

低对比度下手机膜缺陷图像的分割研究

化春健^{1,2*}, 郭金花^{1,2}, 陈莹³

¹江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

²江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

³江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122

摘要 针对低对比度下手机膜缺陷图像分割较难的问题,提出了一种改进的 Retinex 增强方法。首先,利用高斯卷积估计缺陷图像的光照分量,获取反射分量;对反射分量进行自适应非线性变换以及对对比度受限自适应直方图均衡(CLAHE)修正,提高图像对比度,并利用顶帽变换进一步去除光照背景的影响,实现手机膜缺陷图像的增强。然后,针对最大类间方差(OTSU)算法对缺陷边缘的暗细节分割不完整的问题,引入增强图像的梯度图像,实现手机膜缺陷的有效分割。实验结果表明:在低对比度情况下,相较于原缺陷图像,本文算法处理后的图像的信息熵提升约 20%,对比度提升约 100%,分割效果较好。

关键词 图像处理; 图像分割; 图像增强; Retinex; CLAHE; 梯度变换

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.201013

Image Segmentation for Mobile Phone Film Defects Under Low Contrast

Hua Chunjian^{1,2*}, Guo Jinhua^{1,2}, Chen Ying³

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

² Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

³ School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract Image segmentation is the focus of mobile phone film defect detection. However, the low contrast of captured images often makes image segmentation difficult. In this regard, this paper proposed an improved Retinex enhancement method. The method used Gaussian convolution to estimate the illumination component of defect image to obtain the reflection component, performed adaptive nonlinear transformation on the reflection component, employed contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE) correction to improve the contrast, used the top-hat transform to eliminate the influence of lighting background, and enhanced the defect image of the mobile phone film. Then, aiming at the incomplete segmentation of the dark details of the defect edge by Otsu's algorithm, a gradient image of the enhanced image was introduced to achieve effective segmentation of mobile phone film defects images. The experimental results show that in the case of low contrast, compared with the original defect image, the image processed by this algorithm has an improved information entropy of about 20%, a contrast of about 100%, and an excellent segmentation effect.

Key words image processing; image segmentation; image enhancement; Retinex; CLAHE; gradient transform

OCIS codes 100.2000; 100.2980; 150.1135

1 引言

图像检测技术具有智能化、高速化和实时化的特点,适应现代工业的柔性生产模式。在手机膜缺

陷的检测过程中,由于采集的图像存在对比度低的问题,若直接对其进行处理,会造成细节丢失,进而影响后续缺陷识别,无法保证缺陷检测率,故为了准确分割细节缺陷,需要对手机膜缺陷图像先进行增

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-02-05; 录用日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61573168)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP11008)

* E-mail: cjhua@jiangnan.edu.cn

强再进行分割。

目前,在光照不均的情况下,使用较多的图像增强方法^[1]包括伽玛变换、直方图均衡化、同态滤波、形态学等。Retinex理论^[2]是近年来出现的一种空间域图像增强方法,根据光照分量估计方法的不同,发展出不同算法。文献[3]提出采用双边滤波法估计图像的光照分量,相较于高斯滤波,该方法具有更好的边缘保持特性,在一定程度上解决了“光晕伪影”问题,但实时性较差;文献[4]将单尺度 Retinex 算法(SSR)结合双边滤波处理后的图像与拉普拉斯高斯算子(LOG)算法结合归一化处理并取反的图像进行融合,得到增强图像,但图像整体偏亮,对比度不明显,效果较差。文献[5]将图像转换到 HSV 颜色空间(Hue, Saturation, Value),并对 V 通道图像进行引导滤波处理,得到光照分量图像,然后对颜色恢复函数进行了改进,该算法较为复杂且主要是针对夜间的彩色图像。而最大类间方差(OTSU)法^[6]是目前最常用的图像分割算法,其原理是计算图像中背景和前景之间的方差,类间方差越大,说明两者差距越大,划分越明显,求取类间方差最大时对应的阈值即为最佳阈值。

本文对单尺度 Retinex 算法进行改进,主要改进其量化方法,通过自适应非线性变换以及对对比度受限自适应直方图均衡(CLAHE)修正,提高图像的对对比度;然后在 OTSU 算法的基础上引入梯度图像,实现低对比度下的手机膜细节缺陷的分割。

2 自适应 Retinex 算法

2.1 Retinex 概述

Retinex 算法是基于颜色恒常理论提出的,即在不同的光照条件下,人眼对物体颜色的感知保持不变。根据 Retinex 理论,一幅图像 $I(x, y)$ 可由光照分量乘以反射分量来近似得到,其表达式为

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y), \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 表示相机采集的图像信号; $L(x, y)$ 表示光照分量,对应图像中变化缓慢的低频部分; $R(x, y)$ 表示待测物体表面对光的反射分量,是物体的固有属性,对应图像中变化剧烈的高频细节。

2.2 单尺度 Retinex 算法

现今, Retinex 算法已发展出多种算法,但运用

最广泛的是中心/环绕 Retinex 算法^[7]。其最经典的算法为单尺度 Retinex 算法(SSR)以及多尺度 Retinex 算法^[8-9](MSR)。

其中,单尺度 Retinex 算法的一般步骤如下:

1) 将图像转换到对数域,分离其光照分量和反射分量,即

$$\log[I(x, y)] = \log[L(x, y)] + \log[R(x, y)]. \quad (2)$$

2) 获取反射分量,只需要得到光照分量 $L(x, y)$ 即可。但是 $L(x, y)$ 不能直接获得,只能近似估计,一般用原图像和高斯函数的卷积来近似表示。然后用原图像减去光照分量,得到高频增强的图像 $F(x, y)$,即

$$F(x, y) = \log[I(x, y)] - \log[I(x, y) * G(x, y)], \quad (3)$$

式中, $G(x, y)$ 为高斯函数,其表达式为

$$G(x, y) = \lambda \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

其中: σ 为尺度参数,用于控制邻域范围; λ 为归一化常数,其值越大,表明图像灰度动态范围越小。高斯函数满足^[10]

$$\iint G(x, y) dx dy = 1. \quad (5)$$

3) 将 $F(x, y)$ 转换到实数域,获得增强后的图像 $R(x, y)$,表达式为

$$R(x, y) = \exp[F(x, y)]. \quad (6)$$

2.3 反射分量的非线性增强

依据 Retinex 算法对手机膜缺陷图像进行增强,发现图像对比度虽然在一定程度上有所提高,但也会增强图像背景,导致一些局部细小的划痕缺陷的增强效果不佳。为解决这一问题,提出改进算法,算法步骤如下:1)按照(1)~(3)式,对手机膜图像进行处理,得到反射分量;2)针对反射分量的量化方法进行改进;3)采用形态学方法进一步去除光照影响。

由(3)式获得的高频增强图像 $F(x, y)$ 是对数域的输出图像,要将其转换为数字图像,必须将他们量化为 $[0, 255]$ 的数字图像范围。输出图像的品质在很大程度上取决于量化算法的优劣。常用的直接线性拉伸公式为

$$K(x, y) = 255 \times \frac{F'(x, y) - \min\{\min[F(x, y)]\}}{\max\{\max[F(x, y)]\} - \min\{\min[F(x, y)]\}}, \quad (7)$$

其中, $K(x, y)$ 为线性拉伸输出值, $F'(x, y)$ 为当前像素的值, $F(x, y)$ 为反射分量图像。

由(7)式拉伸后的图像, 其灰度范围较大, 一般难以获得满意的结果。许多学者对其进行改进, 如基于伽马校正 (Gamma)^[11]、Sigmoid^[12-13] 函数来增强反射图像。本研究针对图像暗区域(背景区域)的过增强这一不足, 引入 Gamma 函数, 即先将对数域输出值进行线性拉伸, 再输入到 Gamma 函数中。其表达式为

$$R'(x, y) = R(x, y)^{k\gamma}, \quad (8)$$

$$R(x, y) = \frac{F(x, y) - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}}, \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \exp[R(x, y)]}, \quad (10)$$

其中, $R'(x, y)$ 为拉伸后的输出图像, F_{\max} 为反射分量图像最大值, F_{\min} 为反射分量图像最小值, k 为调节参数。本研究以对数域输出值的线性拉伸值为 Gamma 函数的底数, 同时用 (10) 式代替传统 Gamma 函数中的常数指数。绘制 (9) 式、(10) 式得图 1, 可以看出, $R(x, y) \in (0, 1]$, $\gamma \in \left(\frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right]$ 且具有递减特性, 即当 $R(x, y)$ 较大时, γ 较小, $R'(x, y)$ 较大; 当 $R(x, y)$ 较小时, γ 较大, $R'(x, y)$ 较小。

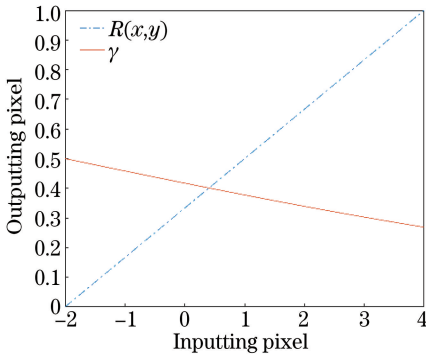


图 1 Gamma 函数中底数 $R(x, y)$ 与指数 γ 关系

Fig. 1 Relation between the base number $R(x, y)$ and the index γ in Gamma function

由图 2 可以发现, 改进的非线性拉伸曲线在暗区域增长较为缓和, 在亮区域增长较为剧烈, 对暗区域的增强明显减弱, 避免了不必要的干扰。

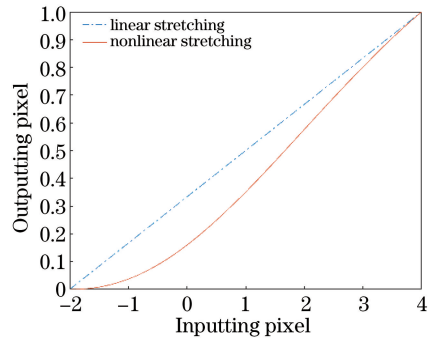


图 2 两种拉伸方法图形比较

Fig. 2 Comparison of two stretching methods

其次, 针对低对比度的不足, 提出用 CLAHE^[14] 对非线性拉伸后的反射分量图像进行进一步修正, 修正后的图像对比度提升, 可以看到更多的细节部分。

CLAHE 即先把图像分块, 获得每块子图的直方图; 然后选定一个阈值, 若直方图高于该阈值则对其进行剪裁, 并将剪裁部分平均分配给各个灰度区间; 再次对各子块进行直方图均衡; 最后采取双线性插值法消除因分块处理而产生的块效应。主要公式如下:

$$H_{\text{ist}}(i) = \begin{cases} H_{\text{ist}}(i) + L, & H_{\text{ist}}(i) < T \\ H_{\text{max}}, & H_{\text{ist}}(i) \geq T \end{cases}, \quad (11)$$

其中, $H_{\text{ist}}(i)$ 为输出直方图高度, H_{max} 为允许输出直方图的最大高度, T 为截取阈值, L 为图像上升高度。将裁剪部分平均分配给各个灰度区间, 以保证直方图总面积不变, 从而使直方图上升 L 。

2.4 形态学处理

对图像进行 Retinex 图像增强时, 假设光照均匀, 即图像中的光照分量在各处分布均匀, 但实际采集的图像存在光照不均匀的问题, 故 2.2 节得到的反射分量混入了部分光照分量。采用顶帽变换^[15]可以有效减弱光照不均的影响, 去除反射分量中混入的光照分量, 提高对比度。其表达式为

$$f' = f - f \circ b \quad (12)$$

其中, f' 为顶帽变换后输出图像, $f(x, y)$ 为输入图像, $b(x, y)$ 为结构元素, $f \circ b$ 为形态学开运算。形态学开操作可用来去除尺寸较结构元小的亮点, 其表达式为

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b, \quad (13)$$

其中: \ominus 为腐蚀符号; \oplus 为膨胀符号; D_b 为结构元素的定义域; $(x+x')$ 、 $(y+y')$ 、 $(x-x')$ 、 $(y-y')$ 均在图像 f 的定义域。

2.5 实验分析

本研究随机选取了 5 组含有划痕、折痕缺陷的手机膜图像在 MATLAB R2017b 平台进行仿真实

$$\begin{cases} (f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x+x', y+y') - b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\} \\ (f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x-x', y-y') + b(x', y') \mid (x', y') \in D_b\} \end{cases}, \quad (14)$$

验,分别采用 SSR 算法、文献[4]算法、CLAHE 算法以及本文改进算法对手机膜缺陷图像进行处理,增强效果如图 3~7 所示。

从效果图可以看出,SSR 算法、CLAHE 算法在

一定程度上可以增强图像,但一些暗细节的增强效果不佳,如图 3~7 中所框选的部分所示。文献[4]中算法的增强效果不稳定,部分图像存在晕影和细节丢失。而改进后的 Retinex 算法可以有效提高缺

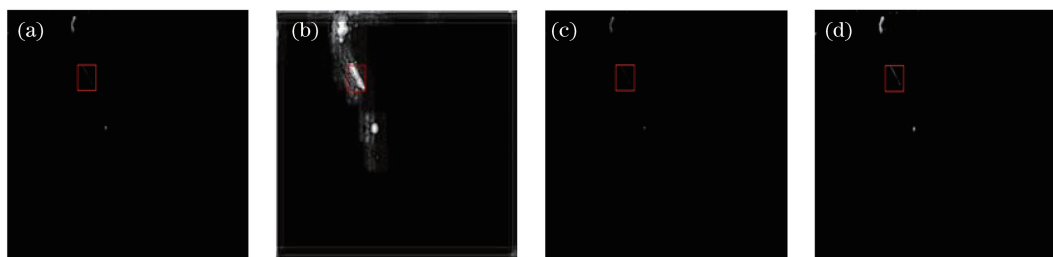


图 3 对划痕 1 的增强效果对比图。(a) SSR; (b) 文献[4]算法; (c) CLAHE; (d) 本文算法

Fig. 3 Comparison of the enhancement effect for scratch 1. (a) SSR; (b) algorithm in Ref. [4]; (c) CLAHE; (d) our algorithm

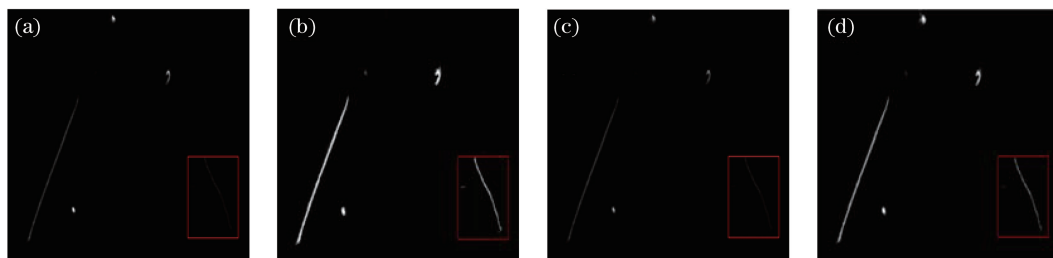


图 4 对划痕 2 的增强效果对比图。(a) SSR; (b) 文献[4]算法; (c) CLAHE; (d) 本文算法

Fig. 4 Comparison of the enhancement effect for scratch 2. (a) SSR; (b) algorithm in Ref. [4]; (c) CLAHE; (d) our algorithm

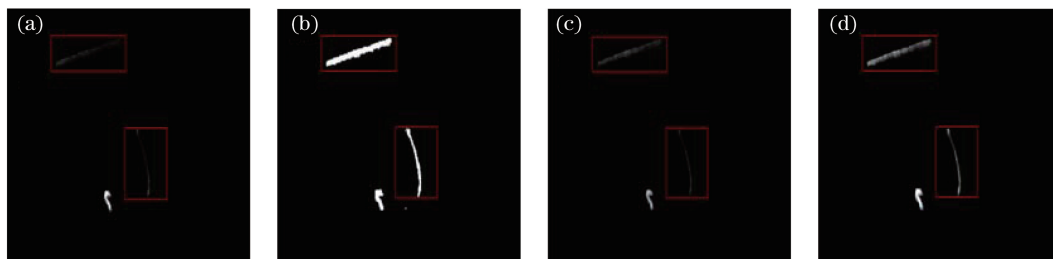


图 5 对划痕 3 的增强效果对比图。(a) SSR; (b) 文献[4]算法; (c) CLAHE; (d) 本文算法

Fig. 5 Comparison of the enhancement effect for scratch 3. (a) SSR; (b) algorithm in Ref. [4]; (c) CLAHE; (d) our algorithm

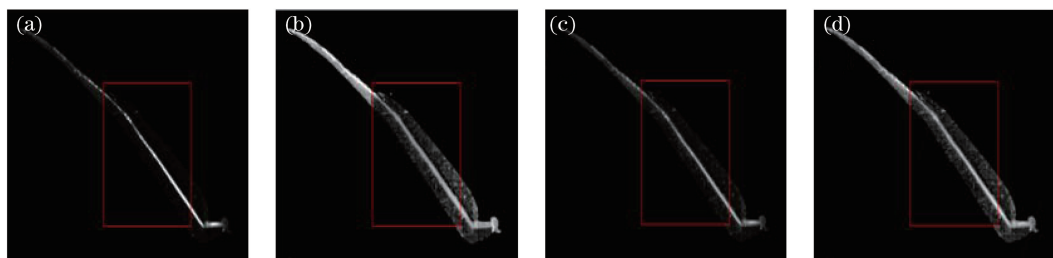


图 6 对折痕 1 的增强效果对比图。(a) SSR; (b) 文献[4]算法; (c) CLAHE; (d) 本文算法

Fig. 6 Comparison of the enhancement effect for crease 1. (a) SSR; (b) algorithm in Ref. [4]; (c) CLAHE; (d) our algorithm

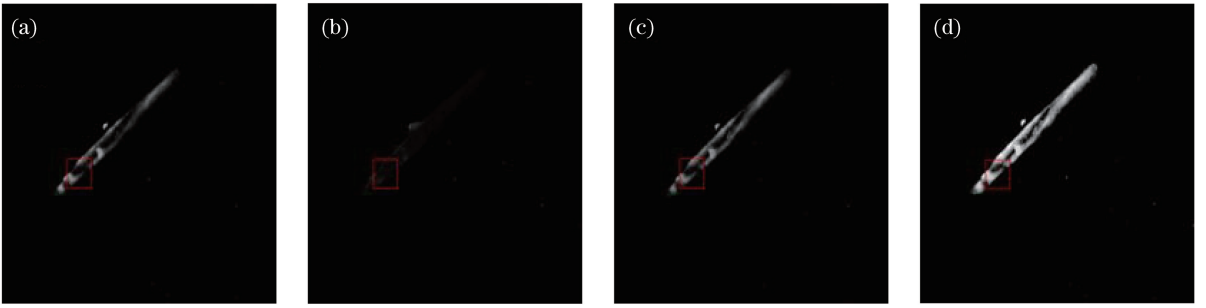


图7 对折痕2的增强效果对比图。(a) SSR; (b)文献[4]算法; (c)CLAHE; (d)本文算法

Fig. 7 Comparison of the enhancement effect for crease 2. (a) SSR; (b) algorithm in Ref. [4]; (c) CLAHE; (d) our algorithm

陷图像的对比度,具有更好的视觉效果。

利用信息熵、对比度和时间3项指标定量评价SSR算法、文献[4]中的算法、CLAHE以及本文改进算法对手机膜缺陷图像的增强效果。信息熵反映了图像的信息量,其值越大,说明图像所含信息越丰富;标准差反映了图像像素值的离散程度,其值越大,说明对比度越高,增强效果越好。计算公式如下:

信息熵可表示为

$$H = - \sum_{i=1}^{255} P_i \log(P_i), \quad (15)$$

其中, i 表示在 $[0, 255]$ 区间内的像素灰度级, P_i 表示该像素级在图像中所占的比例。

平均亮度可表示为

$$R_{\text{mean}} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y)}{M \times N}, \quad (16)$$

表1 不同算法的对比度指标对比结果

Table 1 Comparison results of contrast of different algorithms

Algorithm	Fig. 3	Fig. 4	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
SSR	0.012	0.022	0.029	0.070	0.052
Algorithm in Ref. [4]	0.135	0.066	0.103	0.114	0.011
CLAHE	0.008	0.016	0.022	0.057	0.044
Our algorithm	0.019	0.040	0.040	0.083	0.084
Original image	0.007	0.014	0.019	0.043	0.027

表2 不同算法的信息熵指标对比结果

Table 2 Comparison results of information entropy of different algorithms

Algorithm	Fig. 3	Fig. 4	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
SSR	0.036	0.177	0.154	1.075	0.433
Algorithm in Ref. [4]	1.344	0.178	0.097	1.058	0.398
CLAHE	0.040	0.178	0.250	1.036	0.471
Our algorithm	0.042	0.195	0.197	1.291	0.541
Original image	0.034	0.154	0.154	0.865	0.358

标准差可表示为

$$R_{\text{std}} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) - R_{\text{mean}}^2}{M \times N}}, \quad (17)$$

其中, $f(x, y)$ 为图像在 (x, y) 处的亮度值, $M \times N$ 为图像大小。

表1和表2给出不同算法的对比度和信息熵指标对比结果,表3给出不同算法的耗时对比结果。从表1和表2的数据可以看出,本文算法的2个指标均高于SSR算法、CLAHE算法,并且处理时间相近,耗时较短。同时也可以看出,文献[4]算法对于不同图片,其指标计算结果离散度较大,很不稳定,并且处理时间远大于本文算法,其稳定性和处理速度都不满足在线检测的要求。综上所述,本文算法能够有效地增强缺陷图像的对比度,保持图像的细节部分,还可以满足检测系统的实时性要求。

表 3 不同算法的耗时对比结果

Table 3 Comparison of time-consuming of different algorithms

unit: s

Algorithm	Fig. 3	Fig. 4	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
SSR	0.319	0.301	0.309	0.308	0.493
Algorithm in Ref. [4]	6.325	8.138	9.074	10.236	10.334
CLAHE	0.313	0.293	0.250	0.259	0.303
Our algorithm	0.396	0.378	0.378	0.440	0.487

3 基于梯度的图像分割

对图像采用本文改进的 Retinex 增强算法增强后分割,发现增强前对比度较低细节可以被有效地分割出来,但是划痕、折痕缺陷边缘处较暗的像素不能被完整地分割,对此本研究提出基于梯度的图

像分割算法。

3.1 Sobel 边缘检测

Sobel 算子是一个离散性差分算子,用来计算图像亮度函数的梯度近似值。该算子包含水平和垂直两个方向的模板,将其与图像进行卷积运算,即可分别得出水平和垂直方向的亮度差分近似值,其表达式为

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \mathbf{I}, \mathbf{G}_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * \mathbf{I}, \quad (18)$$

其中, \mathbf{I} 表示原始图像, \mathbf{G}_x 、 \mathbf{G}_y 分别表示水平及垂直方向的梯度分量。则图像梯度的幅值为

$$\mathbf{G} = \sqrt{\mathbf{G}_x^2 + \mathbf{G}_y^2}. \quad (19)$$

通过 Sobel 算子求出梯度图像,使其与增强后的图像点乘,获得标记图像。以图 4 中的划痕 2 为例,其标记图像如图 8 所示。标记图像中背景像素、

一些缺陷内部像素为零,而缺陷的边缘像素不为零,减少了内部高亮像素的影响,有利于较暗的边缘像素的有效分割。表达式为

$$I'(x, y) = I(x, y) \cdot G(x, y), \quad (20)$$

其中, $I'(x, y)$ 为标记图像, $I(x, y)$ 为增强后的缺陷图像, $G(x, y)$ 为梯度图像。

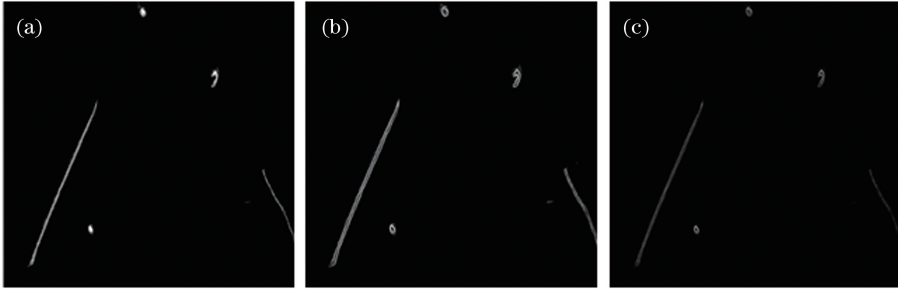


图 8 标记结果图。(a)缺陷增强图;(b)梯度图;(c)标记图像

Fig. 8 Marked results graphs. (a) Defect enhancement image; (b) gradient image; (c) marked image

3.2 OTSU 算法

采用 OTSU 算法来计算 $I'(x, y)$ 的直方图,并以此阈值来全局地分割 $I(x, y)$ 。设 T 为前景与背景的分割阈值,前景像素在图像中占比为 w_0 ,前景的平均灰度为 u_0 ,背景像素在图像中占比为 w_1 ,背

景的平均灰度为 u_1 ,则图像的平均灰度为

$$u_T = w_0 u_0 + w_1 u_1. \quad (21)$$

类间方差 σ^2 为

$$\sigma^2 = w_0 (u_0 - u_T)^2 + w_1 (u_1 - u_T)^2, \quad (22)$$

则最佳阈值为

$$T = \operatorname{argmax} \sigma^2 = \operatorname{argmax} \{w_0 (u_0 - u_T)^2 + w_1 (u_1 - u_T)^2\} = \operatorname{argmax} \{w_0 w_1 (u_1 - u_0)^2\}. \quad (23)$$

对增强图像分别进行 OTSU 处理和本文分割算法处理,如图 9 和图 10 所示,可以发现经本文分

割算法处理后,一些亮度较暗的划痕可以被明显地分割出来,划痕断裂减少,图像分割完整。

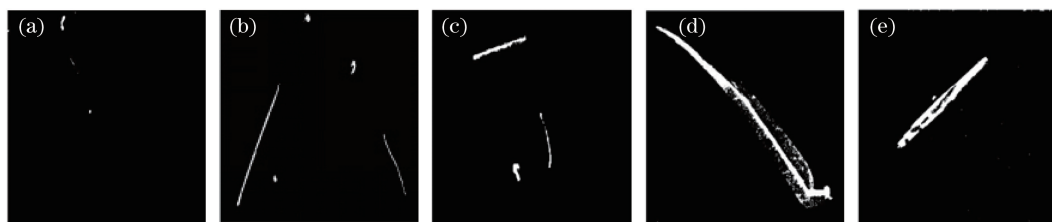


图9 OTSU的分割结果。(a)图3;(b)图4;(c)图5;(d)图6;(e)图7

Fig. 9 Segmentation results of OTSU. (a) Fig. 3; (b) Fig. 4; (c) Fig. 5; (d) Fig. 6; (e) Fig. 7

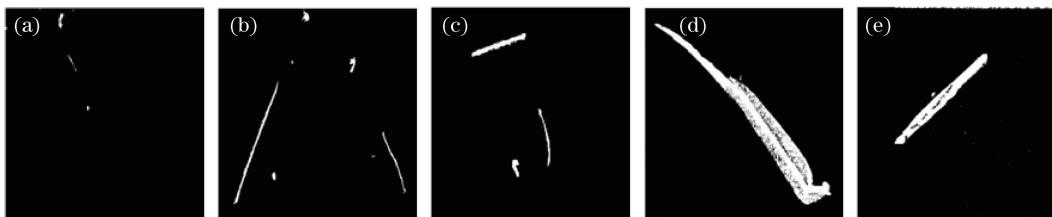


图10 本文算法的分割结果。(a)图3;(b)图4;(c)图5;(d)图6;(e)图7

Fig. 10 Segmentation results of our algorithm. (a) Fig. 3; (b) Fig. 4; (c) Fig. 5; (d) Fig. 6; (e) Fig. 7

4 结 论

提出低对比度时手机膜缺陷图像的分割算法。算法包括两个算法:1)自适应 Retinex 图像增强算法,增强后的图像相较于原缺陷图像,信息熵提升约 20%,对比度提升约 100%,具有较好的整体视觉效果。2)基于梯度图像的分割算法,可以使缺陷边缘较暗的像素得到有效分割。实验结果表明,本文提出的算法在增强图像对比度以及分割缺陷图像的效果上都较好,具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Zhang Y, Shen H H, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 438-448.
王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438-448.
- [2] Land E H, McCann J J. Lightness and Retinex theory[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1-11.
- [3] Hu W W, Wang R G, Fang S, et al. Retinex algorithm for image enhancement based on bilateral filtering[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31(2): 104-109.
胡韦伟,汪荣贵,方帅,等. 基于双边滤波的 Retinex 图像增强算法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(2): 104-109.
- [4] Duan H Y, He W S, Li S J. Face recognition based on improved single scale Retinex and LBP algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2018,

54(23): 144-149.

段红燕,何文思,李世杰. 改进的单尺度 Retinex 和 LBP 结合的人脸识别[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(23): 144-149.

- [5] Li H Y, Zhu Y F, Huang Y. Improved night image enhancement algorithm based on Retinex[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(6): 104-108.
李宏宇,朱一峰,黄怡. 基于 Retinex 改进的夜间图像增强算法[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(6): 104-108.
- [6] Nobuyuki A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [7] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.
- [8] Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale Retinex for color image enhancement [C] // Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing. September 19-19, 1996, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE Press, 1996: 1003-1006.
- [9] Petro A B, Sbert C, Morel J M. Multiscale Retinex [J]. Image Processing on Line, 2014, 4: 71-88.
- [10] Zhao W, Ju M Y, Li Z S. A license plate image enhancement algorithm under complicated illumination [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 976-985.

- 赵伟, 鞠美玉, 李子双. 复杂光线下的车牌图像增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 976-985.
- [11] Tu Q H, Dai S K. Adaptive Retinex image enhancement based on domain transform filter [J]. Computer Engineering and Science, 2016, 38(9): 1830-1835.
- 涂清华, 戴声奎. 基于域滤波的自适应 Retinex 图像增强[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(9): 1830-1835.
- [12] Zhang C, Tan N L, Li X, et al. Foggy image enhancement technology based on improved Retinex algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 309-316.
- 张驰, 谭南林, 李响, 等. 基于改进型 Retinex 算法的雾天图像增强技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 309-316.
- [13] Guo R, Dang J W, Shen Y, et al. Fog removal algorithm of improved single-scale Retinex image[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2018, 37(6): 69-75.
- 郭瑞, 党建武, 沈瑜, 等. 改进的单尺度 Retinex 图像去雾算法[J]. 兰州交通大学学报, 2018, 37(6): 69-75.
- [14] Zuiderveld K. Contrast limited adaptive histogram equalization [M] // Graphics Gems. Amsterdam: Elsevier, 1994: 474-485.
- [15] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L, et al. Digital image processing using MATLAB[M]. Ruan Q Q, Transl. 15th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 276-280.
- Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L, 等. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 阮秋琦, 译. 15版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 276-280.