

文章编号:1007-2780(2016)04-0339-08

TFT-LCD 面板光学检测自动聚焦算法 研究与比较

王永红*, 柏天舒, 但西佐, 闫佩正, 杨永跃
(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对当前 TFT-LCD 玻璃基板在线检测过程中存在的显微图像对焦模糊问题,对基于图像处理的自动调焦方法在 TFT-LCD 玻璃基板检测中的应用进行了研究。基于对 TFT-LCD 液晶面板的光学检测,重点介绍了目前较为常用的、具有代表性的几种基于图像处理的清晰度评价算法,并从算法的单峰性、无偏性、灵敏性以及计算量等方面进行了比较与分析,提出了一种粗细调相结合的复合自动对焦方法,分别选取斜边缘检测算子和梯度滤波器算子作为调焦粗搜索和精搜索阶段的对焦评价算子。实验结果表明:使用调焦行程为 15 步的全局搜索算法,传统单一算法耗时 2.18 s,得到图像的清晰度评价函数值为 46.78;粗细调相结合的复合自动对焦方法时间仅为 1.41 s,得到图像的清晰度评价函数值为 52.49。该方法不仅对焦精度高,有较大的对焦范围,还能保证高的计算效率。

关键词:自动对焦;清晰度评价函数;计算效率;数字图像处理;粗细调
中图分类号:TH742 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163104.0339

Research and comparison of TFT-LCD panel optical detection auto-focus algorithm

WANG Yong-hong*, BAI Tian-shu, DAN Xi-zuo, YAN Pei-zhen, YANG Yong-yue

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The auto-focusing devices in TFT-LCD glass substrate line detection process have problem of blurred image. In order to solve this problem, the application of image based on auto-focusing method in TFT-LCD glass substrate detection process was presented. Based on the optical detection of the TFT-LCD liquid crystal panel, this paper mainly introduces several typical image processing algorithms based on image processing. The focusing evaluation functions are compared and analyzed quantitatively through experiments in the aspects of unique value, unbiased, sensitivity and calculation speed. An evaluation method combining coarse and fine adjustment is presented. The Lean operator and Brenner operator were respectively chosen as the focus measure method of coarse and fine adjustment. The result show that when a lens of 15 steps focus length for local full search is used, traditional sin-

收稿日期:2016-01-26;修订日期:2016-02-29.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2013YQ220749);国家自然科学基金项目(No. 51375136)

Supported by National Key Scientific Equipment Development Projects (No. 2013YQ220749); National Natural Science Foundation of China(No. 51375136)

* 通信联系人, E-mail: yhwang@hfut.edu.cn

gle algorithm takes 2.18 s, the new method takes 1.41 s, and get clarity-evaluation function value is 52.49 higher than 46.78 of traditional single algorithm. This method is not only high focusing accuracy, a greater focus range, but also can ensure high computational efficiency.

Key words: auto-focusing; clarity-evaluation function; computational efficiency; digital image processing; coarse and fine adjustment

1 引言

当前平板显示技术与器件处于飞速发展时期,以 TFT-LCD 为代表的平板显示技术正快速替代彩色显像管(CRT)为代表的传统显示技术。TFT-LCD 液晶平板的生产过程主要有沉积、曝光、蚀刻和检测等工序。其中在 TFT-LCD 玻璃基板的缺陷检测中,需要采用显微镜对其进行局部观察和缺陷检测,实现对细节的检测,需要采用高倍物镜。由于显微成像单元视场范围只有几百微米,其景深很小,在对 TFT-LCD 液晶面板扫描过程中,载物台在 xy 平面上的移动将导致物距的微小变化,进而造成离焦和图像模糊。因此,实时精确的自动对焦技术在 TFT-LCD 液晶面板的光学检测中至关重要。

自动聚焦^[1]算法主要分为两大类:一类是基于测距法的主动对焦方法;另一类是基于图像灰度对比度分析法的被动对焦方法。后一类方法有两种实现方式,既可以使用光路设计的方法实现,也可以使用图像处理的方法实现^[2-5]。测距法和光路设计方法均需要额外增加硬件系统,而数字图像处理方法系统简单,操作方便,发展迅速。本文对目前常用的具有代表性的几种基于灰度梯度函数的清晰度评价算法进行了研究和对比分析,并给出了算法各自的单峰性、无偏性、灵敏性以及计算量等方面的比较结果,在此基础上提出了一种粗细调相结合的复合自动对焦方法。

2 常用图像清晰度评价函数

准确运用图像清晰度评价函数对快速有效地实现自动对焦至关重要。一幅图像清晰与否,关键要看图像的细节是否丰富、边缘是否明显,在空域表现为相邻像素的特征值变化大小;在频域表现为频谱高频分量的多少。

目前,图像清晰度评价函数主要分成 3 大类:灰度梯度函数,信息熵函数和频域分析函数^[6-12]。

2.1 灰度梯度函数

灰度梯度函数就是利用图像各像素点间的灰度变化来表征图像清晰度。假设 $g(x, y)$ 为图像中某点 (x, y) 处的灰度值, M, N 分别为图像 2 个方向的像素个数,则灰度梯度评价函数有以下几种定义:

(1)绝对方差函数

$$F_1 = \sum \sum |g(x, y) - g(x+1, y)|. \quad (1)$$

(2)梯度向量模方函数

$$F_2 = \sum_x \sum_y \left\{ [g(x+1, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+1) - g(x, y)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

与梯度向量模方函数相类似的还有梯度向量平方函数:

$$F_3 = \sum_x \sum_y \left\{ [g(x+1, y) - g(x, y)]^2 + [g(x, y+1) - g(x, y)]^2 \right\}. \quad (3)$$

(3)Brenner 函数(又称为梯度滤波器法)

$$F_4 = \sum_x \sum_y [g(x+k, y) - g(x, y)]^2. \quad (4)$$

(4)Roberts 梯度和函数

$$F_5 = \sum_x \sum_y \left[|g(x, y) - g(x+1, y+1)| + |g(x+1, y) - g(x, y+1)| \right]. \quad (5)$$

(5)灰度涨落变化函数(Variance 函数)

$$F_6 = \sum_x \sum_y [g(x, y) - \mu]^2. \quad (6)$$

其中: $\mu = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y g(x, y)$, 表示图像灰度的平均值。

(6)灰度变化率和函数

$$F_7 = \frac{\sum \sum [g(x, y) - g(x_0, y_0)]}{g(x_0, y_0)}, \quad (7)$$

其中: $g(x_0,y_0)$ 为所选取基准点 (x_0,y_0) 处的灰度值。

(7)拉普拉斯函数

$$F_8 = \sum \sum \left| \frac{4g(x,y) - g(x,y+1) - g(x,y-1) - g(x+1,y) - g(x-1,y)}{g(x-1,y)} \right|, \tag{8}$$

改进:

$$\begin{aligned} F_8' &= \sum \sum \left| \frac{2g(x,y) - g(x,y+1) - g(x,y-1)}{g(x,y+1)} + \frac{2g(x,y) - g(x+1,y) - g(x-1,y)}{g(x-1,y)} \right| \\ F_8'' &= \sum \sum \left[\left| \frac{g(x,y) - g(x,y+1)}{g(x,y+1)} \right| + \left| \frac{g(x,y) - g(x,y-1)}{g(x,y-1)} \right| + \left| \frac{g(x,y) - g(x+1,y)}{g(x+1,y)} \right| + \left| \frac{g(x,y) - g(x-1,y)}{g(x-1,y)} \right| \right] \\ F_8''' &= \sum \sum \left| \frac{2g(x,y) - g(x,y+step) - g(x,y-step)}{g(x,y+step)} + \frac{2g(x,y) - g(x+step,y) - g(x-step,y)}{g(x-step,y)} \right| \end{aligned}$$

第一种是典型的用差分替代微分的拉普拉斯方程,但是先减后取绝对值的方式易使 4-邻域的符号相互抵消,灵敏度降低。改进的 1 式虽然提高了灵敏度,但同时也使噪声的干扰增加了 4 倍;改进的 2 式折中了灵敏度和噪声的干扰;改进的 3 式类似于一个梳状滤波器,step 越大,梳齿就越

密,它只对个别频率进行衰减而对包括低频在内的大多数频率进行增强,从而增强了评价函数对低频信号的灵敏度。

(8)Sobel 算子评价函数

$$F_9 = \sum \sum \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)}, \tag{9}$$

其中:

$$\begin{aligned} G_x &= g(x+1,y+1) + 2g(x+1,y) + g(x+1,y-1) - g(x-1,y+1) - 2g(x-1,y) - g(x-1,y-1) \\ G_y &= g(x-1,y+1) + 2g(x,y+1) + g(x+1,y+1) - g(x-1,y-1) - 2g(x,y-1) - g(x+1,y-1) \end{aligned}$$

除了以上的评价函数,在 Sobel 算子的基础上,对其进行改进,将重点放在模板边缘的像素点,由此提出了 Prewitt 算子评价函数^[13] F_{10} ,根据自然图像斜边缘多于水平和垂直边缘的特点,又引入了阈值的概念,由此提出了 Lean 算子评价函数^[14] F_{11} 。

绝对方差函数只选取了水平方向相邻的两个像素的灰度值之差作为评价函数;梯度向量模方函数和梯度向量平方函数利用了两个方向上梯度变化作为图像灰度变化的判断依据;Brenner 函数选取了水平方向相距 k 个像素的梯度变化的平方和作为判定依据;Roberts 梯度算子使用了被测点及其附近三个像素点的灰度信息,并且是沿着 $\pm 45^\circ$ 的方向进行比较;Variance 算子是取各像素点灰度值与平均灰度值之差的平方和作为判断依据;灰度变化率和函数通过比较每一像素点与同一像素点的灰度变化率之和作为判断依据,该

方法适用于具有固定单一背景的图片;拉普拉斯算子使用了被测点及其 4-邻域像素点的灰度信息。

灰度梯度函数均是利用对图像灰度的各种处理来表征图像的清晰度,都是利用清晰的图像应有比模糊的图像更大的灰度差异。离焦时图像模糊,相邻像素的灰度变化较平缓,相邻像素的特征值变化小,而越接近准焦时,相邻像素的灰度值变化急剧,相邻像素的特征值变化大。

2.2 信息熵函数

聚焦清晰的图像的熵大于没有聚焦清晰的图像,图像越清晰,熵越大。基于这一理论,我们可以利用图像的信息熵函数作为图像清晰度的判据。图像的能量和图像的信息熵可写为:

$$\begin{cases} E = \sum \sum g(x,y) \\ H = - \sum \sum g(x,y) \log_b [g(x,y)] \end{cases}, \tag{10}$$

其中: $b=2$ 或 e 。按信息学香农(Shannon)熵的定

义,熵最大时信息量最多,图像越清晰,即在图像能量 E 一定时,在图像信息熵 H 最大值点得到聚焦最好的图像。

2.3 频域分析函数

频域分析函数是以傅里叶光学为理论基础的清晰度评价函数。聚焦良好的图像具有清晰的边缘和丰富的图像细节,这些部分与傅里叶变换后的高频分量相对应;即图像聚焦越好,其频谱的高频成分越丰富。因此可以根据图像经傅里叶变换后所含的高频含量的多少作为评判聚焦与否的标准。对一连续图像做二维傅立叶变换可得:

$$F_{12} = \sum_0^{M-1} \sum_0^{N-1} g(m,n)W_1^{mk}W_2^{nl}, \tag{11}$$

其中: $W_1 = e^{-j2\pi/M}$, $W_2 = e^{-j2\pi/N}$ 。再计算其高频分量的幅值和,最大值即为所求。

3 复合对焦方案选择与分析

为了选择适合 TFT-LCD 液晶面板自动光学检测的图像清晰度评价函数,本文选用了目前较为常用的、具有代表性的 12 种基于图像处理的清晰度评价算法进行了分析与比较,它们分别是:绝对方差函数、梯度向量模方函数、梯度向量平方函数、Brenner 函数、Roberts 梯度和函数、Variance 函数、拉普拉斯函数、Sobel 算子、Prewitt 算子、Lean 算子、熵函数以及傅里叶变换函数。由于灰度变化率和函数不能得到光滑的曲线无法找到极值点,所以不参与比较。一个好的清晰度评价函数应该具备这样几个特点:无偏性、灵敏性、单峰性、平滑性以及高效率。本文将通过分析和比较两种步进距离条件下不同清晰度评价函数的情况,最终得到适合 TFT-LCD 液晶面板自动光学检测的复合对焦方法。

3.1 计算效率分析

为了比较各种运算效率的差异,本文用计算一幅图像所需要的运算时间来表示运算的复杂性。公式中涉及的运算时间按递增顺序依次为:加法/减法、乘法/除法、平方运算、开方运算、对数运算和图像灰度值的排序与比较运算。我们以 3×3 个像素点为例,各种算法运算次数的比较情况如表 1 所示。

表 1 不同清晰度评价函数的运算次数比较
Tab. 1 Comparison of operation times of different sharpness evaluation function

算子	加法/ 减法	乘法/ 除法	平方/ 开方	绝对值	指数/ 对数
F_1	9			9	
F_2	27		27		
F_3	27		18		
F_4	9		9		
F_5	27			27	
F_6	18		9		
F_8	45	18			
F_9	99	36	27		
F_{10}	99		27		
F_{11}	99	36		18	
H	36	72			36
F_{12}	72	81			

由于计算机在处理各种运算时存在中断请求,所以即使运算次数相同,每次处理的时间也不尽相同。用上述 12 种清晰度评价函数对四组不同的图像进行处理,每组均为 50 幅图像,以其平均处理时间作为算法效率的评价参数。表 2 给出了这 12 种算法的运算时间。

通过表 1 和表 2,可以很直观地看到各种方法的计算效率, F_{12} 需要的时间最长,效率最低; F_4 和 F_6 需要的时间最短,效率最高; F_9 、 F_{10} 和 F_{11} 所需要的时间相当; F_1 和 F_3 、 F_2 和 F_5 所需要的时间相当,H 的计算时间介于两者之间。

表 2 不同清晰度评价函数的计算时间比较
Tab. 2 Comparison of computing time of different sharpness evaluation function

算子	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	平均值
F_1	3.17 s	2.42 s	3.49 s	3.48 s	3.14 s
F_2	3.72 s	3.97 s	5.97 s	6.12 s	4.95 s
F_3	2.61 s	2.61 s	4.22 s	4.30 s	3.44 s
F_4	1.50 s	1.52 s	2.36 s	2.39 s	1.94 s
F_5	3.40 s	3.50 s	5.57 s	5.64 s	4.53 s
F_6	1.86 s	1.87 s	2.95 s	2.92 s	2.40 s

续表

算子	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	平均值
F_8	3.78 s	3.84 s	6.36 s	6.45 s	5.11 s
F_9	6.69 s	6.75 s	11.24 s	11.23 s	8.98 s
F_{10}	6.67 s	6.72 s	11.23 s	11.17 s	8.95 s
F_{11}	6.45 s	6.60 s	10.96 s	10.53 s	8.64 s
H	3.14 s	3.42 s	4.95 s	4.77 s	4.07 s
F_{12}	8.95 s	9.24 s	15.89 s	15.92 s	12.5 s

3.2 粗调焦算法

实验通过显微镜采集 TFT-LCD 液晶面板的图像,通过调节物镜的纵向位置来改变其与被测物之间的距离,实现图像的调焦,物镜移动的步进大小为 $1.56\text{ }\mu\text{m}$ 。实验在聚焦位置附近分别采集两组相同内容的 TFT-LCD 液晶面板图像,其中一组图像对比度较高,另一组图像对比度较低,每组采集了 40 幅图像。采集的图像大小为 $1\ 280\text{ pixel}\times 960\text{ pixel}$,将图像按照远焦-聚焦-近焦的顺序排列。图 1 为高对比度时的第 5、20、35 张图片,图 2 为低对比度时的第 5、20、35 张图片。用 12 种清晰度评价函数分别计算每幅图像的聚焦评价函数值,为了方便比较不同方法的优异,对它们进行归一化处理,并在一幅图中用不同的曲线显示出来,得到的聚焦评价曲线如图 3 所示。其中横坐标表示不同程度离焦图像的序号,纵坐标表示各种算法的归一化的聚焦评价函数值。

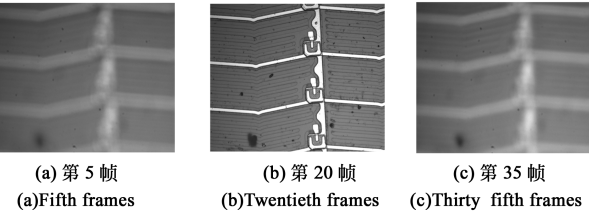


图 1 高对比度时 TFT-LCD 液晶面板图像
Fig. 1 High-contrast TFT-LCD panel image

从图 3(a)可以看出,除了熵函数以外,其他评价函数都具有良好的无偏性,在第 21 幅图像处均得到最大的聚焦评价函数值,即聚焦清晰的位置。绝对方差、梯度向量模方函数、梯度向量平方、Roberts 和 Laplace 函数在峰值两侧都趋于直线,对焦范围比较小。灵敏度方面 Brenner、FFT、Variance、Prewitt、Sobel 和 Lean 函数相对

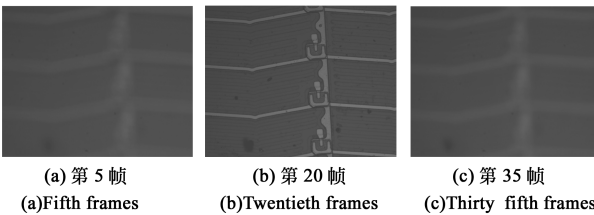
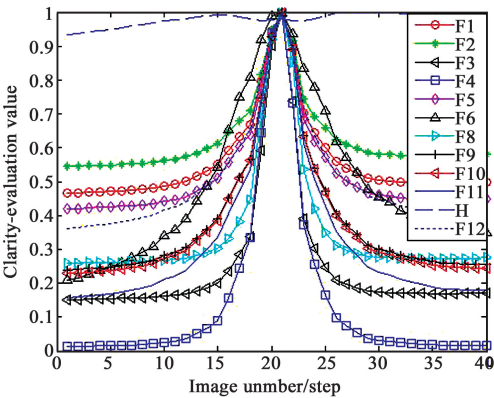
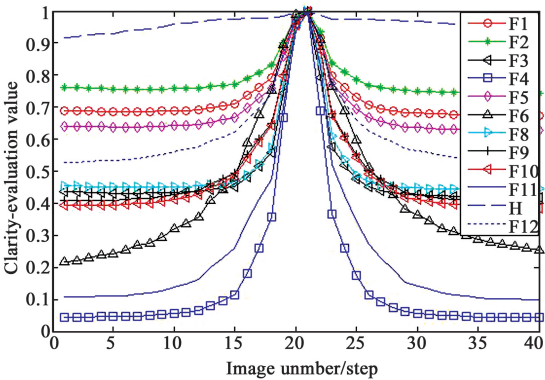


图 2 低对比度时 TFT-LCD 液晶面板图像
Fig. 2 Low-contrast TFT-LCD panel image



(a) 高对比度时
(a) High-contrast



(b) 低对比度时
(b) Low-contrast

图 3 不同离焦图像各算法归一化后的清晰度评价
值
Fig. 3 Evaluation value of normalized difference of different degree of out of focus image

较好。
从图 3(b)可以看出,在低对比度情况下,12 种清晰度评价函数都在第 21 幅图像处均得到最大的聚焦评价函数值,具有良好的无偏性。除了 Variance、Lean 和 Brenner 函数其他函数的灵敏度都有所下降,但是 Brenner 函数在远离焦点位

置曲线趋于平滑,对焦范围较小。

针对 TFT-LCD 液晶面板的边缘,采取同样的方式,调节步距的大小为 $1.56\text{ }\mu\text{m}$,采集两组图像,其中一组图像对比度较高,另一组图像对比度较低,每组采集了 40 幅图像,采集的图像大小同样为 $1\,280\text{ pixel}\times 960\text{ pixel}$,将图像按照远焦-聚焦-近焦的顺序排列。图 4 为高对比度时的第 5、20、35 张图片,图 5 为低对比度时的第 5、20、35 张图片。同样的,用 12 种清晰度评价函数对其进行处理,得到图 6 两条聚焦评价曲线。

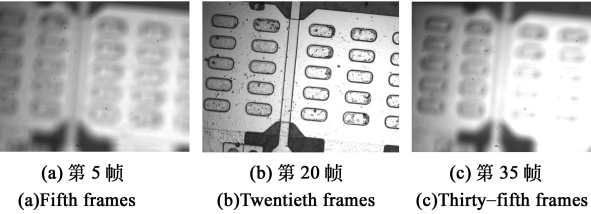


图 4 高对比度时 TFT-LCD 液晶面板边缘图像
Fig. 4 High-contrast TFT-LCD panel edge image

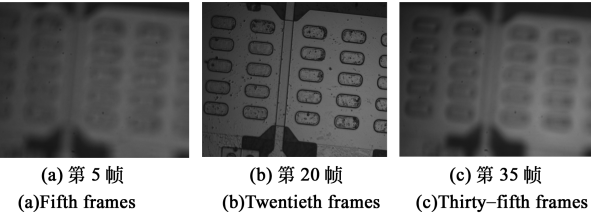
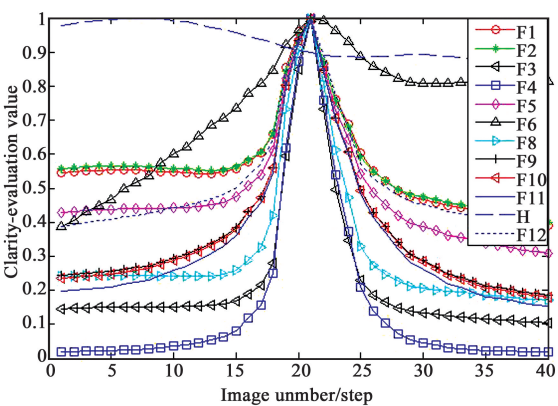


图 5 低对比度时 TFT-LCD 液晶面板边缘图像
Fig. 5 Low-contrast TFT-LCD panel edge image

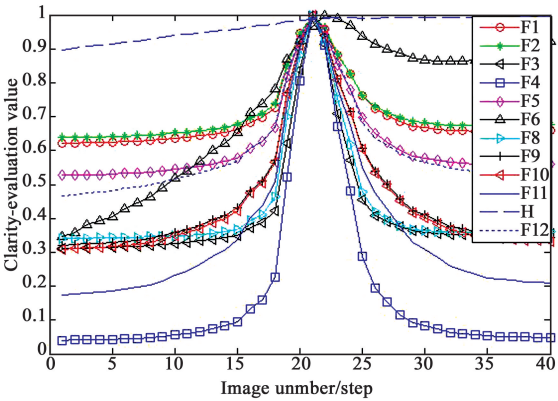
从图 6(a)可以看出,除了熵函数以外,其他评价函数都具有良好的无偏性,在第 21 幅图像处均得到最大的聚焦评价函数值,即聚焦清晰的位置。绝对方差、梯度向量模方函数、Roberts 和 Laplace 函数在峰值左侧有轻微上升趋势,不便于极值的确定;梯度向量平方函数在峰值两侧区域接近于直线,对焦范围比较小;Variance 函数在峰值处不尖锐,且峰值右侧没有快速衰减;灵敏度方面 Brenner、FFT、Prewitt、Sobel 和 Lean 函数相对较好。

从图 6(b)可以看出,在低对比度情况下,除熵函数和 Variance 函数都在第 21 幅图像处均得到最大的聚焦评价函数值,具有良好的无偏性。除了 Lean 和 Brenner 函数其他函数的灵敏度都有所下降,但是 Brenner 函数依然存在对焦范围较小的问题。



(a) 高对比度时

(a) High-contrast



(b) 低对比度时

(b) Low-contrast

图 6 不同离焦图像各算法归一化后的清晰度评价
Fig. 6 Evaluation value of normalized difference of different degree of out of focus image

粗调算法根据其自身特点,具有特殊性,综合文献[4][12]得出粗调焦的应有如下特点:无偏性要求很低;单峰性要求较低;灵敏度平滑性范围要求很高;效率要求较高;鲁棒性要求很高。综上所述,在粗调焦阶段应选择 Lean 函数作为清晰度评价函数。

3.3 精调焦算法

针对 TFT-LCD 液晶面板的检测,为了在精调焦阶段选用适合的清晰度评价函数,使物镜移动的步进大小为 $0.156\text{ }\mu\text{m}$,采集了 40 幅图像。采集的图像大小为 $1\,280\text{ pixel}\times 960\text{ pixel}$,将图像按照远焦-聚焦-近焦的顺序排列。图 7 为采集图像的第 5、20、35 张图片。用 12 种清晰度评价函数分别计算每幅图像的聚焦评价函数值,得到的聚焦评价曲线如图 8 所示。

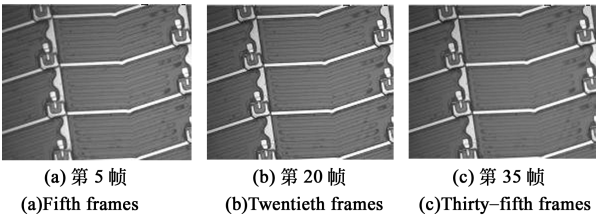


图 7 TFT-LCD 液晶面板图像
Fig. 7 TFT-LCD panel image

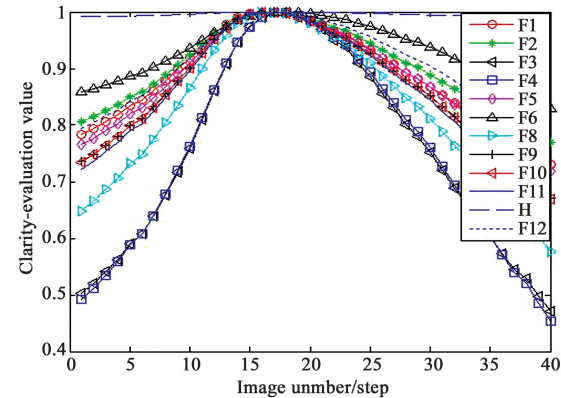


图 8 不同离焦图像各算法归一化后的清晰度评价
Fig. 8 Evaluation value of normalized difference of different degree of out of focus image

从图 8 可以看出 12 种清晰度评价函数均在第 17 幅图像处均得到最大的聚焦评价函数值,即聚焦清晰的位置。其中熵函数趋近于一条平行于 X 轴的直线,无法准确判断极值点;梯度向量平方函数和 Brenner 函数的顶端最尖锐,灵敏度较好。在效率方面,Brenner 函数明显优于梯度向量平方函数。

精调算法应有如下特点:无偏性要求很高;单峰性要求较高;灵敏度平滑性范围要求很低;效率要求较低。综上所述,在精调焦阶段应选择 Brenner 函数作为清晰度评价函数。

4 实验比较

实验采用 Nikon CFI₆₀-2 20x 物镜搭配 Basler axA1300-22gm/gc 的 CCD。为了测试改

进的粗细调相结合算法的性能,在相同范围内,按等步长和变步长的方法各采集 15 幅图像。运用 Lean 函数和改进的粗细调相结合算法分别对其进行处理,将两种算法写成独立的函数,在 Windows 平台下分别对得到 15 幅图像进行处理,并在聚焦结束后,用 Lean 函数计算两种方法得到的聚焦后清晰度评价函数值。结果如表 3 所示。通过实验比较表明,复合对焦算法比单一的对焦方法对焦精度高,而且所需时间短、效率高,在保证对焦效率的同时也保证了对焦的准确性。

表 3 几种聚焦算法性能比较

Tab. 3 Performance comparison of focusing algorithms

算法	所需时长/s	聚焦后清晰度评价值/Pixel
Lean	2.18	46.78
Prewitt	2.01	46.72
Sobel	2.09	48.80
FFT	2.84	47.77
粗细调	1.41	52.49

5 结 论

针对大型 TFT-LCD 玻璃基板的实时在线缺陷显微成像检测,本文设计了一种粗调焦和细调焦相结合的复合对焦算法。实验证明,鉴于 Lean 函数在远焦区域的优秀性能和 Brenner 函数的高灵敏度,在粗调焦阶段选用 Lean 函数作为清晰度评价函数;在细调焦阶段选用 Brenner 函数作为清晰度评价函数。与传统单一的方法相比,复合对焦算法同时兼具了 Lean 函数对焦范围大的特点和 Brenner 函数对焦精度高的特点,在保证对焦效率的同时也保证了对焦的准确性。用传统单一方法平均耗时 2.18 s,采用改进的粗细调相结合的方法,时间仅为 1.41 s,并且得到图像的清晰度评价函数值较大。

参 考 文 献:

[1] SUBBARAO M, CHOI T S, NIKZAD A. Focusing techniques [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2824-2836.

[2] CHEN C Y, HWANG R C, CHEN Y J. A passive auto-focus camera control system [J]. *Applied Soft Compu-*

ting, 2010, 10(1): 296-303.

- [3] CHANG H C, SHIH T M, CHEN N Z, *et al.* A microscope system based on bevel-axial method auto-focus [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(5): 547-551.
- [4] 王超, 蒋远大, 翟光杰, 等. 基于数字图像处理的自控显微镜聚焦算法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(6): 1290-1294.
WANG C, JIANG Y D, ZHAI G J, *et al.* Study on auto focusing algorithm for microscope base on digital image processing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(6): 1290-1294. (in Chinese)
- [5] 赵志彬, 刘晶红. 基于图像处理的航空成像设备自动调焦设计[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(6): 863-868.
ZHAO Z B, LIU J H. Auto-focusing method for airborne image equipment based on image processing [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(6): 863-868. (in Chinese)
- [6] 孙杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 35-39.
SUN J, YUAN Y H, WANG C Y. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocus-criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 35-39. (in Chinese)
- [7] 余超, 王伯雄, 郑汉卿, 等. 显微镜自动粗调焦的 TennenGrad 改进算法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(5): 784-790.
YU C, WANG B X, ZHENG H Q, *et al.* Improved TennenGrad function for microscopic coarse autofocusing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(5): 784-790. (in Chinese)
- [8] 尤玉虎, 刘通, 刘佳文. 基于图像处理的自动对焦技术综述[J]. *激光与红外*, 2013, 43(2): 132-136.
YOU Y H, LIU T, LIU J W. Survey of the auto-focus methods based on image processing [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 132-136. (in Chinese)
- [9] 田畔, 谷朝臣, 胡洁, 等. 显微镜自动对焦方法研究综述[J]. *光学技术*, 2014, 40(1): 84-88.
TIAN P, GU C C, HU J. Research survey on microscopy autofocus methods [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(1): 84-88. (in Chinese)
- [10] 吕恒毅, 刘杨, 薛旭成. 基于微粒群区域搜索和小波评价的差分式自动聚焦[J]. *中国光学*, 2011, 4(3): 283-292.
LÜ H Y, LIU Y, XUE X C. Difference auto-focusing based on particle swarm optimization searching and wavelet evaluation [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(3): 283-292. (in Chinese)
- [11] 张艳超, 赵建, 韩希珍, 等. SUSAN 清晰度评价函数在自动对焦中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 240-244.
ZHANG Y C, ZHAO J, HAN X Z. *et al.* Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 240-244. (in Chinese)
- [12] 张振久, 胡泓, 李天利. 透镜检测中复合自动对焦技术的研究及应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 113-119.
ZHANG Z J, HU H, LI T L. Application and research of composite autofocusing technique in optical- lens measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 113-119. (in Chinese)
- [13] 孙越, 栾晓明, 赵芳. 一种改进的图像清晰度评价函数[J]. *应用科技*, 2009, 36(9): 52-55.
SUN Y, LUAN X M, ZHAO F. An improved image-clarity evaluation function [J]. *Applied Science and Technology*, 2009, 36(9): 52-55. (in Chinese)
- [14] 杨权, 刘晶红, 马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(5): 677-682.
YANG Q, LIU J H, MA X F. Auto-focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(5): 677-682. (in Chinese)

作者简介:王永红(1972—),男,安徽合肥人,博士后,教授,研究生导师,1994 年于合肥工业大学获得学士学位,1997 年于中科院安徽光机所获得硕士学位,2004 年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail: yhwang@hfut.edu.cn