

大行程亚微米级精密定位系统的研究

张金龙¹ 廉美琳¹ 徐 慧¹ 雷华欢²

(¹ 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)
² 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要 针对荫罩式等离子体显示器屏板定位的特点,研究了基于计算机视觉的图像定位和基于衍射光栅的叠栅定位两种方法,利用这两种定位方法,建立了精密定位的复合控制系统,其中图像定位作为粗定位,光栅定位作为精定位。通过粗定位与精定位相结合的两段式复合定位,可保证在较大的工作行程范围内,实现显示器屏板的高速高精度定位,有效解决了定位精度、定位速度与信号捕捉范围三者之间的矛盾。系统采用的快速图像边缘检测技术、特征图形标识识别技术、精密光栅检测技术和精密驱动控制技术,确保了较高的定位精度及工作可靠性。实验结果表明,采用复合式精密定位可在 50 mm 的工作行程内获得 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 的屏板定位精度。

关键词 测量;精密定位;定位精度;复合控制;计算机视觉;衍射光栅

中图分类号 TP274+.5 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s108013

Research on the Long Range Precision Alignment System with Sub-Micron Accuracy

Zhang Jinlong¹ Lian Meilin¹ Xu Hui¹ Lei Huahuan²

(¹ College of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China)
² College of Mechanics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract In view of the features of panel position of shadow-mask plasma display panel (SMPDP), two methods of precision positioning are brought forward: image positioning method and grating positioning method. The compound control system for precision positioning is set up using two kinds of the positioning technique, in which the image positioning method is used as the coarse alignment and the grating positioning method is used as the fine alignment. By using the two-step alignment, the high alignment accuracy and quick alignment speed are obtained in the big long positioning range. The algorithms such as fast image edge detection, character extraction, precision gratings detection and precise driving strategy are adopted to effectively improve positioning accuracy and reliability of the device. The experimental result shows the two-step alignment can perform positioning accuracy of $\pm 0.15 \mu\text{m}$ in the working range of 50 mm.

Key words measurement; precision position; positioning accuracy; compound control; computer vision; diffraction grating

OCIS codes 120.2040; 230.1950; 100.3008; 350.5400

1 引 言

荫罩式等离子体显示器(SMPDP)是一种新型的全彩色显示器,它改进了传统交流等离子体显示器中障壁材料和制作工艺,大幅度降低了生产成本,具有成本低、亮度高、对比度高等特点,在高清电视(HDTV)、数字显示、台式计算机显示终端等领域具有极其广泛的应用^[1,2]。但目前 SMPDP 制作过

程中,前基板、荫罩板和后基板的精密对准,主要是借助显微镜的观察,通过手工调节来进行人工定位,这种方法不仅生产效率低,而且定位精度也难以保证,严重制约着等离子体显示器(PDP)生产的自动化水准。本文在精密定位技术研究的基础上,研制开发了 SMPDP 精密定位工作台,通过光、机、电的有机结合,可实现前基板、荫罩板和后基板三者之间

收稿日期: 2012-02-25; 收到修改稿日期: 2012-03-20

基金项目: 国家 863 计划(2005AA303610)和江苏省自然科学基金(2009406)资助课题。

作者简介: 张金龙(1965—),男,博士,教授,主要从事超精密定位技术方面的研究。E-mail: ZJL0310@163.com

的全自动精密定位,采用粗定位与精定位相结合的两段式复合定位,可保证在较大的信号捕捉范围内实现高速高精度定位,为 SMPDP 的产业化提供了技术支撑。

2 屏板精密定位系统

SMPDP 是一种新型的全彩色显示器,它由前基板、荫罩板和后基板三部分组成,显示器的生产工艺要求前基板的水平电极线和荫罩板相应的水平网孔对准,后基板的垂直电极线与荫罩板相应的垂直网孔对准,即前基板与荫罩板实现垂直方向的定位,后基板与荫罩板实现水平方向的定位。为实现三屏板之间的全自动精密定位,设计了一套屏板精密定位装置,如图 1 所示,定位装置由激光光栅检测系统、计算机视觉检测系统、精密机械驱动机构、电磁固定机构、电机驱动系统及计算机控制系统等组成。计算机视觉检测系统用于检测基板与荫罩板的位置偏差,计算机根据检测到的 CCD 信号,进行图像处理和模式识别,判断出基板的位置偏差,再发出指令,驱动基板作相应移动,完成基板与荫罩板的粗定位,粗定位精度为 $\pm 100 \mu\text{m}$ 。激光光栅检测系统用于检测粗定位后基板与荫罩板的微小位移偏差,检测时激光器发出的激光束经过分光镜分光被分成 8 束,垂直透过光栅副,产生透射的 0 次叠栅信号,由 8 个光电二极管转换为 8 路电信号,并经放大、滤波等处理后,由模/数(A/D)转换器转换为数字信号,输入工业控制计算机,工控机根据叠栅信号的大小和极性发出相应的驱动脉冲信号,使步进电机驱动定位台达到所要求的位置精度范围,完成精定位。定位台的机械传动采用脉冲细分式驱动步进电机,并通过精密滚珠丝杠机构将细分后步进电机的微小

角度转化为亚微米级的线性位移,以满足定位控制的需要,最终的定位误差主要通过计算机闭环控制作用来消除。

3 SMPDP 屏板复合定位技术

3.1 基于计算机视觉的屏板定位

3.1.1 图像预处理

图像预处理是图像识别与理解的重要步骤之一,预处理算法的好坏直接决定了图像识别的精度与速度^[3,4]。视觉装置中存在加性噪声、量化噪声以及随机干扰噪声,为了减少上述噪声对后续检测与识别的影响,本文先采用多帧平均空间域方法进行平滑滤波。设多帧的同一幅图像为 $f(x_i, y_i)$,则平滑后图像为

$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i, y_i), \quad (1)$$

式中 N 为多帧平均的帧数量。

图像平滑滤波后,采用 Canny 算子进行边缘检测。取高斯滤波尺度参数 $\delta = 1.9$,滤波器长度区间为 $[\mu - 3\delta, \mu + 3\delta]$,其中 μ 为多帧平滑中心值。为了提高边缘检测的稳定性,采用双阈值法,设边缘点在图像中的比例因子为 k_h ,从直方图低值开始累加,当对应累加值达到图像总像素数乘以比例因子时,对应的直方图值即为图像的高阈值,可表示为

$$N_i k_h = \sum_{i=0}^{N_h} g_i, \quad (2)$$

式中 N_i 为图像像素总数, k_h 为边缘点在图像像素中所占比例, N_h 为所求灰度值, g_i 为对应灰度值为 i 的像素数量。满足(2)式的最小 N_h 即为最优高阈值。

高阈值确定后,选取适当比例的高阈值,即可得到低阈值。设比例系数为 k_l ,则低阈值为 $N_l = N_h k_l$ 。本文选择 $k_h = 0.87, k_l = 0.4$ 。

3.1.2 图形识别

屏板图像的主要标识图形为十字线与荫罩网孔。智能识别的目的就是从图像预处理后所获得的边缘二值图像中获取对应标识图形的位置信息。

针对十字线,采用 Freeman 编码进行图像识别^[5,6]。令起始点 P 的对应图像坐标为 $p(x_0, y_0)$,则链码第 i 点的坐标为

$$p(x_i, y_i) = p(x_0, y_0) + \sum_{j=1}^i V_{l_j}. \quad (3)$$

由于直线上的点可以表示成初始点与链码对应向量的累积和,因此,链码可以反映曲线的曲率变化及边缘形状特征。为了有效消除图像中的噪声干

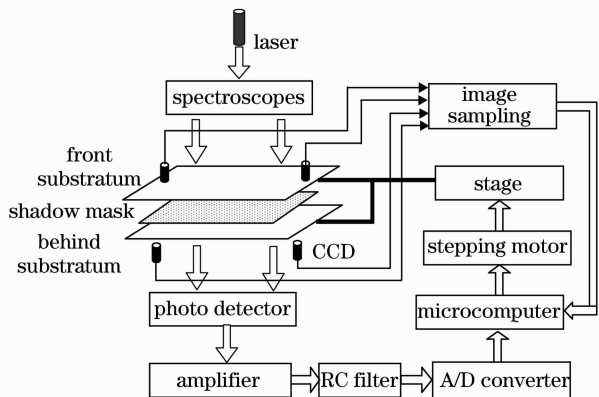


图 1 等离子体显示器精密定位装置

Fig.1 Precision positioning set of PDP

扰,采用求和方式求解 Freeman 码,可表示为

$$s_n = \sum_{i=0}^{n-1} d_i, \quad (4)$$

式中 s_n 为前 n 个码之和, d_i 为第 i 个 Freeman 码的值。

图像处理时,如果计算的点个数超过链码长度的一半,则将直线方程和点个数保存,继续处理下一条链码,直至处理完成,得 Freeman 链码集 $U\{u_{(i,j)} \in$

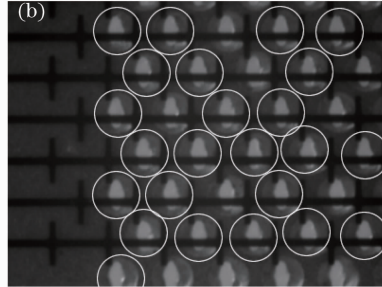
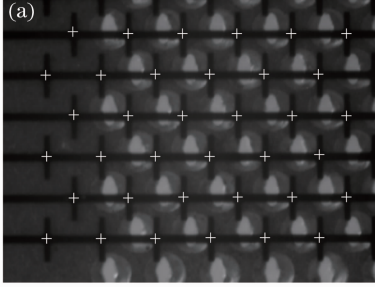


图 2 屏板图像特征识别。(a)十字线识别结果; (b)荫罩网孔识别结果

Fig. 2 Image recognition of screen panel. (a) Electrode-line recognition; (b) mesh recognition

针对网孔特征图形的识别,目前多采用 Hough 变换法。但传统 Hough 变换将图像空间的二维计算映射到参数空间的三维计算,计算量大且对干扰敏感,所以本文基于 SMPDP 荫罩网孔特征,采用如下快速检测算法:1)将十字线检测点与相关 Freeman 链从预处理边缘点集中删除,以减少 Hough 变换数量;2)在边缘检测时辅以模板匹配,大致确定网孔矩形位置,从而将三维累加器降为二维。设模板匹配矩形中心为 (x_i, y_i) ,则将 Hough 变换的圆心累加范围限制在 (x_i, y_i) 的一个邻域 ξ 中,减少了计算量;3)采用随机 Hough 变换,在图像空间随机取不共线的三点映射成参数空间的一个点,从而避免了多映射。在确定了圆心搜索范围后,先采用较大的量化间隔进行粗累加,进一步缩小圆心范围。然后再进行细累加,最终完成精确检测。图 2(b)为荫罩网孔识别结果,识别出荫罩网孔图形位置与实际位置相符。

3.1.3 屏板图像定位

进行图像处理和模式识别后,确定出基板上十字线和荫罩板网孔中心的位置。工控机再根据二者的位移偏差大小和正负,先驱动基板转动,进行角度定位,消除基板与荫罩板之间的角度偏差,使两屏板保持平行。然后再驱动基板直线平移,进行直线定位,直至基板电极线和荫罩板网孔完全对准。整个定位过程由计算机实时检测控制完成。

$R\}$ 。令 $U_k\{u_{(i,j)} \in R\}$ 为十字线模板 Freeman 码集,则以 U_k 各元素为标准,对 U 进行聚类分析,获得与标准十字线模板 Freeman 码最小二乘集,则该子集中 Freeman 链码首像素即为图像中十字线的位置。十字线识别结果如图 2(a)所示,由图可知,识别出的十字线与实际十字线位置相符。

3.2 基于衍射光栅的屏板定位

3.2.1 光栅定位原理

光栅定位基本原理如图 3 所示,两片衍射光栅平行设置,当激光光束垂直入射光栅 1 缝隙上时,由于光栅的衍射形成叠栅信号^[5~11],由菲涅耳衍射积分公式,可得光栅 2 前面 P 点处在柱坐标下的衍射光复振幅为

$$U_1(P) = \frac{i}{2\lambda} \int_{-b_1/2}^{b_1/2} U_0(Q) r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \times \exp(-ikr) dx_0, \quad (5)$$

式中 b_1 为光栅缝隙宽度,设 $A_1 = \frac{i}{2\lambda} U_0(Q)$,则 P 点衍射光复振幅为

$$U_1(P) = A_1 \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \exp(-ikr) dx_0. \quad (6)$$

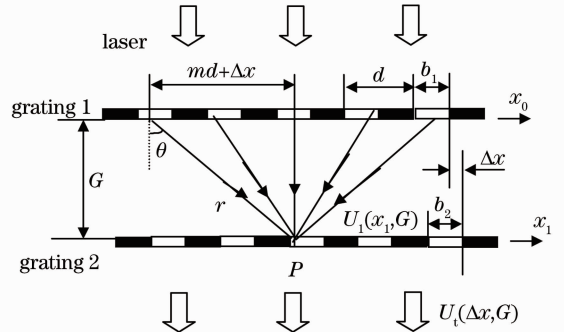


图 3 光栅的配置

Fig. 3 Arrangement of gratings

当激光光束所覆盖的光栅条数为 $2M+1$ 时,则由(1)式可得 P 点的衍射光复振幅 $U_1(x_1, G)$ 为

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \times \exp(-ikr) dx_0, \quad (7)$$

由图可知 $\cos \theta = G/r$, 代入(7)式得

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + G/r) \times \exp(-ikr) dx_0, \quad (8)$$

式中 $r = [G^2 + (\Delta x + md)^2]^{1/2}$, $\Delta x = x_1 - x_0$ 为两片光栅之间的相对位移, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长, d 为光栅常数, G 为两光栅间距, b_1 为第一片光栅的光栅缝隙宽度。

经光栅 1 衍射形成的衍射光 $U_1(x_1, G)$, 再经光栅 2 二次衍射, 设光栅 2 的透光特性函数为 $T(x_1 - \Delta x)$, 则在光栅 2 出射处的二次衍射光复振幅为

$$U'_1(x_1, G) = U_1(x_1, G) T(x_1 - \Delta x). \quad (9)$$

在光栅 2 出射的远处(距离为 z_0 处), 第 n 级衍射光的复振幅可由夫琅禾费衍射公式计算^[10], 其大小为

$$U_i(\Delta x, G)_n = \frac{1}{i\lambda z_0} \exp(ikz_0) \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right) \times \int U'_1(x_1, G) \exp(-i2\pi f_x x_1) dx_1, \quad (10)$$

令 $A_t = \frac{1}{i\lambda z_0} \exp(ikz_0) \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right)$, 并由傅里叶光学理论^[10] 可得空间频率 $f_x = \frac{n}{p}$, 则有

$$U_i(\Delta x, G)_n = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) T(x_1 - \Delta x) \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{p}\right) dx_1, \quad (11)$$

式中 n 为衍射级次, 当 $n=0$ 时由激光衍射理论可知, 其光强最强, 其 0 次衍射光复振幅为

$$U_i(\Delta x, G)_0 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) dx_1. \quad (12)$$

精密定位时, 通过检测叠栅光强的变化量, 即可确定两光栅的相对位移量。计算机再发出相应指令, 驱动定位台移动, 进行精密定位。

3.2.2 屏板光栅定位

为得到精密定位用的叠栅信号, 显示器的三屏板上分别刻有对应定位光栅。根据荫罩式等离子体显示器屏板定位的特点, 前基板上刻有 4 个用于垂直定位的光栅, 后基板上刻有四个用于水平定位的光栅, 荫罩板上刻有与前、后基板光栅对应的 8 个光栅。当激光束垂直透过光栅副时, 产生透射的激光叠栅信号。图 4 为实验测得的 0 次叠栅信号, 由图可以看出叠栅信号强度随两屏板的相对移动呈周期性变化, 与理论分析相符。

当两板对准时, 相应光栅错开 $P/4$, 对应的叠栅信号 I_0 的大小为

$$I_0 = (I_{\max} + I_{\min})/2, \quad (13)$$

式中 I_{\max} 、 I_{\min} 为叠栅信号的最大和最小值, 此时对应的定位点如图 4 中 A 点所示。精密定位时, 荫罩板固定, 前基板通过微动台精密驱动。工控机根据

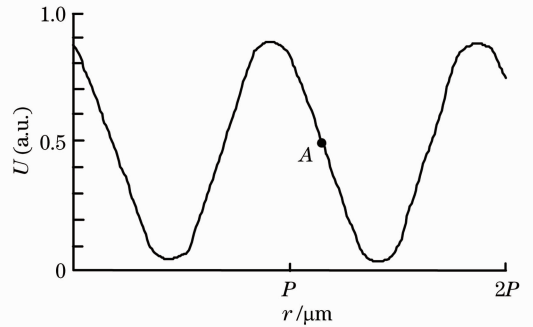


图 4 叠栅信号曲线

Fig. 4 Curve of Moiré signal

叠栅信号的大小和极性发出相应的驱动脉冲信号, 使步进电机驱动定位台达到所要求的位置精度范围, 完成精定位。前基板与荫罩板定位完成后, 通过电磁固定机构将两板固定, 再按同样的方法进行后基板与荫罩板的水平定位。

3.3 复合式精密定位

精密定位的定位精度与信号捕捉范围(工作行程)是一对矛盾, 尽管基于衍射光栅的定位具有很高的定位精度, 但定位信号的工作行程比较小, 仅为一个光栅常数。而基于计算机视觉的图像定位具有较大的工作行程, 但其定位精度较低。因此, 如何实现大行程下的精密定位是精密定位技术研究的难点。

本文提出粗定位与精定位相结合的两段式复合

定位技术,其中粗定位采用图像定位技术,精定位采用光栅定位技术。屏板定位时,计算机先根据检测到的 CCD 信号,大步驱动定位台,快速完成基板与荫罩板的粗定位,其工作行程为 50 mm。粗定位完成后,进入光栅定位信号捕捉的范围内,工控机根据叠栅信号的大小和极性发出相应的驱动脉冲信号,细步精密驱动定位台,实现精定位。这样可使定位装置在较大的工作行程范围内实现高精度定位。

此外,采用两段式复合定位,实现了大步快速驱动与细步精密驱动相结合的定位,从而使精密定位装置在实现高精度的同时,又能大大缩短定位时间,实现高速高精度定位。

4 实验研究

实验在研制的 SMPDP 精密定位台上进行,采用图像定位和光栅定位相结合的两段式复合定位技术。图像定位的主要参数为: CCD 分辨率为 752 pixel(H)×582 pixel(V),采集视频制式 PAL-D,放大镜头物方数值孔径为 0.12,物方工作距离为 17 mm,视频分辨率为 400 pixel×300 pixel,采集处

理 8 位灰度位图,图像定位的工作行程为 50 mm。图像定位时,计算机根据检测到的 CCD 信号,进行图像处理与模式识别,检测出基板与荫罩的位置偏差,再发出相应驱动信号,驱动基板作转动和移动,最终完成基板与荫罩的定位。图 5 为图像定位的实验结果,其中图 5(a)为屏板定位前的初始位置状态,图 5(b)为经过图像定位后的对准位置状态。

图像定位完成后,进入激光光栅所捕捉的信号范围内,再进行光栅定位。光栅定位所用激光光源为半导体激光,波长 $\lambda=633\text{ nm}$,功率 20 mW,光栅的光栅常数 $l_p=200\text{ }\mu\text{m}$,两片光栅间的间距 $G=1\text{ mm}$ 。微机的采样及控制循环时间设定为 0.1 s,微机每发出一个脉冲,对应步进电机旋转 0.028° ,驱动微动台移动 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。图 6 表示荫罩板与前基板光栅定位的实验结果,其中图 6(a)为屏板上、下光栅衍射产生的叠栅信号 I_1 、 I_2 的变化情况,图 6(b)为 CCD 摄制的网孔与电极线的图像。当两叠栅信号进入误差范围内时,精密定位完成,此时荫罩板的网孔与前基板的电极线完全对准。图中精密定位的误差范围为 $\pm 0.15\text{ }\mu\text{m}$,即定位精度为 $\pm 0.15\text{ }\mu\text{m}$ 。

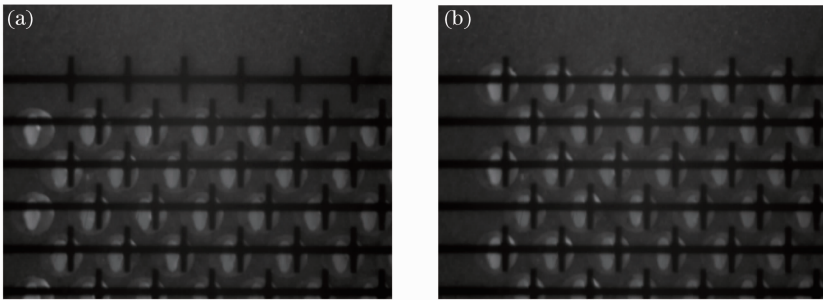


图 5 屏板的图像定位。(a)初始位置状态;(b)对准位置状态

Fig. 5 Image position of screen panel. (a) State of initial position; (b) state of adjusted position

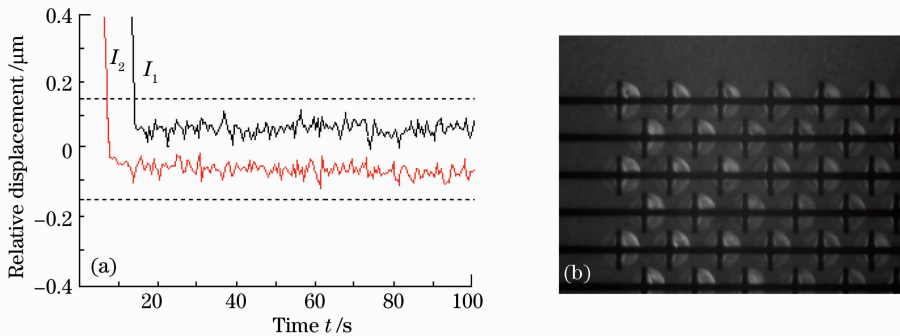


图 6 精密定位实验结果。(a)精密定位曲线;(b)网孔与电极线的图像

Fig. 6 Result of precision alignment. (a) Course of precision alignment; (b) image of panel alignment

5 结论

针对 SMPDP 屏板定位的特点,提出了基于计

算机视觉的图像定位方法和基于衍射光栅的叠栅定位方法,利用这两种定位方法,建立了精密定位的复

合控制系统,其中图像定位作为粗定位,光栅定位作为精定位。通过粗定位和精定位相结合的两段式复合定位,可保证在较大的信号捕捉范围内,实现高速高精度定位,有效解决了定位精度、定位速度与信号捕捉范围三者之间的矛盾。系统在软、硬件方面采取的一系列抗干扰措施,确保了较高的定位精度及工作可靠性。实验结果表明,采用复合式精密定位可在 50 mm 的行程范围内获得 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 的定位精度,对 SMPDP 的产业化具有重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Yang Lanlan, Tu Yan, Zhang Xiong. Study of striation variations in shadow mask plasma display panel[J]. *Chinese J. Vacuum Science and Technology*, 2010, **30**(2): 154~159
杨兰兰,屠彦,张雄.荫罩式等离子体显示板条纹分布变化的研究[J].真空科学与技术学报,2010,**30**(2): 154~159
- 2 Yang Cheng, Zhang Xiong, Wu Zhong. Comparison of address voltage margins under two novel waveforms in shallow mask plasma display panels [J]. *Chinese J. Vacuum Science and Technology*, 2011, **31**(3): 314~319
杨诚,张雄,吴忠.两种新型 SMPDP 驱动波形下的列电极电压动态范围的研究[J].真空科学与技术学报,2011,**31**(3): 314~319
- 3 Li Xiaofeng, Xu Jun, Zhang Shengxiu *et al.*. Edge detection algorithm of laser active imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1599~1601

- 李晓峰,徐军,张胜修等.激光主动成像图像边缘检测方法[J].中国激光,2010,**37**(6): 1599~1601
- 4 Guo Baolong, Wu Xiaoyue, Li Leida. A new approach for removing the Gibbs-like artifacts in image denoising[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 769~773
郭宝龙,武晓玥,李雷达.一种新的有效消除图像中 Gibbs 噪声的算法[J].中国激光,2010,**37**(3): 769~773
- 5 J. L. Zhang, L. L. Yu, J. N. Liu. Ultra-precision positioning control technique based on neural network [J]. *J. Southeast University*, 2006, **22**(1): 1~4
- 6 Y. Wang, Z. G. Liu, F. Bo *et al.*. Design and control of an ultraprecision stage used in grating tiling [J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2007, **20**(1): 1~4
- 7 M. Kihito, H. Furuhashi. Influences of the inclination of gratings on the alignment accuracies in Moiré alignment systems [J]. *Elect. Engng. Jpn.*, 2002, **139**(2): 46~51
- 8 G. Y. Zhou, V. J. Logeeswaran, F. S. Chau. An open-loop nano-positioning micromechanical digital-to-analog converter for grating light modulation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(5): 1010~1012
- 9 L. Sun, J. G. De, Y. J. Liu *et al.*. Investigation on a novel dual-grating macro-micro driven high speed precision positioning system for NEMS[C]. Proc. 1st IEEE Int. Conf. Nano Micro Engineered & Molecular Systems, 2006, 644~648
- 10 L. Z. Zhou, H. Furuhashi, Y. Uchida. Sensing characteristics of a precision aligner using Moiré gratings for precision alignment system [J]. *Chinese J. Lasers B*, 2001, **10**(4): 257~262
- 11 J. L. Zhang, A. K. Yang, J. N. Liu. Study on compound ultra-precision alignment technique [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(10): 1741~1745

栏目编辑:马沂