

# 基于 Fourier-Mellin 变换的液晶显示屏 显示缺陷检测

朱炳斐, 陈文建, 李武森, 张峻乾

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 针对液晶显示屏(LCD)显示缺陷检测中待测图像出现的平移和旋转导致误检率过高,传统人工检测效率低、漏检率高,以及图像配准精度对缺陷检测准确率的影响等问题,提出一种基于 Fourier-Mellin 变换的 LCD 显示缺陷检测方法。基本原理是利用 Fourier-Mellin 变换对标准图像和待测图像进行粗配准,通过加速稳健特征/尺度不变特征变换(SURF/SIFT)算法进行细配准,对标准图像和配准后的图像进行加权平均融合得到最终的配准图,最后利用局部自适应阈值分割和差影法检测缺陷,并标注缺陷的位置及信息。实验结果表明,提出的方法对平移和旋转的稳健性好,能够有效地检测出 LCD 显示缺陷,检测准确率达到 98.667%。

**关键词** 机器视觉;液晶显示屏显示缺陷检测; Fourier-Mellin 变换; 加权平均融合; 局部自适应阈值分割; 差影法

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.121502

## Liquid Crystal Display Defect Detection Based on Fourier-Mellin Transform

Zhu Bingfei, Chen Wenjian, Li Wusen, Zhang Junqian

*School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China*

**Abstract** Aiming at the high false detection rate due to the image translation and rotation, the low efficiency and low reliability of manual inspection, and the impact of image registration precision on the detection accuracy, a method based on Fourier-Mellin transform for liquid crystal display (LCD) defect detection is proposed. The basic fundamental of the method is as follows. The rough matching based on the Fourier-Mellin transform is performed between the detected image and the standard image firstly, and then the fine matching based on the speed-up robust features/scale-invariant feature transform (SURF/SIFT) algorithm is performed. The weighted average fusion is used for the standard image and the image after registration to obtain the final image. The LCD defects are inspected by local adaptive threshold segmentation and subtraction method, with the defect location and information marked. The experimental results show that the proposed method is robust to image translation and rotation, and can effectively detect the LCD defects with an accuracy rate up to 98.667%.

**Key words** machine vision; liquid crystal display defect detection; Fourier-Mellin transform; weighted average fusion; local adaptive threshold segmentation; subtraction method

**OCIS codes** 150.1835; 100.4994; 150.3040

## 1 引言

液晶显示器件广泛应用于各种家用电器和仪器仪表。液晶显示屏(LCD)由于生产工艺繁杂,易受周围

收稿日期: 2017-06-01; 收到修改稿日期: 2017-07-07

作者简介: 朱炳斐(1993—),女,硕士研究生,主要从事机器视觉技术与缺陷检测方面的研究。E-mail: zhubf@njust.edu.cn

导师简介: 陈文建(1965—),男,博士,教授,主要从事光学系统设计、光通信与光纤应用技术及机器视觉技术缺陷检测等方面的研究。E-mail: chenwj@njust.edu.cn(通信联系人)

环境影响,容易产生缺陷,因此,LCD 显示缺陷的检测对改进 LCD 生产工艺、提高其产品质量有重要的意义。常用的方法有人工视觉检测、电学参数检测和自动光学检测,前两者一般用来检测宏观缺陷,无法检测微观缺陷。传统的人工视觉检测中,由于人眼的分辨率不高,主观性大,会出现漏检误检,长期工作产生的视觉疲劳会导致检测稳定性不高,质量检测精度难以保证,无法形成统一的检测标准。自动光学检测以其非接触性、高性能等优点得以快速发展<sup>[1]</sup>。很多学者对 LCD 显示缺陷自动检测进行了研究<sup>[2-5]</sup>,但大量方法中,有些没有很好地克服光照影响,有些对图像旋转敏感,有些要求被测对象背景简单,有些无法检测出缺陷信息等,且基本没有方法能够检测与目标背景相近的缺陷。

LCD 缺陷检测的核心是图像配准,配准精度越高检测精度越高,主要有基于区域和基于特征两种方法,目前基于特征的方法最为普遍。传统的尺度不变特征变换(SIFT)算法对图像旋转和尺度变化的稳健性好,但运算量大,时间复杂度高。基于 SIFT 算法提出的加速稳健特征(SURF)算法牺牲精度换取速度。后来很多学者在 SIFT 和 SURF 算法的基础上进行改进<sup>[6-15]</sup>,但是,大多数方法图像配准的精度不高,适用范围受到局限,对图像亮度变化的抗干扰能力不高,能够处理的旋转角度小,都必须采用去除误匹配算法,时间复杂度高。所有方法的配准过程都采用仿射变换,而仿射变换是透射变换的一种特殊情况,只能处理二维空间旋转和平移,若图像微畸变出现三维状态,仿射变换将会出错。

为了进一步提高图像配准精度和缺陷检测精度,本文提出了一种基于 Fourier-Mellin 变换的特征匹配及透射变换算法,并通过融合进一步提高配准精度,快速检测缺陷并判断其位置和类型。给出了实验结果,并与现有的基于 SIFT 仿射、SURF 仿射的方法进行比较,根据相关系数、时间等客观定量指标对 3 种方法进行评估,验证了本文方法的优越性。

## 2 缺陷检测

缺陷检测主要包括以下内容:建立标准参考模版;基于 Fourier-Mellin 特征匹配及透射变换的图像配准算法;图像融合;局部自适应阈值分割。

### 2.1 建立标准参考模板

有学者曾提出采集多张无缺陷的 LCD 图像,求对应每个像素的灰度平均值生成参考图。该方法的缺点是:采集的标准图数目有限,不能包含所有亮度不一致情况;多张标准图必然在空间位置上存在一定的偏差,求平均值前必须先将所有采集到的标准图进行配准,这增加了整个流程的时间。本文的思想是:每一次实验之前,在当前实验环境下采集一张标准无缺陷图作为参考模板,之后以该图为基准进行检测,每 5 min 重新采集标准图更新模板,继续进行检测,周而复始。该方法在一定程度上能粗略消除亮度不一致的影响,且节省时间,后续还将采用图像融合进行进一步精处理。

### 2.2 基于 Fourier-Mellin 特征匹配及透射变换的图像配准算法

由于每次人为放置 LCD 的位置存在一定偏差,待测图和模板图之间必然会存在一定的平移或旋转(成像距离固定,不存在缩放)。微小空间位置的偏差会导致像素的偏差,从而降低检测的精度。因此需要引入图像配准算法,配准精度高,最终的检测精度才会更高。目前针对平移和旋转最常用的是基于特征的算法,其中 SURF 和 SIFT 算法最为普遍,但这两者如果没有去除误匹配算法,都不能很好地匹配图像,特别是存在大角度偏转的图像,必须将待测图角度调整到可控范围之内,且有些去除误匹配算法效果不好,去除误匹配也会增加整体的匹配时间。其次常用的几何变换为仿射变换,误校正率高。针对上述问题,本文提出了基于 Fourier-Mellin 特征匹配及透射变换的算法。

#### 2.2.1 基本原理

先利用 Fourier-Mellin 变换<sup>[16-17]</sup>求出待测图和模板图之间的旋转角度,根据旋转角度粗略地校正待测图,进行粗匹配;再利用基于特征的算法作透射变换,进行细匹配,得到进一步的配准图。

#### 2.2.2 Fourier-Mellin 变换

假设模板图为  $g_1(x, y)$ ,待测图为  $g_2(x, y)$ ,两者之间的关系为

$$g_2(x, y) = g_1[(x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - \Delta x, (-x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0) - \Delta y], \quad (1)$$

式中  $\theta_0$  为待测图和模板图之间的旋转角度,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为两者之间的水平和垂直偏移量。

对(1)式进行傅里叶变换得

$$G_2 = \exp[-2\pi j(\xi\Delta x + \eta\Delta y)] |G_1[(\xi\cos\theta_0 + \eta\sin\theta_0), (-\xi\cos\theta_0 + \eta\sin\theta_0)]|. \quad (2)$$

(2)式为三角函数形式,可以将(2)式中的变量作如下形式的代换:

$$r_P(\theta, \rho) = |G_1(\rho\cos\theta_0, \rho\sin\theta_0)|, \quad (3)$$

$$s_P(\theta, \rho) = |G_2(\rho\cos\theta_0, \rho\sin\theta_0)|, \quad (4)$$

式中  $r_P(\theta, \rho)$  和  $s_P(\theta, \rho)$  分别为  $G_1$  和  $G_2$  在极坐标中的频谱。对(2)式中的变量进行极坐标转换并简化得

$$s_P(\theta, \rho) = r_P[(\theta - \theta_0), \rho]. \quad (5)$$

对变量  $\rho$  进行对数变换  $\lambda = \lg\rho$ , 并定义  $r_{P_1}(\theta, \lambda) = r_P(\theta, \rho)$ ,  $s_{P_1}(\theta, \lambda) = s_P(\theta, \rho)$ , 则(5)式变为

$$s_{P_1}(\theta, \rho) = r_{P_1}[(\theta - \theta_0), \lambda]. \quad (6)$$

对(6)式进行傅里叶变换,并代入交叉能量谱公式中,即可求得旋转角度  $\theta_0$ 。利用该角度校正待测图得到初步匹配图。

### 2.2.3 基于特征的配准

该方法包括特征提取、特征描述、特征匹配、估计变换模型 4 个部分。着重考虑特征提取及估计变换模型。

1) 特征提取根据图像的几何特征及区域特征,一般用来实现图像配准的有特征点、直线、区域和纹理等。基于直线特征,计算量大且耗时多,不能满足实时性要求比较高的应用;基于区域特征,对图像灰度变化敏感,处理存在旋转的图像时结果不理想;基于特征点,原理简单,计算量小,稳定性好,效率高。因此采用基于特征点的 SURF 和 SIFT 算法。

2) 空间变换模型在图像配准之前,必须根据特征点选择合适的几何变换模型。几何变换模型有刚体变换、仿射变换、透射变换和非线性变换。前 3 种变换依次需要 2 对、3 对、4 对坐标点来确定变换模型。目前处理旋转和平移的图像配准中基本都采用仿射变换,将图像看作二维空间的变换,但实际拍摄可能会产生微畸变使图像处于三维状态,且仿射变换是透射变换的一种特殊情况,采用仿射变换会降低配准精度,影响最终结果。本文采用透射变换,其表示范围更宽,可靠度更高。

透射变换的数学模型为

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

基于上述选择对初步匹配图进行进一步配准,得到最终配准图。

## 2.3 图像融合

在图像配准中,无论是 Fourier-Mellin 变换之后的仿射变换还是特征匹配后的透射变换,都会对图像作旋转处理,这会使图像边缘产生锯齿和模糊。大量的文献表明,插值法可以消除锯齿。本文采用的是双立方插值,但是仍然存在边缘模糊。除此之外,光照变化也是不可避免的,单纯依靠间断更新标准图不能完全解决这一问题。锯齿和边缘模糊都会造成对应像素值的微变,微变虽可大可小,但对缺陷检测精度有不可忽略的影响。本文提出加权平均融合<sup>[18]</sup>的方法可以解决锯齿和边缘模糊问题。

假设  $I_1$  为标准图,  $I_2$  为待测图,大小均为  $M \times N$ ,  $I$  为融合后的图像,则  $I_1$ 、 $I_2$  两图加权平均融合为

$$I(M, N) = c_1 I_1(M, N) + c_2 I_2(M, N), \quad (8)$$

式中加权系数  $c_1 = I_1(M, N) / [I_1(M, N) + I_2(M, N)]$ ,  $c_2 = 1 - c_1$ , 加权系数根据实际情况设定。

## 2.4 局部自适应阈值分割

在差影法进行缺陷检测之前需将待检的两幅图阈值化,两幅图亮度可能不一致,或图像自身光照不均匀。若采用全局阈值分割,可能使噪声凸显,也可能将某些与目标图像灰度近似的缺陷淹没。本文采用局部自适应阈值分割,将  $M \times N$  的图像分为  $m \times n$  块( $m$ 、 $n$  分别是  $M$ 、 $N$  的整数倍),然后计算每一块的梯度直方图,最后对每个子图像做 Otsu 分割。

检测算法流程如图 1 所示。

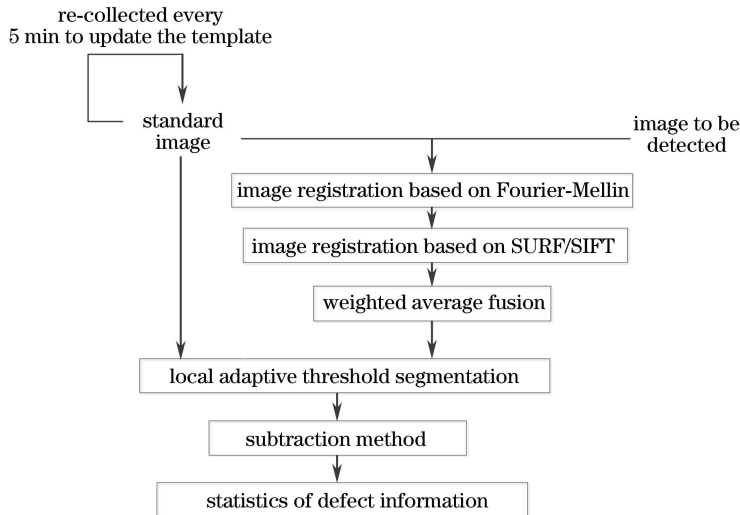


图 1 检测算法流程图

Fig. 1 Flow chart of detection method

### 3 实验结果与分析

采集样品图像进行实验,对比本文算法与现有的 SURF 仿射算法、SIFT 仿射算法,对匹配精度、抗误匹配、抗亮度变化、抗旋转角度、检测精度等性能进行定量分析。实验所用液晶显示屏为 TN 型 LCD(某品牌空调遥控器),尺寸为 34 mm×26 mm,采用 1280 pixel×1024 pixel 分辨率的 MV-1300UM 工业 CMOS 相机采集图像,图像大小均为 976 pixel×1104 pixel。

以两幅亮度明显不一致的图[图 2(b)和图 2(c)]为例进行分析。采用相关系数衡量匹配精度。相关系数是使用最广泛的相似性测度之一,两幅图像 A 和 B 的相关系数为

$$C_{AB} = \left[ \sum_{ij} (A_{ij} - \bar{A}) \cdot (B_{ij} - \bar{B}) \right] / \left[ \sum_{ij} (A_{ij} - \bar{A})^2 \cdot \sum_{ij} (B_{ij} - \bar{B})^2 \right]^{1/2}, \quad (9)$$

式中  $A_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为待测图像 A 和 B 中第  $i$  行、第  $j$  列的像素,  $\bar{A}$  和  $\bar{B}$  分别为待测图像 A 和 B 的平均像素。

图 2 为实验的标准图和待测图,待测图 A 亮度与标准图基本一致,有微弱变化;待测图 B 亮度比标准图高。



图 2 标准模版图和待匹配图。(a) 标准图;(b) 待测图 A;(c) 待测图 B

Fig. 2 Standard template image and images to be detected. (a) Standard image;

(b) image A to be detected; (c) image B to be detected

#### 3.1 图像配准

##### 3.1.1 匹配精度

以待测图 A 取  $0^\circ \sim 30^\circ$  均等  $5^\circ$  为例。由表 1 可知,本文算法相关系数明显高于其他两种算法,匹配精度最高,因为本文算法利用 Fourier-Mellin 变换先一步校正角度,然后在角度微小变化下采用特征匹配,不会存在太多误匹配点,且计算的透射变换模型参数更加精确,匹配效果更好。

表 1 配准精度(相关系数)

Table 1 Registration accuracy (correlation coefficient)

Rotation angle / (°)	5	10	15	20	25	30
SIFT affine method	0.426563	0.113808	0.934411	0.964970	0.965822	0.256628
SURF affine method	0.649525	0.194913	0.797684	0.885486	0.861436	0.691461
Proposed method (SURF)	0.999381	0.999291	0.999344	0.999327	0.999331	0.999371
Proposed method (SIFT)	0.999376	0.999293	0.999353	0.999327	0.999336	0.999371

## 3.1.2 抗误匹配

传统 SIFT 和 SURF 算法采用随机抽样一致性(RANSAC)去除误匹配算法,图 3 中去除误匹配条件(随机抽取)越来越宽泛(取样点最大间距从 0.015 增加至 0.20),旋转角度以  $0^\circ \sim 30^\circ$  为例。

取样点最大间距为 0.015 时,剔除条件严格,待测图 A 在 SURF 仿射下小角度匹配精度高,大角度没有

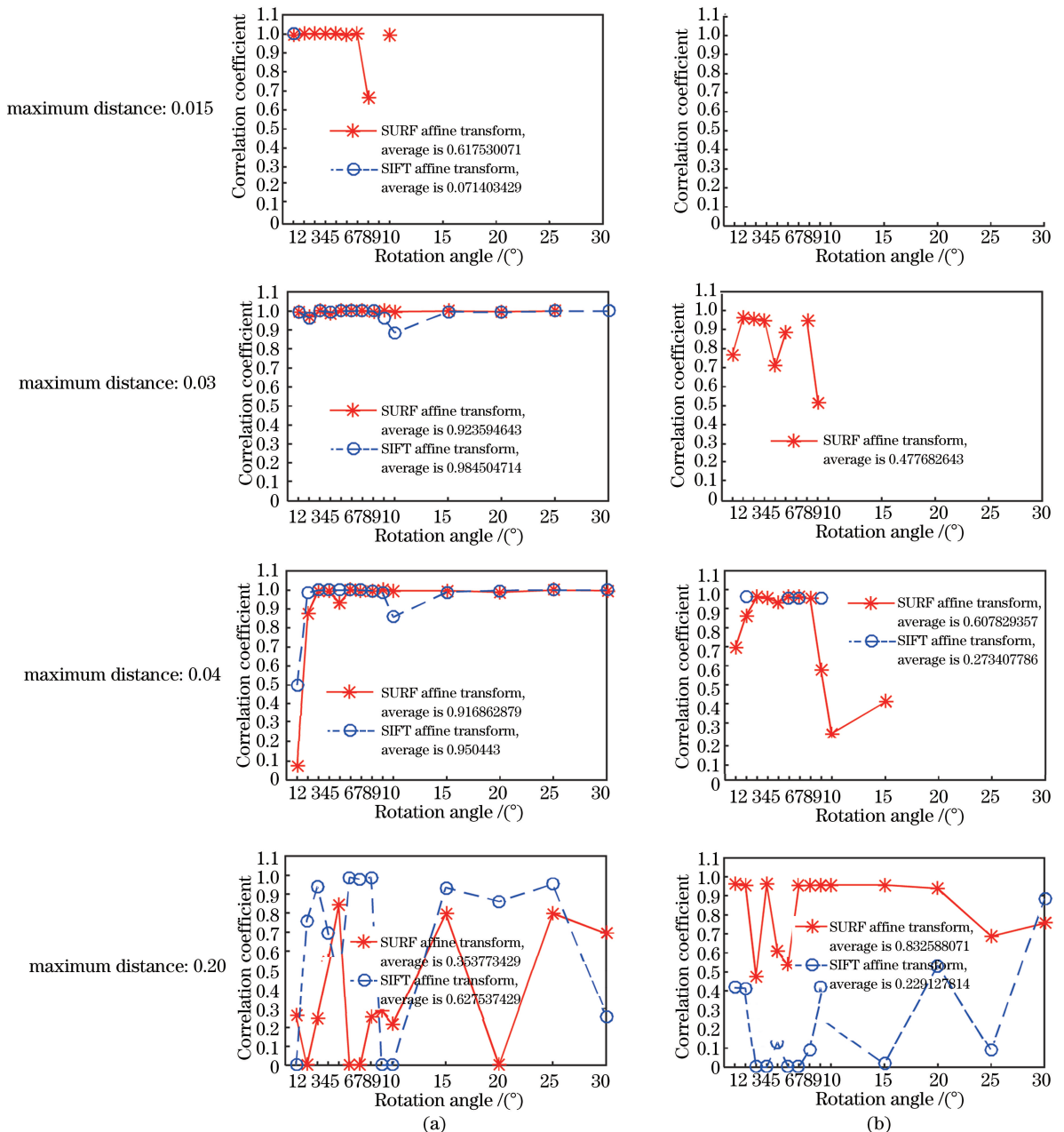


图 3 传统 SURF/SIFT 仿射算法。(a)待测图 A;(b)待测图 B

Fig. 3 Traditional SURF/SIFT affine methods. (a) Image A to be detected; (b) image B to be detected

足够匹配点对数发生错误, SIFT 仿射在  $1^\circ$  时精度高, 其余均无法匹配, 待测图 B 两种方法均无法匹配。取样点最大间距为 0.03 时, 剔除条件稍宽松, 待测图 A 在 SURF 仿射  $30^\circ$  发生错误, 其余小角度、大角度用两种方法的匹配精度都很高, 待测图 B 在 SURF 仿射下小角度可以匹配, 但波动很大, 大角度和 SIFT 仿射依然无法匹配。取样点最大间距为 0.04 时, 剔除条件更加宽松, 待测图 A 用两种方法的大角度匹配精度较高, 而小角度匹配精度出现下降趋势, 待测图 B 匹配角度范围稍有好转, 但精度仍不高。取样点最大间距为 0.20 时, 剔除条件十足宽泛, A、B 两图任何角度都可完成匹配, 但此时存在过多误匹配, 匹配精度低且波动大。

SURF/SIFT 仿射算法必须去除误匹配, 且程度难以把握, 不能满足广泛应用的需求。本文算法无论有无去除误匹配算法[图 4(a)和图 4(b)], 配准精度都高且稳定, 因此不需要去除误匹配, 且在保证精度的同时提高了时效性[图 4(c)和图 4(d)], 时间缩短了 0.1 s 量级。这也论证了前文所述单一的 SURF/SIFT 仿射算法加入去除误匹配算法增加了总的匹配时间。综上所述, 本文算法抗误匹配的性能更好, 总耗时要低于传统算法 0.1 s 量级, 如图 5 所示。

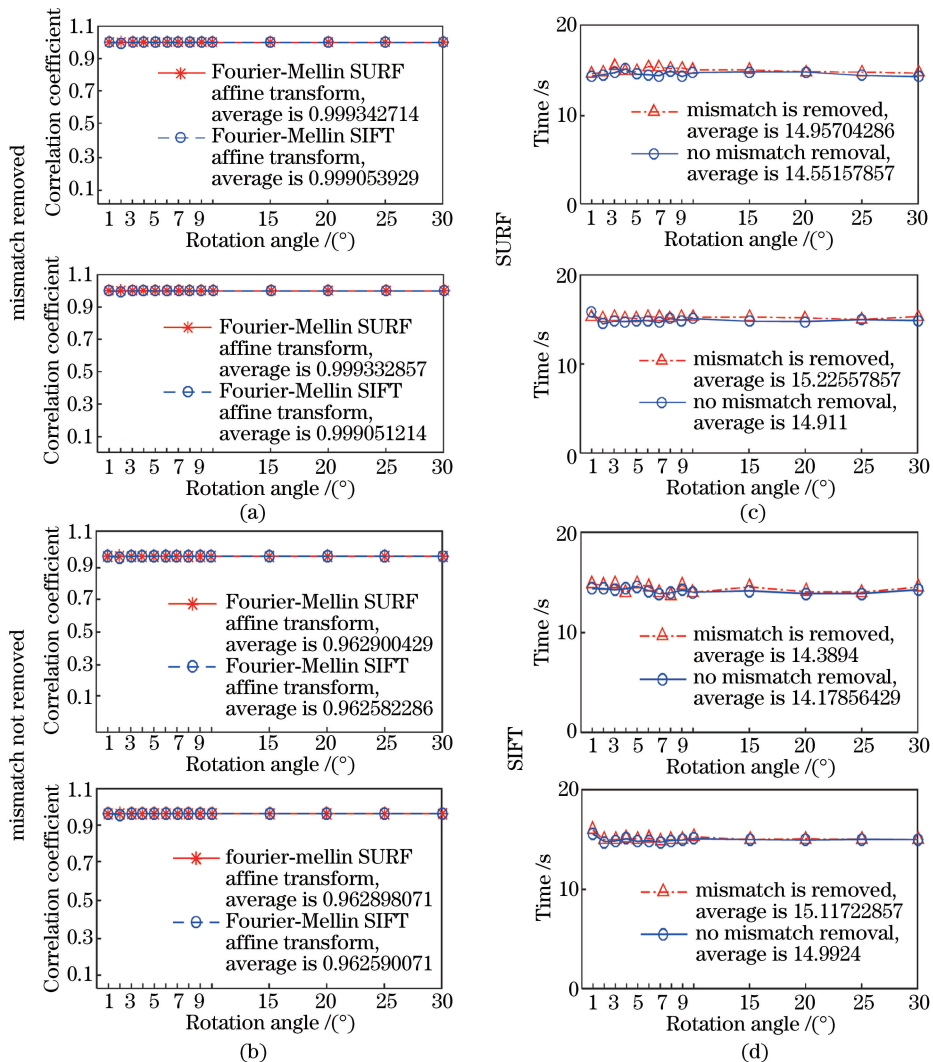


图 4 本文算法。(a)(c)待测图 A;(b)(d)待测图 B

Fig. 4 Proposed method. (a)(c) Image A to be detected; (b)(d) image B to be detected

### 3.1.3 抗亮度变化

由图 3 可知, 对于传统 SURF 和 SIFT 仿射算法, 亮度不同的图像在同一剔除条件下所能匹配的角度、匹配的程度、精度趋势等都大不相同, 而由图 5(a)、(b)可知, 本文算法对不同亮度的图像保持较高的配准精度, 且稳定性好。因此本文算法的抗亮度变化性能更好。

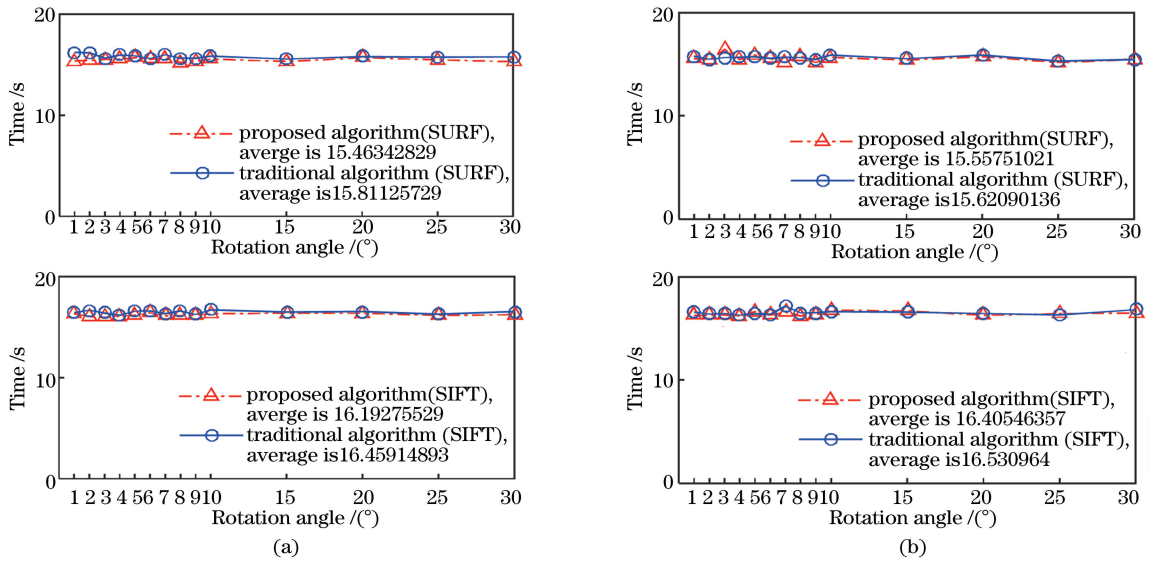


图5 本文算法与传统算法总时间对比。(a)待测图 A;(b)待测图 B

Fig. 5 Comparison of total time consumption between the proposed method and the traditional method.

(a) Image A to be detected; (b) image B to be detected

### 3.1.4 抗旋转角度

将待测图 A 以  $1^\circ$  为步长旋转  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 与标准图匹配, 对比 3 种算法的抗旋转能力, 如图 6 所示。

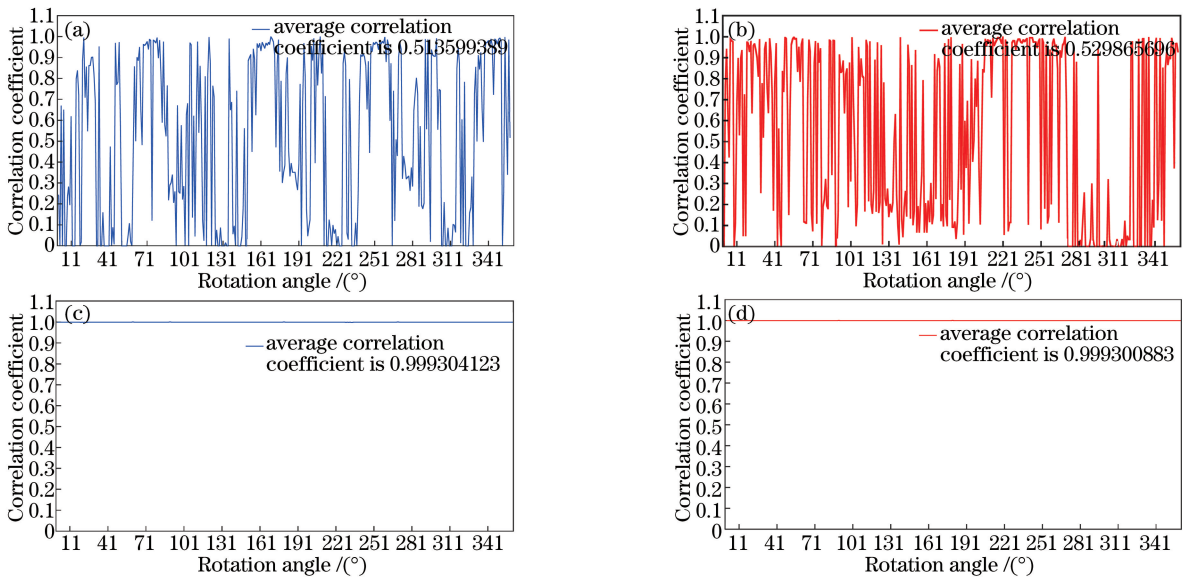


图6 抗旋转能力对比。(a)传统 SURF 仿射;(b)传统 SIFT 仿射;(c)本文算法(SURF);(d)本文算法(SIFT)

Fig. 6 Comparison of anti-rotation ability. (a) Traditional SURF affine method; (b) traditional SIFT affine method;

(c) proposed method (SURF); (d) proposed method (SIFT)

由图 6 可知, SURF、SIFT 仿射算法配准精度波动大, 且平均精度低; 本文算法配准精度曲线平滑, 仅有极其微小的毛刺, 可忽略, 平均精度很高。

### 3.2 图像融合

本文算法在配准后采用加权平均融合, 融合系数根据实际情况设定。融合系数过低会导致相关系数相对较低, 引入不必要的缺陷; 融合系数过高时, 虽然相关系数很高, 但会降低图像中有些缺陷的显著性。在保证实验环境光只有微弱变化的条件下, 对所用 LCD 进行大量连续数据测试, 选取最优组合  $c_1 = 0.38$ ,  $c_2 = 0.62$ 。以待测图 B 旋转  $30^\circ$  为例, 融合结果如图 7 所示。

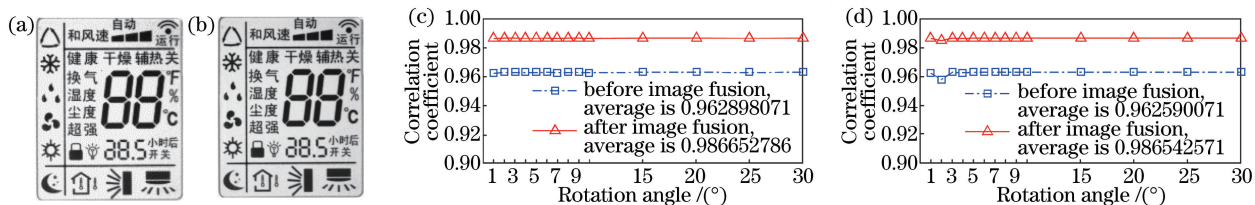


图7 本文算法的融合结果。(a)配准;(b)配准+融合;(c)精度对比(SURF);(d)精度对比(SIFT)

Fig. 7 Fusion results of the proposed method. (a) Result of image registration; (b) result of image registration and fusion; (c) precision comparison (SURF); (d) precision comparison (SIFT)

由图7可知,融合可以克服几何变换引起的边缘灰度变化和图像亮度不一致引入的灰度微差,其直接影响是配准精度提高,间接影响是缺陷检测精度提高。

### 3.3 局部自适应阈值分割

阈值分割对比如图8所示。由图8可知,传统全局阈值分割会遗漏缺陷,如白点、与目标背景近似的缺陷,而局部自适应阈值分割可以检测出任何缺陷,虽有噪点,但有些会与标准图中对应的噪点抵消,后续过程中也可经过中值滤波、高斯滤波、开运算、闭运算等消除。

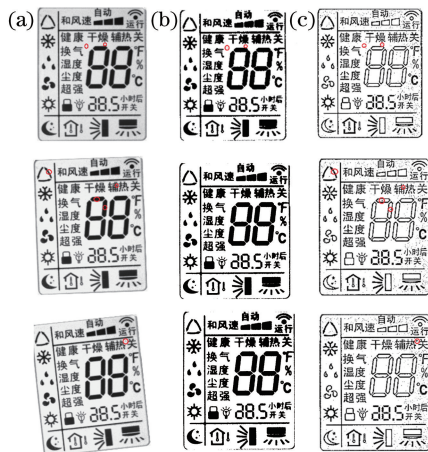


图8 阈值分割对比。(a)缺陷图(黑、白点,与目标背景近似的缺陷);(b)全局阈值分割结果;(c)局部自适应阈值分割结果

Fig. 8 Comparison of threshold segmentation results. (a) Original images with black points, white points, and defects similar to the target background; (b) results of global threshold segmentation; (c) results of local adaptive threshold segmentation

### 3.4 缺陷检测结果及分析

待检测液晶显示屏尺寸为 $34\text{ mm} \times 26\text{ mm}$ ,系统采用 $1280\text{ pixel} \times 1024\text{ pixel}$ 分辨率的MV-1300UM型工业相机,则每个像素尺寸为 $0.0266\text{ mm}$ ,满足精度 $0.1\text{ mm}$ 的需求。图9为黑点、白点以及与背景极为相近的缺陷检测结果。

共选取300个该类型LCD作为样品进行检测,包括多种常见缺陷,正确率可达98.667%。可见本文方法能够实现LCD显示缺陷自动光学检测,且可检测LCD种类不限,只需要针对不同的LCD适当调整工作距离即可。

## 4 结论

研究了一种高精度LCD液晶显示缺陷检测方法。针对核心图像配准,对比常用的SURF/SIFT仿射变换算法,提出了基于Fourier-Mellin变换的特征匹配及透射变换算法。该算法配准精度高,稳定性好,且能处理大角度图像,因此,放置LCD即可不用仔细调整角度到可控范围内,也不用在机械上增添放置LCD的卡槽。针对光照变化或配准过程中几何变换引入的灰度值变化,提出了基于加权平均融合的方法,该方法在一定程度上减小了灰度值变化,提高了配准精度,进而提高了缺陷检测精度。此外,基于局部自适应阈值分



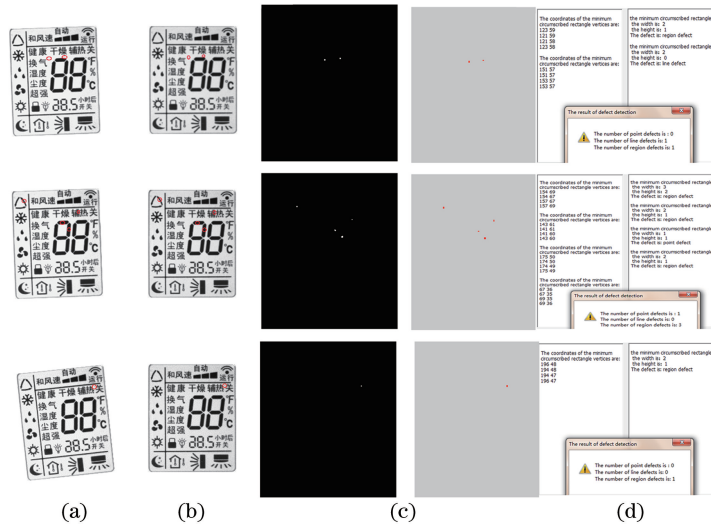


图 9 缺陷检测结果。(a)缺陷图(黑、白点,与目标背景近似的缺陷);(b)配准和融合后的结果;  
(c)缺陷检测结果;(d)缺陷信息统计

Fig. 9 Results of defect detection. (a) Original images with black points, white points, and defects similar to the target background; (b) registration and fusion results; (c) defect detection results; (d) statistics of defect information

割能够区分任何缺陷。用差影法检测缺陷并用最小外接矩形法统计缺陷信息,判别缺陷类型。本文方法检测精度可达 98.667%,具有很好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Lu R S, Shi Y Q, Li Q, *et al.* AOI techniques for surface defect inspection[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 36: 297-302.
- [2] Gan Y, Zhao Q. An effective defect inspection method for LCD using active contour model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(9): 2438-2445.
- [3] Yun J W, Gu H, Kim D H, *et al.* Automatic mura inspection using the principal component analysis for the TFT-LCD panel[C]. 1<sup>st</sup> IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taipei, 2014: 109-110.
- [4] Fan S, Chuang Y. Automatic detection of Mura defect in TFT-LCD based on regression diagnostics[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(5): 2397-2404.
- [5] Yang Y B, Li N, Zhang Y. Automatic TFT-LCD mura detection based on image reconstruction and processing[C]. IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Consumer Electronics-Berlin, 2013: 240-244.
- [6] Mahesh, Subramanyam M V. Automatic feature based image registration using SIFT algorithm [C]. 2012 3<sup>rd</sup> International Conference on Computing Communication and Networking Technologies-Coimbatore, 2012: 13252223.
- [7] Wang S H, You H J, Fu K. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 649-653.
- [8] Alcantarilla P F, Bartoli A, Davison A J. KAZE features[C]. IEEE IAS Annual Meeting, 2012: 214-227.
- [9] Wang B, Zhang J, Lu L, *et al.* A uniform SIFT-like algorithm for SAR image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1426-1430.
- [10] Huang Yuan, Da Feipeng, Tao Haiji. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308002.  
黄源, 达飞鹏, 陶海跻. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.
- [11] Wang Canjin, Sun Tao, Wang Rui, *et al.* Color image registration based on colored binary local invariant descriptor [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0109001.  
王灿进, 孙涛, 王锐, 等. 基于彩色二进制局部不变特征的图像配准[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0109001.
- [12] Yang Sa, Xia Minghua, Zheng Zhishuo. Medical image registration algorithm based on polynomial deterministic matrix and SIFT transform[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 081002.

- 杨飒, 夏明华, 郑志硕. 基于多项式确定性矩阵的 SIFT 医学图像配准算法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 081002.
- [13] Zeng Fanxuan, Li Liang, Diao Xinpeng. Iterative closest point algorithm registration based on curvature features[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011003.  
曾繁轩, 李亮, 刁鑫鹏. 基于曲率特征的迭代最近点算法配准研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011003.
- [14] Ding Nannan, Liu Yanying, Zhang Ye, *et al.* Fast image registration based on SURF-DAISY algorithm and randomized kd trees[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2012, 23(7): 1395-1402.  
丁南南, 刘艳滢, 张叶, 等. 基于 SURF-DAISY 算法和随机 kd 树的快速图像配准[J]. 光电子·激光, 2012, 23(7): 1395-1402.
- [15] Wu Yiquan, Tao Feixiang, Cao Zhaoqing. Image registration algorithm based on dual tree complex wavelet transform and SURF[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(5): 997-1003.  
吴一全, 陶飞翔, 曹照清. 利用双树复小波变换和 SURF 的图像配准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(5): 997-1003.
- [16] Chen Q S, Defrise M, Deconinck F. Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(12): 1156-1168.
- [17] Hutchison L A D, Barrett W A. Fast registration of tabular document images using the Fourier-Mellin transform[C]. 1<sup>st</sup> International Workshop on Document Image Analysis for Libraries, 2004: 253.
- [18] Lu Yongfang, Lu Ke, Hou Xiangwen. Research on Image Fusion Based on the IHS Transform[J]. Bulletin of Science and Technology, 2012, 28(6): 212-214.  
卢永芳, 卢珂, 侯翔文. 基于 IHS 变换的图像融合方法研究[J]. 科技通报, 2012, 28(6): 212-214.