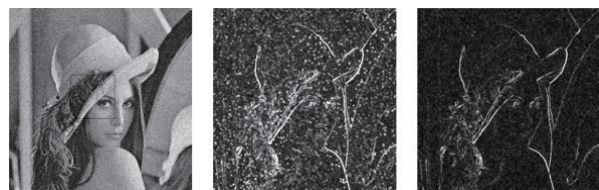
$$(2) A_1 = \text{sort}(A_0(:)); \quad (8)$$

$$(3) A_2 = A_1(1+r:(r+1)^2-r); \quad (9)$$

$$(4) \sigma_k^2 = \text{var}(A_2)。 \quad (10)$$

式中: sort 表示所有元素从小到大排序; var 表示求方差。

为验证本文改进方差计算策略的效果, 输入一幅经典 Lena 图像, 为其添加标准差为 0.01 的高斯噪声和椒盐噪声, 滤波窗口半径设置为 2, 分别使用改进方差后的滤波算法与 VWGF 算法对该图像进行处理, 对比结果如图 2 所示。



(a) 待处理图像 (b) VWGF 权重图 (c) 新感知权重图



(d) VWGF (e) 改进方差的 VWGF

图 2 方差改进前后的感知权重及其效果图

由图 2 可知, VWGF 权重感知函数将大量椒盐噪声误判为边缘点, 改进方差后的感知函数能有效地避免椒盐噪声带来的干扰, 准确感知边缘信息, 权重图中的像素值越大代表该点为边缘点的概率越大。对比图 2 (d) 和 (e), 改进方差的 VWGF 能更有效地过滤图像中的椒盐噪声, 提高算法的降噪性能和稳定性。

1.2.2 改进 Scharr 梯度算法

Scharr 算子基于 Sobel 算子进行了优化, 通过扩大模板权重系数, 能检测出更丰富的图像细节特征, 本文在 Scharr 算子从水平、垂直 2 个方向提取梯度信息的基础上增加 45°、135° 方向的梯度计算, 滤波图像与图 3 所示的 Scharr 模板进行卷积, 得到滑块梯度信息。

-3	0	3	-3	-10	-3	-10	-3	0	0	-3	-10
-10	0	10	0	0	0	-3	0	3	3	0	-3
-3	0	3	3	10	3	0	3	10	10	3	0

(a) x 方向 (b) y 方向 (c) 45° 方向 (d) 135° 方向

图3 Scharr 算子卷积模板

假设图像中以任意像素点 o 为中心的 3×3 窗口记为 R , 则点 o 的梯度计算方法为:

$$\begin{cases} E_i = D_i \otimes R \\ C = \max(E_i) \end{cases} (0 \leq i \leq 3) \quad (11)$$

式中: D_i 为第 i 个梯度模板; $\otimes$ 代表卷积操作; E_i 为第 i 个方向上的梯度值。点 o 最终梯度值为 C ; 梯度方向为 E_o 所对应的模板方向 i 。

1.2.3 局部迭代 Otus 阈值分割算法

滑块图像的边缘像素点占整幅图像的比例较小, 非边缘区域占绝大部分, 传统 Otus 阈值分割易引入噪声和伪边缘, 针对此问题, 本文提出一种基于局部阈值分割的 Otus 迭代算法, 以提高算法滤除伪边缘和噪声的能力。

设图像灰度范围为 $\{0, 1, \dots, l-1, l\}$, 灰度值为 i 的像素点数目为 n_i , 灰度值 i 对应的像素数目占整幅图像的比例 p_i , 图像灰度均值为 μ , 经过阈值 T 分割后所有像素点被分为目标和背景两类: 目标占整幅图像的比例记为 S_0 , 灰度均值记为 μ_0 ; 背景占整幅图像的比例记为 S_1 , 灰度均值记为 μ_1 。则阈值 T 对应的类间方差为:

$$\sigma^2 = S_0(\mu_0 - \mu)^2 + S_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (12)$$

阈值 T 遍历图像的整个灰度范围, 当 σ^2 取最大值时对应的阈值 T 作为全局分割阈值。

对于只有目标和背景组成的图像, 其灰度直方图可视为背景和背景像素灰度混合分布的概率密度函数, 且通常将混合分布的两个分量 $P(i|0)$ 与 $P(i|1)$ 视为正态分布^[10], 表示为:

$$\begin{cases} \sigma_0 = \left(\sum_{i=0}^T (i - \mu_0)^2 p_i / \sum_{i=0}^T p_i \right)^{1/2} \\ \sigma_1 = \left(\sum_{i=T+1}^l (i - \mu_1)^2 p_i / \sum_{i=T+1}^l p_i \right)^{1/2} \end{cases} \quad (13)$$

式中: μ_0 、 μ_1 、 σ_0 、 σ_1 分别为两个分量的均值和标准差。

当图像中的背景与目标能够显著区分时, 公式为:

$$\mu_0 - \mu_1 > k(\sigma_0 + \sigma_1) \quad (14)$$

式中: k 根据图像的灰度值分布情况取值, 一般取 2~3 为宜。

基于上述原理, 本文提出的局部迭代式 Otus 算法流程图如图4所示。

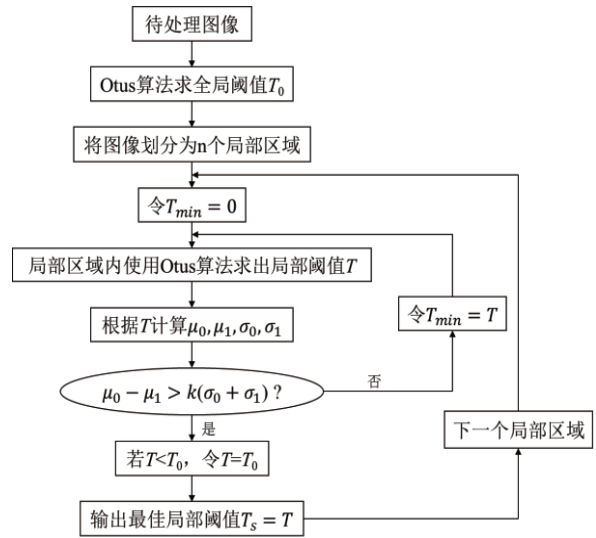


图4 局部迭代 Otus 算法流程图

1.2.4 提取直线特征

Hough 变换^[11]将二维 x - y 平面中的每个点映射为 ρ - θ 参数空间中的一条正弦曲线, 而 x - y 平面中共线的点在 ρ - θ 参数空间画出的曲线是相交于一点的, 即二维空间的共线性对应于参数空间的共点性。Hough 变换基于以上原理对参数空间进行网格划分, 但提取边缘特征的准确性受到参数空间中划分网格的精度影响, 在高分辨率图像会中引入较大误差, 因此本文采用 Hough 变换初步提取图像中的直线特征, 再分别统计到每条直线小于 3 个像素距离的所有像素点, 最后使用总体最小二乘法 (TLS) 拟合修正直线位置, 滑块直线特征拟合过程如图5所示。

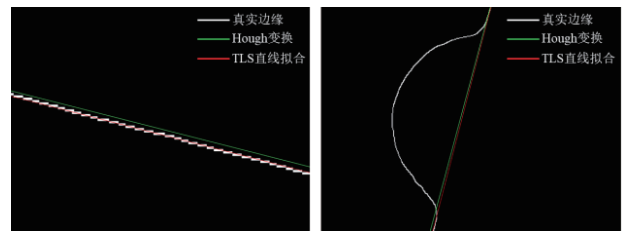


图5 滑块直线特征提取结果

Hough 变换的直线拟合精度受限于参数空间的网格划分精度, 无法取得最佳的斜率参数, 拟合误差随着直线的延伸越来越大, 而使用 TLS 再次拟合后直线位置得以修正, 对真实边缘的拟合效果更佳。

2 实验结果与分析

2.1 滤波实验结果

本文在背光照明的环境下, 使用维视 MV-1400UC 工业相机采集粉末冶金滑块图像, 图像分辨率为 $4384 \text{ px} \times 3288 \text{ px}$ 。为验证本文改进引导滤波算法的有效性, 使用 Matlab2023a 软件进行图像处理, 首先给滑块灰度图像添加标准差为 0.01

的高斯噪声和椒盐噪声，对图像进行不同的滤波降噪并评价算法的降噪性能，检测效果如图 6 所示。

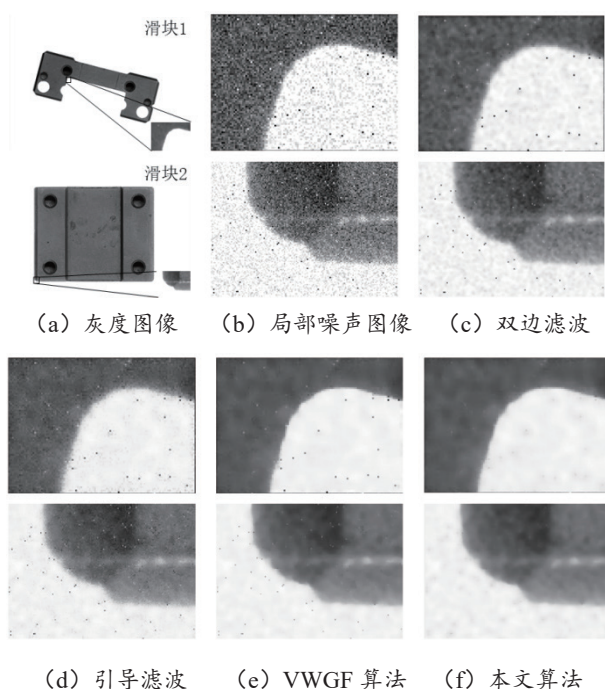


图 6 不同滤波方法对滑块图像的处理效果

图 6 中可以看出双边滤波、引导滤波和文献 [9] 的 VWGF 算法都能有效地保护边缘信息，同时滤除图像中大部分高斯噪声，但都有部分椒盐噪声残留，而本文算法的图 6(f) 中，不仅保留了上述算法的优点，而且能够去除图像中的椒盐噪声和冗余边缘信息，图像更清晰。

为客观评价滤波处理后的效果，本文引入峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 评价指标，对处理前后的图像信息进行统计，结果如表 1 所示。

表 1 不同方法在滑块图像上的去噪性能指标

图像	双边滤波		引导滤波		VWGF		本文算法	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
滑块 1	24.556	0.652	25.143	0.739	26.333	0.825	27.290	0.930
滑块 2	25.671	0.637	26.127	0.683	28.576	0.836	28.615	0.892
平均值	25.114	0.645	25.635	0.711	25.955	0.831	27.951	0.911

从表 1 的数据发现，本文算法相比于双边滤波性能明显提升；对比引导滤波，平均值 PSNR 提升了 9.03%，SSIM 提升了 28.13%；相较于 VWGF 算法，平均值 PSNR 提升了 7.69%，SSIM 提升了 9.63%。表明本文算法的降噪能力更强，图像质量更好。

2.2 改进 Canny 算子边缘提取结果

为验证改进 Canny 算法的性能，使用传统 Canny 结合 Otus 算法、文献 [10] 算法以及本文算法对滑块图像数据集进行边缘检测，部分实验结果如图 7 所示。

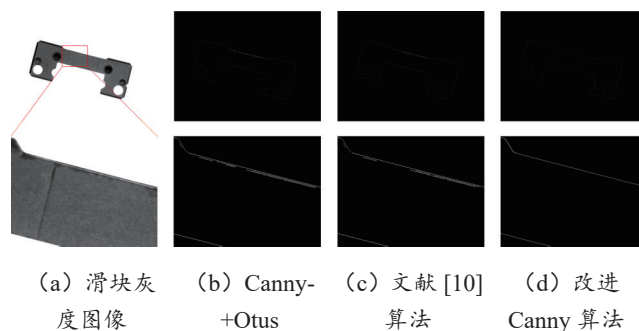


图 7 边缘提取实验结果对比

当滑块边缘附近存在倒角和表面缺陷等干扰信息时，Canny+Otus 算法检测结果中含有大量伪边缘，文献 [10] 算法检测结果中的伪边缘和噪声有所减少，但效果仍不理想；相比之下，改进 Canny 算法提取的边缘更为精炼，在保证边缘完整性和准确性的前提下，图像中的噪声和伪边缘大幅减少，边缘提取效果最佳。

为客观评价不同边缘提取算法的性能，引入边缘真假阳性率作为评价指标，边缘检测图像中真阳性率 (TPR) 与假阳性率 (FPR) 的计算方法分别为：

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (15)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (16)$$

式中：TP 表示实际为边缘且被正确检测为边缘的像素点；FP 表示实际为非边缘但被错误检测为边缘的像素点；TN 表示实际为非边缘且被正确检测为非边缘的像素点；FN 表示实际为边缘但未被检测出的像素点。

统计上述实验中 3 种不同算法提取的图像边缘信息，结果如表 2 所示。

表 2 三种不同算法检测性能指标统计

指标	Canny+Otus	文献 [10] 算法	改进 Canny
TP	11 374	11 627	11 896
FP	1946	1584	49
TN	11 400 738	11 401 200	11 402 635
FN	534	281	12
TPR	95.52%	97.64%	99.90%
FPR	0.171%	0.139%	0.004%

由表 2 可知，本文改进 Canny 算法求出的 TPR 值为 99.90%，相比于 Canny+Otus 算法提升了 2.26%，获取的真实边缘像素点数量更多，边缘更连续和完整，同时 FPR 指标仅为 0.004%，远低于另外两种算法，表明算法引入的噪声、伪边缘最少。综上所述，本文提出的边缘检测算法性能稳定，边缘连续性好，提取边缘的效果优于前两种算法。

为验证滑块边缘检测精度，首先通过计算棋盘格标定板

图像中像素尺寸所对应的实际长度, 求出像素尺寸与物理尺寸之间的比例关系为 107.20 pixel/mm, 然后提取滑块图像的直线特征用于尺寸测量, 提取结果如图 8 所示。

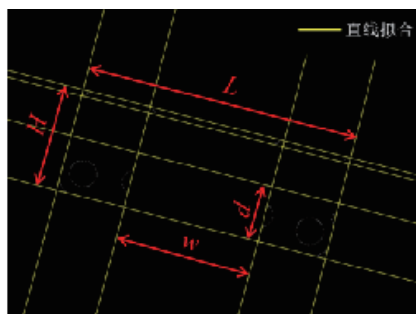


图 8 滑块直线特征提取结果

将图 8 中标记的尺寸分别使用游标卡尺重复测量 10 次并取平均值, 将其作为真实尺寸, 再与图像测量值进行比较, 实验结果如表 3 所示。

表 3 滑块测量精度验证

测量方式	真实尺寸/mm	像素距离/pixel	图像标定测量值/mm	图像测量误差/mm
L	27.49	2 941.78	27.44	0.05
H	10.35	1 108.27	10.34	0.01
w	13.56	1 458.98	13.61	0.05
d	5.45	601.26	5.61	0.16

根据表 3 的数据分析可知, 图像标定测量值与真实值的最大绝对误差为 0.16 mm, 最小绝对误差为 0.01 mm, 故本文算法提取的边缘质量较好, 能够实现较高精度的尺寸测量, 满足滑块检测要求。

3 结语

针对滑块图像边缘提取过程中存在噪声、伪边缘干扰和边缘连续性差的问题, 提出了一种基于改进 Canny 的滑块边缘提取算法, 通过引入基于边缘感知的改进方差加权引导滤波, 保护真实边缘信息的同时有效地滤除高斯噪声和椒盐噪声, 从而保证了边缘的完整性和准确性, 使用 Scharr 算子提取图像更丰富的细节信息, 提出的局部自适应迭代 Otus 算法能够自动获取最佳局部阈值, 提高了算法的自适应性和稳定性, 避免了伪边缘的干扰。Hough 变换结合总体最小二乘法提取的滑块特征更加贴近真实边缘, 定位更准确。改进的 Canny 算法不但提高了最终获取的真实边缘质量, 而且为高精度视觉测量奠定了基础。

参考文献:

[1] 胡志萍. 数字图像处理技术研究进展[J]. 中国新通信, 2020, 22(24): 72-73.

- [2] ZHOU L Y, HUANG X W, FU Q, et al. Fine edge detection in single-pixel imaging[J]. Chinese optics letters, 2021, 19(12): 121101.
- [3] LIANG Z Q, WANG J S, XIAO G, et al. FAANet: feature-aligned attention network for real-time multiple object tracking in UAV videos[J]. Chinese optics letters, 2022, 20(8): 081101.
- [4] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005(3): 415-419.
- [5] 李静, 陈桂芬, 丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4): 371-375.
- [6] 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[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 221-230.
- [7] 陈韵竹, 郭剑辉. 基于 Canny 算子加权引导滤波的 Retinex 医学图像增强算法[J]. 计算机与数字工程, 2019, 47(2): 407-411.
- [8] LU C Z, QI X G, DING K, et al. An Improved FAST algorithm based on image edges for complex environment[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7127.
- [9] 文洪青, 贾赞, 谭开豪, 等. 基于边缘感知的方差决策加权引导滤波[J]. 激光杂志, 2023, 44(1): 10-108.
- [10] 王茜, 彭中, 刘莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 521-524.
- [11] ZHAO R C, XIAN J Y, YANG Z P, et al. Image-based crop row detection utilizing the Hough transform and DBSCAN clustering analysis[J/OL]. IET image processing, 2023[2024-02-19]. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ipr2.13016>.

【作者简介】

熊金华(1999—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向: 计算机视觉、深度学习。

于慧(1999—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向: 智能控制、软件工程。

李斐(1999—), 女, 山东济南人, 硕士研究生, 研究方向: 智能控制、大数据。

白瑀(1975—), 男, 陕西西安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 智能制造、机械设计、计算机视觉等。

(收稿日期: 2024-12-09)