



基于有效背景重构和对比度增强的Mura缺陷检测

胡亮, 胡学娟, 黄圳鸿, 徐露, 胡凯, 张家铭

引用本文:

胡亮, 胡学娟, 黄圳鸿, 等. 基于有效背景重构和对比度增强的Mura缺陷检测[J]. 液晶与显示, 2021, 36(10): 1395–1402.

HU Liang, HU Xue-juan, HUANG Zhen-hong, et al. Mura defect detection based on effective background reconstruction and contrast enhancement[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1395–1402.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0177>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自适应局部增强的手机TFT-LCD屏Mura缺陷自动检测

Automatic detection of Mura defect in TFT-LCD mobile screen based on adaptive local enhancement

液晶与显示. 2018, 33(6): 475–482 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183306.0475>

基于改进Otsu算法的TFT-LCD点缺陷自动光学检测系统

Automatic optical detection system for TFT-LCD spot-type defect based on improved Otsu algorithm

液晶与显示. 2018, 33(3): 221–227 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183303.0221>

基于改进Chan-Vese模型的液晶显示屏Mura缺陷分割

LCD Mura defect image segmentation based on improved Chan-Vese model

液晶与显示. 2016, 31(6): 613–620 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163106.0613>

TFT-LCD一种绿Mura机理分析和改善

Mechanism analysis and improvement of TFT-LCD green Mura

液晶与显示. 2021, 36(8): 1136–1143 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0337>

基于深度学习的木材表面缺陷图像检测

Image detection of wood surface defects based on deep learning

液晶与显示. 2019, 34(9): 879–887 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193409.0879>

文章编号:1007-2780(2021)10-1395-08

基于有效背景重构和对比度增强的 Mura 缺陷检测

胡 亮^{1,2}, 胡学娟^{1,2,3*}, 黄圳鸿^{1,2}, 徐 露^{1,2}, 胡 凯^{1,2}, 张家铭^{1,2}

- (1. 深圳技术大学 中德智能制造学院, 深圳 518118;
2. 广东省先进光学精密制造重点实验室, 深圳 518118;
3. 广东省微纳光机电工程重点实验室, 深圳 518118)

摘要:提出一种基于有效背景重构和对比度增强的 Mura 缺陷检测方法。首先,提出了一种新的基于缺陷区域预剔除的背景重构方法,能够有效地重构背景图像,消除图像亮度不均等干扰。然后,引入了基于 Otsu 的双 γ 分段指数变换法对差分图像进行增强处理,能够有效解决背景残余问题且极大增强了 Mura 区域的对比度和轮廓度。最后,直接运用动态阈值分割方法,可以快速准确地将 Mura 缺陷分离出来。实验结果表明,与传统的多项式曲面拟合方法以及离散余弦变换法相比,本文方法对各种类型的 Mura 缺陷检测效果稳定,且检出率和无误报率均达到了 97% 以上。

关键词:TFT-LCD; Mura 缺陷检测; 背景重构; 分段指数变换

中图分类号:TN141.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0177

Mura defect detection based on effective background reconstruction and contrast enhancement

HU Liang^{1,2}, HU Xue-juan^{1,2,3*}, HUANG Zhen-hong^{1,2}, XU Lu^{1,2},
HU Kai^{1,2}, ZHANG Jia-ming^{1,2}

- (1. Sino-German College of Intelligent Manufacturing,
Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, China;
2. Key Laboratory of Advanced Optical Precision Manufacturing Technology of
Guangdong Provincial Higher Education Institute, Shenzhen 518118, China;
3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Micro/Nano Optomechatronics Engineering,
Shenzhen 518118, China)

Abstract: A Mura defect detection method based on effective background reconstruction and contrast

收稿日期:2021-07-05; **修订日期:**2021-08-03.

基金项目:广东省普通高校特色创新类项目(No. 2021KTSCX111); 深圳市坪山区科技创新专项(No. PSKG202006); 深圳技术大学 2021 年自制实验仪器设备项目(No. 2021015777701059)

Supported by Characteristic Innovation Projects of Colleges and Universities in Guangdong Province (No. 2021ktscx111); Shenzhen Pingshan District Science and Technology Innovation Project (No. pskg202006); Self-made Experimental Instruments and Equipment Project of Shenzhen Technology University in 2021 (No. 2021015777701059)

* 通信联系人, E-mail: huxuejuan@sztu.edu.cn

enhancement is proposed. Firstly, a new background reconstruction method based on defect region pre-elimination is proposed, which can effectively reconstruct the background image and eliminate the interference of uneven brightness. Then, the dual- γ piecewise exponential transform method based on Otsu is introduced to enhance the difference image, which can effectively solve the problem of background residual and better enhance the contrast and contour of Mura region. Finally, the Mura defects can be separated quickly and accurately by using the dynamic threshold segmentation method. The experimental results show that, compared with the traditional polynomial surface fitting method and the discrete cosine transform method, the detection effect of this method for various types of Mura defects is stable, and the detection rate and no false alarm rate are more than 97%.

Key words: TFT-LCD; Mura defect detection; background reconstruction; piecewise exponential transform

1 引言

薄膜晶体管液晶显示器 (Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display, TFT-LCD) 作为新一代发展非常成熟的显示器件, 已经成为电子信息产业重要的核心硬件之一, 其具有分辨率高、无几何变形、轻薄和功耗低等优点, 广泛应用于智能手机、数码相机、平板、显示器等电子设备^[1]。由于其复杂的制造工艺, TFT-LCD 在生产中不可避免地会产生各种类型的缺陷, 主要分为表面缺陷和电气缺陷。其中, Mura 缺陷作为 TFT-LCD 表面缺陷中一种特殊的缺陷, 通常具有对比度低、边缘模糊、形状不规则、检测难度大等特点, 主要表现为 TFT-LCD 显示的局部亮度变化, 会极大影响用户的视觉感受和使用体验^[2]。当前, 相关缺陷主要依靠人工视觉检测, 该方法存在检测成本高、效率低、主观性强等不足。因此, 研究一种准确、快速且符合人眼视觉感知的 Mura 缺陷自动检测方法显得尤为重要。

目前, 国内外有关研究人员已经提出了很多检测 Mura 缺陷的方法, 这些方法主要可分为特征提取法^[3-5]和背景抑制法^[6-13]。特征提取法是一种快速有效的直接提取 Mura 缺陷特征的方法。但是, 该方法的适用性相对较低, 只对具有某些相似特征或特征明显的 Mura 缺陷有效。背景抑制法是通过背景重构和差分有效地从原始图像中分割出 Mura 缺陷, 是当前研究的主流方向之一。Tsai 和 Yun 等人^[6-8]分别提出了基于独立成分分析以及基于主成分分析的背景重建方法来达到抑制 Mura 缺陷检测过程中不均匀背景的影响。这些方法能够很好地检出 Mura 缺陷, 但前期都需要人工操作

去挑选出具有代表性的无缺陷样本图像, 并且对于所检测产品的规格、图像的采集环境等都提出了较高的要求, 整体的灵活性表现较差。一些研究者运用离散余弦变换^[9-10]和离散小波变换^[11]将图像从空间域变换到频率域, 然后对高频信息进行滤波来重构背景。这些方法计算简单, 但在复杂光照和不均匀缺陷背景下, 低对比度的 Mura 缺陷和背景之间的界限比较模糊, 背景抑制效果不佳。还有一些研究者运用曲面拟合的方法进行背景重构, 如多项式曲面拟合^[12-13]、双三次 B 样条曲面拟合^[14]。这一类方法可以有效解决小尺寸 Mura 缺陷的检测问题, 但是如果缺陷区域很大, 由于进行曲面拟合的图像数据是整张图像上的所有数据, 则其中将包含大量的缺陷像素数据, 这会给最终的拟合背景图像造成较大干扰。另外, 近年来随着人工智能技术的不断成熟和发展, 许多学者将其逐步应用到 Mura 缺陷检测中^[15-16], 这为 Mura 缺陷检测研究提供了一个新的方向。

对此, 在对比分析前人研究的基础上, 本文提出了一种基于有效背景重构和对比度增强的 Mura 缺陷视觉检测方法, 能够快速准确地检测出多种类型的 Mura 缺陷。

2 算法描述

图 1 所示为本文算法的主体流程, 主要可分为以下 3 个步骤:

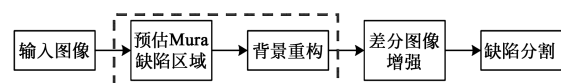


图 1 本文算法流程

Fig.1 Flowchart of the proposed method

Step1: 预估 Mura 缺陷区域——对待检的 TFT-LCD 图像进行离散余弦变换以初步消除图像亮度不均的影响,再运用数学统计学方法对图像进行逐行逐列处理,找出每一行和每一列中可能的缺陷区域并通过逻辑或操作对这些区域进行合并,得到预估的缺陷区域位置。

Step2: 图像有效背景重构——将 step1 中预估的缺陷区域像素剔除掉,运用多项式曲面拟合方法对剩下的像素进行背景拟合,获得有效的背景重构图像。

Step3: 差分图像增强和缺陷分割——运用基于 Otsu 的双 γ 分段指数变换法对差分图像进行增强处理,最后进行阈值分割将 Mura 缺陷从图像中分离出来。

2.1 预估 Mura 缺陷区域

图 2(a)所示为一张含有 Mura 缺陷的 TFT-LCD 图像,不难看出缺陷与背景的对比度非常低,背景的亮度也不均匀。此外,在图像采集过程中还存在噪声等因素的干扰,这些都给 Mura 缺陷的检测增加了不少难度。为了更直观地描述图像的特征,这里将源图像信号 $f(x, y)$ 定义如下:

$$f(x, y) = b(x, y) + d(x, y) + n(x, y), \quad (1)$$

其中, $b(x, y)$ 、 $d(x, y)$ 、 $n(x, y)$ 分别表示背景信号、缺陷信号以及噪声信号。从频域的角度看,背景 $b(x, y)$ 主要为低频信号,噪声 $n(x, y)$ 一般为高频信号,而缺陷 $d(x, y)$ 介于两者之间,所以可以运用频域变换的方法分离高、低频信息以初步消除图像背景亮度不均的影响,本文采用的是离散余弦变换。

2.1.1 离散余弦变换

离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 是图像处理中一种常见的频域变换方法。其拥有非常强的“能量集中”特性,使得图像的大部分能量都集中分布在 DCT 变换后的低频部分,并且其计算复杂度较小^[9]。在此基础上,考虑运用该方法进行图像背景重建。对于一幅 $M \times N$ 的图像 $f(x, y)$ 的离散余弦变换定义为:

$$C(u, v) = \alpha(u)\alpha(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \times \cos\left[\frac{\pi(2x+1)u}{2M}\right] \times \cos\left[\frac{\pi(2y+1)v}{2N}\right], \quad (2)$$

式中: $x, u = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $y, v = 0, 1, 2, \dots, N-1$, $C(u, v)$ 是变换后的 DCT 系数。

$$\alpha(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{M}} & \text{for } u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}} & \text{for } u \neq 0 \end{cases}, \quad \alpha(v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{N}} & \text{for } v=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & \text{for } v \neq 0 \end{cases}.$$

由式(2)可知,对图像进行离散余弦变换后,会得到 DCT 系数矩阵 $C(u, v)$, 其从左上角到右下角的系数分别表示图像中灰度平坦部分(低频)、微小变化部分(中频)、剧烈变化部分(高频)。而前述分析中已知背景主要属于低频信号,因此它对应于 DCT 系数矩阵中的左上角。一般地,在重建过程中是选择系数矩阵 $C(u, v)$ 中第一行($u=0$)和第一列($v=0$)系数。但是在一些研究中^[9-10]发现,这样会在重建的背景图像中产生正交的条纹噪声。为了抑制条纹噪声的影响,这里根据文献[9]中提到的分别寻找 $u=0$ 和 $v=0$ 中 DCT 系数的拐点作为 u 和 v 方向的截止频率,以进一步优化用于初始背景重构的 DCT 系数,如式(3)所示。

$$C_B(u, v) = \begin{cases} C(u, v), & u=0 \text{ or } v=0 \text{ 且 } u < f_u \text{ or } v < f_v \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, f_u 、 f_v 分别表示 u 和 v 方向的截止频率。最后对 $C_B(u, v)$ 系数进行如下离散余弦逆变换可以得到重构的背景图像:

$$B(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \alpha(u)\alpha(v)C_B(u, v) \times \cos\left[\frac{\pi(2x+1)u}{2M}\right] \times \cos\left[\frac{\pi(2y+1)v}{2N}\right]. \quad (4)$$

为了验证所述理论在从背景中分离 Mura 缺陷的效果,运用此方法对图 2(a)中含有 Mura 缺陷的 TFT-LCD 图像进行背景重建并产生差分图像,图 2(b)、(c)分别表示 DCT 背景重建图像、差分图像。由图 2(b)、(c)可以看出,DCT 背景重建可以从很大程度上将 Mura 缺陷从背景中分离,从而克服背景亮度不均的问题。

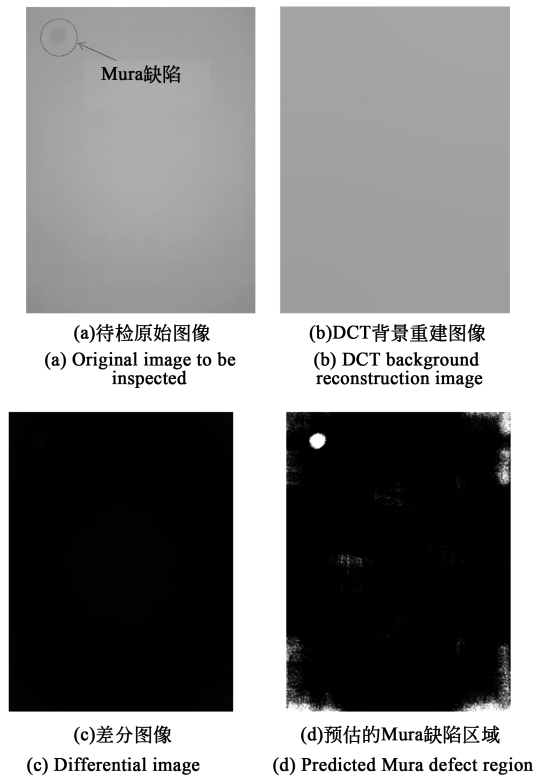


图 2 Mura 缺陷区域预估结果

Fig.2 Prediction result of Mura defect region

2.1.2 基于概率统计理论的 Mura 缺陷区域预测

由概率统计理论可知,对于一副灰度分布均匀的图像,其大约有 96% 的像素灰度范围集中在 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$, 其中 μ, σ 分别表示图像的灰度均值和标准差。而 Mura 缺陷虽然与背景的对亮度很低,但在灰度值上通常比背景要低一些或者高一些,因此考虑运用概率统计理论来预估图像中可能存在 Mura 缺陷的区域。此外,由于待检图像背景亮度不均,并且 Mura 缺陷的形态大小不一,所以不能直接运用统计学方法对待检图像进行缺陷区域预测,而是首先运用离散余弦变换重建背景图像以消除背景亮度不均的干扰,在此基础上再运用概率统计理论对差分图像进行逐行逐列处理,找出每一行和每一列中可能的缺陷区域并通过逻辑或操作对这些区域进行合并,最终便得到预估的缺陷区域位置。其中将预测为缺陷区域的灰度值置为 1,其余部分置为 0。运用此方法对图 2 中经离散余弦变换后得到的差分图像进行处理,得到的预估结果如图 2(d)所示。

2.2 图像背景重构

在通过 Step1 将可能的 Mura 缺陷区域标记出来后,这些区域的像素会被剔除掉,而余下的像素数据 ($I_{\text{rest}}(x, y)$) 用来重构背景图像。由于图像的背景灰度可以用 k 阶二元多项式模型 $f_k(x, y)$ (式(5))近似逼近,并且重建精度高,所以本文采用多项式曲面拟合的方法对余下的像素数据 $I_{\text{rest}}(x, y)$ 进行背景重构。

$$f_k(x, y) = \sum_{m \geq 0, n \geq 0, m+n \leq k} a_{mn} x^m y^n, \quad (5)$$

其中, m, n, k 均为整数。为了在计算速度和精度之间取得一个较好的平衡,这里取 $k = 3$, 具体的计算公式如式(6)所示。

$$I_{\text{rest}}(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + a_{11}xy + a_{12}xy^2 + a_{21}x^2y + a_{30}x^3 + a_{03}y^3 + \epsilon, \quad (6)$$

式中: x, y 是用于重建背景图像的像素的坐标值, ϵ 是误差项, $a_{00}, a_{01}, \dots, a_{30}$ 是多项式中对应的系数。

为获得一个最佳的背景拟合模型,这里运用最小二乘回归,通过最小化残差平方和来求解模型参数,即有:

$$I_{\text{rest}}(x, y) = \mathbf{Z} \mathbf{A} \mathbf{A} = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T I_{\text{rest}}(x, y), \quad (7)$$

其中: $\mathbf{Z} = \{1, x, y, x^2, y^2, xy, xy^2, x^2y, x^3, y^3\}_{N \times 10}$, N 为剔除预估缺陷区域后剩余的像素个数, $\mathbf{A} = [a_{00}, a_{10}, a_{01}, a_{20}, a_{02}, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{30}, a_{03}]^T$ 为待求的系数矩阵。根据式(7),求解出系数矩阵,从而可以得到重建的背景图像。

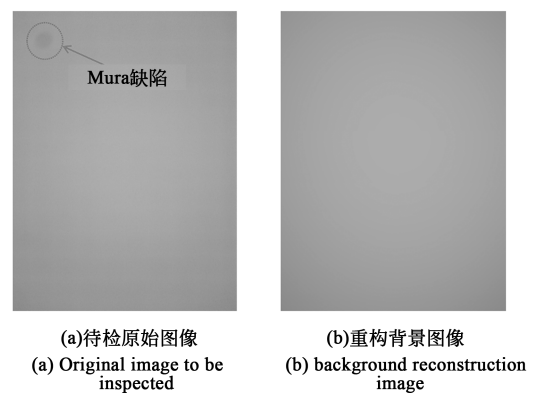


图 3 基于缺陷预剔除的图像背景重构结果

Fig.3 Results of image background reconstruction based on defect region pre-elimination

在大量的实验中我们发现,删除式(6)中的交互项(xy , xy^2 , x^2y)后,也能取得很好的重建效果,并且可以从一定程度上减少计算时间,简化后的计算公式如式(8)所示。

$$I_{\text{rest}}(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 + a_{30}x^3 + a_{03}y^3 + \epsilon. \quad (8)$$

运用式(8)以及最小二乘法对图 2(a)中剔除预估 Mura 区域像素后的图像数据进行曲面拟合,获得的重建结果如图 3(b)所示。

2.3 差分图像增强和阈值分割

为抑制背景干扰,在获得重构背景图像后,将原图与重构背景图像做差得到差分图像,如图 4(a)所示。

从图 4(a)中可以看出,获得的差分图像中 Mura 缺陷区域的对比度仍比较低,对此我们引入了一种基于最大类间方差的双 γ 分段指数变换^[10],以进一步抑制图像的背景信息,增强 Mura

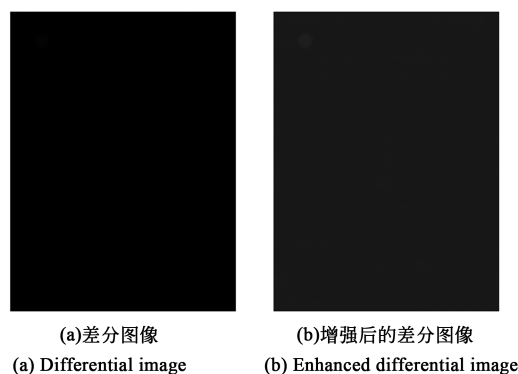


图 4 差分图像增强

Fig.4 Differential image enhancement

目标区域的对比度。该方法首先运用 Otsu 法对差分图像进行处理得到一个最佳阈值 k ,并将该阈值作为分段变换的分段点,然后对灰度值在 $[0, k]$ 和 $[k+l, L-1]$ 之间的部分分别做参数为 γ_1 、 γ_2 的伽马变换,变换公式如式(9)所示:

$$O(x, y) = \begin{cases} I(x, y)^{\gamma_1} & 0 \leq I(x, y) \leq k \\ k^{\gamma_1} + (I(x, y) - k)^{\gamma_2} & k+1 \leq I(x, y) \leq L-1 \end{cases}, \quad (9)$$

式中 $I(x, y)$ 为原图像的灰度值, $O(x, y)$ 为经过分段伽马变换后图像的灰度值。 $\gamma^2 = 1/\gamma^1 = \gamma$, 且 γ 的最优取值范围为 1.2~1.8, 本文取 $\gamma = 1.5$ 。运用该变换对锐化处理后的差分图像进行处理,得到对比度增强图像,如图 4(b)所示。

从图 4(b)可以看出,运用基于最大类间方差的双 γ 分段指数变换对差分图像进行对比度增强后,增大了阈值点左右两侧部分的灰度值差距,从而使图像中目标区域的对比度和轮廓度得到了

一定程度的增强。最后进行缺陷分割。在这一处理过程中,由于考虑到全局的阈值分割经常容易受到噪声的影响产生误分割。而相比之下,动态阈值分割是一种比较灵活的、抗噪声能力强的局部分割,它可以对图像中的不同区域自适应地选择符合该区域灰度分布特征的阈值。因此,本文最后运用动态阈值分割方法,可以快速有效地将 Mura 缺陷从图像中直接分离出来,分割结果见图 5。

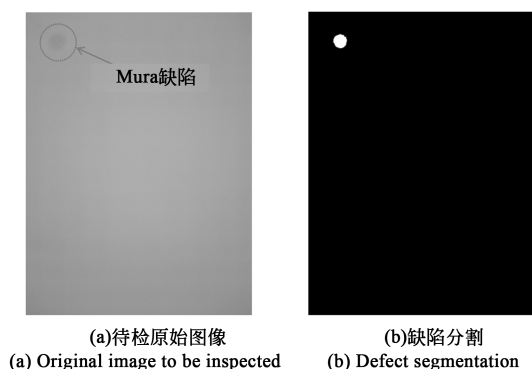


图 5 Mura 缺陷分割结果

Fig.5 Segmentation result of Mura defect

3 实验设计与分析

3.1 主观定性分析

为检验所提出的算法,本文设计了 Mura 缺陷检测实验来测试算法对 Mura 缺陷的检测性能。受条件限制,无法采集更多的带有 Mura 缺陷的图像,这里选取带有几种典型 Mura 缺陷的 TFT-LCD 图像作为实验样本,如图 6(a)列所示。依次输入这些缺陷样本图像,并分别采用离散余弦变换法(DCT)^[10]、多项式曲面拟合法^[12]以及本文

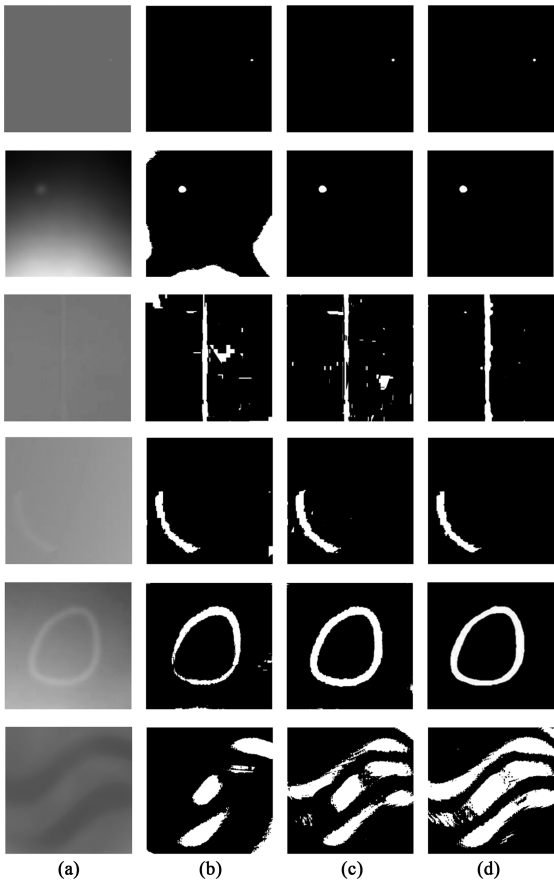


图 6 实验结果。(a)列为原始图像,(b)列为文献[10]的分割结果,(c)列为文献[12]的分割结果,(d)列为本文方法分割结果。

Fig.6 Experimental results. The column (a) is original images, the column (b) is detection results of the method in Ref. [10], the column (c) is detection results of the method in Ref. [12], the column (d) is detection results of the proposed method.

方法进行实验,其结果如图 6(b)~(d)列所示。

对比几种方法的检测结果,可以看出:对于面积比较小的点状 Mura 缺陷,3 种方法都能取得较好的效果。但是对于线状、环状等面积相对较大的 Mura 缺陷,运用离散余弦变换法和多项式曲面拟合法都或多或少地会带有背景残差,而本文方法则具有更好的检测结果。然而,当缺陷区域面积非常大时,如图 6 最后一行所示,本文方法和其他两种方法都没有正确检出,均造成了不同程度上的误检。这是由于缺陷区域面积很大,而本文方法会预估缺陷区域并剔除这些可能的缺陷像

素数据,所以剩余用来重建的背景像素数据就很少,导致重建的背景图像精度降低,最后便造成了一些区域的误分割。

3.2 客观定量评价

在实际应用中,检出率是衡量一种缺陷检测算法好坏的一个广泛使用且非常重要的评判指标。另外,由于 Mura 缺陷与背景的对比度非常低,并且很多待检图像本身亮度也不均匀,在检测过程中极易将某一背景区域当做是 Mura 缺陷,从而造成误检。基于此,这里综合运用检出率和误报率两个指标来衡量该检测算法的准确性与稳定性。其中检出率、误报率的计算公式分别如式(10)、(11)所示:

$$\text{检出率} = \frac{\text{正确检出的样本数}}{\text{总的样本数}} \times 100\%, \quad (10)$$

$$\text{误报率} = \frac{\text{误检的样本数}}{\text{总的样本数}} \times 100\%. \quad (11)$$

实验中采用了 200 张(45 张含有不同 Mura 缺陷 + 155 张无缺陷)TFT-LCD 样本图片进行测试,并将本文算法的测试结果与离散余弦变换法、多项式曲面拟合法的测试结果进行对比,实验结果如表 1 所示。

将最终的分割结果与真实存在 Mura 缺陷区域进行对比,发现离散余弦变换法有 4 张图片没有检测出来,多项式曲面拟合法有 2 张 Mura 图片没有检测出来,而本文方法共正确检测出 44 张。另外,离散余弦变换法和多项式曲面拟合法

表 1 不同检测方法的实验结果

Tab.1 Experimental results of different detection methods

检测方法	检出率/%	误报率/%
离散余弦变换 ^[10]	91.11	26
多项式曲面拟合 ^[12]	95.56	11
本文方法	97.78	2

的误报率分别为 26%、11%,而本文提出的算法仅为 2%。对比几种方法的实验数据可以看出,本文提出的 Mura 缺陷检测算法在检出率 and 无误报率两个指标上均达到了 97%以上,表现出较高的检测准确性和稳定性。

4 结 论

根据 Mura 缺陷对比度极低的特点以及 TFT-LCD 图像亮度不均的性质,提出基于缺陷区域预剔除的有效背景建模和对比度增强的 Mura 缺陷检测方法,能很好地消除 TFT-LCD 自身亮度不均对缺陷检测的影响,同时能有效地增

强 Mura 缺陷特征。最后,运用动态阈值分割方法可以准确地分割出 Mura 缺陷区域。通过实验对比分析可知,与离散余弦变换、多项式曲面拟合相比,本文方法能够获得更精确的 Mura 缺陷检测,并且能有效减少误检区域。此外,该方法对于其他领域具有低对比度特点的缺陷检测,如带钢表面低对比度弱小缺陷检测、磁瓦表面裂纹检测等也具有一定的借鉴意义。

参 考 文 献:

- [1] 高如新,任晓朵,吴献,等.基于图像处理的手机屏幕缺陷检测系统研究[J].测控技术,2017,36(4):26-30.
GAO R X, REN X D, WU X, *et al.* Research on mobile phone screen defect detection system based on image processing [J]. *Measurement & Control Technology*, 2017, 36(4): 26-30. (in Chinese)
- [2] CEN Y G, ZHAO R Z, CEN L H, *et al.* Defect inspection for TFT-LCD images based on the low-rank matrix reconstruction [J]. *Neurocomputing*, 2015, 149: 1206-1215.
- [3] 陈凌海,姚剑敏,郭太良.基于改进 Chan-Vese 模型的液晶显示屏 Mura 缺陷分割[J].液晶与显示,2016,31(6): 613-620.
CHEN L H, YAO J M, GUO T L. LCD Mura defect image segmentation based on improved Chan-Vese model [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 613-620. (in Chinese)
- [4] CHEN C S, WANG C M, TSENG C C. An efficient detection algorithm based on anisotropic diffusion for low-contrast defect [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9/12): 4427-4449.
- [5] 廖苗,刘毅志,欧阳军林,等.基于自适应局部增强的手机 TFT-LCD 屏 Mura 缺陷自动检测[J].液晶与显示,2018, 33(6):475-482.
LIAO M, LIU Y Z, OUYANG J L, *et al.* Automatic detection of Mura defect in TFT-LCD mobile screen based on adaptive local enhancement [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(6): 475-482. (in Chinese)
- [6] YUN J W, GU H, KIM D H, *et al.* Automatic Mura inspection using the principal component analysis for the TFT-LCD panel [C]//2014 *IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan*. Taipei, China: IEEE, 2014: 109-110.
- [7] TSAI D M, TSENG Y H, CHIU W Y. Surface defect detection in low-contrast images using basis image representation [C]//2015 *14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*. Tokyo: IEEE, 2015: 186-189.
- [8] WANG X, DONG R, LI B. TFT-LCD Mura defect detection based on ICA and multi-channels fusion [C]//2016 *3rd International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*. Beijing: IEEE, 2016: 687-691.
- [9] CHEN L C, KUO C C. Automatic TFT-LCD Mura defect inspection using discrete cosine transform-based background filtering and 'just noticeable difference' quantification strategies [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 19(1): 015507.
- [10] JIN S Q, JI C, YAN C C, *et al.* TFT-LCD Mura defect detection using DCT and the dual- γ piecewise exponential transform [J]. *Precision Engineering*, 2018, 54: 371-378.
- [11] PARK J S, LEE S H. Automatic Mura detection for display film using mask filtering in wavelet transform [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2015, E98-D(3): 737-740.
- [12] FAN S K S, CHUANG Y C. Automatic detection of Mura defect in TFT-LCD based on regression diagnostics [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(15): 2397-2404.
- [13] MA Z Q, GONG J. An automatic detection method of Mura defects for liquid crystal display [C]//2019 *Chinese*

- Control Conference (CCC)*. Guangzhou: IEEE, 2019: 7722-7727.
- [14] 李坤, 李辉, 刘云杰, 等. LCD Mura 缺陷的 B 样条曲面拟合背景抑制[J]. 光电工程, 2014, 41(2): 33-39.
LI K, LI H, LIU Y J, *et al.* Background suppression of LCD Mura defect using b-spline surface fitting [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(2): 33-39. (in Chinese)
- [15] KIM Y G, PARK T H. Mura defect detection on compact camera module (CCM) using metric learning [C]//2020 *IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. Hong Kong, China: IEEE, 2020: 1263-1268.
- [16] LEE J. Region-based machine learning for OLED Mura defects detection [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 200-203.

作者简介:



胡 亮(1994—),男,湖北黄冈人,硕士,2021 年于深圳大学获得硕士学位,主要从事图像处理、机器视觉方面的研究。E-mail:1194924113@qq.com



胡学娟(1981—),女,湖北安陆人,博士,副教授,2014 年于深圳大学获得博士学位,主要从事数字图像处理、光学成像系统方面的研究。E-mail:huxuejuan@sztu.edu.cn