

基于自相关性和模版匹配的TFT缺陷电路重构算法

王永城, 林珊玲, 林志贤, 郭太良

引用本文:

王永城, 林珊玲, 林志贤, 等. 基于自相关性和模版匹配的TFT缺陷电路重构算法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(6): 564–571.

WANG Yong-cheng, LIN Shan-ling, LIN Zhi-xian, et al. TFT defect circuit reconstruction algorithm based on autocorrelation and template matching[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(6): 564–571.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0564>

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>

一种新型a-IGZO TFT集成栅极驱动电路设计

Novel integrated gate driver design based on a-IGZO TFTs

液晶与显示. 2018, 33(12): 996–1001 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183312.0996>

一种LTPS-TFT AMOLED像素电路的理论研究

LTPS-TFT threshold voltage compensation pixel circuit for AMOLED

液晶与显示. 2017, 32(8): 614–621 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173208.0614>

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(2020)06-0564-08

基于自相关性和模版匹配的 TFT 缺陷电路重构算法

王永城,林珊玲,林志贤*,郭太良

(平板显示技术国家地方联合工程实验室,福州大学 物理与信息工程学院,福建 福州 350116)

摘要:在 TFT 的制程中会造成许多不可避免的工艺缺陷,需要逐个判断其对 TFT 电路所造成的影响,这种缺陷检查方式需要大量人力且速度慢、精度低,因此,将人工识别替换成计算机自动化识别就显得尤为重要。自动识别中的一个关键部分就是将 TFT 电路进行定位。针对因缺陷颜色、形状、位置、大小不固定等原因导致现有图像处理算法无法准确定位出 TFT 电路位置的问题,本文提出基于自相关性和模版匹配的 TFT 电路图像重构算法。首先,对全自动光学检测(AOI)相机采集的缺陷图片进行区域提取,估算出偏角并校正图像;根据边缘图像的灰度垂直响应的自相关估计函数来估算电路的重复周期,再由周期灰度均值来确定一组的电路纵贯线位置,利用 TFT 电路周期特征重构出其余纵贯线;通过角模版匹配算法重构 TFT 电路硅岛部分。实验结果表明,本文提出的算法能够重构出被缺陷遮挡、图片模糊、电路缺失等情况下的电路,定位准确率达 96% 以上。基本满足 TFT 缺陷自动化识别中的电路定位要求。

关键词:TFT 缺陷电路;图像分割;自相关性;模版匹配;图像重构

中图分类号:TP278 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20203506.0564

TFT defect circuit reconstruction algorithm based on autocorrelation and template matching

WANG Yong-cheng, LIN Shan-ling, LIN Zhi-xian*, GUO Tai-liang

(National & Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology,
School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The TFT manufacturing process can inevitably result in a number of process defects, it is necessary to individually determine the impact caused by the defects. This defect inspection method requires a lot of manpower and slow, low accuracy. Therefore, it is especially important to replace manual recognition with computerized automatic identification. A key part in automatic identification is to

收稿日期:2019-08-30; **修订日期:**2019-11-12.

基金项目:国家重点研发计划课题(No.2016YFB0401503);广东省科技重大专项(No.2016B090906001);福建省科技重大专项(No.2014HZ0003-1);广东省光信息材料与技术重点实验室开放基金资助项目(No.2017B030301007)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0401503); Science and Technology Major Program of Guangdong Province (No.2016B090906001); Science and Technology Major Program of Fujian Province (No.2014HZ0003-1); Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology (No.2017B030301007)

* 通信联系人, E-mail: lzx200500@163.com

locate the TFT circuit. Aiming at the problem that the existing image processing algorithms can not accurately locate the position of the TFT circuit due to the defect color, shape, position and size unfixed. This paper proposes an image reconstruction algorithm based on autocorrelation and template matching. Firstly, the region extraction is performed on the defect image acquired by the automated optical inspection(AOI) camera, and estimates the angle and corrects the image. The circuit's repetition period is estimated according to the autocorrelation estimation function of the gray-scale vertical response of the edge image, and then the periodic gray-scale mean is used to determine the position of a group of longitudinal lines, and the remaining vertical lines are reconstructed by using the periodic characteristics of the TFT circuit. Finally, the silicon island part of the TFT circuit is reconstructed by the angular template matching algorithm. The experimental results show that the proposed algorithm can reconstruct the circuit under the condition of defect occlusion, blurred picture, and missing circuit. The accuracy of positioning is over 96%. Basically, it can meet the circuit segmentation requirements in TFT defect auto-identification.

Key words: TFT defect circuit; image segmentation; autocorrelation; template matching; image reconstruction

1 引言

薄膜晶体管(Thin Film Transistor, TFT),其主要用途是控制显示面板的信号传输及控制显示面板的电压信号。目前 TFT 技术主要被用于液晶显示屏与电子纸等显示设备中。液晶显示屏具有低功耗、寿命长、体积小等诸多优点,因此取代了 CRT(Cathode Ray Tube)显示器,成为目前主流的显示设备^[1-2]。电子纸是一种超薄、超轻的显示屏,多采用电泳显示(Electrophoretic, E-Paper)技术作为显示面板,电泳显示技术由于结合了普通纸张和电子显示器的优点,其显示效果接近自然纸张效果,免于阅读疲劳,因而从众多显示技术中脱颖而出,成为极具发展潜力的柔性电子显示技术之一。

TFT 大体的制作方式是在基板上沉积各种不同的薄膜,如半导体主动层、介电层和金属电极层。在这些过程之中不可避免会出现各种缺陷,但是这些缺陷并不都对面板造成影响,需要逐个判断是否对显示电路造成影响来确定这块面板是否需要进行维修处理。在工业生产中往往采用全自动光学检测(Automatic Optical Inspection, AOI)相机对缺陷进行拍摄,再由人工肉眼判断。这种模式使得判断站点一直面临人力需求大,人力成本高,并且培训上岗周期长,离职率高等问题^[3]。随着智能制造的推进以及计算机视觉的发

展,由系统自动判断代替人员判定来解决以上问题成为可能。因此,研究自动化识别算法对提高产能,减小生产成本有着重要意义。

在自动化识别算法中,将 TFT 电路位置进行定位是一个关键性的部分。但由于 AOI 相机所采集的缺陷图片中存在缺陷过大、遮挡电路、图片模糊、电路缺失、缺陷颜色形状不固定、电路变形等诸多问题,因此,现有的图像分割处理算法,如基于阈值的 Otsu 算法^[4-6]、基于区域的区域生长合并算法、基于边缘的 Canny^[7]和 Sobel^[8-9]算子等都无法处理以上情况的 TFT 电路:基于阈值的分割算法无法处理缺陷颜色与电路颜色相近的图片,基于区域的分割算法无法处理电路变形、缺陷遮挡电路的图片,基于边缘的分割算法无法处理图像模糊、缺陷与电路相接的图片^[10-15]。

因此,研究一套能够适用于所有缺陷情况的 TFT 电路重构算法对 TFT 生产中的缺陷自动化识别有着极其重要的意义。实验证明,本文所提出的算法能够较全面地在各种缺陷影响的情况下重构出 TFT 电路位置。

2 本文算法

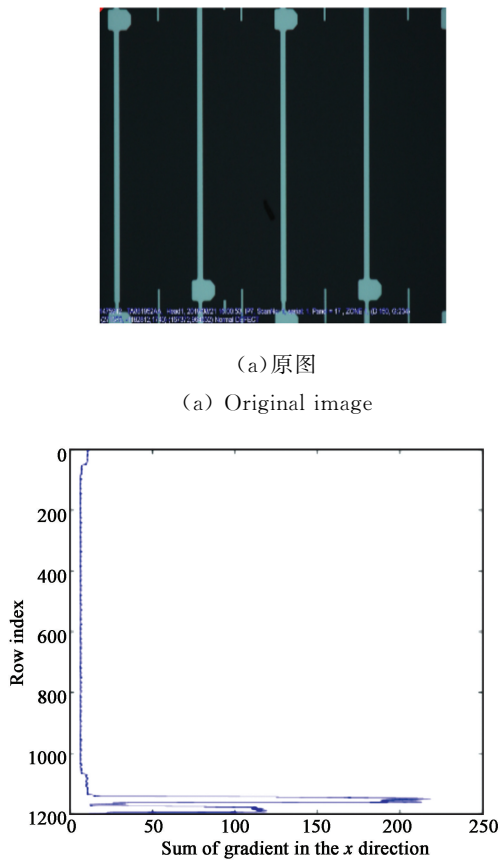
由于 TFT 电路具有较强的周期特性,因此本文依据图像的周期特征设计算法。首先对缺陷图片进行预处理操作,提取出目标区域并校正图像角度;再使用卷积提取灰度边缘图像在垂直方

向的响应序列,并使用自相关估计函数抑制缺陷在响应序列中的影响,从而估算出电路周期;再由周期灰度均值确定一组精确的纵贯线,配合估算的周期重构出其余纵贯线位置;最后使用六边形模版匹配算来确定分布在纵贯线上的电路硅岛位置。

2.1 预处理

2.1.1 文字区域剔除

AOI 相机采集的缺陷图片会在图片的下方打上产品批次、拍摄时间等信息,需要将这些高度不一的文字区域剔除,避免这些冗余信息对后续模版分割造成影响,图 1(a)为 AOI 相机采集的原始图像。



(a) 原图

(b) Sum of gradient

图 1 提取目标区域

Fig.1 Extraction target area

首先将 RGB 图像转换成灰度图像。计算公式如下:

$$f(x, y) = 0.298 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B, \quad (1)$$

接着求出灰度图像在竖直方向的梯度值,再将梯度值逐行叠加。即:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f(x+1, y) - f(x, y), \quad (2)$$

$$S(x) = \sum f'(x, y_k), \quad (3)$$

绘制得到梯度叠加图如图 1(b)所示,在梯度变换最剧烈的行,即为文字区域最上端,估算出文字区域的高度,将这部分文字区域剪裁掉。

2.1.2 图像校正

AOI 相机采集的原始图像有一定的角度偏移,会对后续的纵贯线定位以及周期估计造成较大的误差,导致分割不准确,因此需要对图像进行角度校正处理。

首先将裁剪后的灰度图像使用 Otsu 算法进行二值化。Otsu 是一种阈值自适应算法,它使用统计决策的方法将像素的灰度值分为两部分,并找到一个阈值使得这两部分之间的方差最大。其公式如下:

$$g_{\max} = w_0 \times w_1 \times (\mu_0 - \mu_1)^2, \quad (4)$$

其中图片大小为 $W \times H$,灰度值小于阈值的像素个数记为前景像素个数 N_0 ,反之记为背景像素个数 N_1 。 μ 为图像的平均灰度。 w_0 与 w_1 分别是 N_0 与 N_1 和 $W \times H$ 的比值。 μ_0 、 μ_1 为前景与背景的平均灰度。阈值遍历 $0 \sim 255$,得到使方差 g 最大的阈值。

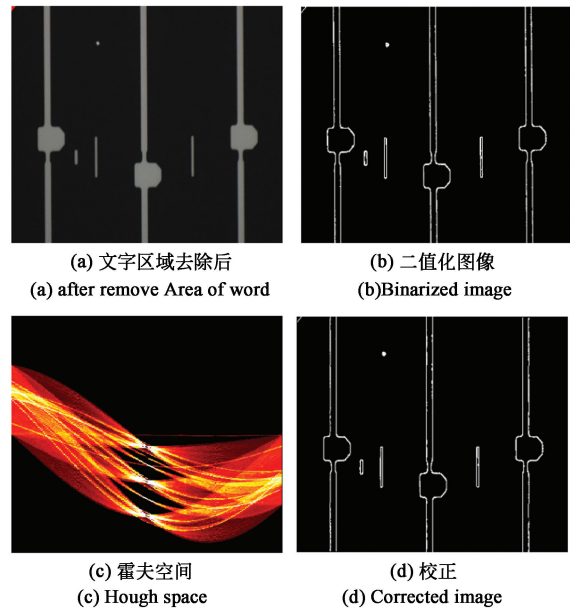


图 2 图像校正过程

Fig.2 Image correction process

再将二值图像经过膨胀卷积算子与原来的二值图像做差即可提取到边缘图像。将边缘图像使用参数方程 $\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ 映射到 $\rho-\theta$ 霍夫空间中。即, $X-Y$ 平面上的一个点在 $\rho-\theta$ 平面上代表一条正弦曲线, $\rho-\theta$ 平面的交点即为 $X-Y$ 平面上的同一条直线上的点。因此,在 $\rho-\theta$ 平面上最多曲线相交的点,对应 $X-Y$ 平面上最长的直线,这个交点的 θ 值也就是要需的部件偏角,最后根据 θ 值旋转校正。处理过程如图 2 所示。

2.2 基于自相关的周期估计和电路纵贯线重构算法

AOI 相机采集的缺陷图片中存在图像模糊、电路被缺陷覆盖、电路变形等情况,因此,准确定位到所有纵贯线是较为困难的。根据 TFT 电路的周期特征,设计鲁棒性较强的纵贯线定位算法,电路图像如图 3(a)中所示。本文通过寻找一组精准的纵贯线边界以及精确的周期,再依据电路的周期特性来重构出其余纵贯线。

首先,将预处理后的边缘灰度图像使用卷积算子: $w = (1, 1, 1, 1, \dots, 1)^T$ 进行卷积得到边缘灰度图像在垂直方向上的响应,如图 3(b)所示,在响应图中可以找到一组极大值序号点: $E_m = [68, 92, 452, 476, 835, 859, 1218, 1242]$ 。由此序列可估算出,该图的纵贯线宽度 W 大约为 24 个像素,周期 T 数值在 383~384 个像素之间,并非一个整数。直接使用该周期来估计纵贯线的位置会出现一到两个像素的误差积累而使定位结果不准确。本文提出对垂直响应序列进行自相关估计,计算出精确估算周期 T ,计算公式如式(6)所示:

$$R(n) = E(n) E^*(-n) = \sum_{i=0}^{2N-1} E(i) E(n-i), \quad (5)$$

$$T = \sum_{i=0}^{n_r-2} \frac{R_f(i+1) - R_f(i)}{n_r}, \quad (6)$$

其中: $E(n)$ 为垂直响应序列, N 为 E 序列的长度, R_f 为垂直响应序列的自相关序列极大值, n_r 为 R_f 的长度。其计算结果如图 3(c)所示,可求得 $T = 383.3$ 为预估的准确周期。为进一步提高分割精度引入图像坐标浮点数,定义以下公式:

$$G(x, y + 0.5) = \frac{G(x, y) + G(x, y + 1)}{2}, \quad (7)$$

其中 G 为原图像灰度值的分布。在相邻像素中

插入一个新像素点,其灰度值为相邻像素的灰度均值。接着将引入了坐标浮点数的灰度图像每隔 0.5 个像素采样一次进行卷积,计算得出的序列按周期划分为若干个子序列,划分子序列时出现的小数部分四舍五入到最近整数位置。将这些子序列按周期进行叠加并取均值,如图 3(d)所示。

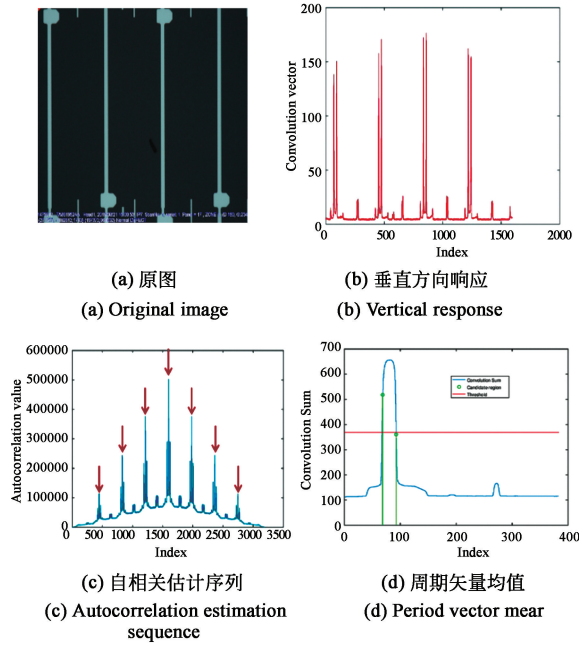


图3 纵贯线位置估计

Fig.3 Longitudinal position estimation

在周期矢量均值中寻找卷积和最高的连续 W 个像素设定为参考区域。在参考区域的左右边界分别寻找最接近阈值 $Otsu_THRESH \times H$ 的位置,即为第一个周期的纵贯线边界位置,其中 $Otsu_THRESH$ 为 Otsu 算法计算出的灰度阈值的大小, H 为预处理后的图像高度。根据图 3(d)可以估算出此图的第一个周期内的纵贯线左右边界的位置分别为 67.5, 92.5, 再配合估算的周期 T 来计算所有纵贯线边界位置。

2.3 基于模版匹配的电路硅岛部件重构

如图 4 所示,电路硅岛是图中分布在纵贯线上的六边形部分。硅岛部件缺失、硅岛部件不完整、图像模糊、缺陷覆盖在正常的电路硅岛结构上引起灰度变化等情况,都易导致算法错误估计电路硅岛位置。部分缺陷图片如图 4 所示。

由于缺陷的存在以及图像尺寸的约束使得图像中的电路硅岛极易受到遮挡,但是绝大部分的图像中都还存在部分完整的电路硅岛角。针对这

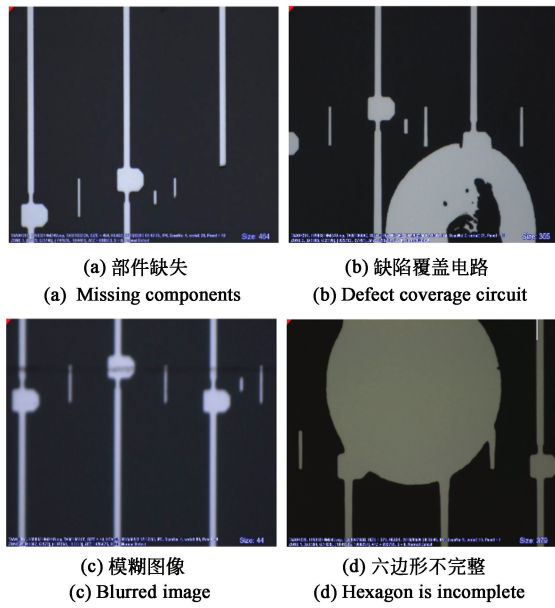


图 4 缺陷影响电路的若干情况

Fig.4 Situation of defects affecting the circuit

一特征,本文设计了一种角模版匹配算法,使用部分未被影响的硅岛角来确定电路硅岛部件位置,分别使用电路硅岛的 6 个角来进行匹配,6 个角模版包括 2 个直角,4 个 135° 钝角,尺寸为 40×40 ,如图 5 所示。

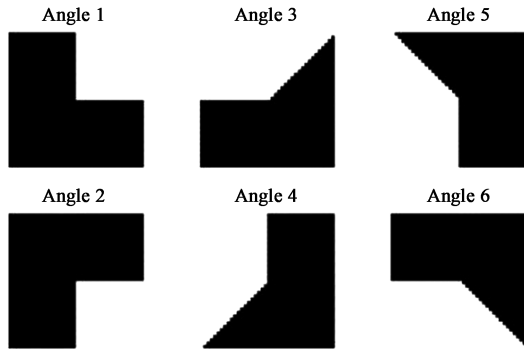


图 5 六边形角模版

Fig.5 Hexagonal angle stencil

在纵贯线边界处计算角模版与图像块的相关度。相关度大于 0.8 则认为匹配,计算匹配角的个数。Angle1、Angle3 同时被匹配,Angle2、Angle6 同时被匹配,3 个以上角被匹配且其中存在 Angle1 或者 Angle2,满足 3 个条件中的一个,则认为图像中存在六边形结构并以角顶点为六边形顶点,确定电路硅岛位置。 $D(x, y)$ 表示模版矩阵, $I(x, y)$ 为截取图像, $R_N(x, y)$ 为计算的相

关度函数。相关度计算公式如下^[16-20]:

$$D'(x', y') = D(x', y') - 1/(\omega \cdot h) \cdot \sum_{x'', y''} D(x'', y''), \quad (8)$$

$$I'(x + x', y + y') = I(x + x', y + y') - 1/(\omega \cdot h) \cdot \sum_{x'', y''} I(x + x'', y + y''), \quad (9)$$

$$R_N(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (D'(x', y') \cdot I'(x + x', y + y'))}{\sqrt{\sum_{x', y'} D'^2(x', y') \sum_{x', y'} I'^2(x + x', y + y')}}. \quad (10)$$

如图 4 所示,硅岛部件的形状是一致的,大小只与倍率相关,可根据图像倍率来估算出六边形大小,同时只需任意确定一个顶点坐标即可求解出六边形其他的顶点坐标。

2.4 其余部件重构

图像中的其余部件可由纵贯线位置、纵贯线周期、硅岛部件位置来共同确定。如图 6(a)所示,在两组纵贯线之间较短的部件,其尺寸的比例固定,数值可由图像的尺寸大小计算得出。在垂直方向与上下两组六边形共享一个垂直对称轴,定位电路硅岛六边形位置即可以确定此部件垂直坐标范围。其水平方向为距离纵贯线左边界 0.315 倍的纵贯线周期的位置,其出现的周期为纵贯线周期的 3 倍。在 3 个周期内的指定位置,寻找白色像素比例大于 0.4 小于 0.95 的区域即可。同理,如图 6(b)所示,在纵贯线之间较长的部件也可以用相同方法确定。

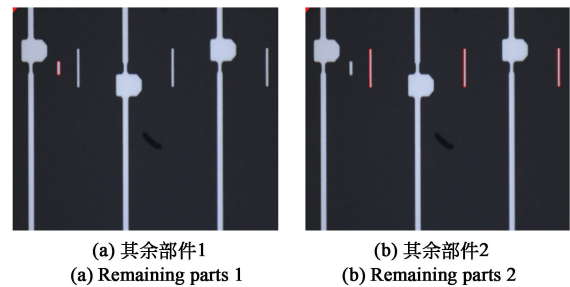


图 6 其余部件

Fig.6 Remaining parts

3 实验结果与分析

实验数据为 2 000 幅由 AOI 相机采集的缺陷图片。部分原图如图 4 所示,图像尺寸分为 $1\,024 \times 768$, $1\,600 \times 1\,200$ 两种。

为验证本文算法的有效性,分别用本文算法与自动阈值分割算法、分水岭算法进行对比实验,部分图片的处理结果如图7所示。其中红色像素点为不同算法的定位效果。从图中可以看出,基于自动阈值分割算法与分水岭分割算法只能处理少量缺陷颜色与电路颜色相差较大情况下的图片,对于电路被缺陷遮挡、电路缺失、缺陷颜色与电路颜色相近等大部分图片都无法准确定位电路位置。

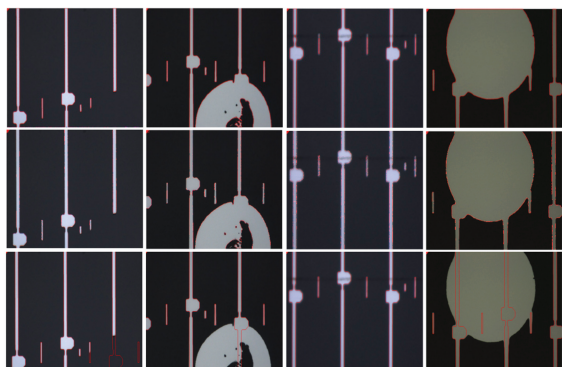


图7 实验结果。第一行为阈值算法处理结果,第二行为分水岭算法处理结果,第三行为本文算法处理结果。

Fig.7 Experimental results. The first row is threshold algorithm processes the results, the second row is watershed algorithm processes the results, and the third row is the algorithm processing results.

相比之下,本文算法能够较好地处理数据集中出现的部件缺失、大尺度缺陷、图像模糊、部件变形等现有算法无法处理的情况。定位效果明显优于现有的分割算法,定位效果如图7所示。

为进一步定量分析本文算法的有效性,本文使用图像分割通用定量分析公式,其公式如下:

$$IOU = \frac{N_P \cap N_D}{N_P \cup N_D}, \quad (11)$$

$$IOU_m = \frac{\sum K}{N_A}, \quad (12)$$

$$Acc = \frac{N_{IOU>0.95}}{N_A}, \quad (13)$$

其中: N_P 为算法定位区域, N_D 为真实电路区域。 IOU 表示算法定位结果与真实电路的重叠度,它的值越大表示此图的定位效果越好。 IOU_m 表示

平均每张图 IOU 值的大小, $N_{IOU>0.95}$ 表示在测试集中 IOU 的值大于 0.95 的图片数量, N_A 为测试集的图片总数, Acc 表示在用阈值 $IOU>0.95$ 时的定位准确率。表1为现有算法与本文算法的对比试验结果。

表1 定量分析结果

Tab.1 Quantitative analysis results

算法	IOU_m	IOU 的标准差	$Acc/\%$
分水岭算法	0.547	0.326 4	18.5
Ostu 算法	0.623	0.262 7	24.5
本文算法	0.974	0.029 3	96.1

从表中可以看出现有的分水岭算法与 Otsu 算法的定位准确率分别为 18.5% 和 24.5%,而文本算法达到 96.1%。从数据中可以分析得出,现有算法只能处理数据集中某一特征的缺陷图片,而本文算法能够适用于绝大多数的缺陷图像。同时,本文算法的 IOU_m 值达到 0.974,说明本文算法分割出的电路位置精准,存在的像素偏移小。对比 3 个算法的 IOU 的标准差,本文算法具有较好的稳定性。综上,本文算法在各项指标都极大地优于现有图像处理算法。

4 结 论

提出了一种基于自相关性和模版匹配的 TFT 缺陷电路重构算法来定位被缺陷影响的 TFT 电路位置。首先,提取出目标区域去除无关的冗余信息后,通过 Hough 变换计算偏角并校正图像。针对电路周期特征,提取灰度边缘图像的卷积矢量。根据卷积矢量特征确定纵贯线位置,使用自相关估计来估算周期,并引入坐标浮点数进一步提高分割精度。设计六边形角模版匹配算法,提高算法的稳定性、覆盖率、准确率。

实验结果表明,本文算法能够在多种缺陷影响下通过重构 TFT 电路的方法,准确地定位到 TFT 电路位置,并达到 96.1% 以上的准确率。相比现有的图像处理算法,不仅有更高的定位准确率,并且保证了定位的精度与稳定性,基本满足 TFT 生产中缺陷自动化检测对 TFT 电路定位的要求。

参 考 文 献:

- [1] 田路线,李国富,吴光文.TFT-LCD 玻璃基板简介[J].玻璃,2009,36(5):46-49.
TIAN L X, LI G F, WU G W. Summary of TFT-LCD glass substrate [J]. *Glass*, 2009, 36(5): 46-49. (in Chinese)
- [2] 田雨.TFT-LCD 制造工艺的研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
TIAN Y. The study of TFT-LCD production technics [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 顾鹏,张玉.改进的红外图像 2 维 Otsu 分割算法 [J]. 中国图象图形学报,2011,16(8):1424-1428.
GU P, ZHANG Y. Improved 2D Otsu segmentation algorithm for infrared image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, 16(8):1424-1428. (in Chinese)
- [5] 黄港,李俊,潘金贵.基于粒子群优化方法的 2 维 Otsu 快速图像分割算法 [J]. 中国图象图形学报,2011,16(3):377-381.
HUANG G, LI J, PAN J G. A fast 2D Otsu image segmentation algorithm based on particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011,16(3):377-381. (in Chinese)
- [6] 吴一全,张金矿.改进的 2 维 Otsu 法及混沌粒子群递推的阈值分割 [J]. 中国图象图形学报,2009,14(9):1843-1849.
WU Y Q, ZHANG J K. Thresholding based on improved 2D Otsu method and chaotic particle swarm optimization [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(9):1843-1849. (in Chinese)
- [7] 张帆,韩树奎,张立国,等.Canny 算法的 GPU 并行加速 [J]. 中国光学,2017,10(6):737-743.
ZHANG F, HAN S K, ZHANG L G, *et al.* Parallel acceleration of Canny algorithm based on GPU [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 737-743. (in Chinese)
- [8] 江山,张锐,韩广良,等.复杂背景灰度图像下的多特征融合运动目标跟踪 [J]. 中国光学,2016,9(3):320-328.
JIANG S, ZHANG R, HAN G L, *et al.* Moving object tracking based on multi-feature fusion in the complex background gray image[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 320-328. (in Chinese)
- [9] 陶李,王珏,邹永宁,等.改进的 Zernike 矩工业 CT 图像边缘检测[J]. 中国光学,2012,5(1):48-56.
TAO L, WANG J, ZOU Y N, *et al.* Improved Zernike moment method for industrial CT image edge detection [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 48-56. (in Chinese)
- [10] 韩思奇,王蕾.图像分割的阈值法综述 [J].系统工程与电子技术,2002,24(6):91-94,102.
HAN S Q, WANG L. A survey of thresholding methods for image segmentation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(6): 91-94, 102. (in Chinese)
- [11] 李梅.基于 Otsu 算法的图像分割研究[D].合肥:合肥工业大学,2011.
LIN M. Research of image segmentation based on Otsu algorithm [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [12] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [13] 周燕琴,吕绪洋.基于改进 K-均值与分水岭算法的医学图像分割[J].软件导刊,2016,15(3):172-174.
ZHOU Q Y, LV X Y. Medical image segmentation based on improved K-means and watershed algorithm [J]. *Software Guide*, 2016, 15(3): 172-174. (in Chinese)
- [14] 朱莉玲.数字图像处理技术与应用研究[J].信息系统工程,2016(4):84.
ZHU L L. Digital image processing technology and application research [J]. *Information Systems Engineering*, 2016(4): 84. (in Chinese)

- [15] 伊力哈木·亚尔买买提.基于改进的自适应分水岭图像分割方法研究[J].计算机仿真,2013,30(2):373-377,405.
YILIHAMU · YAERMAIMAITI. Based on the improved adaptive watershed image segmentation method research [J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(2): 373-377, 405. (in Chinese)
- [16] JUPP D L B, STRAHLER A H, WOODCOCK C E. Autocorrelation and regularization in digital images. I. Basic theory [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(4): 463-473.
- [17] COBB J T, PRINCIPE J. Autocorrelation features for synthetic aperture sonar image seabed segmentation [C]// *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Anchorage: IEEE, 2011.
- [18] 唐璁,李青.一种快速的模板匹配算法[J].计算机应用,2010,30(6):1559-1561,1564.
TANG J, LI Q. Fast template matching algorithm [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(6): 1559-1561, 1564. (in Chinese)
- [19] 邹广华.基于几何特征的快速模板匹配算法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
ZOU G H. Fast template matching based on geometric features [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [20] BRIECHLE K, HANEBECK U D. Template matching using fast normalized cross correlation [C]// *Proceedings of SPIE, Optical Pattern Recognition XII*. Orlando, FL, United States: SPIE, 2001, 4387: 95-102.

作者简介:



王永城(1995—),男,福建龙岩人,硕士研究生,2017年于福州大学获得学士学位,主要从事机器视觉及电子纸显示的研究。E-mail: 532427913@qq.com



林志贤(1975—),男,福建泉州人,教授,博士,博士生导师,2010年于福州大学获得博士学位,主要研究方向为信息显示技术、平板显示驱动系统及图像处理。E-mail: lzx2005000@163.com