

一种基于 Sobel 算子的带钢表面缺陷 图像边缘检测算法

刘 源 夏春蕾

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘 要: 基于机器视觉的带钢表面缺陷检测是带钢轧制过程中重要的质量检测方法,为了提高带钢表面缺陷检测的效率和准确率,提出了一种新的带钢表面缺陷图像边缘检测算法。该算法首先用双边滤波去除图像噪声,达到保边去噪的目的,然后用改进的四方向 Sobel 算子检测缺陷图像边缘,并用自适应动态阈值选取最佳阈值进行二值化处理,最后将二值化图像进行基于 Hilditch 算法的边缘细化处理,得到最终检测图像。在 MATLAB 平台上对算法进行仿真,并将得到的实验结果与传统 Sobel 算子进行比较。实验结果表明,所提算法平均分割正确率达到 93.5%,与传统 Sobel 算子边缘检测方法相比,所提算法能得到更好的边缘检测效果。

关键词: 双边滤波;Sobel 算子;图像细化;边缘检测;带钢表面缺陷

中图分类号: TN37 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520

An image edge detection algorithm for strip steel surface defects based on Sobel operator

Liu Yuan Xia Chunlei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Strip steel surface defect detection based on machine vision is an important quality inspection method in the strip rolling process. In order to improve the efficiency and accuracy of strip surface defect detection, this paper proposes a new strip steel surface defect image edge detection algorithm. The algorithm first uses bilateral filtering to remove image noise to achieve the purpose of edge preservation and denoising, then uses an improved four-direction Sobel operator to detect the edges of defective images, and uses adaptive dynamic thresholds to select the best threshold for binarization. The valued image is processed by edge thinning based on Hilditch algorithm to obtain the final detection image. The algorithm is simulated on the MATLAB platform, and the experimental results obtained are compared with the traditional Sobel operator. Experimental results show that the average segmentation accuracy of the algorithm reaches 93.5%. Compared with the traditional Sobel operator edge detection method, the algorithm can obtain better edge detection results.

Keywords: bilateral filtering; Sobel operator; image refinement; edge detection; strip surface defects

0 引 言

图像的分割是把图像阵列分割成多个互不交迭的区域,每一个区域里面的某种特征相同或近似,而不同区域间的图像特征则有明显差异,它是由图像处理到图像分析的关键步骤^[1]。图像分割在基于机器视觉的表面缺陷检测中起着承前启后的作用^[2-4],分割效果的好坏直接决定了后续的处理效果。为了得到更好的分类效果,要求分割算法能够准确地将缺陷从背景中提取出来,并尽可能多的保留缺

陷边缘细节信息,即能够真实体现缺陷的空间结构信息^[5]。现有的图像分割方法主要分为基于阈值的分割方法、基于区域的分割方法、基于边缘的分割方法以及基于特定理论的分割方法等^[6-8]。

边缘检测常常被应用于图像分割当中,边缘检测是提取图像中灰度变化明显的部分,并据此确定缺陷区域的位置^[9-10]。边缘检测首先检测出图像局部特征的不连续性,然后进行边缘连接,并通过封闭的边界实现缺陷区域的分割^[11]。经典的边缘检测算法一般采取微分的方式进行计

算,常用的一阶微分边缘检测算子有 Robert 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、Kirsch 算子等^[12-13],一阶微分算子计算简单、运算速度快,但边缘定位不够准确。二阶微分算子主要有 Canny 算子、Log 算子、Laplacian 算子等^[14-15],二阶微分算子边缘定位准确,但对噪声敏感。许多学者将边缘检测算法应用于带钢表面缺陷图像检测当中,熊鹰^[16]提出了一种 Otsu 和 Canny 算子结合的算法用于带钢缺陷的边缘检测,但该算法抑制噪声能力较差;储茂祥^[17]提出了一种改进的 Canny 算子用于带钢缺陷的边缘检测,运用改进的微分算子计算梯度幅值,但该算法容易导致伪边缘的检测;胡超^[18]提出了一种自适应阈值小波边缘检测算法用于带钢缺陷的边缘检测,但该算法容易造成图像边缘细节丢失。基于此,本文提出了一种基于改进 Sobel 算子的带钢表面缺陷图像边缘检测算法,该算法能在抑制噪声的同时较好地检测到缺陷图像的边缘。

1 传统 Sobel 算子边缘检测算法

传统 Sobel 算子是边缘检测中常用的梯度幅度检测算子,该算子首先使用 3×3 的卷积模板对检测图像进行加权平均或邻域平均,然后通过一阶微分计算来检测图像的边缘^[19]。假设 $f(x, y)$ 表示为一幅函数图像,它在点 $f(x, y)$ 处的梯度是一个矢量,定义为:

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (1)$$

其中 $\nabla f(x, y)$ 表示梯度的模,其值可按下式计算:

$$\nabla f(x, y) = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

传统的 Sobel 算子包含水平和垂直两个方向的卷积模板^[20],如图 1 所示。

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

(a) 水平方向模板

(b) 垂直方向模板

图 1 传统 Sobel 算子模板

传统 Sobel 算子的具体步骤如下:

- 1) 将水平和垂直方向的模板从左到右、从上到下遍历图像,模板的中心点对应于图像中相应的像素点。
- 2) 对图像所有像素点组成的每个模板进行离散卷积运算。
- 3) 将两个模板卷积运算结果的最大值替换中心像素点的灰度值,用 $p_{\max}$ 表示。
- 4) 取恰当的阈值 T 进行二值化处理,若 $p_{\max} \geq T$, 则判定该像素点为图像的边缘,反之判定该像素点为背景区域。

2 本文基于改进 Sobel 算子的边缘检测算法

传统 Sobel 算子的优点是原理简单、计算量小、运行速度快。但是,传统 Sobel 算子只使用水平和垂直两个方向的模板,对其他方向的边缘不敏感,且抑制噪声能力较差。因此,对于纹理复杂、边缘倾斜较多的图像,提取的图像轮廓并不理想,而带钢表面缺陷图像复杂多样,这非常不利于带钢表面的缺陷检测。基于此,针对上述缺陷提出一种基于改进 Sobel 算子的边缘检测算法,该算法检测流程如图 2 所示。

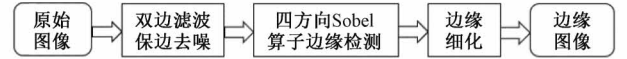


图 2 本文改进 Sobel 算子边缘检测流程

2.1 双边滤波保边去噪

双边滤波是一种非线性滤波,能较好地保持图像边缘处的梯度,达到保持边缘、降噪平滑的效果,故本文选择双边滤波进行保边去噪。其原理和其他滤波原理一样,采用加权平均的方法,用周边像素亮度值的加权平均代表某个像素的强度,其区别在于双边滤波的权重不仅考虑了像素的欧氏距离,还考虑了像素范围区域中的辐射差异。双边滤波的计算公式如下:

$$I_p^{bf} = \frac{1}{w_p^{bf}} \sum_{q \in s} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) I_q \quad (3)$$

$$W_p^{bf} = \sum_{q \in s} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) \quad (4)$$

式中: p 为中心像素点, q 为中心像素点 p 的邻域像素点, s 为邻域像素集, W_p 为归一化因子, I_q 为输入图像, I_p^{bf} 为滤波后图像, G_{σ_s} 为空间域权重, G_{σ_r} 为像素范围域权重。其中 G_{σ_s} 和 G_{σ_r} 的计算公式为:

$$G_{\sigma_s}(\|p - q\|) = e^{-\frac{[(x-u)^2 + (y-v)^2]}{2\sigma_s^2}} \quad (5)$$

$$G_{\sigma_r}(|I_p - I_q|) = e^{-\frac{[I_p - I_q]^2}{2\sigma_r^2}} \quad (6)$$

式中: σ_s 是基于高斯函数的空间标准差, σ_r 是基于高斯函数的灰度标准差,它们分别控制着空间域权重和像素范围域权重的衰减程度,直接决定了双边滤波器的性能。在实际的应用中,许多学者选用相对固定的参数,因此达不到好的保边去噪效果。基于此,本文为了达到更好的保边去噪效果,针对带钢缺陷这一研究对象,对双边滤波主要参数的选择进行了多次对比实验,通过对滤波后图像质量的评价来确定双边滤波器的关键参数。通过多组实验对比分析,本文双边滤波器主要参数的选择如下:1) 取 $\sigma_s = r/2$, 因为高斯函数 95% 的分量都集中在 $[-2\sigma_s, 2\sigma_s]$ 之间,故 σ_s 可由半径 r 决定。2) 取 $\sigma_r = 2\sigma_n$, σ_n 为滤波窗口内所有像素点的噪声标准差,可用概率分布函数法求得。

2.2 四方向 Sobel 算子边缘检测

本文改进 Sobel 算子在传统 Sobel 算子的基础上增加了 45° 和 135° 两个方向的模板,改进后的四方向 Sobel 算子

模板如图 3 所示。

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

(a) 水平方向

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

(b) 垂直方向

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

(c) 45°方向

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

(d) 135°方向

图 3 改进 Sobel 算子的四方向模板

改进后四方向 Sobel 算子边缘检测算法的具体步骤如下：

1) 用四方向 Sobel 算子模板对带钢缺陷图像从左到右、从上到下依次遍历每一个像素点，并分别对所有像素点组成的每个模板矩阵进行卷积运算，其卷积运算公式如下：

$$\Delta_x f(x, y) = f(x-1, y+1) + 2 \times f(x, y+1) + f(x+1, y+1) - (f(x-1, y-1) + 2 \times f(x, y-1) + f(x+1, y-1)) \quad (7)$$

$$\Delta_y f(x, y) = f(x-1, y-1) + 2 \times f(x-1, y) + f(x-1, y+1) - (f(x+1, y-1) + 2 \times f(x+1, y) + f(x+1, y+1)) \quad (8)$$

$$\Delta_{45^\circ} f(x, y) = f(x, y-1) + 2 \times f(x-1, y-1) + f(x-1, y) - (f(x, y+1) + 2 \times f(x+1, y+1) + f(x+1, y)) \quad (9)$$

$$\Delta_{135^\circ} f(x, y) = f(x, y-1) + 2 \times f(x+1, y-1) + f(x+1, y) - (f(x-1, y) + 2 \times f(x-1, y+1) + f(x, y+1)) \quad (10)$$

2) 取各模板四方向 Sobel 算子卷积运算结果的绝对值，将所得 4 个值进行相加求和，将所得结果替换为 3×3 模板中心像素点的灰度值，边缘方向由所得中心像素点的方向决定。对所有像素点都进行如此计算，即可确定缺陷图像所有像素点的灰度值和边缘方向。

3) 用自适应动态阈值选取最佳阈值进行二值化处理。具体方法如下：在一个 3×3 的模板中，模板中心像素点的自适应阈值如式(11)所示。

$$T = [\text{sum}(\mathbf{A}) - \min(\mathbf{A}) - \max(\mathbf{A})]/7 \quad (11)$$

式中： $\mathbf{A}$ 代表像素点组成的 3×3 模板矩阵， $\text{sum}(\mathbf{A})$ 为该模板所有像素点的灰度值之和， $\min(\mathbf{A})$ 为该模板中灰度值最小的灰度值， $\max(\mathbf{A})$ 为该模板中灰度值最大的灰度值， T 为该 3×3 模板自适应确定的阈值。确定好各模板的自适应阈值后，将各模板内灰度值大于其自适应阈值 T 的像素点灰度值设为 255，即标记为缺陷边缘，小于自适应

阈值的像素点灰度值设为 0，即标记为背景区域。对缺陷图像所有像素点组成的模板矩阵都进行如此计算，即可得缺陷图像的二值图像。

2.3 边缘细化

由于改进的 Sobel 算子增加了两个方向的模板，在缺陷边缘检测时有些边缘像素点可能会被重复检测到，容易导致检测结果边缘较粗。为了避免检测到较粗的边缘，本文结合带钢缺陷特点选择 Hilditch 算法进行边缘细化处理，Hilditch 算法的原理如图 4 所示。

X_4	X_3	X_2
X_5	P	X_1
X_6	X_7	X_8

图 4 Hilditch 算法原理

Hilditch 算法是通过删除标记像素点来细化图像的，当像素点灰度为 0 时， $B(X_i) = 1$ ，当像素点灰度为 255 时， $B(X_i) = 0$ 。标记像素点删除需要满足 6 个条件：1) P 的灰度值为 255，即 P 为缺陷边缘；2) X_1, X_3, X_5, X_7 至少有一个不为 255；3) $X_1 \sim X_8$ 至少有两个 255；4) P 的 8 联通区域连接数为 1 (P 的 8 联通区域计算如式(12)所示)，即 $N_c(p) = 1$ ，此时 P 标记为可删除点；5) 假设 X_3 被标记删除， $X_3 = 0$ 时， P 的联通连接数为 1；6) 假设 X_5 被标记删除， $X_5 = 0$ 时， P 的联通连接数为 1。

$$N_c(p) = \sum_{k \in S} \{ \overline{B}(X_k) - \overline{B}(X_k) \overline{B}(X_{k+1}) \overline{B}(X_{k+2}) \}$$

$$S = \{1, 3, 5, 7\}, \overline{B}(X_k) = 1 - B(X_k), X_8 = X_1 \quad (12)$$

对图像从左到右、从上到下依次遍历每个像素点，对所有像素点都进行上述 6 个条件的判断，若该像素点满足上述 6 个条件，则将该像素点删除，即判定该像素点为背景，反之判定为缺陷边缘。

3 实验过程及结果分析

在 MATLAB 平台上分别对不同类型的带钢表面缺陷图像进行边缘检测，并将本文所提算法与传统 Sobel 算子边缘检测结果进行比较。

3.1 实验具体实施过程

以带钢表面常见的擦伤缺陷为例，用双边滤波对其进行保边去噪，处理结果如图 5 所示。

从滤波后的结果可以看出，虽然调参后的双边滤波与传统双边滤波在视觉上差异不大，但调参后的双边滤波能够对其灰度方差值进行自适应调整，使得去除噪声的同时能够保留更多的边缘信息，并且能有效的去除图像中的强噪声，更好地达到了保边去噪的效果。

对双边滤波后的图像进行四方向 Sobel 算子边缘检

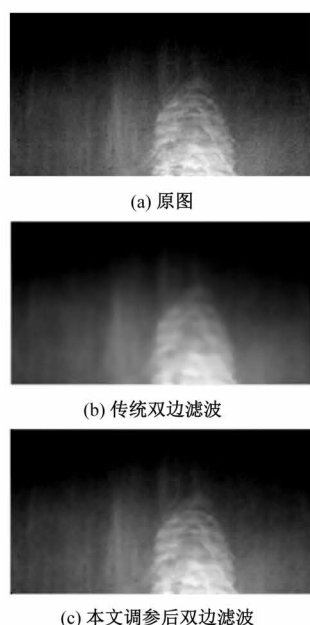


图 5 双边滤波保边去噪

测,检测过程和结果如图 6 所示。

对四方向 Sobel 算子检测后的图像进行 Hilditch 算法边缘细化处理,处理结果如图 7 所示。

3.2 本文算法与传统 Sobel 算子在不同带钢表面缺陷图像中检测结果对比

以带钢表面常见的几种缺陷为例,分别用传统 Sobel 算子、本文所提算法对其进行边缘检测,实验结果如图 8 所示。其中,图 8(a)为缺陷原图,从上往下依次为瘀伤、壳状凸起、鳞皮、孔洞、划痕缺陷;图 8(b)为传统 Sobel 算子检测结果;图 8(c)为本文算法检测结果。

从瘀伤、孔洞缺陷的检测结果中可以明显看出,传统 Sobel 算子只能检测到水平和垂直方向边缘,而无法检测到其他方向的缺陷边缘,而本文算法能够清晰地检测到瘀伤、孔洞缺陷的大体轮廓。在壳状凸起缺陷的检测结果中,传统 Sobel 算子检测到大量噪声的存在,因此可以看出传统 Sobel 算子抑制噪声能力较差,而本文算法不仅能够抑制噪声,还能清晰地检测到壳状凸起缺陷边缘。在鳞皮缺陷的检测结果中,本文算法相比传统 Sobel 算子能检测到更多的鳞皮缺陷边缘,因为鳞皮缺陷分布范围广,且缺陷纹理复杂,传统 Sobel 算子难以检测出这种纹理复杂的缺陷边缘。在划痕缺陷的检测结果中可以看出,传统 Sobel 算子不能检测到划痕缺陷,而本文算法却能较好地检测到划痕缺陷,分析原图可以发现,划痕缺陷的对比度较低,缺陷区域和背景区域差别较小,传统 Sobel 算子难以将缺陷从背景中检测出来,因此可以看出本文算法对于对比度较低的缺陷图像也有较好的检测结果。

为了进一步验证本文算法的有效性,采用文献[21]中

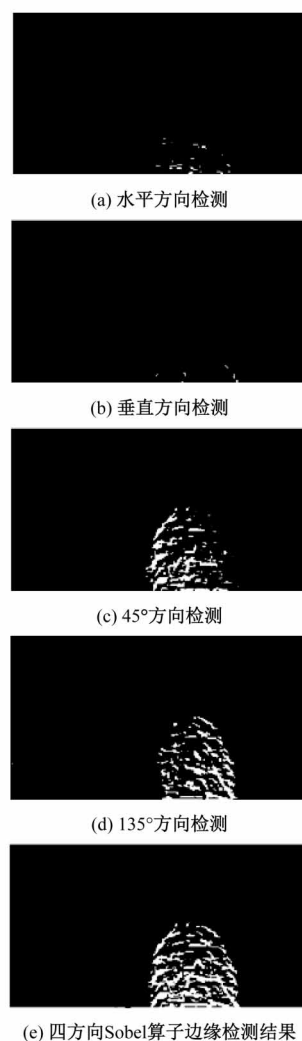


图 6 四方向 Sobel 算子对瘀伤缺陷的检测过程和结果



图 7 瘀伤缺陷边缘细化后结果

的分割正确率和对本文边缘检测效果进行评价,一共采集了 250 张带钢缺陷图像,平均每种缺陷图像 50 张,图像大小为 240×130 pixel,实验结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,在本文算法中,瘀伤、可状凸起、鳞皮、孔洞缺陷的分割正确率均达到了 90% 以上,这是由于这些缺陷纹理明显或缺陷较大,较容易正确识别;而划痕缺陷的分割正确率在 90% 以下,这是由于划痕缺陷区域分布窄,与背景区别较小,导致分割正确率稍微偏低。但总体相比传统 Sobel 算子提高了很多,因此可以看出本文算法得到的边缘检测效果比传统 Sobel 算子更好。



图 8 本文算法与传统 Sobel 算子边缘检测结果对比

表 1 带钢表面缺陷分割正确率 %

	瘀伤	壳状凸起	鳞皮	孔洞	划痕	平均
传统 Sobel 算子	77.8	79.3	82.9	77.8	67.3	77.0
本文方法	94.5	93.7	92.3	98.8	88.1	93.5

4 结 论

本文以传统 Sobel 算子为基础对其进行改进,结合优化后的双边滤波和 Hilditch 细化算法提出了一种新的带钢表面缺陷图像边缘检测算法。将该算法应用于不同类型的带钢表面缺陷检测,实验结果表明,本文算法相比于传统 Sobel 算子能在抑制噪声的同时检测出非水平和垂直方向的缺陷边缘,且对对比度低的图像也有较好的检测结果。因此可以看出,本文算法能更好地检测出带钢表面各种缺陷的边缘,对提高带钢表面缺陷的识别与分类有一定的应用价值。后续研究将针对带钢微型缺陷边缘难以检测的问题进行下一步的研究,以进一步提高带钢缺陷检测的准确性。

参考文献

- [1] 汤勃,孔建益,伍世虔. 机器视觉表面缺陷检测综述[J]. 中国图象图形学报,2017,22(12):1640-1663.
- [2] 陈春谋. 基于机器视觉与图像分割的工件表面残胶识别算法[J]. 电子测量技术,2019,42(15):74-78.
- [3] 帅红宇,管声启. 基于小波分解的带钢缺陷检测[J]. 软件,2016,37(12):35-37.
- [4] 张旭中,翟道远,陈俊. 基于深度强化学习的木材缺陷图像识别及分割模型研究[J]. 电子测量技术,2019,43(17):80-86.
- [5] 周友行,刘汉江,赵晗斌,等. 基于像元相互关系的FCM聚类分割算法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(9):124-131.
- [6] 易梦云. 带钢表面质量缺陷检测与分类方法研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [7] 吴彬彬. 机器视觉方法在带钢表面缺陷检测中的应用研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
- [8] 杨林. 冷态热轧钢板表面缺陷检测系统技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [9] FU Z H, SONG S Y, WANG X J, et al. Imaging the

- topology of grounding grids based on wavelet edge detection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 55(4):1-8.
- [10] XIE S N, TU Z W. Holistically-nested edge detection[J]. International Journal of Computer Vision, 2015, 125(1/3):3-18.
- [11] 王瑞,姚爱琴,杨瑞,等. 基于小波变换模极大的多尺度图像边缘检测在烟雾图像中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(9):63-67.
- [12] 张阳,刘缠牢,卢伟家,等. 基于 LOG 算子的双滤波边缘检测算法[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4):95-98.
- [13] 谭艳,王宇俊,李飞龙,等. 几种典型的图像边缘检测算法的分析比较[J]. 电脑知识与技术, 2012, 8(7):1604-1608.
- [14] 张红霞,王灿,刘鑫,等. 图像边缘检测算法研究新进展[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14):11-18.
- [15] 曾建华,黄时杰. 典型图像边缘检测算子的比较与分析[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2020, 44(4):295-301.
- [16] 熊鹰. 带钢表面缺陷检测及识别关键技术研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [17] 储茂祥. 钢板表面缺陷检测关键技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2014.
- [18] 胡超. 基于机器视觉的热轧钢板表面缺陷检测系统关键技术研究[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- [19] 朱寒,林丽,陈德全,等. 基于多方向改进 Sobel 算子的 PCB 图像定位校正方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9):121-128.
- [20] 任克强,张镭. 对数域梯度与改进 Sobel 算子相结合的边缘检测[J]. 液晶与显示, 2019, 34(3):283-290.
- [21] 徐科,宋敏,杨朝霖,等. 隐马尔可夫树模型在带钢表面缺陷在线检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22):34-40.

作者简介

刘源,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:liuyuan9624@163.com