

基于阈值优化的带钢表面缺陷图像边缘检测研究

黎浩,汤勃,孔建益,王兴东
(武汉科技大学机械自动化学院,武汉 430081)

摘要:针对带钢表面缺陷图像光照不均而使得边缘检测困难的问题,分别使用顶帽变换和同态滤波对常规缺陷和低对比度缺陷进行去光照不均处理。接着,通过 Otsu 算法求出缺陷图像最佳阈值获取自适应的阈值改进边缘检测算法,即分别采用 Sobel 算法、Canny-Otsu 算法进行常规缺陷和低对比度缺陷的图像分割。以带钢表面黑斑、划伤等典型缺陷为例进行了研究,结果表明算法取得了良好的效果。

关键词:顶帽变换;同态滤波;Otsu 阈值分割;边缘检测

中图分类号:TH16;TG506

文献标识码:A

Research on Edge Detection of Steel Plate Surface Defects Image Based on Threshold Optimizatio

LI Hao, TANG Bo, KONG Jian-yi, WANG Xing-dong

(School of Machinery and Automation Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Aiming at the problem that edge detection is difficult due to uneven illumination of strip surface defect image, the conventional defect and low contrast defect are treated by top-hat transform and homomorphic filtering combined with wavelet algorithm respectively. The optimal threshold value of the defect image is obtained by the Otsu algorithm to improve edge detection algorithm. Sobel algorithm and Canny-Otsu algorithm are used for image segmentation of conventional defects and low contrast defects respectively. Taking the typical defects such as black spots and scratches on the surface of strip steel as an example, the results show that the algorithm has achieved good results.

Key words: top-hat transformation; homomorphic filtering; Otsu threshold segmentation; edge detection

0 引言

带钢表面缺陷是影响质量的重要因素之一,机器视觉检测因其准确度高、实时性好,所以在带钢表面缺陷检测中得以运用^[1-2]。

在带钢表面检测系统中,因 LED 光源的不均匀照明,环境光干扰等,实际图像常常受到光照不均因素的影响,光照不均在一定程度上导致图像原始灰度信息丢失、缺陷边缘不清晰,从而影响分割效果,因此,有必要对带钢图像做灰度校正以去除光照不均对后续处理的影响。

对于光照不均的图像,常见的处理方法包括 Retinex 图像增强法、直方图均衡化法、顶帽变换法、同态滤波法等^[3]。针对采集到的图像存在光照不均问题,文献^[4]通过小波变换对光照不均图像进行增强处理,引入 BP 神经网络得到图像增强系数,进一步实现图像增强处理,虽然效果较好,但增加了计算负担;文献^[5]分析了 4 种常用的光照不均增强方法,对比了这

几种方法的处理效果,选择了效果较好的一种。

光照不均处理后再进行缺陷的边缘检测。传统的边缘检测算子如 Roberts、Sobel、Prewitt 等,其算法实现简单。Canny 算法是一个具有滤波、增强、检测的多阶段优化算法,因为严格的边缘检测评价标准得到了广泛应用。

当采用 Sobel、Canny 等边缘检测的算法用于图像边缘检测时,其阈值选取不具备自适应性,从而一定程度上影响了图像分割的效果。为此,许多学者进行了改进。文献[6]基于 Sobel 等边缘检测算子与 Otsu 结合进行图像分割;文献[7]提出一种基于简单统计法的自适应阈值选择方法;文献^[8-9]提出将 Otsu 算法运用到改进 Canny 算法边缘检测中,证明了其算法的有效性。

带钢表面缺陷具有多样性的特点,对于缺陷特征相对较明显的常规缺陷和缺陷特征相对不明显的对比度较低的微小缺陷,为兼顾算法的有效性和实时性,应

收稿日期:2019-09-23;修回日期:2019-12-18

作者简介:黎浩(1995—),男,湖北咸宁人,武汉科技大学硕士研究生,研究方向为图像处理,(E-mail)932852107@qq.com;通讯作者:汤勃(1973—),男,湖北石首人,武汉科技大学教授,博士,研究方向为图像处理与模式识别,(E-mail)tang1017@163.com。

采用与之相适应的光照不均处理算法和缺陷目标检测算法。

1 图像光照不均处理

1.1 顶帽变换法

顶帽变换法是由基本的灰度形态学腐蚀和膨胀运算构成,设 $F(x,y)$ 表示输入图像的二元函数, $S(x,y)$ 为结构元素, D_s 表示结构元素的定义域,则 S 对 F 的腐蚀 ($F \ominus S$) 和膨胀 ($F \oplus S$) 运算公式如下^[8]:

$$(F \ominus S)(x,y) = \min\{F(x-a,y-b) \mid (a,b) \subseteq D_s\} \quad (1)$$

$$(F \oplus S)(x,y) =$$

$$\max\{F(x+a,y+b) - S(x,b) \mid (a,b) \subseteq D_s\} \quad (2)$$

另外,灰度图像的开运算、闭运算是灰度腐蚀、膨胀相结合的复合运算,则 S 对 F 的开运算 ($F \circ S$)、闭运算 ($F \cdot S$) 定义如下:

$$(F \circ S) = (F \ominus S) \oplus S \quad (3)$$

$$(F \cdot S) = (F \oplus S) \ominus S \quad (4)$$

灰度图像的开运算是结构元素对灰度图像先腐蚀再膨胀,该运算常用来去除灰度图像中相对于结构元素较小的高灰度区域;基于上述灰度图像的一些基本运算,顶帽变换定义为:

$$\text{顶帽变换: } F - (F \circ S) \quad (5)$$

顶帽变换的主要应用之一是,用一个结构元素通过开操作从一幅图像中删除物体,而不是拟合被删除的物体。而开运算可用于补偿不均匀的背景亮度,所以用一个结构元素做开运算后,用原图像减去这个开运算,就得到了背景均衡的图像。

1.2 同态滤波法

同态滤波主要是将图像进行傅里叶变换,抑制图像信息的低频分量,并通过设计好的频域滤波器增强高频分量,从而实现非均匀亮度的校正。

设 $f(x,y)$ 为一幅二维图像函数, $i(x,y)$ 、 $r(x,y)$ 分别表示入射分量和反射分量,则^[11]:

$$f(x,y) = i(x,y)r(x,y) \quad (6)$$

入射分量 $i(x,y)$ 属于低频信号部分,反射分量 $r(x,y)$ 属于高频信号部分。

借助对数函数将 $i(x,y)$ 与 $r(x,y)$ 分离:

$$\ln f(x,y) = \ln i(x,y) + \ln r(x,y) \quad (7)$$

再进行傅里叶变换,可记为:

$$F(u,v) = F_i(u,v) + F_r(u,v) \quad (8)$$

其中, $F_i(u,v)$ 是 $\ln i(x,y)$ 的傅里叶变换, $F_r(u,v)$ 是 $\ln r(x,y)$ 的傅里叶变换。选取合适的滤波函数 $H(u,v)$ 来控制入射分量和反射分量,即:

$$H(u,v)F(u,v) = H(u,v)F_i(u,v) + H(u,v)F_r(u,v) \quad (9)$$

在进行傅里叶反变换,将图像从频率域变换到空间域:

$$f'(x,y) = F^{-1}[F(u,v)H(u,v)] \quad (10)$$

再经过指数变换,得到输出图像。

图像经同态滤波处理后,图像亮度通常比较均匀、细节得以增强,为进一步增强对低对比度的带钢表面微小缺陷图像效果,可将小波变换与同态滤波相结合。图像经过小波变换后对低频带系数(LL)进行灰度线性变换,而对三个高频带系数进行高通滤波器 $H(u,v)$ 进行处理。然后对各频带系数进行小波逆变换,得到增强后的图像。

为了评估各个去光照不均算法的检测效果,本文在 window7 Intel(R)Core(TM) i5-3230M CPU@2.60 GHz 环境下配合 Matlab 2016B 进行研究。

图1和图2分别为划伤、分层常规缺陷运用 Retinex 算法、直方图均衡化、顶帽变换法对比效果。可看出,顶帽算法达到了光照不均校正的效果。

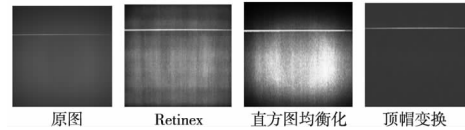


图1 划伤缺陷图像处理效果图

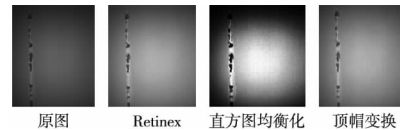


图2 分层缺陷图像处理效果图

图3和图4是低对比度缺陷图像的光照不均校正效果。可以看出,同态滤波结合小波算法达到了去光照不均的效果。

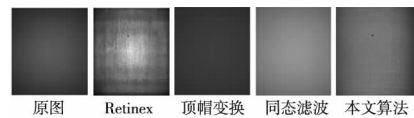


图3 黑斑缺陷图像处理效果图

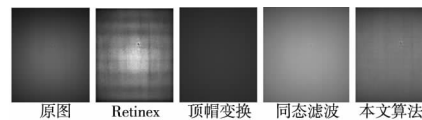


图4 压痕缺陷图像处理效果图

2 阈值优化的边缘算法

2.1 边缘检测算法

通过对 Roberts、Prewitt 和 Sobel 算法对带钢表面缺陷的边缘检测研究,得知 Sobel 算法对常规缺陷检测效果良好,且处理时间快。

Sobel 算法引入了类似局部平均的运算,对噪声具有平滑作用,能在一定程度上消除噪声的影响。Sobel 算法包含两组 (3×3) 的矩阵,将之与图像作平面卷

积,即可分别得出横向及纵向的亮度差分近似值。

$$\nabla f(x, y) = [G_x, G_y]^T = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (11)$$

$$g(x, y) = \text{magf}(x, y) = [G_x^2, G_y^2]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (12)$$

为了方便计算,幅度可取:

$$g(x, y) = |G_x| + |G_y| \quad (13)$$

G_x 和 G_y 各用一个模板,两者结合起来就构成一个梯度算子。Sobel 边缘检测算法由下列两个卷积核构成:

$$\nabla_x f(x, y) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \nabla_y f(x, y) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Canny 算法是 1986 年 John F Canny^[12]采用解析的方法挖掘出来的一个多级边缘检测算法。Canny 提出了 3 个严格的边缘检测标准:(a)良好的信噪比;(b)高的定位精度;(c)单边缘响应^[13]。Canny 边缘检测算法步骤为:

(1)为去除噪声,应用高斯滤波器平滑处理原图像。

(2)计算平滑后图像的梯度值和方位。

(3)应用非最大抑制来消除那些梯度不够大的像素点,只保留最大的梯度,仅保留了一些细线条。

(4)应用双阈值方法检测和连接边缘。

2.2 表面缺陷目标分割的阈值法

Otsu 算法^[14]是一种使类间方差最大的自动确定阈值方法。其基本思想是把图像像素分为背景和目标两类,搜索计算类间方差最大值。设 X 是一幅具有 L 级灰度级的图像,其中第 i 级像素为 N_i 个,其中 i 的值在 $0 \sim L-1$ 之间,图像的总像素点个数为: $N = \sum_{i=0}^{L-1} N_i$ 。第 i 级出现的概率为: $P_i = N_i/N$ 。在 Otsu 算法中,以阈值 k 将所有的像素点分为目标 C_0 和背景 C_1 两类。 C_0 、 C_1 类的像素灰度级分别为 $0 \sim k-1$ 、 $k \sim L-1$ 。 C_0 、 C_1 类像素所占的总面积的比例为:

$$\omega_0 = \sum_{i=0}^{k-1} P_i, \omega_1 = 1 - \omega_0 \quad (15)$$

C_0 、 C_1 类像素的平均灰度级为:

$$\mu_0 = \sum_{i=0}^{k-1} iP_i/\omega_0, \mu_1 = \sum_{i=k}^{L-1} iP_i/\omega_1 = 1 - \mu_0(k)/\omega_1 \quad (16)$$

最大类间方差为:

$$\delta^2(k) = \omega_0(\mu - \mu_0)^2 + \omega_1(\mu - \mu_1)^2 \quad (17)$$

令 k 从 $0 \sim L-1$ 变化,计算在不同 k 值下的类间方差 $\delta^2(k)$,使得 $\delta^2(k)$ 最大值时的那个 k 值就是所要求的最优阈值。

2.3 Otsu 算法改进边缘检测

对于带钢的缺陷图像边缘检测,想要取得好的效果,就要选取适合的阈值,阈值的合适可以使得图像处理的缺陷更加明显。

由于 Otsu 算法具有自适应性强,计算量小,分割效果好的优点。因此可以先通过 Otsu 算法求取最佳阈值,然后把其作为 Canny 算法的阈值(对于后者则为高阈值),从而有效地进行图像的边缘检测。

对于缺陷特征相对较明显的常规缺陷,选择 Sobel 算法进行边缘检测。

对于缺陷特征相对不明显的低对比度缺陷, Sobel 算法则不能很好识别,此时采用 Canny 算法,并结合 Otsu 算法确定其分割阈值。在 Canny 算法中,如果阈值选取过高会丢失一些边缘点,阈值选择过低则会导致伪边缘的出现,如何有效的选择合适的阈值是 Canny 算法边缘检测的重要环节。通过求出式(17)令 δ^2 最大的阈值 K_h ,即为最佳阈值,低阈值 K_l 取 K_h 的 0.4 倍。

3 带钢图像边缘检测结果

选取了常见的带钢表面光照不均、形态差别大的几类缺陷图像,分别使用 Sobel 算法和 Canny-Otsu 算法进行缺陷分割对比,结果如图 5~图 8 所示。

其中,图 5、图 6 是带钢表面常规缺陷的分割情况。从中可得知,光照不均处理前,缺陷分割效果不佳;光照不均处理后,对于常规缺陷运用 Sobel 和 Canny-Otsu 算法均能有效地提取边缘,且 Sobel 算法计算简单。

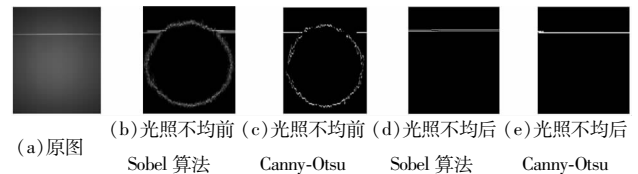


图 5 划伤缺陷的边缘检测效果对比

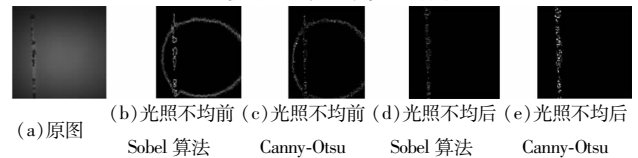


图 6 分层的边缘检测效果对比

图 7、图 8 为带钢表面低对比度缺陷的分割情况。从中可看出,光照不均处理前,缺陷分割效果不佳;光照不均处理后, Sobel 算法效果欠佳, Canny 结合 Otsu 阈值分割将缺陷有效地检测出来。

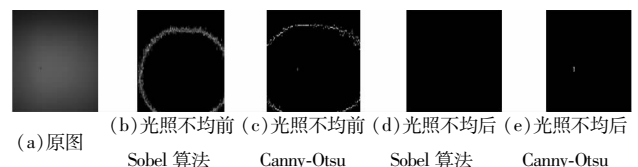


图 7 黑斑缺陷的边缘检测效果对比

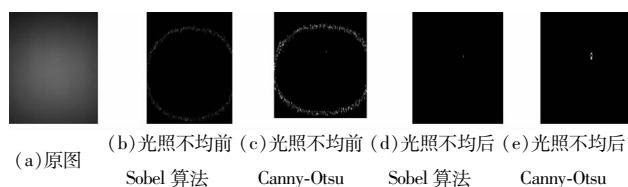


图 8 压痕缺陷的边缘检测效果对比

4 结论

带钢表面图像因环境因素、光学元件等影响常造成图像的光照不均,Retinex 算法和直方图均衡化均不能有效消除其光照不均,顶帽变换对带钢表面常规缺陷处理效果良好、算法简单;对于其低对比度缺陷,同态滤波效果比顶帽变换好。

应用边缘检测与阈值优化相结合的方法实现带钢表面缺陷图像的分割。对于常规缺陷,采用 Sobel 边缘检测以及 Canny 算法与 Otsu 阈值分割相结合的图像分割算法均能取得较好的效果,但 Sobel 边缘检测计算简单。而对于其低对比度缺陷,采用 Canny 算法与 Otsu 阈值分割相结合的边缘检测算法。根据带钢表面缺陷图像的特点选择相应的边缘检测算法,从而兼顾算法的有效性和算法的速度。

[参考文献]

- [1] 徐科,周鹏,杨朝霖. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法[J]. 机械工程学报,2013,49(4): 25-29.
- [2] 何永辉,彭铁根,宗德祥. 宝钢热轧带钢表面质量在线检测系统研发及应用[J]. 中国冶金文摘,2012,26(6): 55-56,59.

- [3] 梁琳,何卫平,雷蕾,等. 光照不均图像增强方法综述[J]. 计算机应用研究,2010,27(5):1625-1628.
- [4] 王明蓉,蒋树清. 光照不均图像自适应增强方法[J]. 激光杂志,2017,38(6):74-77.
- [5] 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.
- [6] 杨陶,田怀文,刘晓敏,等. 基于边缘检测与 Otsu 的图像分割算法研究[J]. 计算机工程,2016,42(11):255-260.
- [7] 段军,高翔. 基于统计滤波的自适应双阈值改进 Canny 算子边缘检测算法[J]. 激光杂志,2015,36(1):10-12.
- [8] 张月圆,曾庆化,刘建业,等. 基于 Canny 的改进图像边缘检测算法[J]. 导航与控制,2019,18(1):84-90.
- [9] 徐亮,吴海涛,孔银昌. 自适应阈值 Canny 边缘检测算法研究[J]. 软件导刊,2013(8):62-64.
- [10] 殷苏民,朱锦萍,王祖声. 基于顶帽变换和最大类间方差的图像分割方法研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(7):60-64.
- [11] 马超玉,孙俊喜. 光照不均匀条件下图像增强算法研究[D]. 长春:长春理工大学,2014.
- [12] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1986,8(6):679-698.
- [13] 李平阳,孙志毅. 一种提升 Canny 算子的自适应边缘检测方法[J]. 太原科技大学学报,2013,34(3):171-174.
- [14] Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1979, 9(1):62-66.

(编辑 李秀敏)

(上接第 121 页)

[参考文献]

- [1] Hao Feng, Wenhua Qiao, Chen bo Yin, et al. Identification and compensation of non-linear friction for a electro-hydraulic system[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 141: 1-13.
- [2] Duc-Thien Tran, Minh-Nhat Nguyen, Kyoung Kwan Ahn. RBF Neural Network Based Backstepping Control for an Electrohydraulic Elastic Manipulator[J]. Applied Sciences-Basel, 2019, 9(11):2237.
- [3] W Sun, H Gao, O Kaynak. Vibration isolation for active suspensions with performance constraints and actuator saturation [J]. IEEE/ASME, Trans. Mechatronics, 2015, 20(2): 675-683.
- [4] J Yao, Z Jiao, D Ma. High-accuracy tracking control of hydraulic rotary actuators with modeling uncertainties [J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 2014,19(2): 633-641.
- [5] 王鑫刚,芮光超,丁兴亚,等. 基于干扰观测器的电液伺服系统反馈线性化滑模控制[J]. 液压与气动, 2018(6):8-13.
- [6] Shuo Kang, Hao Yan, Lijing Dong, et al. Finite-time adap-

tive sliding mode force control for electro-hydraulic load simulator based on improved GMS friction model[J]. Mechanical systems and signal processing, 2018,102:117-138.

- [7] 李阁强,顾永升,李健,等. 被动式电力伺服系统的自适应反步滑模控制[J]. 兵工学报,2017,38(3):616-624.
- [8] Xu dong Li, Jian yong Yao, Changsheng Zhou. Adaptive robust output - feedback motion control of hydraulic actuators [J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, DOI:10.1002/acs.2785.
- [9] J Yao, W Deng, W Sun. Precision Motion Control for Electro-Hydraulic Servo Systems With Noise Alleviation: A Desired Compensation Adaptive Approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1859-1868.
- [10] Yang ming Zhang, Peng Yan, Zhen Zhang. High precision tracking control of a servo gantry with dynamic friction compensation[J]. ISA Transactions,2016,62:349-356.
- [11] 魏琼,焦宗夏,王君,等. 基于 LuGre 模型的气动位置伺服系统摩擦补偿控制[J]. 机械工程学报,2018,54(20): 131-138.

(编辑 李秀敏)