

# TFT-LCD 检测中基于激光三角法的显微镜 离焦快速在线检测及补偿

范富明 程良伦

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要** 光学成像检测设备的快速自动对焦是基于机器视觉快速缺陷检测的关键,为了解决检测过程中不同倍数物镜景深( $0.5\sim 91\ \mu\text{m}$ )跨度大以及被检测物体振动给快速对焦造成的影响等问题,提出了基于激光三角法的显微镜离焦在线检测及补偿方法。该方法利用激光三角法进行离焦量和离焦方向的快速探测,使用由行程  $100\ \mu\text{m}$  的压电陶瓷和行程  $25\ \text{mm}$  直流电机构成的宏微双驱动结构协同控制完成大范围对焦任务。实验结果表明,构建的宏微结构对焦方式可以在  $0.4\ \text{s}$  内实现高倍物镜  $\pm 0.5\ \mu\text{m}$  景深至低倍物镜  $\pm 91\ \mu\text{m}$  景深大范围的快速自动对焦,并实现被检测物体  $\pm 3\ \mu\text{m}$  振动范围的快速自动跟随对焦。该方法满足了新一代薄膜场效应晶体管液晶显示器(TFT-LCD)工业检测装备对自动化对焦范围、速度和精度的要求,同时可应用在平板显示器(FPD)检测、线路板检测、生物医学和自动机器装配等领域。

**关键词** 测量;光学检测;激光三角法;宏微双驱动;自动调焦;离焦检测

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0208005

## A Fast Detection and Compensation of Microscope Defocus Method Based on Laser Triangulation Method on TFT-LCD Inspection

Fan Fuming Cheng Lianglun

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract** The fast automatic focusing equipment of optical imaging detection is one of the most important devices in rapid optical inspection based on machine vision. In order to limit the impact caused by multiple objectives, whose depths of fields(DOF) are from  $0.5\ \mu\text{m}$  to  $91\ \mu\text{m}$ , and vibration in rapid automatic focusing, a fast detection and compensation of microscope defocus method based on laser triangulation method is proposed. In this method, a macro institution into micro dual driven structure is proposed. It is constructed by the piezoelectric ceramics(PZT) with stroke of  $100\ \mu\text{m}$  and direct current(DC) motor with stroke of  $25\ \text{mm}$ . Based on the structure and laser triangulation, multiple objectives, defocus amount and direction are rapidly detected, cooperating with PZT and DC motor. Experimental results show that the macro-micro dual-drive focus mode can achieve a wide range of auto focusing within  $0.4\ \text{s}$ , from a low magnification objective ( $\pm 91\ \mu\text{m}$ ) DOF to a higher magnification objective ( $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ), and follow focus in the vibration range ( $\pm 3\ \mu\text{m}$ ). This method meets requirements of the industrial thin film transistor-liquid crystal display(TFT-LCD) automation inspection equipment in broad automatic focusing range, speed and accuracy. It can also be applied in many other fields, such as flat panel display(FPD) inspection, printed circuit board inspection, biomedicine, automatic assembly machines and so on.

**Key words** measurement; optical inspection; laser triangulation; macro-micro dual-drive; automatic focusing; focus error detecting

**OCIS codes** 120.4630; 120.1880; 040.1880

收稿日期: 2010-05-14; 收到修改稿日期: 2010-06-29

基金项目: 广东省教育部产学研(2007A090302071, 2009B090300242, 2010A090100030)资助课题。

作者简介: 范富明(1984—),男,硕士研究生,主要从事光学自动化检测和嵌入式系统等方面的研究。

E-mail: fanfumin84@126.com

导师简介: 程良伦(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事自动化装备与系统、光学自动化检测和智能与网络化系统等方面的研究。

## 1 引言

薄膜场效应晶体管液晶显示器(TFT-LCD)检测装备利用高分辨率光学成像原理,实现 TFT-LCD 生产过程中的污染和缺陷非接触快速检测,提高 TFT-LCD 合格率。为了满足大尺寸玻璃板的需要,TFT-LCD 玻璃板已经发展到第 8 代,随着新一代面板生产线的投入,玻璃面板的尺寸也随之增加,对 TFT-LCD 检测装备的检测速度要求不断提高。光学检测成像设备快速的自动化对焦,是新一代 TFT-LCD 检测装备实时获取高分辨率检测图像进行快速 TFT-LCD 缺陷检测的关键<sup>[1,2]</sup>。TFT-LCD 检测装备在检测过程中使用物镜的放大倍数是从  $50\times$  到  $2\times$ ,景深(DOF)变化从  $0.5\ \mu\text{m}$  到  $91\ \mu\text{m}$  不等,同时,被检查玻璃板悬浮在气浮台上在  $\pm 3\ \mu\text{m}$  范围内振动。以上问题对 TFT-LCD 检测装备中自动对焦的范围、速度和精度提出了更高的要求。

自动对焦按照对焦方式可以分为被动对焦和主动对焦两类。被动对焦通过合理的选取对焦评价函数分析图像前后的清晰度判别焦平面的位置,该调焦方式需要连续处理大量的图像数据,对焦时间较长,并且要求评价函数严格满足单峰性、无偏性<sup>[3]</sup>。主动对焦方式在一定程度上克服被动对焦的不足之处。文献[4,5]提出针孔法进行离焦探测实现的主动调焦,但在离焦方向的判断上存在一定的局限性。文献[6]采用二象限探测器对检测装置进行了改进,使得系统具有离焦方向控制的功能。文献[7]提出的使用像散法获得聚焦偏差形成闭环控制压电陶瓷(PZT),实现一定范围内激光直写系统快速精确自动聚焦,突破了文献[6]对焦精度和速度的局限性。文献[8]提出了一种新型的自动对焦方法,改善了文献[7]中对焦范围限制,并在探测量与离焦量上具有较为优越的线性度关系,但在多景深大范围对焦和跟随对焦问题上没有提出完全的解决方案。文献[9,10]提出的宏微双驱动精密运动结构,在位移运动范围和控制精度方面为对焦系统的设计提供了较大的参考价值。

为了满足 TFT-LCD 检测过程中对自动对焦范围、速度和精度的要求,本文在前期自动对焦研究工作基础上,结合激光三角法原理和宏微双驱结构,提出了一种大范围高精度的工业显微镜自动对焦方法,其基本思路是利用改进型激光三角法进行离焦量和方向的探测,控制由直流(DC)电机和 PZT 组成的双驱动结构,完成不同倍数物镜多景深条件下快速自动对焦,并结合 PZT 电机运动的快速性和精

密性,实现焦平面  $\pm 50\ \mu\text{m}$  内对焦实时动态跟随。

## 2 激光三角法对焦原理

显微镜光路主要由可见光光路和离焦检测光路组成。如图 1(a)所示,检测光路主要由激光发射器、拦光片、分光镜、 $1/4$  波片、聚焦镜、滤波片、电荷耦合元件(CCD)相机等构成。激光器发射的  $810\ \text{nm}$  波长近红外激光束被拦光片截掉上半部分,下半部分先后通过偏振分光片、 $1/4$  波片、聚焦镜,经过偏振分光镜转向,最后透过物镜投射在检测面上。激光光束在被检测物体表面发生反射,反射光再次通过聚焦镜和  $1/4$  波片后,透过偏振分光片转向投射到 CCD 相机检测屏上,在 CCD 检测屏上产生半圆形光斑。可见光路为显微镜的主光轴光路,主要完成 TFT-LCD 图像实时获取。为减少近红外激光对可见光路的影响,在主光路中增加滤波片,其可见光波段透射率  $T > 85\%$ ,在  $740\sim 1200\ \text{nm}$  波段的光透射率  $T < 10\%$ 。

系统对焦原理光路设计如图 1(b)所示。当反射光束刚好在 CCD1 屏处聚焦表明被检测物体处于物镜焦平面处时,系统调焦完成;当物镜与被检测距离发生变化时,系统发生离焦,此时投射到 CCD1 屏上的是一个半圆形光斑,如果检测到的是一个下半圆时,表明物镜与被检测物体距离变大,发生下离焦;如果检测到上半圆光斑时,表明物镜与被检测物体距离变小,发生上离焦。检测到的光斑半径越大,表明系统离焦量越大。根据 CCD 相机采集到的半圆的方向和半径值,由对焦控制模块分析出显微镜的离焦方向和离焦距离,并根据分析结果控制运动执行机构直到准确对焦。

近红外激光光路如图 2 所示。假定物镜和聚焦镜焦距分别为  $f_1, f_2$ ,两者之间的距离为  $d$ 。如图 2 中实线所示,对焦完成时,激光器发射的光束在被检测物体表面聚焦,并被检测物体反射回光路,在聚焦镜的作用下,在 CCD 检测屏上汇聚成一个光点。如图 2 中虚线所示,当被检测物体发生  $\delta$  离焦时,最外侧的光线在 B 点处反射回光路中,由于激光束光路的改变在 CCD 检测屏上将形成一个半圆光斑。

通过数学推导的方式构建离焦量  $\delta$  与 CCD 检测屏成像半圆半径  $r$  之间的关系。对于薄透镜由高斯公式可知

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}, \quad (1)$$

式中  $f$  为透镜的焦距,  $u$  为物体到透镜的距离,  $v$  为

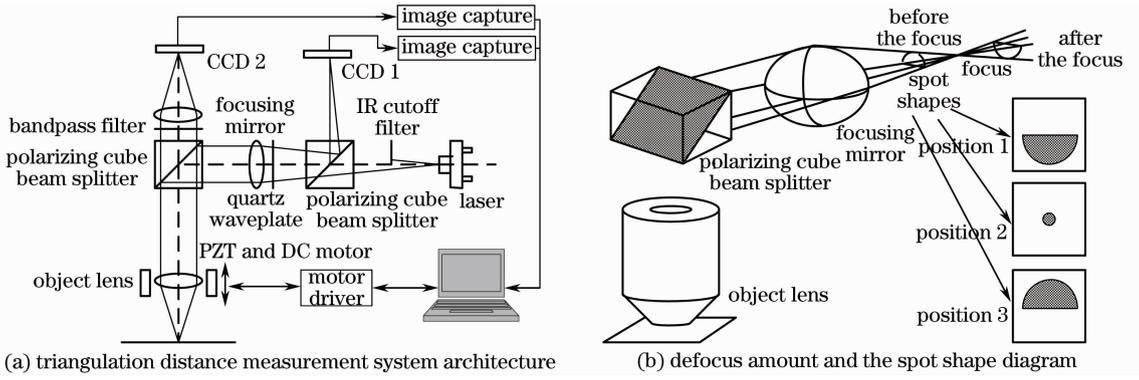


图 1 对焦光学原理

Fig. 1 Focusing optics

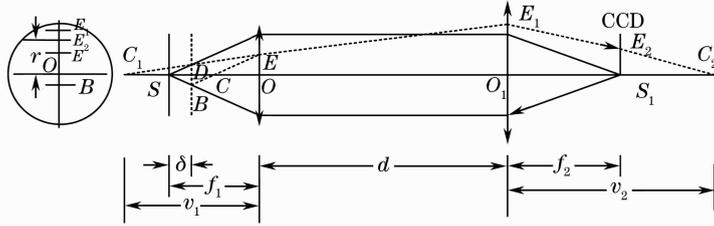


图 2 三角法调焦光路原理

Fig. 2 Focusing optical triangulation principle

像到物镜的距离。

对物镜运用高斯公式可得

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_1 - 2\delta} + \frac{1}{v_1}, \quad (2)$$

对聚焦镜运用高斯公式可得

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{d - v_1} + \frac{1}{v_2}. \quad (3)$$

根据图 2 中的几何关系,可以计算出  $EO$ 、 $E_1O_1$  和  $R$

$$EO = \frac{(f_1 - 2\delta)\delta \tan \theta}{\delta}, \quad (4)$$

$$E_1O_1 = \frac{(u_1 + d)EO}{u_1}, \quad (5)$$

$$R = E_2S_1 = \frac{(v_2 - f_2)}{v_2} E_1O_1, \quad (6)$$

$$r = R/P_z, \quad (7)$$

将(2)~(6)式代入(7)式,得到离焦量  $f_{\text{FES}}$  的公式为

$$f_{\text{FES}} = \delta = \frac{f_1 P_z}{2f_2 \tan \theta}, \quad (8)$$

式中  $\tan \theta$  为常量,  $P_z$  为 CCD1 相机的像元常数。

由(8)式可知  $f_{\text{FES}}$  与  $r$  存在线性关系,并且通过零点,其线性斜率(即灵敏度)与光学系统中的物镜和聚焦镜焦距  $f_1$  和  $f_2$ ,物镜数值孔径(NA,  $d_{\text{NA}}$ ), CCD 像元  $P_z$  等参数有关。CCD 相机分辨率为  $752 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ ,像元  $P_z$  为  $6 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ ,  $f_2 = 150 \text{ mm}$ ,通过(8)式可分别计算出探测量光斑半径  $r$  与离焦量  $f_{\text{FES}}$  间的关系:  $f_{\text{FES}}(50 \times) = 0.14r$ ,

$f_{\text{FES}}(2 \times) = 33r$ ,  $r$  的范围在  $\pm 200 \text{ pixel}$  范围内。在  $50 \times$  物镜时,有效的离焦量检测范围在  $\pm 27.14 \mu\text{m}$ ;在  $2 \times$  物镜时,有效的探测范围在  $\pm 6500 \mu\text{m}$ 。

### 3 系统补偿结构

在动态对焦过程中,由于气浮、电机的振动以及外界环境影响导致处于悬浮状态的被检测 TFT-LCD 玻璃板在  $\pm 3 \mu\text{m}$  内振动,振动频率小于  $5 \text{ Hz}$ 。当处于高倍数物镜检测状态下,由于  $\pm 3 \mu\text{m}$  的振动远大于  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  的景深,对 TFT-LCD 实时检测产生了较大影响,因此为保证 TFT-LCD 检测装备实时获取清晰的检测图像,要求系统实时进行离焦量和离焦方向的探测与调焦,且运动执行机构具有较高的动作响应频率。

为了同时满足高倍物镜对精确度的要求和低倍物镜对对焦范围的要求,系统构建了宏微双驱动结构的运动执行机构,宏微结构主要由粗调焦直流电机和细调焦 PZT 组成。其中直流电机重复定位精度为  $1 \mu\text{m}$ ,行程  $25 \text{ mm}$ ,由滚珠丝杆传动;PZT 选用德国 PI 公司 P-373 型 PZT,行程  $100 \mu\text{m}$ ,并且具有  $150 \text{ Hz}$  的响应频率,PZT 上安装有电容片式传感器,分辨率达到  $0.1 \mu\text{m}$ 。

如图 3 所示,在“回”字型的 PZT 运动器中间板上挂载 5 种不同放大倍数的物镜,沿物镜轴向上微

移动。如图 4 所示,水平面 XY 方向分别由直流电机控制,能实现 5 种放大倍数物镜的自由切换;整个光学模组由激光器、光斑检测 CCD 相机和 TFT-LCD 检测相机组成;整个物镜切换平台和光学模组固定在 Z 向直流电机滑块上,通过电机带动丝杆的转动实现平台在竖直方向 25 mm 范围内的对焦搜索。PZT 行程小,负重较小,携带 5 种不同倍数的物镜在轴线上进行微动,其响应频数可以达到 150 Hz,运行速度较快,定位精度 0.1  $\mu\text{m}$ ,为对焦准确度和快速性提供了条件。行程大,功率大的直流电机,为大范围对焦提供了条件,但是其位移精度相对较低。

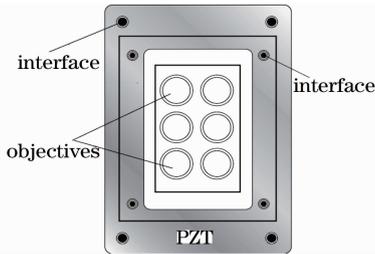


图 3 PZT 与物镜的链接方式

Fig. 3 Way of PZT and objectives links

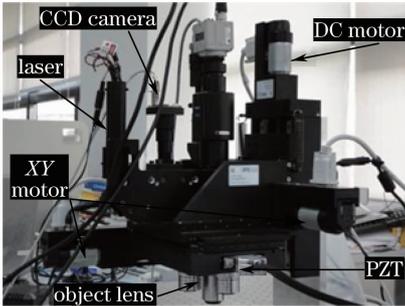


图 4 自动对焦系统结构

Fig. 4 Autofocusing system

对 2 $\times$ 和 5 $\times$ 低倍数物镜自动对焦来说,物镜景深分别达到 91  $\mu\text{m}$ 和 14  $\mu\text{m}$ ,而 PZT 行程仅有 100  $\mu\text{m}$ ,通常需要 PZT 和直流电机共同移动才能完成较大范围内的对焦任务。系统通过(8)式分析到离焦量  $f_{\text{FES}}$ 后,由控制电机的移动改变物镜与被检测玻璃板表面的距离。将运动位移量分解成微位移  $y_{\text{pc}}$ 和宏位移  $y_{\text{dc}}$ 两个部分<sup>[11~14]</sup>。控制模块具开关控制功能,主要完成电机协同控制切换工作,其中开关的阈值  $e_{\text{threshold}}$ 为 50  $\mu\text{m}$ 。当偏移量  $|e| = |r - y| > e_{\text{threshold}}$ 时,直流电机启动进行较大范围的移动,直到偏移量  $|e| < e_{\text{threshold}}$ 。当偏移量  $|e| = |r - y| < e_{\text{threshold}}$ 时,由 PZT 完成细调焦。

50 $\times$ 物镜景深为 0.5  $\mu\text{m}$ ,系统有效线性离焦量在  $\pm 27.14 \mu\text{m}$ 之间,此时对焦工作完全由 PZT 来完成。由于环境的影响,导致被检测玻璃板在

$\pm 3 \mu\text{m}$ 范围内以低频振动,对于景深较小的高倍物镜影响较大。考虑到这些,系统将 CCD 相机离焦量探测的采样频率设置为 60 Hz,实时进行离焦量和离焦方向的探测,控制 PZT 进行 TFT-LCD 检测过程中动态跟踪对焦。

## 4 实验及结果分析

为了验证自动对焦系统在对焦过程中的位移精确性和快速跟随性,在激光干涉仪的配合下进行了位移和速度跟随的测试。在 0~6000  $\mu\text{m}$ 范围的测试中,通过数字信号处理(DSP)控制器开关的作用,协同控制 PZT 和直流电机的运行,可得到如图 5(a)所示的测试结果。跟随测试以振幅为  $\pm 32.5 \mu\text{m}$ 的正弦函数作为跟随对象,系统采样频率为 60 Hz,从图 5(b)中期望值和实际测量值的关系可以看出 PZT 能够较好地跟随检测物体低频振动,实现实时跟踪对焦。

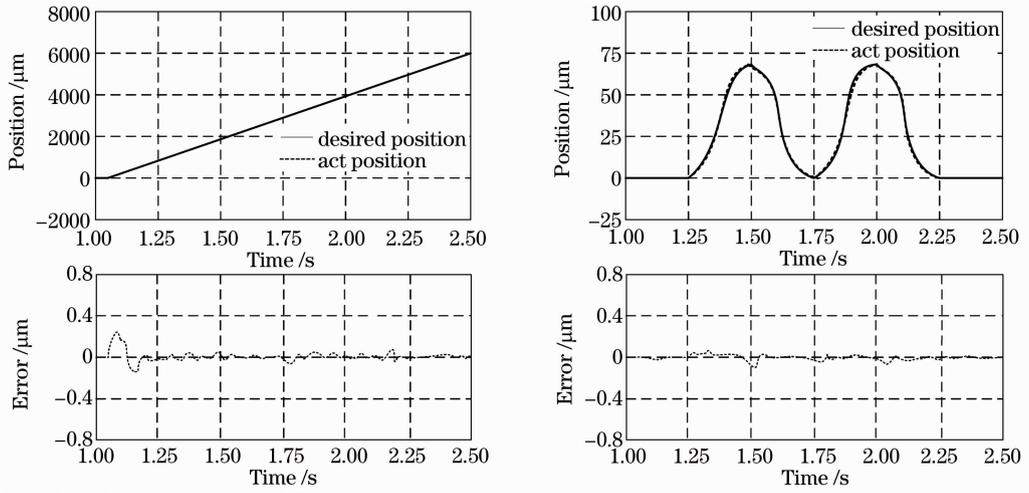
图 6,7 分别为 50 $\times$ ,2 $\times$ 物镜自动对焦的测试效果图像,被检测的 TFT-LCD 玻璃杯内部有大量的密集电路。2 $\times$ 物镜在有效离焦量探测范围内,对焦过程需要 PZT 和直流电机的协同控制实现精准快速对焦。

图 6(c)和图 7(c)分别为半圆半径检测值  $r$  与离焦量为  $f_{\text{FES}}$ 之间的关系,图中实线是通过(8)式计算出的理论值,从图中可知离焦量的测量值与理论值基本吻合, $f_{\text{FES}}(50\times) = 0.14r$ , $f_{\text{FES}}(2\times) = 33r$ 。造成误差的原因主要有两点:1)采用快速 Hough 算法<sup>[15]</sup>提取光斑半径  $r$ 的方法时,由于光路机械误差造成光斑不是绝对的半圆,给半径的准确提取造成了一定的误差;2)由于 TFT-LCD 内部排布了大量的金属线路,玻璃板和金属线路对近红外激光的反射率不同,导致了形成的光斑在能量分布上的不均匀性和形状的不规则性。但是系统在算法上增加预处理的卡尔曼滤波,同时在求取半圆半径  $r$ 时,通过多次测量取平均值等方法在一定程度上消除了部分偏差。

测试结果如表 1 所示,实验对系统 50 $\times$ ,20 $\times$ ,10 $\times$ ,5 $\times$ ,2 $\times$ 物镜的对焦精度、速度和对焦范围进行了测试,静态进行 100 次对焦速度测试中。对于系统定位精度的评估,定义了标准偏差  $f_{\text{MSD}}$ <sup>[16]</sup>

$$f_{\text{MSD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (m_p - \bar{m}_a)^2}{N}}, \quad (9)$$

式中  $\bar{m}_a$  为对焦完成后的测量值, $m_p$  为焦平面的理论值, $N$  为测试的次数。



(a) tracking feature of PZT and DC motor coordinated control (b) tracking feature of piezoelectric micro actuator

图 5 系统跟踪性能测试结果

Fig. 5 System tracking performance results

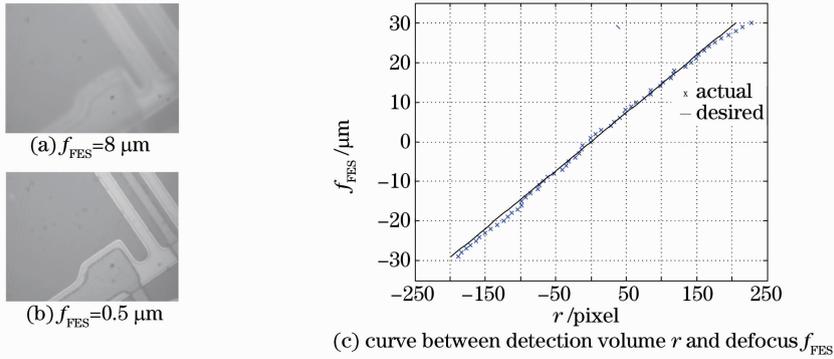

 图 6  $50\times$  物镜,  $f_1 = 4 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{NA}} = 0.55$ ,  $f_{\text{DOF}} = \pm 0.5 \mu\text{m}$  时的测试结果

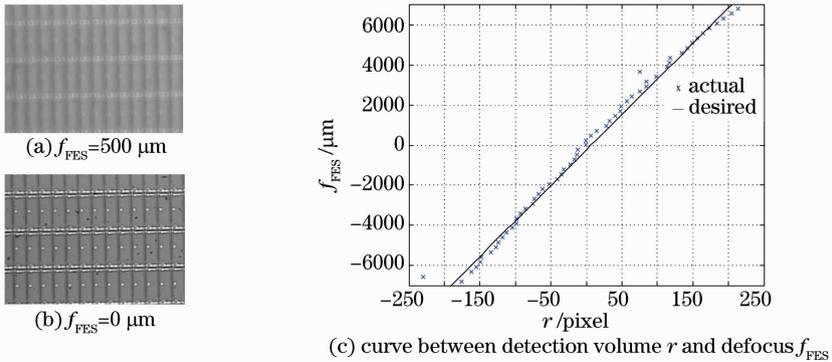
 Fig. 6 Text result with  $50\times$  objective,  $f_1 = 4 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{NA}} = 0.55$  and  $f_{\text{DOF}} = \pm 0.5 \mu\text{m}$ 

 图 7  $2\times$  物镜,  $f_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{NA}} = 0.055$ ,  $f_{\text{DOF}} = \pm 91 \mu\text{m}$  时的测试结果

 Fig. 7 Text result with  $2\times$  objective,  $f_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $d_{\text{NA}} = 0.055$  and  $f_{\text{DOF}} = \pm 91 \mu\text{m}$ 

表 1 对焦实验测试结果

Table 1 System auto-focus experimental results

Parameter	Objective				
Magnification / $d_{\text{NA}}$	$2\times/0.055$	$5\times/0.14$	$10\times/0.28$	$20\times/0.42$	$50\times/0.55$
$f_{\text{DOF}} / \mu\text{m}$	$\pm 91$	$\pm 14$	$\pm 3.5$	$\pm 1.6$	$\pm 0.5$
$f_{\text{MSD}} / \mu\text{m}$	$\pm 10$	$\pm 4.5$	$\pm 0.8$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$
Capture range / $\mu\text{m}$	$\pm 6500$	$\pm 3000$	$\pm 1100$	$\pm 450$	$\pm 27.5$
Ave time / s	0.40	0.38	0.38	0.33	0.27

## 5 结 论

研究并构建宏微双驱动的大行程运动台和特殊设计激光探测离焦量的光学系统,建立不同物镜下离焦量和离焦方向与探测量的数学关系,实现不同物镜 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 至 $\pm 91 \mu\text{m}$ 大范围景深变化的快速自动对焦,并结合PZT的快速响应特性,实现被检测物体 $\pm 3 \mu\text{m}$ 振动范围内实时跟踪对焦,较好地满足了TFT-LCD检测系统对自动对焦的要求。该方法可以应用在平板显示器(FPD)检测、线路板检测、生物医学、自动机器装配等领域。

**致谢** 感谢肇庆中导光电设备有限公司裴世铀博士、鄯育群博士、陈维华博士的指导,同时感谢项目成员肖磊、姜均、黄帅、黄双欢的协助。

## 参 考 文 献

- 1 Jeongho Lee, Yousik Kim, Sungryoung Kim *et al.*. Real-time application of critical dimension measurement of TFT-LCD pattern using a newly proposed 2D image-processing algorithm [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**(7): 558~569
- 2 Duming Tsai, Shiachih Lai. Defect detection in periodically patterned surfaces using independent component analysis [J]. *Pattern Recognition*, 2008, **41**(9): 2812~2832
- 3 Liu X. Y., Wang W. H., Sun Y.. Dynamic evaluation of autofocusing for automated microscopic analysis of blood smear and pap smear [J]. *Journal of Microscopy*, 2007, **227**(1): 15~23
- 4 Liang Yiyong, Yang Guoguang. Defocusing detection based on dual-quadrant detector [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(6): 7~11  
梁宜勇, 杨国光. 基于二象限探测器的离焦探测[J]. *光学仪器*, 2004, **26**(6): 7~11
- 5 Rhee Hyugyo, Kim Dongik, Lee Yunwoo. Realization and performance evaluation of high speed autofocusing for direct laser lithography [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2009, **80**(7): 073103
- 6 Rhee H. G., Kim D., Hong S. K. *et al.*. 300 mm reference wafer fabrication by using direct laser lithography [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(10): 578~583
- 7 Weiyao Hsu, Chiensheng Lee, Poju Chen *et al.*. Development of the fast astigmatic auto-focus microscope system [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(4): 45902~45910
- 8 Fan Fuming, Cheng Lianglun, Wang Xiaofen *et al.*. A new type of high-speed automatic focusing system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(5): 127~132  
范富明, 程良伦, 王晓芬等. 一种新型光学快速自动聚焦系统 [J]. *光电工程*, 2010, **37**(5): 127~132
- 9 Elfizy A. T., Bone G. M., Elbestawi M. A.. Design and control of a dual-stage feed drive [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, **45**(2): 153~165
- 10 Li Guo, Wang Bo, Dong Shen *et al.*. Design and control of dual-stage feed drive system in ultra-precision machine tools [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(6): 1426~1430
- 11 Wang Xihua, Guo Shuxiang, Ye Xiufen *et al.*. Modeling and feed-forward control based on piezoelectric ceramic hysteretic [J]. *Electric Machines and Control*, 2009, **13**(5): 766~771  
王希花, 郭书祥, 叶秀芬等. 压电陶瓷迟滞特性的建模及复合控制 [J]. *电机与控制学报*, 2009, **13**(5): 766~771
- 12 Chen Lu, Xu Wendong, Zhu Qing. A novel focus servo module in hybrid magneto-optical recording testing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1341~1346  
陈 璐, 徐文东, 朱 青. 光磁混合存储动态测试系统中的聚焦伺服模块研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1341~1346
- 13 Hwee Choo Liawa, Bijan Shirinzadeh, Julian Smith. Enhanced sliding mode motion tracking control of piezoelectric actuators [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical.*, 2007, **138**(1): 194~202
- 14 Lin Chihjer, Chen Shuyin. Evolutionary algorithm based feedforward control for contouring of a biaxial piezo-actuated stage [J]. *Mechatronics*, 2009, **19**(6): 829~839
- 15 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan *et al.*. Online calibration methods for high energy laser energy measuring equipment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2399~2403  
巍继锋, 关有光, 周 山等. 高能激光能力测量装置的现场标定方法 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2399~2403
- 16 Kangsun Choi, Junsuk Lee, Sungjae Ko. New autofocusing technique using the frequency selective weighted median filter for video cameras [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1999, **45**(3): 820~826