

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.09.013

结合加权模板差图与双边滤波的 TFT-LCD 检测算法*

严成宸¹ 金施群^{2,3,4} 闫真真¹ 胡海兵^{2,3,4}

(1. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009; 2. 合肥工业大学光电技术研究院 合肥 230009; 3. 特种显示技术教育部重点实验室 合肥 230009; 4. 现代显示技术省部共建国家重点实验室 合肥 230009)

摘要:为了检测薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)面板上常见的点缺陷和线缺陷,提出了一种加权模板差图法与双边滤波相结合的缺陷检测算法。选取待检图左上角 $l \times k$ 大小的理想纹理模板,将原图分割为若干相同大小的单元,与加权的模板相减后再合成以去除大部分纹理背景;采用双边滤波抑制残余纹理背景;采用最大熵法分割缺陷;最后提取图像中的缺陷参数。通过对构造的理论缺陷图试验,验证了算法能检测出 TFT-LCD 面板图像上的缺陷,再对针孔、划痕、颗粒等样本缺陷进行试验并成功检出。算法结合了差图法去背景性能优异和双边滤波去噪效果明显的优点,具有良好的准确性和适用性。

关键词: TFT-LCD; 缺陷检测; 差图法; 双边滤波; 最大熵分割

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

TFT-LCD detection algorithm combining weighted template difference image and bilateral filtering

Yan Chengchen¹ Jin Shiqun^{2,3,4} Yan Zhenzhen¹ Hu Haibing^{2,3,4}

(1. Instrument Science and Opto-electric Engineering College, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, Hefei 230009, China; 4. National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to detect common point and line defects on TFT-LCD panels, a defect detection algorithm combining weighted template difference image method and bilateral filtering is proposed. The image is divided into several units with the same size, in which an ideal texture template with the size of $l \times k$ in the upper left corner is selected. These units are synthesized after subtracting the weighted template in order to remove most of the texture background. The suppression of residual texture background is achieved by bilateral filtering. The maximum entropy threshold segmentation method is used to realize the defect segmentation. Finally, the defect parameters in the image are extracted. It is proved that the algorithm can detect the defects on the TFT-LCD panel image through testing the constructed theoretical defects image, and it is verified that the defects of pinhole, scratch and particles are successfully detected. The proposed algorithm combines the advantages of the well-background-removing performance of the difference image method and the effective denoising of bilateral filtering, which has good accuracy and applicability.

Keywords: TFT-LCD; defect detection; difference image method; bilateral filtering; maximum entropy segmentation

0 引言

薄膜晶体管液晶显示器(thin film transistor-liquid crystal display, TFT-LCD),其构造是在上下两个基板即 C/F 玻璃和 TFT 玻璃之间注入液晶,两片玻璃中间有许多垂直和水平的细小电线,通过通电与否来控制杆状液晶分子改变方向,将光线折射出来产生画面。TFT-LCD

薄膜晶体管液晶显示器(thin film transistor-liquid

上下两面板在制造的过程中会出现一些常见的缺陷,根据形状尺寸将其分为3类:点缺陷、线缺陷、MURA缺陷。

国内外很多学者对点、线缺陷的自动光学检测法做过详细的研究,如基于独立成分分析的图像重构法^[1]、基于奇异值分解的图像重构法^[2]、低阶矩阵重构方法^[3]、局部线性嵌入法^[4]、核主成分分析(KPCA)^[5]、基于一维离散傅里叶变换(DFT)和小波分解法^[6]、基于约束性独立主成分分析(ICA)模型的卷积滤波法^[7]等,以及国内外其他学者的方法^[8-10]。其中,传统的差图法通常需要大量内存空间来储存模板图像,生成模板图像耗时较长,有的方法对待检的缺陷种类有针对性,有的计算复杂且参数设置较多,有的对噪声抑制效果不佳,有的甚至不能保存缺陷信息。在对 mura 缺陷检测时为去除背景干扰采用的 Gabor 滤波法^[11-12]、曲面拟合法^[13],对未点亮的 LCD 面板检测时会在抑制背景的同时扩大缺陷的区域范围,不利于提取正确的缺陷参数,或是因为背景复杂导致三维参数十分离散,无法拟合光滑的曲面方程。为此,本文设计使用了一种简单的差图法,结合现下在医学影像噪声处理和 SAR 图像相干斑抑制等方面有着广泛应用的双边滤波^[14-15],在图像分割^[16]提取缺陷的基础上,重点研究针对复杂背景下点、线缺陷的检测算法。

1 缺陷特征提取算法

1.1 加权模板差图法去除背景

整个 TFT-LCD 面板的显示区域就是由数百万个独立 TFT 元件控制的重复的像素矩阵构成,在低分辨率下 CCD 获取的无缺陷 TFT-LCD 面板表面图像如图 1 所示,可见低分辨率面板图像上有规律性的水平栅极线和垂直数据线,因此采集到的图像含有重复性的纹理背景。图 1 中纹理网格中的每一格即为实际显示面板上的一个像素单元。



图 1 无缺陷图像
Fig. 1 Non-defect image

通常,获取的 TFT-LCD 面板图像大部分区域是无缺陷的,根据自我比较法的思想,选取本图像中无缺陷的部

分作为差图的理想纹理模板单元,然后将待检面板图像与模板单元进行遍历差分运算,获得的残影图像可保留面板上的缺陷,同时去除大部分纹理背景。其中,理想纹理模板单元的选取是重点。

假设待检面板图像的左上角区域是没有缺陷的,考虑到选取单个像素单元作为模板存在较大偶然性,同时为避免差分过程中待检图像某个部分被漏检,故从待检面板图像左顶点开始,选取长 l 、宽 k 的矩形区域作为理想纹理模板单元 I_{cell} 。

考虑到各单元的亮度不均匀,引入亮度校正因子 w ,按式 1~3 将待检面板图像 I_{ori} 与理想纹理模板单元 I_{cell} 遍历差分运算,得到输出的残影图像 I_{out} 。具体方法如下:

$$I'_{ij} = I_{ij} - w \cdot I_{\text{cell}} \quad (1)$$

$$w = \text{mean}_{ij} / \text{mean}_{\text{cell}} \quad (2)$$

式中: $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$ 。

I_{ij} 为 I_{ori} 从坐标 $[1 + (i - 1) \times l, 1 + (j - 1) \times k]$ 开始的 $l \times k$ 大小的图像单元, I'_{ij} 为亮度校正后的图像单元; mean_{ij} 为 I_{ij} 的灰度均值, $\text{mean}_{\text{cell}}$ 为 I_{cell} 的灰度均值; n, m 可以由 I_{ori} 的长、宽分别除以 I_{cell} 的长 l 、宽 k 得到。将 I'_{ij} 按 $i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ 的顺序从左上角依次拼接起来,合成一幅完整的输出图像 I_{out} 。

1.2 双边滤波抑制残余纹理背景

经差图法处理后的残影图像,由于相机标定的误差或环境振动因素等的影响,导致图片存在左右倾斜、各像素矩阵大小不一致等问题,仍然会保留一部分未成功去除的纹理背景。这些残余纹理背景可以认为是图像上的噪点,可采用滤波法对其抑制,以便下一步对缺陷进行分割测算。

双边滤波算法(bilateral filtering)^[14],作为高斯滤波的改进算法,同时对像素域的像素值和空间域像素位置进行了局部的加权平均。在空间域,权值随着空间距离的增加而变小;在像素域,权值随着像素差值的增大而减小。

假设原输入图像 X 在坐标点 $p(i, j)$ 的像素值为 X_p ,滤波后的图像 Y 在坐标点 p 的像素值为 Y_p ,则双边滤波算法的公式表示如下:

$$Y_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_v}(\|X_p - X_q\|) X_q \quad (3)$$

其中,

$$W_p = \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_v}(\|X_p - X_q\|) \quad (4)$$

式中: $q(u, v)$ 是中心像素 p 的一个邻域像素点,邻域像素的集合为 S , W_p 为归一化因子。 G_{σ_s} 为空间高斯核函数, G_{σ_v} 为像素值的高斯核函数,其表达式分别为:

$$G_{\sigma_s}(\|p - q\|) = \frac{1}{2\pi\sigma_s^2} \exp\left[-\frac{(i-u)^2 + (j-v)^2}{2\sigma_s^2}\right] \quad (5)$$

$$G_{\sigma_r}(\|X_p - X_q\|) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left[-\frac{(X_p - X_q)^2}{2\sigma_r^2}\right] \quad (6)$$

式中： σ_s 是滤波窗口内基于高斯核函数的像素空间距离标准差， σ_r 是像素灰度值标准差。在选取合适滤波窗口的前提下，它们可以通过改变像素相对于滤波窗口的空间位置和像素值的变化范围来改变加权值。

1.3 基于最大熵的缺陷分割

熵是图像统计特性的一种表现形式，反映了图像包含信息量的大小。经分割后的二值图像的熵值越大，表明分割图像的细节越丰富，分割效果越好。采用基于最大熵的阈值分割算法，受目标缺陷大小的影响小，能实现高精度的分割。

对于一幅灰度级为 $L(0 < L \leq 255)$ 大小为 M 行 N 列的灰度图像， $f(x, y)$ 表示坐标为 (x, y) 的像素的灰度值。计算分割阈值分为以下 3 步。

1) 计算整张图像中灰度级 i 出现的概率 p_i 。

$$p_i = \frac{N_i}{N_{\text{image}}} \quad (7)$$

式中： N_i 为图像中灰度值为 i 的像素点总数， N_{image} 为整幅图像像素总数。

2) 分割阈值从 0 ~ 255 遍历，计算每个阈值分割后前景和背景的熵，故图像前景和背景熵值分别为：

$$E_o = - \sum_{i=0}^{Th} (p_i/p_{Th}) \cdot \ln(p_i/p_{Th}) \quad (8)$$

$$E_B = - \sum_{i=Th+1}^{255} [p_i/(1 - p_{Th})] \cdot \ln[p_i/(1 - p_{Th})] \quad (9)$$

式中： $p_{Th} = \sum_{i=0}^{Th} p_i$ 。

3) 前景熵与背景熵之和最大时对应的灰度，即为所求阈值：

$$E = E_o + E_B \quad (10)$$

$$Th^* = \text{Argmax}(E) \quad (11)$$

1.4 参数特征提取

TFT-LCD 屏的缺陷种类较多，且表现各异，对于不同特点的缺陷要进行具体的分析，以选用能够准确反映图像中缺陷的类型、性质和状态等特征的图像特征值。点缺陷一般为单个像素面积，缺陷类型为亮点或者暗点，而相邻的多个点缺陷则尤为严重，所以判断点缺陷需考虑面积和位置两个特征参数。线缺陷一般宽度为单个像素，而长轴方向贯穿屏幕纵轴或横轴方向的一排亮点或暗点，可通过面积、位置和矩形度 3 个特征参数来判定。

样本图像中缺陷的面积、位置和矩形度可由下列公

式得出。

1) 位置(质心)：

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i,j \in U} x_{ij} \\ \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i,j \in U} y_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

式中： U 表示缺陷存在的区域。

2) 面积：

$$\text{Area} = \sum_{i,j \in U} 1 \quad (13)$$

3) 矩形度：

$$\sigma = A_s/A_R \quad (14)$$

式中： A_s 表示缺陷区域 S 的面积， A_R 表示包围该区域的最小矩形面积。

2 实验结果

2.1 算法理论验证

为了验证本文所述算法的正确性，在图 1 基础上构造一张带有 4 个缺陷的图(256 pixels × 256 pixels, 8 位灰度级)，如图 2 所示，从图像左侧到右侧依次用 5×5 、 40×2 、 30×1 、 2×2 和 255 像素面积的缺陷来分别模拟各种大小的线缺陷和点缺陷。以 MATLAB R2014a 为工具编写算法程序，先对图 2 进行实验来验证本算法的正确性。具体算法流程如图 3 所示。

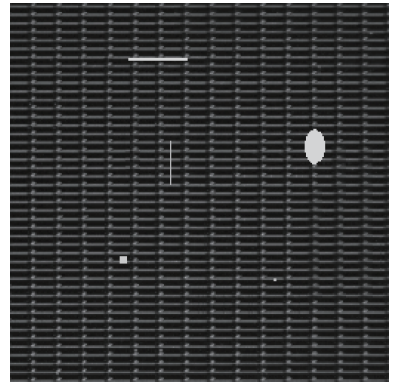


图2 构造的理论缺陷图

Fig. 2 Theoretical defect image of structure

由图 2 的长、宽分别除以每行、每列像素单元的数量可以得到每个像素单元的长度约为 17 个像素、宽度约为 6 个像素。为了尽可能的将整幅图都检测到，经多次实验，从本图左上点开始，选取 3×4 个像素单元作为理想纹理模板单元 $I_{\text{cell}}(52 \times 23$ 像素面积) 实验效果最佳，如图 4 中标注的位置 1。由于选取的单元大小会导致图中右侧一列漏检，故先将其不足区域补 0，使原图能被完整差分。经差图法处理后的图像如图 5 所示。

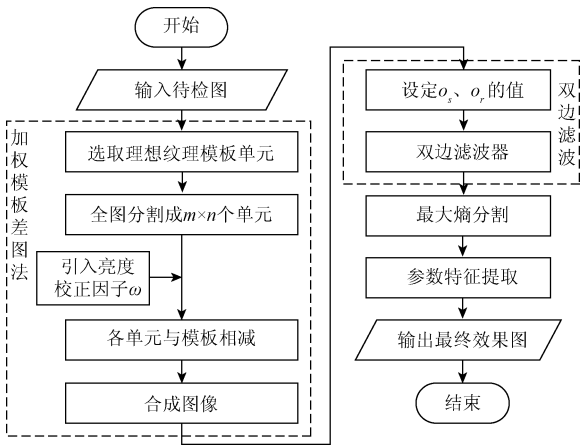


图3 算法流程

Fig.3 Flow chart of algorithm

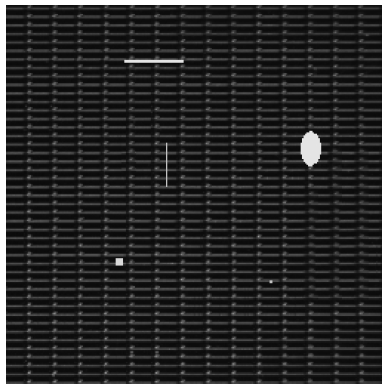


图4 选取理想纹理模板单元

Fig.4 Selected ideal texture template unit

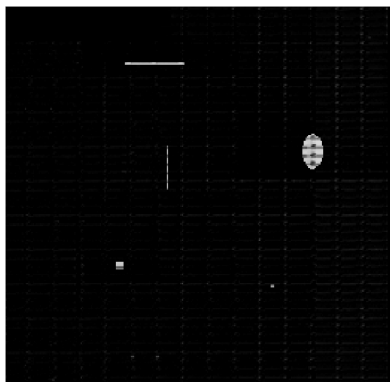


图5 差图法效果

Fig.5 Result of difference image method

在双边滤波试验部分, σ_s 决定了空间域高斯核函数的径向作用范围, 其值越大, 残余纹理背景和表面缺陷滤除越明显, 反之残留越明显。 σ_r 则决定了像素域的径向作用范围, 其值越大, 图中表面缺陷与残余纹理背景的亮度越低, 反之越高。在实验中, σ_s 取 1 ~ 6, 间隔为 1, σ_r

取 0.05 ~ 0.3, 间隔为 0.05, 发现取 $\sigma_s = 3, \sigma_r = 0.2$ 时构建双边滤波窗口效果最佳, 既能完全移除残余背景而又能同时保留缺陷。图 6 所示为此参数下双边滤波后的输出图像。图 7 为所示经过最大熵分割后的效果图, 此时分割的阈值为 13。表 1 为以图片左上角为零点的像素坐标下提取出的部分特征参数, 按缺陷在图中的位置从左到右依次编号, 可以看出各缺陷的面积与先前构造的缺陷数据相同, 证明了该算法能够可靠地检测出 TFT-LCD 面板图像中的缺陷。

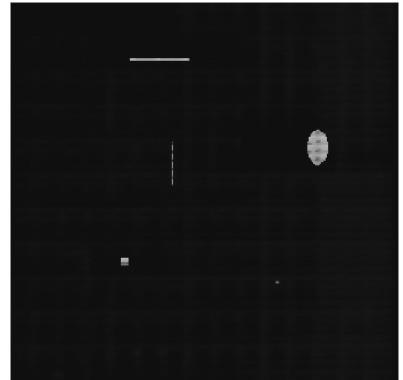


图6 双边滤波效果

Fig.6 Result of bilateral filtering

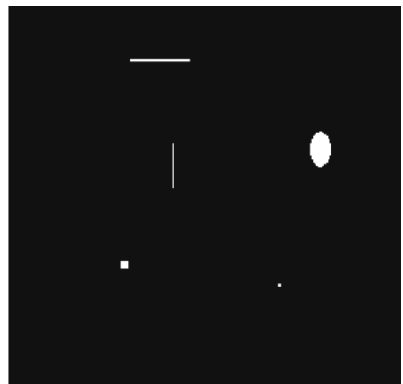


图7 最大熵分割效果

Fig.7 Result of maximum entropy segmentation

表1 图7中的缺陷参数

Table 1 Parameters of defects in Fig.7

编号	质心	面积	矩形度
1	(77.00, 174.00)	25	1
2	(100.50, 38.50)	80	1
3	(109.00, 108.50)	30	1
4	(179.50, 187.50)	4	1
5	(206.47, 97.55)	255	0.667

2.2 缺陷图检测

图 8(a) ~ (c) 所示分别为包含针孔、划痕、颗粒的

LCD 表面缺陷的真实图像(256 pixels × 256 pixels, 8 位灰度级), 图 9 ~ 11 所示分别为其先后经过差图法、双边滤波、最大熵分割后的效果。其中, 通过多次对空间域和像素域的高斯核函数标准差 σ_s 、 σ_r 取值的调试, 双边滤波器中两参数取值如表 2。结合表 2 与图 8 ~ 11 可知, 当图中缺陷尺寸较纹理尺寸偏小时, σ_s 取值偏大些才可避免图上微小缺陷被漏检; 当图中残留背景较多时, σ_r 取值

偏大些才能尽可能地降低背景因亮度高对整体滤波效果的影响。由图 10 可以看出, 如图 9(a) 左下角和右侧有大块的残余纹理背景点, 这些点的灰度值与待检的针孔缺陷灰度值相近, 对接下来的步骤有一定的影响; 这些残留也证明了原图中的背景纹理并不均匀, 而这些问题可以通过对相机焦距和角度的调整来避免; 在纹理方向上的缺陷容易被认为是重复性纹理, 经差图法后亮度会大

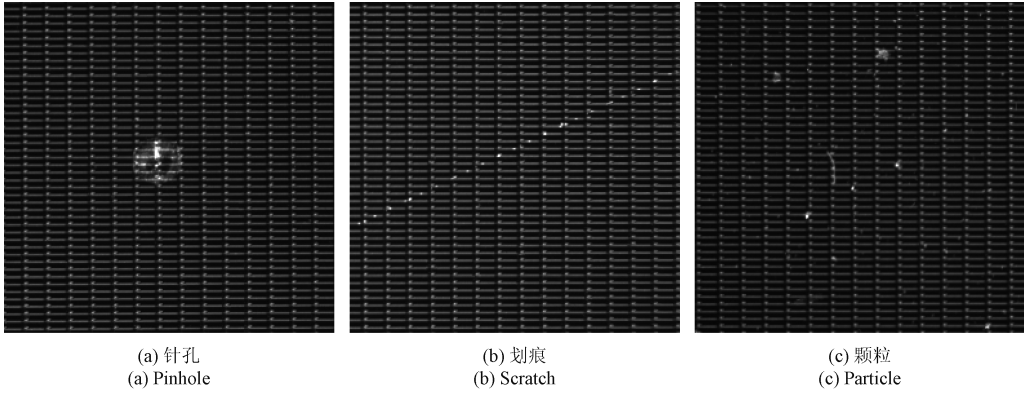


图 8 样本图像
Fig. 8 Sample images

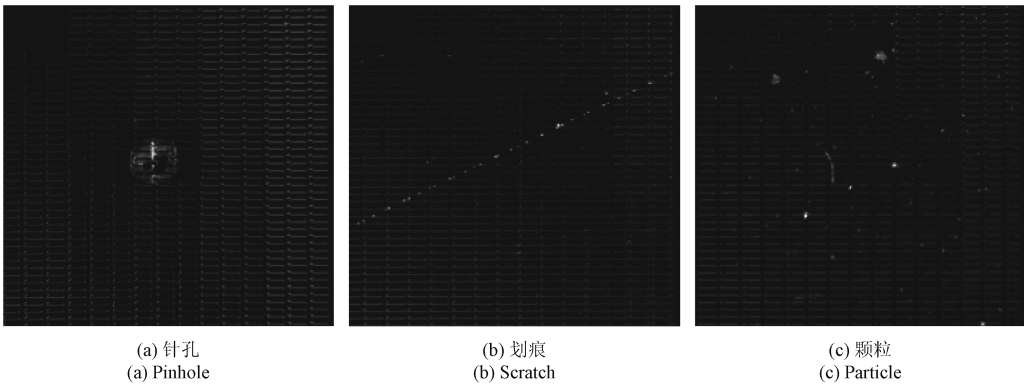


图 9 差图法效果
Fig. 9 Result of difference image method

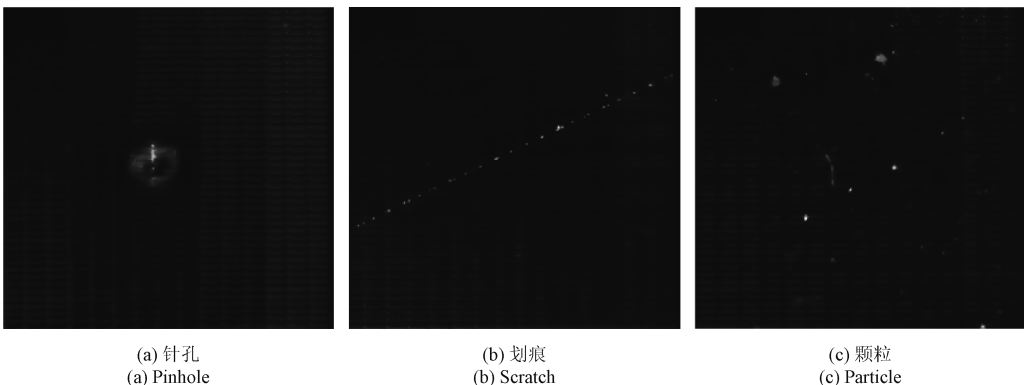


图 10 双边滤波效果
Fig. 10 Result of bilateral filtering

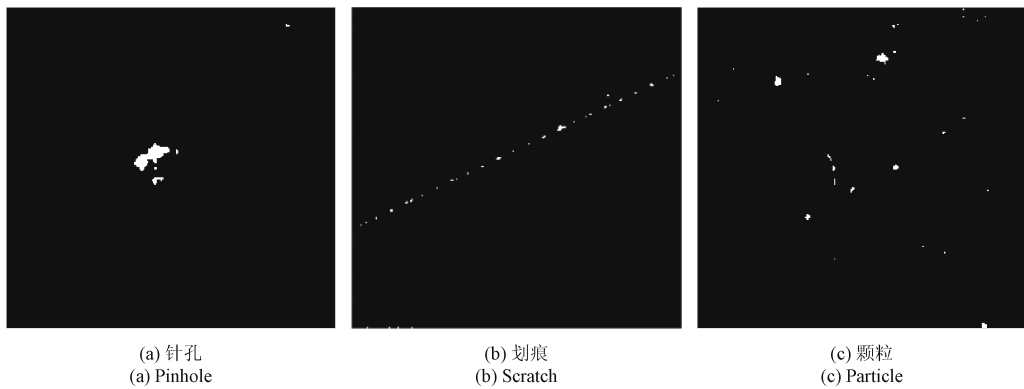


图 11 最大熵分割效果

Fig. 11 Result of maximum entropy segmentation

表 2 高斯核函数参数 σ_s 、 σ_r 的取值Table 2 Value of σ_s , σ_r in Gaussian kernel function

图号	6	10(a)	10(b)	10(c)
σ_s	3	3	4	3
σ_r	0.2	0.2	0.1	0.1

大降低,容易在后续的阈值分割中被置 0。通过图 11 可以看出,经本文提出的算法检测过后,针孔、划痕、颗粒等缺陷都可以被很好的分割出来,形状特征被完好保留,可以实现均匀或非均匀纹理背景的完全去除且残留的噪声点极少,可以提取出相应的参数数据,为对下一步缺陷的分类提供可靠的数据。

3 总结

本文采用差图法和双边滤波原理相结合的方法,对 TFT-LCD 面板上点缺陷和线缺陷进行自动检测处理。通过一种简单的加权模板差图法,模板单元占用内存少,能将缺陷图中规律性纹理背景基本消除;根据不同的缺陷大小和残留背景情况,研究不同参数 σ_s 、 σ_r 设定值对滤波效果的作用规律以构造合适的双边滤波器,从而实现残余纹理噪声的抑制;采用基于最大熵的分割方法分割出点缺陷和线缺陷;最后提取出缺陷的位置、面积及矩形度等参数特征。实验结果表明,本算法原理简单易实现,在抑制背景的同时,将图像中的缺陷轮廓真实地分割出来,不扩大缺陷轮廓,且不需要保存占用较大内存的模板图像,适用于有规律性背景 TFT-LCD 面板的多种点、线缺陷的检测,有良好的准确性和适用性。对于如何在差图法中补偿纹理方向上低对比度缺陷的亮度,以及双边滤波器的参数自动化设置,可作为接下来的研究方向。

参考文献

[1] LU C J, TSAI D M. Independent component analysis-

based defect detection in patterned liquid crystal display surfaces [J]. *Image and Vision Computing*, 2008, 26(7) : 955-970.

[2] LU C J, TSAI D M. Automatic defect inspection for LCDs using singular value decomposition [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005, 25(1-2) : 53-61.

[3] CEN Y G, ZHAO R Z, et al. Defect inspection for TFT-LCD images based on the low-rank matrix reconstruction [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149 (C) : 1206-1215.

[4] LIU Y H, HUANG Y K, LEE M J. Automatic inline defect detection for a thin film transistor-liquid crystal display array process using locally linear embedding and support vector data description [J]. *Measurement Science & Technology*, 2008, 19(9) : 1-16.

[5] LIU Y H, WANG C K, TING Y Z. In-TFT-array-process micro defect inspection using nonlinear principal component analysis [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2009, 10(10) : 4498-4514.

[6] TSAI D M, HUNG C Y. Automatic defect inspection of patterned TFT-LCD panels using 1-D Fourier reconstruction and wavelet decomposition [J]. *International Journal of Production Research*, 2005, 43(21) : 4589-4607.

[7] TSAI D M, LIN P C, LU C J. An independent component analysis-based filter design for defect detection in low-contrast surface images [J]. *Pattern Recognition*, 2006, 39(9) : 1679-1694.

[8] 张腾达, 卢荣胜. 自动周期选取的 DFT 方法在 TFT-LCD 平板检测中的应用 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3) : 361-373.

ZHANG T D, LU R SH. Automatic period selection for DFT method in the application of TFT-LCD panel

- detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3):361-373.
- [9] 张腾达, 卢荣胜, 张书真. 基于二维 DFT 的 TFT-LCD 平板表面缺陷检测[J]. 光电工程, 2016, 43(3):7-15.
ZHANG T D, LU R SH, ZHANG SH ZH. Surface defect inspection of TFT-LCD panels based on 2D DFT [J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(3):7-15.
- [10] 冯小波, 贺臻, 施旭. 机器视觉在 TFT-LCD 点缺陷检测系统中的应用[J]. 现代显示, 2011(9):16-21.
FENG X B, HE ZH, SHI X. Application of machine vision in the TFT-LCD point defect inspection system [J]. Advanced Display, 2011(9):16-21.
- [11] 毕昕, 丁汉. TFT-LCD Mura 缺陷机器视觉检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12):13-19.
BI X, DING H. Machine vision inspection method of mura defect for TFT-LCD [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12):13-19.
- [12] 王新新, 徐江伟, 邹伟金, 等. TFT-LCD 缺陷检测系统的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3):278-284.
WANG X X, XU J W, ZOU W J, et al. Research on detection system for TFT-LCD defects [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3):278-284.
- [13] 张昱, 张健. 基于多项式曲面拟合的 TFT-LCD 斑痕缺陷自动检测技术[J]. 光电工程, 2006, 33(10):108-114.
ZHANG Y, ZHANG J. Automatic blemish inspection for TFT-LCD based on polynomial surface fitting [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(10):108-114.
- [14] 丁伟利, 陈瑜, 马鹏程, 等. 基于阵列图像的自适应光场三维重建算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9):2156-2165.

DING W L, CHEN Y, MA P CH, et al. Study on adaptive light field 3D reconstruction algorithm based on array image [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9):2156-2165.

- [15] 叶崧, 杨万扣. 改进的基于大气光幕单幅图像去雾算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3):50-55.
YE S, YANG W K. Improved single image de hazing method using atmospheric veil [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(3):50-55.
- [16] 李云红, 魏妮娜, 张晓丹. 基于多方向 Gabor 滤波器的图像分割[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(3):20-23.
LI Y H, WEI N N, ZHANG X D. Image segmentation based on multi-direction Gabor filters [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(3):20-23.

作者简介



严成宸, 2014 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学在读硕士生, 主要研究方向为图像处理与机器视觉检测。
E-mail: yanchcfut@163.com

Yan Chengchen received B. Sc. from Hefei University of Technology in 2014. Now he is M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interest includes image processing and machine vision detection.



金施群, 现为合肥工业大学教授, 硕士生导师, 目前主要研究方向为机器视觉理论。
E-mail: shq_king@163.com

Jin Shiqun is a professor and M. Sc. supervisor in Hefei University of Technology. Her main research interest includes machine vision.