

文章编号 1004-924X(2012)04-0864-09

利用像素移动技术提高液晶光阀投影图像分辨率

赵连军^{1,2*}, 张文明¹, 刘恩海¹

(1. 中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100190)

摘要: 为了提高薄膜场效应晶体管液晶显示器(TFT-LCD, 以下简称液晶光阀)投影图像的分辨率, 提出了一种利用压电陶瓷驱动的平台拖动液晶光阀做 X、Y 方向上的精确移动, 实现液晶光阀像素移动的方法。介绍了液晶光阀硬件结构的特点, 基于这些特点提出了利用像素移动技术提高投影图像分辨率的原理。根据计算得出 X、Y 方向精确位移运动的精度要求为 10 nm 量级, 进而选择了实现这样高精度运动的机械结构。提出了 3 种检测试验结果的方案, 绘制了整体试验方案的结构框图。最后, 搭建试验平台验证了试验原理的正确性和有效性。采用像素移动技术后, 利用液晶光阀投影得到的图像的分辨率在 X、Y 方向上分别提高到原来的 2 倍, 总像素个数为原来的 4 倍, 突破了星模拟器的分辨率完全受限于显示器件分辨率的状况。

关键词: 像素移动; 液晶光阀; 压电平台; 投影图像; 分辨率

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0864

Enhancement of resolution for projective image of TFT-LCD by pixel-multiplexing

ZHAO Lian-jun^{1,2*}, ZHANG Wen-ming¹, LIU En-hai¹

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhao-zongyu@163.com*

Abstract: To improve the resolution of projective image of a Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display (TFT-LCD), a method was proposed by using a piezo-stage to drive the TFT-LCD movement in X and Y directions to implement the pixel-multiplexing of the TFT-LCD. The hardware configuration of the TFT-LCD was introduced, and the principle of improving the resolution of projective image by the pixel-multiplexing was presented. On the basis of accuracy demand of displacement movement to be 10 nm, the moving mechanism that can achieve a higher precision was chosen. Furthermore, three kinds of test schemes were proposed to prove the obtained results, and an experimental platform was constructed to verify the correction and efficiency of test principle. Experimental results show that the image resolution projected by the TFT-LCD has been doubled in X and Y directions, respectively, and total pixels are four times that of traditional imaging method. Proposed method changes the situation that the resolution of a star simulator is limited by that of the display device.

收稿日期: 2011-12-06; 修订日期: 2012-01-16.

基金项目: 民用航天预研项目 (No. C5220062303)

Key words: pixel-multiplexing; Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display (TFT-LCD); piezo-stage; projective image; resolution

1 引言

星敏感器是为卫星等空间飞行器提供姿态信息的仪器,它通过对星空拍摄图像,提取图像中的星点位置,与星表中的数据比对来定位卫星的姿态。在星敏感器上天以前要对其进行检测和标定,动态星模拟器就是为其提供动态模拟星图的设备。随着 CCD 器件分辨率、处理电路性能和亚像素细分定位算法等技术的发展^[1-3],星敏感器给出的姿态信息的精度相应提高,因此对为它提供标定图像的地面标定设备性能的要求也在不断提高,尤其是在图像的分辨率方面。因为高分辨率的模拟图像能够更精确地表达星点的位置信息,从而为星敏感器提供更加接近理想星空的星图模拟,近年来很多人针对各种特殊的应用背景对星模拟器的精度提高做了很多的工作^[4-6]。孙高飞等人研制了一套星间角距精度优于 $0.2''$ 的甚高精度星模拟器系统^[7],但是他们研制的星模拟器功能相对于动态星模拟器来说功能单一,不能广泛应用。动态星模拟器中显示器件的分辨率是限制其发展的瓶颈,针对这种情况,提出的像素移动技术突破了星模拟器的分辨率完全受制于显示器件分辨率的局面。

现有的提高图像分辨率的方法主要有直接提高显示器件的分辨率、从控制算法上提高分辨率和通过硬件光学拼接来提高分辨率三种。相对于星模拟器来说,理论上可行的提高模拟星图分辨率的方法也是以上三种。将直接提高显示器分辨率的工作主要是由日韩和欧美的显示器制造商来完成的,每次性能的提高都是以昂贵的成本为代价。在从控制算法提高显示图像分辨率方面,很多人做了相关研究^[8-10]。现阶段在小尺寸的显示器中,彩色显示器的分辨率远低于单色显示器。根据动态星模拟器应用的特点,采用的主要是单色液晶光阀。单色液晶光阀和此方法中提到的彩色显示器在结构上有本质的不同,所以他们的技术不能应用在提高星模拟器的分辨率中。光学拼接分为有缝拼接和无缝拼接两种,有缝拼接主要应用于舞台背景显示器和广告牌等大屏幕显示。

无缝拼接是通过精密光学系统,将放置在不同的位置的显示器的图像投影出去来实现投影图像的无缝拼接,Wu-Li Chen 等人就利用类似的原理研制了投影仪^[11]。如果利用这种方法中提到的无缝拼接技术将分辨率提高到以前的 4 倍,需要 4 套液晶光阀及其驱动电路和一套精密光学系统,不仅加大成本,而且制造的星模拟器体积会很大,有悖于现在小型化的要求和趋势。在排除现有方法的基础上,本文参考像素复用的原理^[12]提出了用像素移动的方法来提高液晶光阀投影图像的分辨率。试验表明,像素移动技术在稳定性和精度方面满足工程实际的需求。

2 像素移动技术系统构成及原理

2.1 像素移动技术简介

液晶光阀的工作原理决定像素点之间必然存在间隔,而且为了增加液晶像素的光传递效率,通常在液晶光阀的结构中加入微透镜阵列(MLA),微透镜阵列对发光点有压缩作用,增加了间隙宽度和发光点宽度的比例,导致液晶光阀中发光点和间隙的宽度比小于 1。这种硬件结构特点为提高液晶光阀投影图像的分辨率提供了可能性。图 1 是液晶光阀 $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 的结构示意图,其中白色的部分是可以控制光透过量的部分,黑色是不可控的部分。就单个像素而言,可以控制光通过量的部分是正方形,其面积略小于整个像素尺寸的 $1/4$ 。

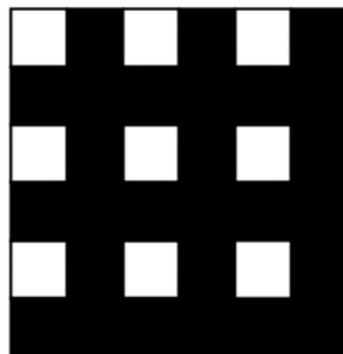


图 1 液晶光阀的结构示意图

Fig. 1 Configuration of TFT-LCD

像素移动技术的设计思想是利用可控的部分分时移动到不可控的部分上,同时配合图像处理技术,使可控的部分在相应位置时显示相应的信息,一整幅图像分 4 次显示。星敏传感器在利用星模拟器进行标定时,星模拟器中的星图不断更新,但是星敏传感器中的成像器件 CCD 或者 CMOS 是积分器件,会记录在一个积分周期内的所有情况。液晶光阀中的一幅图像虽然是分 4 次来显示的,但是对于星敏传感器来说和利用 XY 方向上分辨率分别高一倍的液晶光阀一次显示没有区别。使用像素移动技术之后原来的一个像素就变好像变成了 4 个像素,整个液晶光阀的分辨率在 XY 方向上分别提高一倍。图 2 是像素移动技术的原理示意图,左边表示液晶光阀需要 4 个像素才能显示该图形的完整形状,右边部分表示采用像素移动技术之后液晶光阀中单个像素中 1/4 的发光部分分别移动到其余不发光的 3/4 的部分上,这样只需要一个像素就可以显示该图形的完整形状。

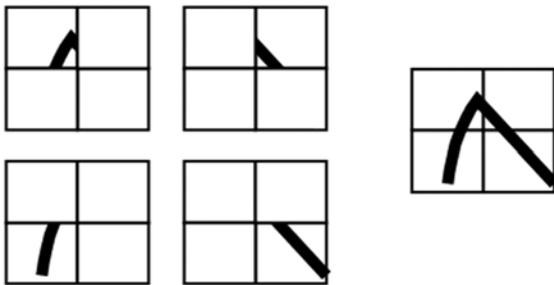


图 2 像素移动示意图

Fig. 2 Sketch map of pixel multiplexing

2.2 精度及需求的相关计算

像素移动技术在工程实践中需要考虑的问题主要包括以下 4 个方面:

(1) 液晶光阀在遍历 4 个位置时需要做到的位移精度是多少确定了机械平台应该达到的精度。

(2) 采用什么机械结构实现高精度的位移才能最好地满足定位精度、运动频率、成本等方面的要求。

(3) 图像处理和显示技术,将图像按照一定要求分割成 4 幅子图像,4 幅子图像的显示要和平台的运动匹配。

(4) 同步技术,采用计算机来控制压电平台控

制器和液晶光阀的驱动电路不能够满足在响应时间方面的要求,需要将控制系统通过 DSP + FP-GA 的模式来实现,做到高速和实时性。

工程应用的对象主要是星敏传感器和星模拟器,因此所有的参数计算和机械装置的选择是按照他们的性能及要求来进行的。在机械结构的选择方面主要考虑机械结构尺寸、定位精度、响应时间、控制系统难度。下面就关心的几个方面进行计算,确定执行机构。其中主要的一个方面是执行机构的定位精度,这里根据国内的高精度星敏传感器和星模拟器的情况分析得出需要的定位精度。

国内某型号高分辨率的星敏传感器主要参数为:

(1) CCD 像元数:1 024 pixel × 1 024 pixel

(2) 成像视场大小:17.3° × 17.3°

(3) 通过算法可以达到的细分精度:1/200^[1-3]针对以上这种型号的星敏传感器,通过计算可以得到星敏传感器上单像元对应的视角为:

$$17.3^\circ / 1\,024 = 60.82''$$

细分以后的精度为:60.82''/200 = 0.304''

国内某型号高精度的星模拟器参数:

(1) TFT-LCD 像元数:2 048 pixel × 1 536 pixel

(2) 视场:17.3° × 17.3°(对应于星敏传感器)

(3) 像元尺寸:14.3 μm × 14.3 μm

(4) 刷新时间:16.3 ms

通过星模拟器的参数指标可以计算对机械结构的精度要求:

(1) 星模拟器中单像元对应的视场张角为:17.3°/1 536 = 40.55''

(其中采用 1 536 而没有采用 2 048 的原因是要保证星模拟器投影出来的图像必须被星敏传感器全部接收,即星敏传感器的光学不变量大于星模拟器的光学不变量)

(2) 对应 0.304'' 的角度在液晶光阀上对应的尺寸为:(0.304''/40.55'') × 14.3 μm = 0.107 μm。

(3) 若星模拟器的星点精度做到星敏传感器探测精度的 10 倍,则星模拟器中液晶光阀位移运动的定位精度应为:0.107 μm/10 = 0.010 7 μm ≈ 11 nm。

通过以上计算得液晶光阀做位移运动需要的

精度为 11 nm。

机械执行结构的另一项重要指标是响应时间。试验采用的液晶光阀的刷新频率是 65 Hz, 根据液晶光阀的刷新特点, 要保证采用像素移动技术之后投影图像像素之间边缘清晰, 压电平台的响应频率应该比液晶光阀的刷新频率高一个数量级, 至少要达到 300 Hz。如果执行机构的响应时间过长, 就会造成采用像素移动技术之后得到的投影图像出现边缘模糊。

2.3 执行结构的选择

现有的微定位机构根据工作原理可以分为以下 6 大类^[3], 它们的分类和各种类型所具有的特点如下:

(1) 机械传动微定位机构

特点: 只适用于中等精度的微位移系统

(2) 弹性变形微定位机构

特点: 容易产生振荡

(3) 热电式微定位机构

特点: 相邻的零部件由于受热变形, 以致影响整体精度

(4) 磁性伸缩微定位机构

特点: 铁磁材料在磁场的作用下, 除产生磁致伸缩外, 还伴随着受热伸长因而其应用受到限制

(5) 电磁铁驱动的微定位机构

特点: 通过电流的大小产生磁力来驱动产生精密位移, 通电流则不可避免的产生热, 而且在启动的时候容易产生振荡

(6) 压电陶瓷微定位机构

特点: 机构紧凑、无间隙、体积小, 具有很高的位移分辨率, 响应快, 几乎没有发热问题

满足星模拟器小型化的要求, 微定位机构的体积应在 70 mm×70 mm×30 mm 级别; 2.2 中分析微定位机构定位精度要求为 11 nm; 驱动频率为 300 Hz。综合考虑各种微动机构的性能特点, 在满足驱动频率、定位精度和小型化需求的情况下, 只有压电陶瓷驱动的微动平台满足实验要求。

2.4 检测方法

在实验方案制定完成和试验条件具备之后, 需要考虑采用什么方法来检测实验结果。在综合考虑现有的硬件条件和测试设备及测试方法的基础上, 提出了以下 3 种检测方法:

(1) 在液晶光阀前安装镜头, 将液晶光阀和镜

头组合在一起形成一套完整的投影设备, 然后将星敏感器安装在液晶光阀和镜头组成的投影系统前, 保证两套系统的光轴重合。利用星敏感器拍摄液晶光阀的投影图像。

(2) 在液晶光阀前安装光学镜头, 组成一套完整的投影设备, 通过控制板, 让液晶光阀显示标准的网格板或均匀分布的星点图, 然后将经纬仪放在镜头前, 人工检测投影图像和理论上标准图像的差别。

(3) 用显微镜观察采用像素移动技术之后的液晶光阀。将图像采集系统安装在显微镜之上, 拍摄通过显微镜放大之后的采用了像素移动技术的液晶光阀显示的图像。

第一种采用星敏感器拍摄采用像素移动技术之后的液晶光阀投影图像的方法是液晶光阀制成星模拟器后的实际应用, 所以是最容易考虑到的检测方法。但是现有的星敏感器或者其它成像设备的分辨率不够高, 不能够清楚地记录单个像素采用像素移动技术之后的情况。如果想准确地观察每个像素的变化情况, 这种方法有一定的局限性, 不能满足需求。第二种方法理论上是可行的, 实际的工程应用中也是采用这种方法来检测星模拟器, 但是由于像素移动技术使液晶光阀的位置处在 4 个位置之间的周期运动中, 此周期运动的频率对于人眼来说是高频运动, 所以采用人眼不能够完成检测任务。第三种方法通过显微镜放大之后来观察, 虽然只能观察到液晶光阀的部分区域, 但是可以清楚地观察到每个像素的情况, 而且可以在光路中加入图像采集系统拍摄采用像素移动技术后液晶光阀显示图像的完整状况。采用的图像采集系统和星模拟器的应用对象星敏感器的工作原理完全相同, 所以这种检测方法最为理想。综合考虑各项因素的基础上整个检测过程采用第三种方法。

2.5 系统的硬件结构框图

在试验方案和检测方案制定完成之后, 绘制了整套系统的结构框图, 如图 3 所示。整个系统的核心部分是根据光传播的需求设计的。最下层是 LED 光源, 它的作用是为液晶光阀提供背光光源, 固定在基座上, 位置不能移动。液晶光阀固定在压电平台上, 压电平台可以拖动液晶光阀实现 XY 方向上的纳米级精确运动。压电平台放置在二维大位移平台上, 通过大位移平台的移动, 可以

测量液晶光阀中单个像素的尺寸以及调节显微镜的观察区域和图像采集系统系统的成像区域。液晶光阀驱动电路和压电平台控制器的控制是由控制计算机 2 来完成的。液晶光阀的移动情况可以通过显微镜来观察。在显微镜的光路中安装了图像采集系统,图像采集的工作是在控制计算机 1 的控制下完成的。

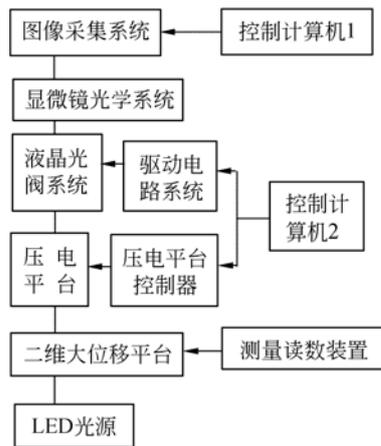


图 3 系统结构框图

Fig. 3 Sketch map of whole system

3 实验及分析

3.1 压电平台的选择及标定

按照图 3 中的结构框图,搭建了试验平台验证提出的试验原理的可行性和正确性,并且检测试验结果。分别采用了美国 NPOINT 公司型号为 NPXY100A 的二维平台和德国 PI 公司型号为 P-545 的三维压电平台对比完成了试验阶段和检测阶段的工作,图中是 NPOINT 公司的平台,平台的主要性能指标是(完整性能指标可以网上下载):

- (1)行程/ μm : 100×100
- (2)外型尺寸/ mm : $100 \times 100 \times 23$
- (3)位置噪声/ nm : 0.3
- (4)通孔直径/ mm : 40
- (5)线性误差/(%):0.03
- (6)迟滞/(%,典型值):0.03

现行检测高精度的压电陶瓷平台的仪器有激光干涉仪和电容式传感器两种。压电平台生产厂家采用激光干涉仪标定他们的产品,但是激光干

涉仪造价昂贵、使用步骤复杂。电容式传感器是另一种测量压纳米级位移量的高精度器件,使用相对简单,因此采用电容式传感器对平台的位移精度进行标定。对电容式传感器标定得到的数据显示 NPOINT 公司 NPXY100A 的定位重复性优于 2 nm,在定位精度方面满足试验的需求。表 1 是在两个时间段分别测量压电平台在 X 方向的定位精度的试验数据,第一列是给出的指令位置,第二列和第三列是压电平台在不同时间测量时的实际定位位置,数据显示其定位重复精度优于 2 nm。

在响应时间方面,将负载固定在平台上之后,观察平台的响应时间,负载的重量是 47 g,输入矩形波驱动时平台的响应曲线如图 4 所示,显示平台在 11 ms 时稳定。

表 1 压电平台标定数据

Tab. 1 Calibration data of piezo-stage

| 指令位置(μm) | 定位位置(μm) | |
|-----------------------|-----------------------|------------|
| | 2011.07.28 | 2011.07.29 |
| X 方向 | | |
| -50 | -49.808 | -49.809 |
| -40 | -39.847 | -39.846 |
| -30 | -29.883 | -29.883 |
| -20 | -19.921 | -19.921 |
| -10 | -9.958 | -9.958 |
| 0 | 0.004 | 0.004 |
| 10 | 9.967 | 9.967 |
| 20 | 19.929 | 19.929 |
| 30 | 29.892 | 29.892 |
| 40 | 39.854 | 39.854 |
| 50 | 49.817 | 49.817 |

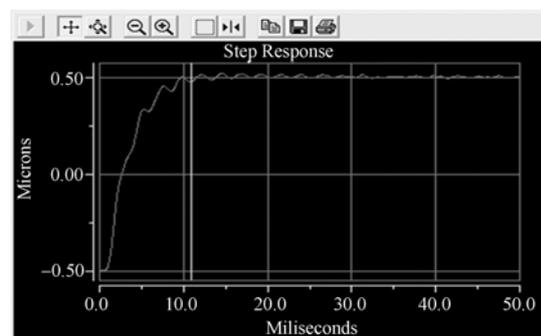


图 4 压电平台的响应曲线

Fig. 4 Response time of Piezo-stage

3.2 试验平台的搭建

在所有的试验仪器到位和准备工作完成之后,在实验室中搭建了完整的试验装置,实物图如图5和图6所示。其中图5是试验装置中的核心部分,包括NPOINT公司的压电平台、液晶光阀(安装在压电平台上)、显微镜物镜系统、液晶光阀的驱动电路系统。图6除了图5包含的设备以外还包括物镜、图像采集系统、显微镜的二维手动调整载物台及读数系统等。

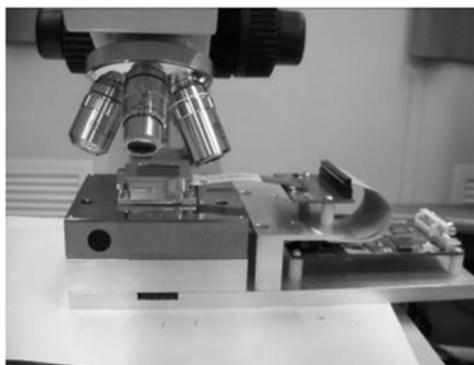


图5 液晶光阀系统

Fig.5 System of TFT-LCD



图6 核心实验装置

Fig.6 Core of whole system

3.3 试验结果

实验装置安装完成之后拍摄了多幅图形,其中图7是液晶光阀的原始图像。采用测量显微镜对液晶光阀的像素尺寸进行了测量,得到液晶光阀的单个像素的尺寸是 $14.3\ \mu\text{m} \times 14.3\ \mu\text{m}$,可调制光的部分尺寸是 $6.5\ \mu\text{m} \times 6.5\ \mu\text{m}$ 。可以控制光通过量的部分略小于像素尺寸的 $1/4$,这样的硬件结构特点对于应用像素移动技术非常理想,在采用像素移动技术之后,像素之间不会有重叠的部分。

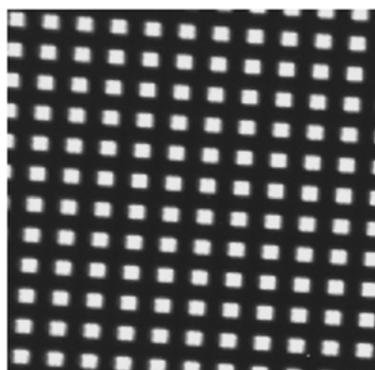


图7 液晶光阀原始图像

Fig.7 Original picture of TFT-LCD

图8和图9是在液晶光阀显示的图像不变的情况下使用压电平台拖动液晶光阀分别在X方向和Y方向上移动0.5 pixel,在每个位置停留20 ms,采用安装在显微镜上的光学成像系统得到的试验结果。图10是用压电平台拖动液晶光阀在XY方向上分别移动0.5 pixel,在每个位置停留

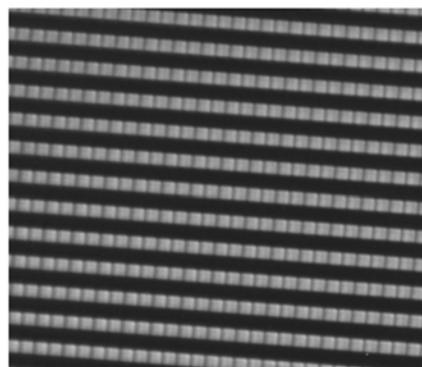


图8 左右移动0.5 pixel

Fig.8 Displacement of 0.5 pixel right and left

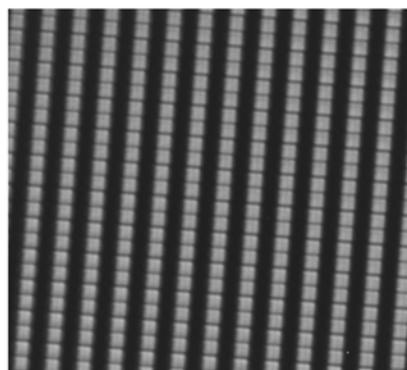


图9 上下移动0.5 pixel

Fig.9 Displacement of 0.5 pixel up-and-down

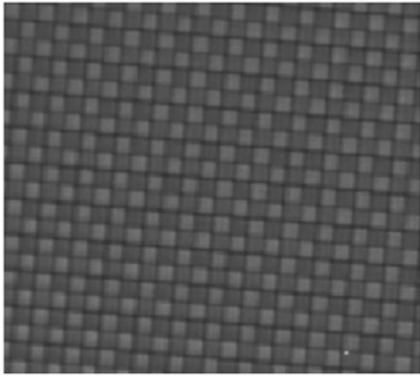


图 10 液晶光阀采用像素移动技术后的图像

Fig. 10 Result of pixel multiplexing

20 ms, 采用安装在显微镜上的相机拍摄得到的实验结果。由于光源的亮度不够强, 所以采用加长图像采集曝光时间的方法成像, 曝光时间是 2 s。曝光 2 s 的原因主要有以下三点, 一是显微镜的镜头口径远小于星敏感器镜头口径; 二是显微镜中成像传感器敏感度小于星敏感器中成像器件敏感度; 三是液晶光阀前没有加镜头。应用到星模拟器中时, 如果显示的亮度不够理想, 可以采用加大背光板的功率来提高显示图像的亮度。例如采用像素移动技术使液晶光阀投影出来的图像的分辨率提高为以前的 4 倍, 单个像素的亮度变为以前的 1/4, 要想使单个像素的亮度恢复到以前的状态, 需要将背光板的功率提高为以前的 4 倍。

图 10 的试验结果显示像素移动技术可以有效地将液晶光阀显示的图像在 XY 方向上分别提高 1 倍, 显示的总像素数为未采用像素移动技术之前的 4 倍。

图 7 中可以看到亮点的边缘模糊, 造成这种现象主要有三方面的原因, 一是显微镜上安装的成像设备的量化误差, 二是液晶光阀上安装的微透镜阵列对单个像素的压缩标准是在 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$ 的面积内通过总能量的 80% 左右, 三是液晶光阀前没有加镜头。

图 10 中同样存在像素的边缘不清晰的现象, 造成这种现象的原因除图 7 中边缘模糊的三点原因外, 还有压电平台的响应时间过长等。现在采用的 NPOINT 公司的平台对输入的矩形波的响应时间如图 4 所示, 幅值稳定在 2% 以内的时间大约为 11 ms。对于实验要求来说, 这样的响应时间相对较长, 所以它是造成像素边缘不清晰的

重要原因之一。针对这种情况分析压电平台的特点, 采用短行程的压电平台可以相对降低响应时间。在 NPOINT 公司的帮助下, 采用短行程的压电平台, 在负载为 50 g 的情况下走 $8 \mu\text{m}$ 的行程, 平台的响应时间为 3 ms (如图 11 所示), 这样就可以有效降低由于响应时间造成的边缘模糊现象, 而图 10 中像素点亮度不均匀是由平台 XY 方向上的响应时间不一致引起的。

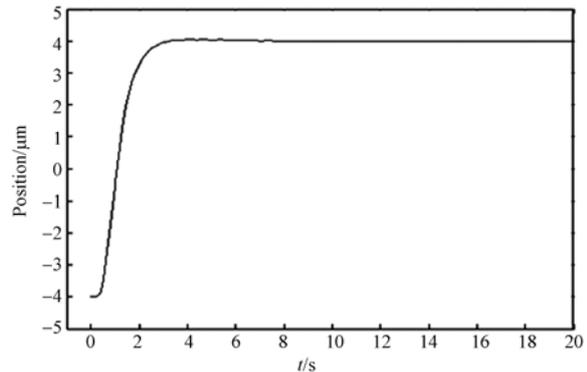


图 11 短行程平台的响应曲线

Fig. 11 Response time of short-range stage

4 结 论

本文提出用像素移动的方法来提高液晶光阀投影图像的分辨率, 由图 7 和图 10 可以看出, 采用该技术后, 液晶光阀投影的图像的分辨率在 XY 方向上分别提高为以前的 2 倍, 1 幅图像中能够显示的总像素个数为未采用像素移动技术之前的 4 倍。经过实验证实了像素移动理论的正确性和工程实际中的可行性。突破了星模拟器的分辨率完全受限于显示器件分辨率的状况, 系统在稳定性和高精度方面满足工程实际的要求。

因为提高分辨率之后, 1 幅完整的图像是由 4 幅图像组成的, 因此要保证整个系统正常工作就要保证平台的移动和给液晶光阀提供的图像在时序上匹配。而电脑是多任务系统, 不能保证高速的时序关系, 要在工程实际中应用需要将平台控制和图像处理通过 DSP 和 FPGA 来实现, 这是下一步的工作重点。

由于液晶光阀的结构特点, 现在分辨率只是提高为以前的 4 倍, 但是采用相同的思路可以将提高的倍数增加, 前提是在液晶光阀上加上微透

镜阵列(MLA)将可控光通过部分的面积进一步压缩。例如将可控光部分面积压缩为以前的1/9、

1/16,将其分别移动到相应的位置上,分辨率可以提高到以前的9倍、16倍。

参考文献:

- [1] 杨君,张涛.星点质心亚像元定位的高精度误差补偿[J].光学精密工程,2010,18(4):1002-1010.
YANG J, ZHANG T. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel sub-division location[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):1002-1010. (in Chinese)
- [2] 李葆华,刘国良,刘睿.天文导航中的星敏感器技术[J].光学精密工程,2009,17(7):1615-1620.
LI B H, LIU G L, LIU R. Key techniques of star sensors for celestial navigation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(7):1615-1620. (in Chinese)
- [3] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination[J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1995(6):10-16.
- [4] 赵晨光,谭久彬,刘俭.用于天文导航设备检测的星模拟装置[J].光学精密工程,2010,18(6):1326-1332.
ZHAO CH G, TAN J B, LIU J. Star simulator for testing celestial navigation equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(6):1326-1332. (in Chinese)
- [5] 孙向阳,张国玉,王大轶.大尺寸高精度星模拟器光机结构设计[J].仪器仪表学报,2011,32(9):2121-2126.
SUN X Y, ZHANG G Y, WANG D Y. Opto-mechanical structure design of large-scale and high precision star simulator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011,32(9):2121-2126. (in Chinese)
- [6] 孙高飞,张国玉,郑茹.星敏感器标定方法的研究现状与发展趋势[J].长春理工大学学报(自然科学版),2010,33(4):8-14.
SUN G F, ZHANG G Y, ZHENG R. Star sensor calibration research and development[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010,33(4):8-14.
- [7] 孙高飞,张国玉,姜会林,等.甚高精度星模拟器设计[J].光学精密工程,2011,19(8):1730-1735.
SUN G F, ZHANG G Y, JIANG H L, *et al.*. Design of very high accuracy star simulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1730-1735. (in Chinese)
- [8] 张筱蓉,陈泽祥.一种彩色平板显示器像素移动的虚拟显示算法及实现[J].电子器件,2006,29(4):1227-1230.
ZHANG X R, CHEN Z X. Algorithm to achieve virtual vision on color array display panel[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2006, 29(4):1227-1230. (in Chinese)
- [9] 梁宁,沈思宽,刘纯亮,等.一种提高等离子体显示器分辨率和亮度的驱动技术[J].西安交通大学学报,2003,37(2):159-162,183.
LIANG N, SHEN S K, LIU C L, *et al.*. New driving method to improve definition and luminance on PDP for high definition television[J]. *Journal of XI'AN Jiaotong University*, 2003, 37(2):159-162, 183. (in Chinese)
- [10] 许峰,张俊生.LED信息屏组合虚拟像素技术及其算法研究[J].中国图形图像学报,2009,14(9):1915-1918.
XU F, ZHANG J SH. The combined-virtual pixels technology for LED display and study of algorithm [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009,14(9):1915-1918. (in Chinese)
- [11] CHEN W L. An autostereoscopic display with high resolution and large number of view-zones[J]. *SPIE-IS&T 2008*,6803:68030L-1-8.
- [12] GIL B, MATHISA T. Temporal pixel multiplexing for simultaneous high-speed, high-resolution imaging [J]. *Nature Methods*, 2010,7(3):209-211.
- [13] 权哲浩.纳米级步进压电微动台结构设计 with 性能分析研究[D].天津:天津大学,2007.
QUAN Z H. *Study on structure design and characteristic analysis of a nano-stepping piezoelectric actuator* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

作者简介:



赵连军(1985—),男,山东潍坊人,博士研究生,2009年于四川大学获得学士学位,主要从事图像显示、图像处理和空间物体位置姿态测量等方面的研究。E-mail: zhao-zongyu@163.com



刘恩海(1964—),男,四川达州人,研究员,博士生导师,1987年于大连理工大学获得学士学位,主要从事光电精密计量测试技术的研究。E-mail: leh@ioe.ac.cn



张文明(1965—),男,四川眉山人,副研究员,硕士生导师,1988年于北京理工大学获得学士学位,主要从事光学精密测量技术的研究。E-mail: ZWM@ioe.ac.cn

● 下期预告

基于微液滴介质的静电式微型振动发电机的研究

温中泉,何 渝,王晓兰

- (1. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术国家级重点学科实验室,重庆 400044;
2. 重庆大学 微系统研究中心,重庆 400044)

针对现有悬臂梁式微型振动发电机存在低频响应特性差等问题,提出了一种利用微液滴介质拾振实现差分电容器变化及电荷转移的静电式微型振动发电机新结构。根据驻极体模型,推导出了差分电容器极板上电荷分布公式;结合微液滴作受迫正弦振动假设,建立了静电式微型振动发电机的数学模型。采用 COMSOL Multiphysics 软件对微液滴运动及电容器极板电荷分布进行了仿真,得到了发电机的输出电压幅频特性。制作出了以汞为介质的静电式微型振动发电机样机,进行了样机的性能测试。实验结果表明:该静电式微型振动发电机共振频率为 3 Hz,在加速度为 3g、频率为 3 Hz 的振动激励下,负载为 1 M Ω 时,测得样机输出电压峰-峰值为 1.21 V,输出功率为 0.73 μ W,可以实现环境中低频振动能量的获取与转换。