文章编号:1001-5078(2010)12-1358-06 ·光电技术与系统·

一种检测薄膜晶体管液晶屏的自动对焦方法

姜 钧,程良伦,黄 帅
(广东工业大学控制科学与工程系,广东 广州 510006)

摘 要:针对大尺寸 TFT-LCD(第五代到第八代)生产检测过程中要求成像系统成像速度快、精度高的情况,研究快速的显微镜自动对焦方法。提出一种间接清晰度评价函数和一种用于 TFT-LCD 玻璃板检测的显微镜自动对焦的方法,采用一个激光器和一个黑白 CMOS 相机作为辅助手段,通过寻找 CMOS 相机最大的通光率的值确定 CCD 相机对焦最好的目标点,在此基础上,通过求取 CMOS 相机获得图片中的激光光斑质心并查表确定镜头调节的方向和距离。实验结果表明,对于放大倍率为 5 倍至 50 倍的物镜,当玻璃板在焦平面上下正负 50 μm 范围内进行自动对焦时,对焦时间在 0.4 s 以内,重复对焦精度可达到景深的 0.1 ~0.5 倍以内。

关键词:成像系统;自动对焦;通光率;光斑质心;对焦时间
中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Method of auto-focus for TFT-LCD test

JIANG Jun, CHENG Liang-lun, HUANG Shuai
(Department of Control Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To meet the requirement of high speed and accurate performance test of large TFT-LCD (the fifth to the eighth generation LCD), fast auto-focus method is studied. A clarity evaluation function and an auto-focus method used to inspect the glass by microscope are presented. It used a laser and a black /white CMOS camera as an auxiliary means. The CMOS camera is used for getting image of the laser spot. Evaluation criteria of definition can be acquired by calculating the transparent rate of the CMOS camera. The focus of CCD camera can be obtained by the clarity evaluation function. On this basis, how to adjust the distance between the microscope lens and the glass in order to achieve focus is determined by the position of the spot centroid of the image in the spot centroid table. Experimental results show that when the objective lens with magnification of 5 to 50 times of depth of field are used for test, auto-focus time is 0.4 seconds or less and repetitive focusing accuracy can be less than 0.1 times to 0.5 times when the glass is in the focal plane up and down within ±50 μm.

Key words: imaging systems; auto-focus; rate of pass-ray; spot centroid; focus time

1 引 言

TFT-LCD 玻璃板是一层很薄的带有金属丝电路的玻璃,生产过程中会出现金属丝短路、断路、破裂,玻璃沾有灰尘,留有划痕等缺陷,因此需要做出厂前检测的工作[1-2]。大尺寸(第五代后的)TFT-LCD 玻璃板(以下简称玻板)为了满足提高光学检测设备使用效率的要求,必须使得检测过程中成像系统能够快速清晰地显示被检测点的像。此项工作要求显微镜能实现对玻板的自动对焦,并且要求有较高的速度和精度。

自动对焦技术有主动和被动两种方式[3-4]。国内现有的显微镜自动对焦方式一般采用被动方式,其主要方法是构造一个清晰度评价函数,通过对物体在显微镜下图像的分析得到当前的清晰度,然后与图片最清晰时的清晰度比较从而控制机构移动,通过多次移动达到最终对焦的目标[5]。但是这种

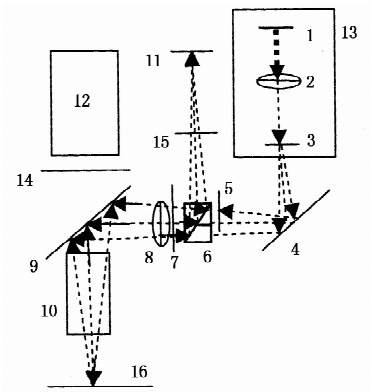
基金项目:广东省教育部产学研项目(No. 2007A090302071);广东省教育部产学研项目(No. 2009B090300242)资助。
作者简介:姜 钧(1985-),男,硕士,主要从事光学自动化检测,自动化装备方面的研究。E-mail:sxjj04@yahoo.cn
收稿日期:2010-07-15

方法需要进行复杂的图像处理过程,其自动对焦花费的时间比较长,用于高速的玻板检测生产线是不满足要求的。日本中央精机公司的某款自动对焦显微镜根据照明光源在离焦位置和对焦完成位置的光程差不同来调节物镜与物体间的距离实现对焦,在正负 200 μm 对焦范围内,可实现 0.5 s 内完成对焦。加拿大 WDI 公司的某产品采用激光照射物体,根据激光光斑的中心位置判断离焦程度,在正负 100 μm 对焦范围内,可实现 0.2 s 内完成对焦。

本文所用的自动对焦方法属于主动方式,原理与 WDI 公司的类似。在显微镜光学回路里加入了一个激光器,激光透过物镜射到玻板表面后反射回来,反射回来的激光落在一个黑白 CMOS 芯片上。在此辅助手段的基础上,根据提出的间接的清晰度评价函数确定对焦最好的目标位置,然后用黑白 CMOS 相机获得图片中光斑的质心,查表就能得到调节物镜以实现对焦的参数,从而可以通过显微镜上面的 CCD 相机得到清晰的玻板图像。该方法不需要复杂的图像处理过程,能实现玻板在焦平面上下正负 50 μm 范围内在 0.4 s 时间内自动对焦,对于放大倍率为 10 ~ 50 的物镜,重复对焦精度能达到各自景深的 0.1 ~ 0.5 倍,对焦精度能达到各自景深的 0.4 ~ 0.8 倍,适合用于工业上 TFT - LCD 检测设备。

2　系统结构

为了利用辅助手段实现对焦,显微镜光学模块分成了显微镜主体部分、激光光斑采集部分、激光发射部分。光学模块原理图如图 1 所示。



1 - laser; 2 - focus lens; 3 - pinhole; 4 - mirror; 5 - light barrier; 6 - polarized spectroscopic; 7 - 1/4 wave plate; 8 - frocus lens; 9 - spectroscope; 10 - microscope lens; 11 - CMOS chip; 12 - microscope main; 13 - corrective platform; 14 - IR cut filter; 15 - laser filter; 16 - glass for inspection

图 1　光学模块原理图

Fig. 1　optical module schematic

显微镜主体包含了观察物体的彩色 CCD 相机和光源,除此部分以外是以激光和黑白 CMOS 相机等组成的辅助对焦的部分。激光器发射激光通过显微镜与物体之间的光路,然后反射回来的激光射向黑白 CMOS 相机。

由于检测的过程中有使用不同倍率物镜的需求,根据这一需求,系统结构上用了 XY 驱动平台带动 6 个倍率不同的镜头,需要某个倍率的镜头时就将对应的镜头切换到光学模块正下方。整个系统的结构图如图 2 所示,图 3 为实物图。

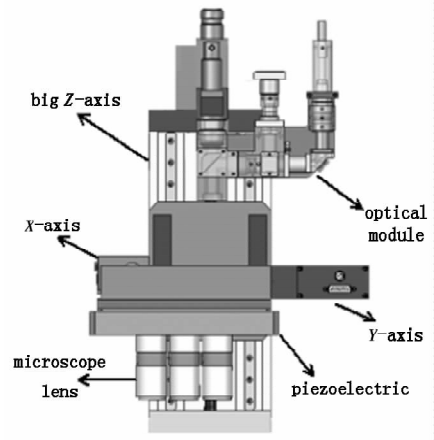


图 2　系统结构图

Fig. 2　system architecture diagram

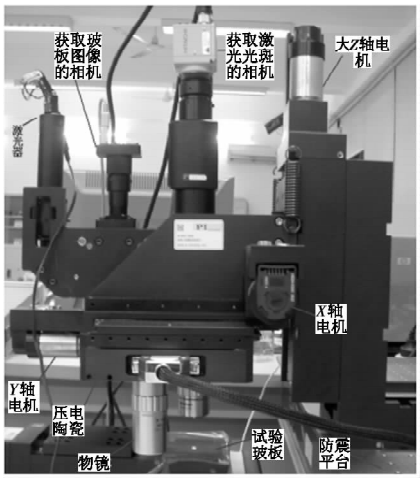


图 3　实物图

Fig. 3　actual picture

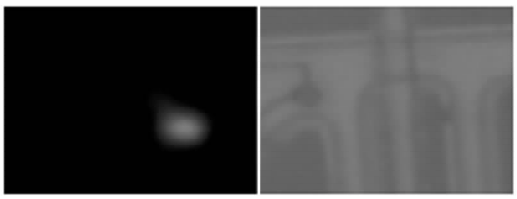
其中压电陶瓷带动 6 个镜头可做上下 100 μm 范围的移动,*XY* 轴带动压电陶瓷和物镜一体做水平面 *XY* 方向的移动,大 *Z* 轴可带动 *XY* 平台整体部分上下移动。一般情况下,对于特定型号的玻板,会预先移动上述整个装置,使得物镜和玻板间的距离为一特定预设值,在此预设值的基础上,通过压电陶瓷做竖直方向上 100 μm 行程的移动一般可以实现自动对焦,在玻板厚度不均匀时,需要先调节大 *Z* 轴作一个粗调,然后再借助压电陶瓷细调实现对焦。

3　对焦原理

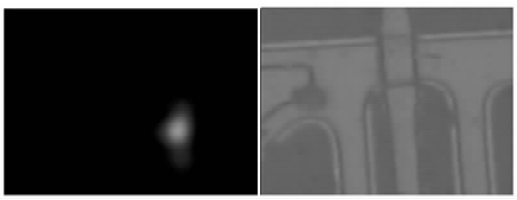
本系统的激光光路中将入射激光挡了一半,使

得理论上得到的激光光斑是个半圆而不是圆,这样就可以根据半圆的左右位置判断当前玻板的位置在焦平面以上还是以下。根据成像原理,对于倍率一定的镜头,焦距和内径是一定的,离焦量与像斑大小成正比关系,因此得到即离焦量与黑白 CMOS 相机(下文起简称为 CMOS)获得的图片中半圆光斑的半径成正比关系。当玻板处于焦平面时,相机获得的光斑图像最小。到达玻板上的激光光点可以看作是由无数个点光源组成的分布,而图像就是这些点光源通过镜头系统的映射[6]。半圆形光斑的半径的变化可以用占半径固定比例的长度的变化来代替,而半圆形光斑的质心到圆心的距离正好满足条件。因而对于左半圆(或右半圆)光斑图片,光斑圆心的横坐标减去光斑质心的横坐标的值(或绝对值)的变化可以等价半径的变化。由于对焦的过程中只是镜头上下移动,理论上激光光斑的圆心位置在光斑图片上的坐标是固定的,因此可以用光斑质心的横坐标的变化代替半径的变化。所以,可以得到离焦量与 CMOS 获得图片中光斑质心的横坐标成线性关系。

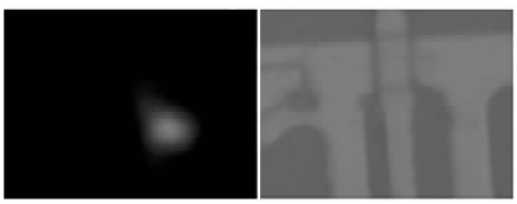
图 4 为采用 50 倍物镜时,玻板在焦平面附近三个位置的光斑图片和显微镜上的彩色 CMOS 相机拍得的玻板图像,其中,光斑图片和玻板图像都用抓图工具进行了局部放大,抓图时都在同样的坐标位置抓取了同样大的区域。从图片中可以看到离焦位置



(a)2 μm above the focal plane



(b)the focal plane



(c)2 μm under the focal plane

图 4 不同位置的光斑图像与玻板图像

Fig. 4 spot and glass imaging of different position

和聚焦位置的光斑图像的差异以及 CCD 相机下玻板图像的差异。同时也可发现实际光斑与理论上的半圆形光斑存在一定差异。

4 间接清晰度评价函数

对焦的效果是玻板在 CCD 相机下成像最清晰。图像清晰度是衡量成像系统质量的重要指标[7]。该部分提出的清晰度评价函数能反映显微镜下玻板图像的清晰度,由于主要处理工作是通过对 CMOS 相机获得的激光光斑图片的处理得到 CCD 相机下玻板图像的清晰度,因此是一种间接清晰度评价函数:

$$T = \frac{B}{S \times Z \times W} \tag{1}$$

式中,B 为光斑图片中所有像素点中最大的灰度值;S 为 CMOS 的曝光时间;Z 为 CMOS 的增益;W 为激光的功率;T 为通光率。通光率是指通过光学系统后的能量/输入光学系统的能量。聚焦时,当图片没有曝光过度时,通光率最大,并且激光光斑最小最亮。这里用到的激光器是功率不可调的,同时 CMOS 的增益保持最小值时能够使获得的光斑图片不受金属背景及噪声的影响,因此 Z 和 W 都是定值,即公式(1)可简化为公式(2),其中 K 为常量:

$$T = K\frac{B}{S} \tag{2}$$

这里需要强调的是获得的光斑图片不能过曝,即避免 B 出现等于 255 的情况,因为如果过曝,那么对于同一个曝光时间的值,会有多个通光率的值,这样的清晰度评价函数失去了意义。

表 1 为采用 50 倍物镜时,焦平面附件采集到的一些数据,其中 PZT 为压电陶瓷的位置。表中调节 PZT 的位置是通过上层软件向 PZT 控制器发送对应位置的移动指令完成的,调节曝光时间是通过调用相机的软件开发包提供的动态函数库完成的,最大灰度值是在上层软件中通过对相机获得的图像的数据进行处理得到的。为了不使光斑图片过度曝光,曝光时间必须减少,但同时为了不使光斑强度太小而出现误判断,曝光时间又必须增大,所以曝光时间必须处于动态的调节中。表中的曝光时间都是以减少或增大 1 倍的方式调节的,这样调节的速度相对快一点。

图 5 为根据表 1 的数据利用 Matlab 得到的通光率 T 与压电陶瓷位置的关系曲线,可以看出曲线具有单峰性,峰值两侧较近位置的变化速度比较快,整

表 1　不同位置的 B 和 S

Tab. 1　B and S in different position

PZT /μm	B /levels	S /ms	PZT /μm	B /levels	S /ms	PZT /μm	B/ levels	S/ ms
30	26	63	47	144	31.5	64	127	31.5
31	29	63	48	200	31.5	65	106	31.5
32	33	63	49	137	15.75	66	85	31.5
33	33	63	50	192	15.75	67	69	31.5
34	39	63	51	140	7.875	68	134	63
35	45	63	52	216	7.875	69	120	63
36	51	63	53	167	3.938	70	107	63
37	54	63	54	203	3.938	71	96	63
38	61	63	55	176	3.938	72	83	63
39	81	63	56	105	3.938	73	67	63
40	90	63	57	61	3.938	74	56	63
41	101	63	58	100	7.875	75	53	63
42	119	63	59	73	7.875	76	48	63
43	134	63	60	123	15.75	77	48	63
44	145	63	61	90	15.75	78	37	63
45	167	63	62	75	15.75	79	35	63
46	213	63	63	64	15.75	80	34	63

个曲线的动态变化很鲜明。实际上,峰值对应的压电陶瓷的位置就是焦平面的位置,如果有偏移的话,可以通过调节图 1 中的 13 部分进行校正。这些使得图 5 中的曲线具有清晰度评价函数的特性。理想的清晰度评价函数为抛物线形状,具有单峰性、无偏性、较强的抗噪能力、计算简单、适应能力强等特点[8-10]。由此看出,虽然图 5 的曲线在离焦平面稍微远点的地方存在局部极值,但是在焦平面附近位置的特性是非常好的,因此通光率的定义公式是一种非常好的清晰度评价函数。

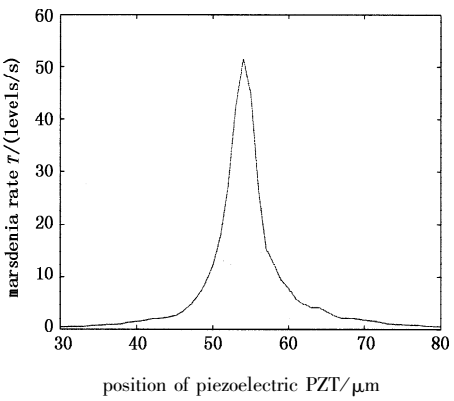


图 5　T 与压电陶瓷位置的关系

Fig. 5　relation curve between T and piezoelectric

利用该清晰度评价函数可以通过搜索通光率最大的位置以实现自动对焦。具体方法就是按一个方向以一定步长,以一定步数移动压电陶瓷,记录每走一步的压电陶瓷的位置和通光率的值。当预先设定的步数都走完时,找出其中通光率最大的值,然后将压电陶瓷移到与最大通光率的值对应的位置。

虽然利用该清晰度评价函数结合压电陶瓷的移动可以实现自动对焦,但是由于需要移动压电陶瓷的次数比较多,同时需要动态调节曝光时间,而目前的硬件决定了相机在调节曝光时间后要有一段延时才能稳定,因此这不是速度较快的对焦方法。本文用的对焦方法是利用该清晰度评价函数找到对焦最佳的位置,然后以此位置作为目标,用下面的方法实现最终对焦。

5　质心表匹配法

前面已经提过离焦量与 CMOS 获得图片中光斑质心的横坐标成线性关系,因而可以在获得多组离焦量和对应的横坐标后将线性关系的直线方程求出来,上面提到的间接清晰度评价法可以确定对焦完成时压电陶瓷的位置,从而可以获取对焦完成时 CMOS 获得图片中光斑质心位置,在此基础上便可知道从直线上任意一点如何移到对焦完成对应的目标点。实际发现得到的直线是一条近似的直线,用查表法移动压电陶瓷比用依靠直线方程更可靠和快速。

质心表匹配法实现过程的第一步准备工作是在焦平面附近正负 50 μm 的范围内,用遍历搜索法计算出每个位置图片的光斑质心横坐标,然后保存起来,并且将对应的压电陶瓷的位置也保存起来。得到的表中光斑质心的横坐标与压电陶瓷的位置是一一对应的,并且前者按照后者的变化而单调变化,其曲线关系是一条对应的直线。第二步准备工作是利用上面提到的清晰度评价函数找到对焦最好的位置光斑图片的质心,以此作为对焦的目标点。正式自动对焦的时候,采集当前的激光光斑图片后,计算其光斑质心,接着查表得到当前的压电陶瓷的位置,然后计算其与对焦目标点对应的压电陶瓷的位置的差值,根据差值的正负和数值得到压电陶瓷需要的移动方向和移动量,最后通过向压电陶瓷控制器发送指令控制压电陶瓷移动以实现对焦。

在建立质心表的时候,也需要调节曝光时间,使得在当前的曝光时间下,离焦平面约 50 μm 的位置也能采集到光斑图像,同时在玻板不同的位置,采集到的数据的相对差异性改变不大。由于高倍率镜头的景深比较小,所以离焦平面稍微远点的位置必须

在曝光时间比较长的时候才有光斑,才能求出质心。而在焦平面附近的位置,用比较长的曝光时间测得的质心表在不同玻璃板位置、不同采集时刻得到的数据有一定差异性,用较小的曝光时间得到的质心表要稳定很多。因此对于高倍率镜头,需要建立两个不同曝光时间下的质心表。当离焦位置比较远时,先查曝光时间较长的质心表,然后移动压电陶瓷到焦平面附近,然后再查曝光时间较短的质心表最终完成对焦。但是,如果玻板的初始位置就在焦平面附近,先查曝光时间长的表反而会将玻板移到离焦程度更大的位置。因此,对于曝光时间比较长的表,还要设一个焦平面附近的无效查找区间。当质心落在该区间内时直接查找曝光时间短的表。因为压电陶瓷的分辨率很高,所以可以用很小的步长移动压电陶瓷来建立质心表,这是较高对焦精度的重要保证。

由于金属反射回来的能量和纯玻璃反射回来的能量有差异,所以光斑图片会受玻板上金属的影响。当射到玻板上的激光光点沾有金属的比率不同,影响的程度也不同。但是求取质心时,对于倍率固定的镜头,预先将整幅图像的灰度值整体减去了一个经验值,然后再按照求几何质心的公式求质心。这一经验值的选取要满足两个条件:一是能够消除金属反射回来的能量;二是对无金属的区域产生的激光光斑的质心计算不造成影响。这两个条件在激光聚焦点沾到金属时,可以通过多次测量选取效果较好的经验值。

不同玻板位置在同一离焦位置下的光斑质心会因含有金属的比率不同而不同。同时,同一个玻板位置,在同样的离焦位置、不同的测量时间,得到的光斑质心也会因各种噪声而不同。因而,质心表应使得各种条件下的光斑质心与表中对应数值的差异尽量少,所以质心表的建立需要采集多组数据。由于目标点和质心表一旦选定就不再改变,因而该方法的正式应用所需的计算量和步骤都很少,所以能实现快速的自动对焦。

6 实验结果

实验所用计算机主频 2.4 GHz,内存为 512 M,操作系统为 Windows XP,对焦程序用 Visual C++6.0 编写,压电陶瓷及其控制器由 PI 公司提供,Z 轴方向的定位精度为 0.2 μm,100 μm 范围内移动一次的平均时间为 10 ms 左右,激光器选用的 CP808,CMOS 相机选用的是 FFMV-03MTM/C,显微镜主体中的 CCD 相机用的是 HITACHI 公司的 KP-D20BU,激光滤光片选用的 L53-710,1/4 波片选用的 L46-554,激光聚焦镜选用的 AC127-50-B,物镜选用的 Mitutoyo 的 378 系列的标准镜头。其中压电陶瓷数据是根据读取控制器中的数据得到,花费时间是用 GetLocalTime 从计算机的系统时钟获取时间差得到。

表 2 和表 3 为用 50× 镜头在焦平面上下正负 40 μm左右位置自动对焦得到的测试数据。

表 2 焦平面下面位置自动聚焦的数据

Tab. 2 data of auto-focus under the focus position

PZT /μm	Focus position /μm	Focus times /times	Used time /s
11.06	50.03	3	0.324
11.08	50.38	4	0.375
11.07	50.47	5	0.412
11.07	50.41	3	0.323
11.07	50.21	4	0.357
11.09	50.27	3	0.321
11.10	50.22	4	0.364
11.06	50.29	3	0.322
Average	50.28	3.6	0.396

表 3 焦平面上面位置自动聚焦的数据

Tab. 3 data of auto-focus above the focus position

PZT /μm	Focus position /μm	Focus times /times	Used time /s
89.01	50.46	3	0.315
89.01	50.81	3	0.325
89.01	50.71	6	0.507
89.02	50.87	6	0.502
89.00	50.51	3	0.313
89.01	50.79	4	0.375
88.99	50.56	3	0.313
89.02	50.46	3	0.321
Average	50.65	3.9	0.371

当压电陶瓷的初始位置处于 11 μm 和 89 μm 之内时,可以得到更小的平均对焦完成时间。Focus position 为对焦完成后压电陶瓷的位置,Focus times 为压电陶瓷移动的次数,Used time 为自动对焦需要的时间。50× 镜头的景深比较小,上述 PZT 已经为离焦较远的位置,所以先要查曝光时间较长的质心表,然后再查曝光时间较短的质心表,这样一般最少需要移动 2 次压电陶瓷,同时需要调节曝光时间,因此对焦花费的时间相对多些。对于倍率小的镜头,

对焦次数少一些,同时由于不需要调节曝光时间,所以对焦所需时间更短。

上述数据的测量是在普通实验室里完成的,不可避免要受到一些震动的影响。上表中对焦次数为6次的数据应该是受震动的影响造成的,如果在TFT-LCD玻璃板检测的气浮防震平台上测试,效果应该会更好。

7 结 论

本文提到了一种间接清晰度评价函数和一种用于检测TFT-LCD玻璃板的显微镜自动聚焦的方法。采用激光器和CMOS做辅助手段,利用采集到的激光光斑的质心横坐标与离焦量的线性关系进行对焦,且与显微镜共用部分光路,但是对显微镜的工作不产生影响。用到的计算量小,实现过程简单,对焦精度较高,对焦时间比较短,通过实验测量,满足工业上玻璃板检测的需求。

8 结束语

该系统目前还在调试中,硬件系统还没发挥到最理想的优势,软件程序也还有需要优化的地方。激光光斑的圆心坐标存在一定的漂移,同时质心表的建立存在一定不稳定因素的影响,需要经过很多的数据筛选才能得到比较理想的质心表数据,随着研究的深入,相信这些问题会慢慢解决,该系统自动聚焦的精度会更高,用时会更短。

该系统的研究得到了肇庆中导光电设备有限公司技术人员的大力指导,在此表示感谢,同时感谢项目组的范富明、肖磊同学。

参考文献:

[1] Zhang Yu, Zhang Jian. Application of fuzzy expert system in defect Inspection of TFT-LCD[J]. Journal Of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(6): 719-723. (in Chinese)
张昱,张健. 模糊专家系统在TFT-LCD缺陷检测中的应用[J]. 光电子·激光, 2006, 17(6): 719-723.

[2] Su Xiaohong, He Zhiguang, Ma Peijun. An automatic detection algorithm for TFT-LCD micro display defects[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(11): 1756-1760. (in Chinese)
苏小红,何志广,马培军. TFT-LCD微米级显示缺陷的自动检测算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1756-1760.

[3] Liang Cuiping, Li Qingan, Qiao Yanfeng, et al. On auto-focusing technology of optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2006, 13(6): 93-96. (in Chinese)
梁翠萍,李清安,乔彦峰,等. 简析光学系统自动调焦的方法[J]. 电光与控制, 2006, 13(6): 93-96.

[4] Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in auto-focusing criterion [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 35-39. (in Chinese)
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.

[5] Chen Guojin, Zhu Miaofen, Zhang Kesong. Image definition evaluation function in auto-focusing process[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(2): 165-169. (in Chinese)
陈国金,朱妙芬,张克松. 图像调焦过程的清晰度评价函数研究[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 165-169.

[6] Wang Chao, Jiang Yuanda, Zhai Guangjie, 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)
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.

[7] Cai Mingrong, Ma Junshan, Wang Fuhong. Research on the discrimination methods of the image definition in the auto-focusing system [J]. Optical Instruments, 2008, 30(5): 35-39. (in Chinese)
蔡明荣,马军山,王福红. 自动调焦系统中图像清晰度判别方法的研究[J]. 光学仪器, 2008, 30(5): 35-39.

[8] Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng, et al. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(9): 1225-1232. (in Chinese)
宗光华,孙明磊,毕树生,等. 显微镜视觉自动聚焦研究[J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1225-1232.

[9] Miao Ligang, Xuan Bo, Peng Silong. Fast autofocusing algorithm in microscopy[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(1): 9-12. (in Chinese)
苗立刚,轩波,彭思龙. 显微镜的快速自动对焦算法[J]. 光电子·激光, 2007, 18(1): 9-12.

[10] Qu Yufu, Pu Zhaobang, Zhao Huijie, et al. Influence factor analysis of sensitivity of focus criteria function[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(7): 902-906. (in Chinese)
屈玉福,浦昭邦,赵慧洁,等. 调焦评价函数灵敏度的影响因素分析[J]. 光学学报, 2005, 25(7): 902-906.