

裸眼 3D 显示串扰率实时检测系统设计

马鸿钦¹, 王晓露¹, 范 杭², 王嘉辉¹, 周建英¹, 周延桂^{1*}

¹中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275;

²广州弥德科技有限公司, 广东 广州 510275

摘要 为了提高裸眼 3D 显示的光学膜层与显示屏的贴合效率和全局对位精度, 提出了一种全局的、高效率的、实时的 3D 显示光学特性测量方案, 并开发出了相应的测量系统, 实现了对 3D 显示屏幕的亮度均匀性和串扰率均匀性的实时测量。设计并开发了测量系统的光电二极管阵列, 制作了高灵敏度和高精度的电路控制模块, 同时编写了上位机软件, 用以实时显示数据结果。光电二极管的光谱响应与人眼光谱响应基本一致, 经过标定和方向性校正后, 可以实时得到屏幕不同局部在视区中的光强分布数据。基于这一数据, 可以计算出屏幕不同局部量化的串扰率数据。在实验中, 测试系统能够有效测量 23.7 cm 宽度范围内的空间光强分布, 覆盖了一对左右眼视区。系统的测量精度为 1.58 mlx。实验表明, 所得的数值结果能够量化地反映人眼亮度和串扰率视觉感受, 可用于实时检测 3D 显示器的视区光强分布, 计算串扰率分布, 有助于提高 3D 裸眼显示设备的装机效率。

关键词 测量; 串扰率; 3D 显示; 亮度; LabVIEW

中图分类号 TH741; TP399 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061201

Design of Real-Time Measuring System for Autostereoscopic 3D Displays

Ma Hongqin¹, Wang Xiaolu¹, Fan Hang², Wang Jiahui¹, Zhou Jianying¹, Zhou Yangui¹

¹ State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

² Guangzhou MiD-Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510275, China

Abstract To improve the fit efficiency of optical membranes and displays and overall alignment precision in autostereoscopic 3D displays, this article proposes an overall, high efficiency and real-time measurement scheme for optical properties of 3D displays. The corresponding measurement system is developed. The real-time measurement of luminance uniformity and crosstalk ratio uniformity for 3D display screen is realized. Photodiode array of the measurement system is designed and developed. Circuit control module with high sensitivity and high precision is fabricated. And software of upper computer is designed to display data in real time. The spectral response of the photodiodes is close to that of human eyes. The calibrated and directionally corrected photodiodes can be used to measure light intensity distributions of visual area from different parts on screen in real time. The crosstalk ratio data from different parts on screen can be calculated quantitatively with obtained data. Experimental results show that the system is capable of effectively measuring spatial light intensity distribution within 23.7 cm width, which covers a pair of eyes' visual area. The measurement precision of the system is 1.58 mlx. Results prove that the data can quantitatively reflect luminance and crosstalk ratio perceived by human eyes. This method can be used to measure light intensity distribution of visual area for 3D displayer in real time, and calculate crosstalk ratio distribution. Which is beneficial to enhance the fabrication efficiency of autostereoscopic 3D display devices.

收稿日期: 2016-11-25; **收到修改稿日期:** 2017-01-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2016M592572)、科技开发协作项目(20167413071010004)

作者简介: 马鸿钦(1995—),男,本科生,主要从事 3D 显示测量与应用方面的研究。E-mail: mahq7@mail2.sysu.edu.cn

导师简介: 周建英(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事信息光子学、显示光学与 3D 显示技术与应用方面的研究。E-mail: stszjy@mail.sysu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhouyg3@mail.sysu.edu.cn

Key words measurement; crosstalk ratio; 3D display; luminance; LabVIEW

OCIS codes 120.2040; 120.1880

1 引言

随着 3D 显示技术的逐渐成熟,3D 显示系统光学特性的准确测量与评价对于 3D 产业的规范化和 3D 显示产品的优化设计来说有着重要的意义。影响 3D 显示效果及舒适度的主要因素包括:亮度、分辨率、串扰率、均匀性等^[1-9],而这些因素的评价与测量均依赖于对视区中光强分布的测量。

在传统的测量方式中,多采用光谱辐射度计或电荷耦合器件(CCD)摄像机等测量工具。这一类的方案是以非在线的方式对 3D 显示系统的光学特性进行测量的,单次测量空间范围小,且每次移动之后需手动对准测量点,增加了工作复杂度。同时,测量仪器光谱响应特性不符合人眼视见函数曲线,不能反应人眼实际观看效果,因此难以量化地反映 3D 显示屏幕的串扰率均匀性和亮度均匀性^[10-13]。其中,串扰率的评价与测量依赖于视区中对光强分布的测量^[4]。在已发表的文章^[3-4]中,本课题组提出了一种基于单个光电二极管与步进电机的自动检测系统,实现了对 3D 显示器亮度均匀性和串扰率均匀性的定量测量,但步进电机存在移位误差,移动过程中会产生抖动,影响测量精度和速度^[14],且无法实现测试数据的实时显示。

为了实现量化、全局、实时的 3D 显示系统光学特性检测,本文设计了一种基于光电二极管阵列的实时检测系统。该系统采用光电二极管阵列对空间光强分布进行检测,光探头的位置相对固定,因此进一步提高了位置的精确度,并且大大提升了测量效率。采样结果通过上位机 LabVIEW 程序进行数据处理,以波形图的方式实时显示。通过实验验证了该测试系统的可行性与可靠性,讨论并分析了选通信号的驱动延时特性。实验结果表明,该实时光学测量系统可广泛应用于 3D 显示系统的光学特性检测,可实现在线调试的功能,具有高精度、高效率、高可靠性、低成本等优点^[15-18]。

2 系统设计与实现

2.1 测试方案设计

由于裸眼 3D 显示特殊的光强分布特性,人们通常只能在特定的最佳观看距离观看 3D 影像。在最佳观看距离下,左右眼视区交替分布。实际测量串扰率时,采用黑白图像串扰率测试方案,即左右眼视区的其中一个为全白图像,另一个为全黑图像,此时测得串扰率最大,对改进裸眼 3D 显示具有重要的参考价值^[1]。图 1 所示为 3D 显示器播放“左白右黑”图像对时的视区分布,即白色带状区域为左眼视区,黑色带状区域为右眼视区。该视区分布是在最佳观看距离下拍摄的结果,每个视区宽度约为 10 cm。

为了测量屏幕上局部区域像素对应视区中的光强分布,传统的测量方法是采用亮度计在视区中平移旋转进行测量,如图 2(a)所示。这种测量方式工作量大,且难以对准屏幕上同一位置。图 2(b)为本研究提出的测量方案的实验配置,该方案可对 3D 显示系统视区中的照度、亮度以及串扰率等光学特性进行定量、实

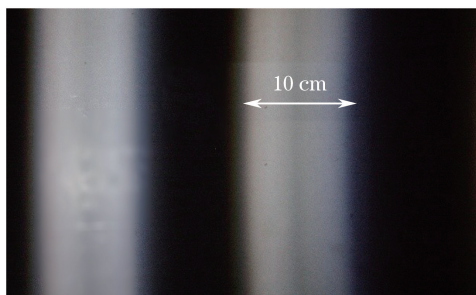


图 1 裸眼 3D 显示器视区分布
Fig. 1 Visual area distributions of autostereoscopic 3D display

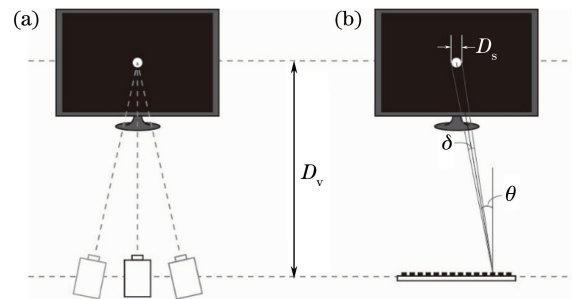


图 2 3D 显示光强分布测量装置。(a)亮度计测量方案;
(b)基于光探头阵列的测量方案
Fig. 2 Measurement apparatus of 3D displays light intensity distribution. (a) Measurement scheme of luminance meter;
(b) measurement scheme based on optical probe array

时的测试。

首先在屏幕上覆盖一张带小孔的不透光覆盖物,小孔直径 D_s 为

$$D_s = 2 \cdot D_v \cdot \tan \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

式中 D_v 为最佳观看距离; δ 取值为 1° ,表示人眼所能清晰成像的视角范围^[4]。

将光电二极管阵列放置于最佳观看距离下,依次读取每一个探头对光强响应产生的电压值 U ,单位为伏特 V ,根据以下公式计算对应的照度值^[3]:

$$E = -1.06 + 120.83U(V) - 34.08U^2(V) + 7.95U^3(V). \quad (2)$$

根据照度与亮度的物理定义进行照度与亮度的转换,由下式计算对应的光强值^[3,17]:

$$L = \frac{E \cdot r^2}{\Delta A_s \cdot \cos^2 \theta}, \quad (3)$$

式中 r 为探头到小孔中心的距离, ΔA_s 为小孔的面积, θ 为探头相对屏幕法线方向的偏角。

串扰表现为重影现象,是左右眼视差图像不完全分离的结果,可由以下公式计算^[1]:

$$C_L = \frac{I_{BW} - I_{BB}}{I_{WB} - I_{BB}}, \quad C_R = \frac{I_{WB} - I_{BB}}{I_{BW} - I_{BB}}, \quad (4)$$

式中 C_L 、 C_R 分别为左右眼视区的串扰率, I_{BW} 为播放“左黑右白”图像对时的照度, I_{WB} 为播放“左白右黑”图像对时的照度, I_{BB} 为播放“全黑”图像对时的照度。

2.2 硬件设计

基于 AVR 单片机(SCM)的光学实时测量系统的下位机控制结构主要包括以下模块:扫描驱动电路、电流/电压(I/V)转换电路、放大电路、模数(A/D)转换,如图 3 所示。

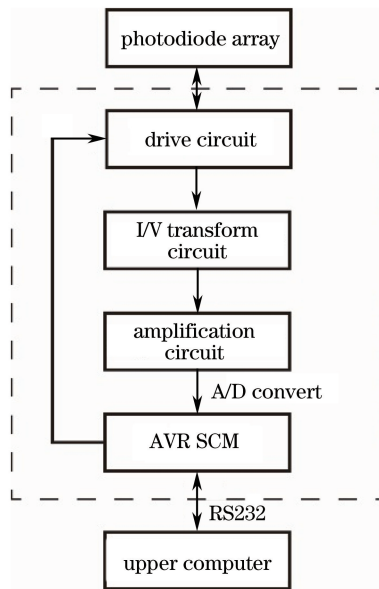


图 3 下位机控制结构系统框图

Fig. 3 Control structure system chart of the lower computer

系统使用 80 个 S11154 光电二极管组成一维的阵列,如图 4 所示,其光电二极管的光谱响应特性与人眼视见函数曲线接近,可以较好地反映人眼实际观看情况^[13]。相邻两个光电二极管间隔 3 mm,整个阵列单次可以测量 23.7 cm 空间范围内的光强分布,可覆盖连续两个视区范围。

扫描驱动电路设计的核心芯片为 CD4067^[16] 和 CD4051 芯片。CD4067 是一个 16 路的数字模拟开关芯片,CD4051 是一个 8 通道的数字模拟开关芯片,具有低导通阻抗、低截止漏电流的特性。图 5 为光电二极管阵列的扫描驱动电路设计框图。光电二极管在 5 V 反向电压下工作,反向驱动电压由 CD4051 的 COM IN 端输入,通过 A1~C1 选通 1~5 其中一个端口,使 5 V 驱动电压输入其中一个 CD4067 芯片的 COMMON

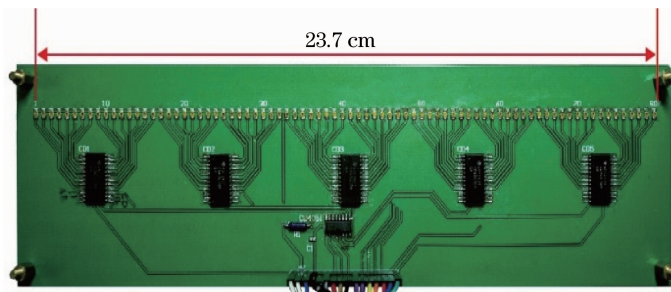


图 4 光电二极管阵列

Fig. 4 Photodiode array

端。本系统共使用 5 个 CD4067 芯片,每个芯片对应 16 个光电二极管,01~15 输出端分别接通一个光电二极管的负极,由 A2~D2 选通一个通道。INHIBIT 为 CD4067 的控制端,INHIBIT 置 1 时,所有通道关闭,因此对于未选通的 CD4067 芯片,该端口置 1。最后,光电二极管的响应电流经过电阻 R 转换为电压由 V_{out} 输出。

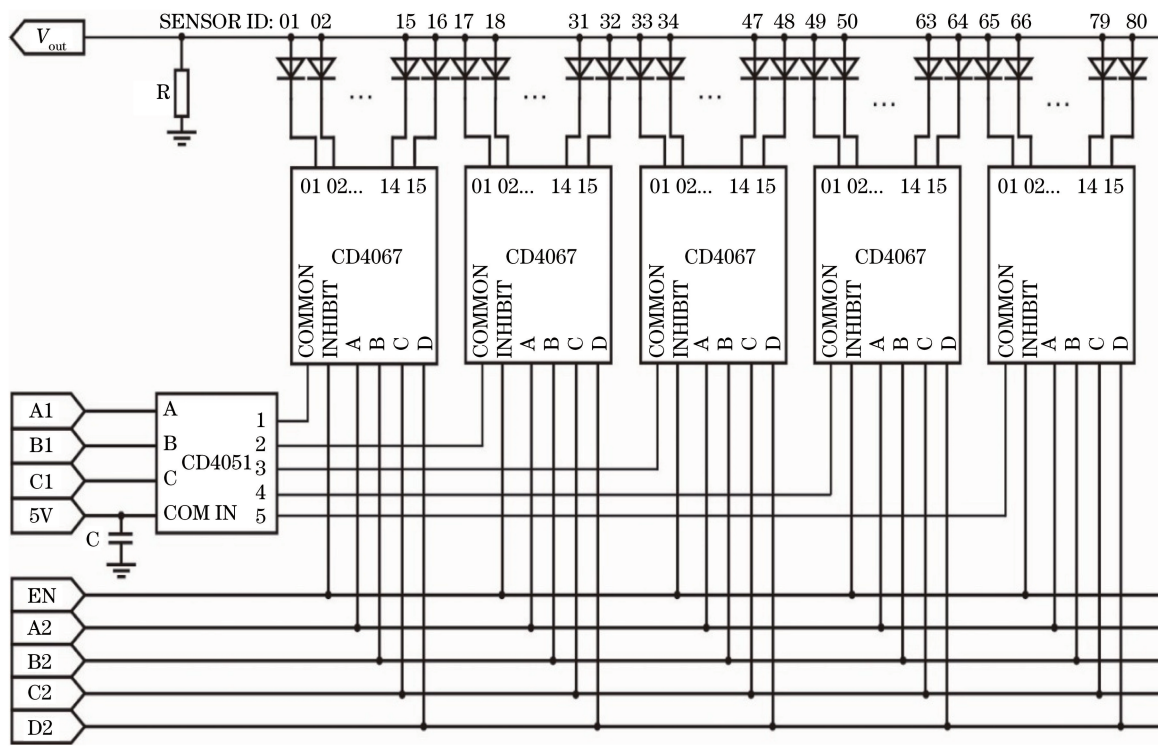


图 5 光电二极管阵列扫描驱动电路设计

Fig. 5 Scanning and driving circuit design of photodiode array

V_{out} 输出的电压值经过放大电路 120 倍放大和低通滤波后,将通过 AVR 单片机 ATmega16 内置的模数转换模块(ADC)进行采集。单通道 ADC 的分辨率为 10 bit,通过外部标准电压源芯片 REF02 将参考电压设置为 5 V,因此电压测量分辨率为 0.005 V,由于噪声的影响,系统不确定度为 0.01 V。光电二极管已经过“电压-照度”标定,不确定度为 $1.58 \text{ mlx}^{[1]}$ 。采样结果通过 RS232 串口协议传输至上位机。

2.3 软件设计

系统使用 LabVIEW 编写上位机软件,其功能包括:向下位机发送控制指令、接收下位机发送的串口数据、处理分析数据并显示。软件设计的流程图如图 6 所示。首先,程序调用虚拟仪器软件结构(VISA)完成串口配置的初始化^[13]。接着通过串口向下位机发送初始化命令重置参数。经过一段延时后,再向下位机发送选通移位命令,此时选通了编号(ID)为 01 的光电二极管。经过一段延时后,接收下位机发送的串口数据,此数据为字符串的形式,接着将字符串转换为有效的数值化物理量,并显示在波形图中。

此时若停止按钮未被按下,系统继续进行测量,执行发送选通移位命令步骤,直至当前选通的为最后一

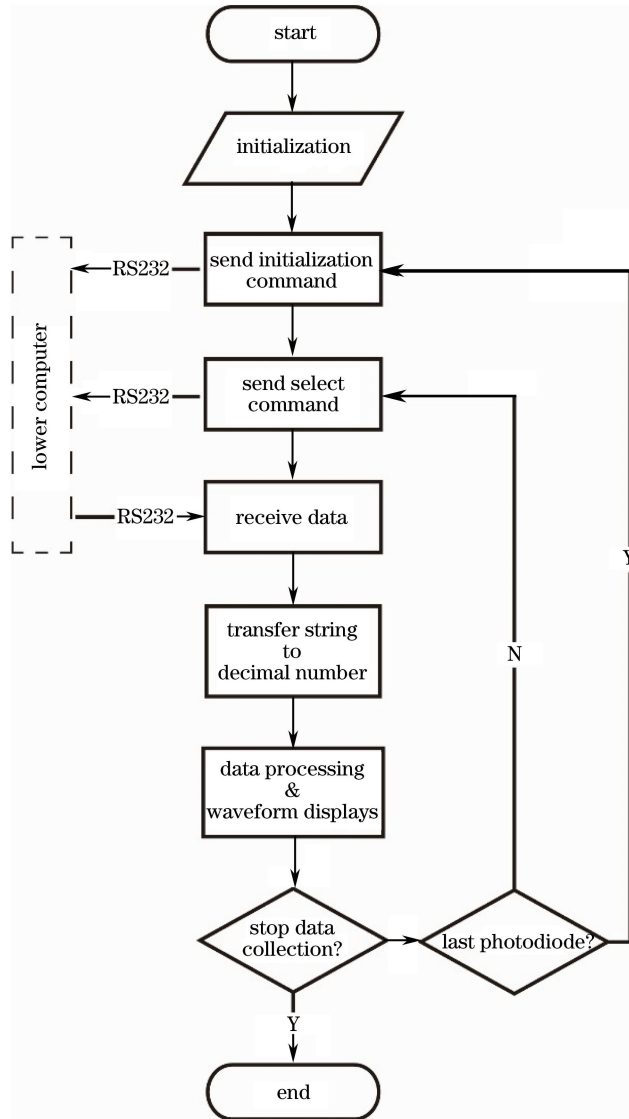


图6 软件设计流程图

Fig. 6 Flow chart of software design

个光电二极管(ID:80)时,重新发送初始化命令,进入新一轮采集。软件操作界面如图7所示,波形图中所示为亮度分布曲线。

在对软件进行初始化设置时,可选择的显示数据类型有三种:电压值 U ,照度值 E ,亮度值 L 。根据(1)~(3)式可以通过电压值计算对应的照度和亮度值。

3 实验与结果分析

3.1 实时性分析

当扫描驱动信号状态发生改变,选通某一路光电二极管时,响应信号会存在一定的延时。为了测定响应延时,选定光电二极管阵列中的其中一个探头,设置为每隔 10 s 改变一次选通状态(选通/非选通)观察原始信号及放大后信号的变化情况,测量电路的响应时间,如图8所示。当选通某一通道的光探头后,响应信号有过冲现象,经过 332 ms 后稳定。此延时主要来源于数字模拟开关芯片 CD4067,切换通道时,CD4067 引脚输出电压需经过一段延时才能达到稳定的电压值。因此,测量系统实际使用中,每两次采集数据的时间间隔必须大于 332 ms 才能采集到正确的数据。

实际测试中,采用的选通移位延时为 1.6 s,完成一轮 80 个光电二极管的扫描(即 23.7 cm 空间范围内的

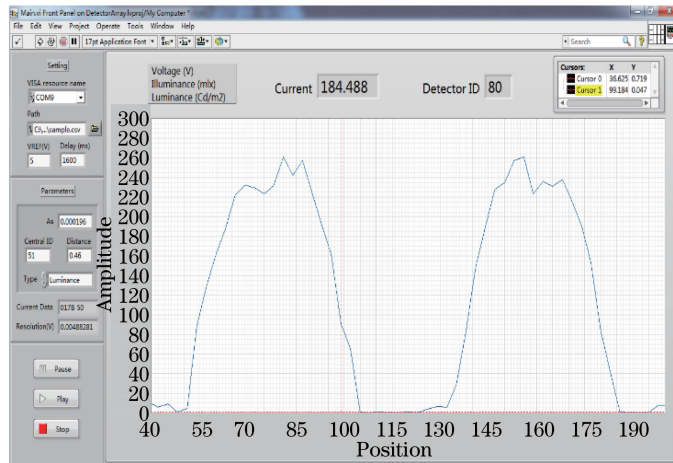


图 7 上位机软件操作界面

Fig. 7 Software operation interface of the upper computer

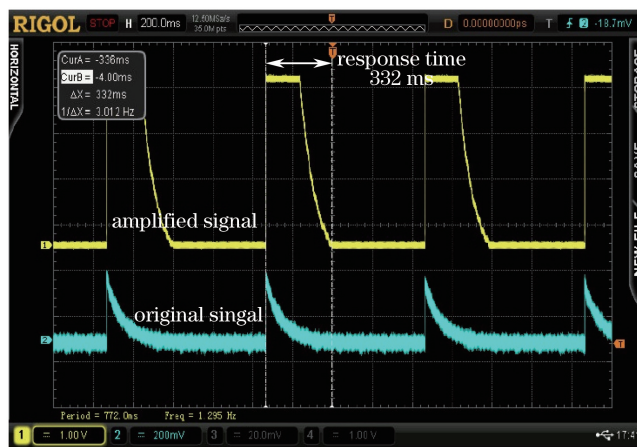


图 8 光电二极管响应时间测试

Fig. 8 Response time test of the photodiode

测量)所需时间为 128 s,并实时在软件界面显示数据波形图,速度明显优于传统的测量方案,可以满足实际使用中的要求。

为了进一步提高测量速度,可以选用通道切换延时更小的数字模拟开关芯片。

3.2 裸眼 3D 显示器视区串扰率分布测试

本研究将上述测量系统应用于一种裸眼 3D 显示产品视区中光强分布的测量。被测对象为 F 品牌的 3D 数码相框,该产品是一种基于视差屏障光栅技术的裸眼 3D 显示器。

实验配置如图 2(b)所示,测试距离为最佳观看距离 $D_v = 65$ cm,该距离下张角 $\theta = 1^\circ$ 所对应的圆孔直径 D_s 约为 11.3 mm,通过在屏幕上覆盖一个带孔的黑色不透光卡纸,测试该区域内屏幕像素所对应的视区光强分布。正对小孔的光电二极管为第 40 个(ID:40)。在播放“左白右黑”视差图像对时,对图 1 所示的视区测量左眼视区中的光强分布,测试在暗室中进行。

为了提高测量精度,对于同一光场情况下,可进行多次测量,并对每一测量位置所得的采样数据进行滤波处理。图 9 为对视区光强分布连续进行 4 次测量的结果,横坐标为光电二极管阵列相对位置,纵坐标为电压值。其中, left(1)~ left(4)分别为连续 4 次测量得到的曲线, averaged 为 4 次测量结果的平均值。测试结果的平均不确定度为 0.022 V,对应的照度不确定度为 1.58 mlx。

由(1)~(3)式可计算各位置对应的亮度,图 10 为分别对应播放“左白右黑”(left)、“左黑右白”(right)和“全黑”(BG)视差图像对时视区中的亮度分布。从亮度分布情况可以发现,“左白右黑”和“左黑右白”视差图像的亮区与暗区恰好互补,符合被测显示器的显示情况^[1]。

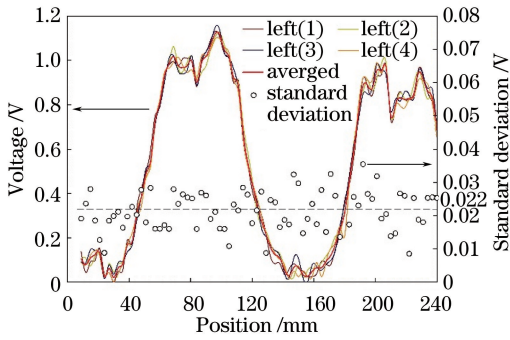


图 9 测试结果与误差分析

Fig. 9 Test result and error analysis

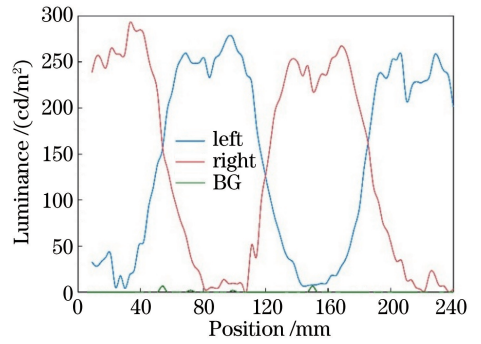


图 10 视区亮度分布

Fig. 10 Luminance distributions of visual area

根据(4)式可计算对应的串扰率分布,如图 11 所示。该裸眼 3D 显示器在视区“甜点”范围内的串扰率均低于 5%,观看者可以得到较好的观影效果。

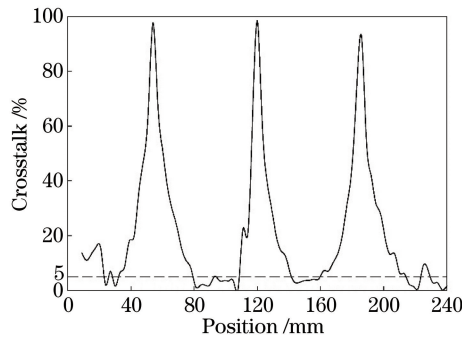


图 11 串扰率分布曲线

Fig. 11 Crosstalk ratio distribution

4 结 论

基于光电二极管阵列设计了一个用于 3D 显示系统视区光强分布检测的实时测量系统,系统包括上位机和下位机两个部分,下位机采用 AVR 单片机作为核心控制模块,使用数字模拟选通开关芯片,扫描驱动光电二极管阵列,并将相应电流转换为电压并放大 120 倍后通过单片机的 ADC 进行采集,最后经过上位机的 LabVIEW 程序处理数据并实时显示在波形图中。实验表明,该系统的电压测量不确定度为 0.022 V,对应的照度测量不确定度为 1.58 mlx,有效测量空间范围为 23.7 cm,响应延时为 332 ms,可满足 3D 显示系统视区光强分布的检测需求。

本系统可广泛应用于各种 3D 显示系统的光学特性的实时检测,能有效提高装机效率,有利于系统的优化设计。此外,本系统也可应用于多种光学系统的弱光条件(低于 450 mlx)下照度和亮度分布检测。

参 考 文 献

- [1] Woods A J. Crosstalk in stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, 21(4): p. 040902.
- [2] Xia Zhenping, Li Xiaohua, Cui Yuan, *et al.* Crosstalk analysis and cancellation method study in stereoscopic displays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1012002.
夏振平, 李晓华, 崔 渊, 等. 眼镜式立体显示中的串扰分析及消除方法研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1012002.
- [3] Wang Xiaolu, Fan Hang, Ma Hongqin, *et al.* Quantitative evaluation for luminance uniformity in 3D displays [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(15): 5792-5799.
- [4] Fan Hang, Wang Xiaolu, Liang Shaosen, *et al.* Quantitative measurement of global crosstalk for 3D display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(5): 323-329.

- [5] Xie Zexiao, Lu Wenjuan, Wang Xiaomin, *et al.* Analysis of pose selection on binocular stereo calibration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0208003.
解则晓, 陆文娟, 王晓敏, 等. 双目立体标定的姿态选择分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0208003.
- [6] Cui Hongxia, Wang Hongyan, Liu Jiaqi, *et al.* Calibration and quantitative evaluation for a low-cost stereo-camera system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(2): 021503.
崔红霞, 王鸿雁, 刘佳琪, 等. 一种低成本立体摄像机系统的标定和定量评价[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 021503.
- [7] Xie Yutong, Su Xiaohuang, Zheng Jiwen, *et al.* Key properties of autostereoscopic display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(5): 888-893.
谢雨桐, 苏晓煌, 郑集文, 等. 裸眼 3D 显示设备关键指标测试方案的研究[J]. 液晶与显示, 2015, 30(5): 888-893.
- [8] Wang Jiahui, Deng Yutao, Li Yining, *et al.* Measurement and evaluation of comprehensive performance in 3D Display with glasses[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2014, 29(6): 1071-1076.
王嘉辉, 邓玉桃, 黎奕宁, 等. 眼镜式 3D 显示设备综合性能测试方案的研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(6): 1071-1076.
- [9] Wang Jiahui, Deng Yutao, Su Jianbang, *et al.* Evaluation and measurement of display effect in full high resolution autostereoscopic display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(5): 805-809.
王嘉辉, 邓玉桃, 苏剑邦, 等. 全高清裸眼 3D 显示效果的评价与测量[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 805-809.
- [10] Marja S, Toni J. Objective evaluation of multi-view autostereoscopic 3D displays [C]. Sid Symposium Digest of Technical Papers, 2008: 267-270.
- [11] Yoshihara Y, Ujike H, Tanabe T. 3D crosstalk of stereoscopic display using patterned retarder and corresponding glasses[C]. IDW, 2008: 1135-1138.
- [12] Marja S, Toni J. Optical characterization and measurements of autostereoscopic 3D displays[C]. SPIE, 2008, 7001: 700102.
- [13] Hong H K. Reduction of spatially non-uniform 3D crosstalk for stereoscopic display using shutter glasses[J]. Displays, 2012, 33(3): 136-141.
- [14] Zhang Liepiao. Study on controlling stepper motor with high accuracy that based on MCU [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
章烈剽. 基于单片机的高精度步进电机控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [15] Luo Qiang, Liu Wenhan, Zhang Qingyi. Application of photodiode array detector in analytical instrument[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2001, 29(4): 374-377.
罗强, 刘文涵, 张清义. 光电二极管阵列检测器在分析仪器中的应用[J]. 浙江工业大学学报, 2001, 29(4): 374-377.
- [16] Bu Dengli. Application of analog multiplexers CD4067 in LED Lattice's panel[J]. Microelectronics & Computer, 2006, 23(8): 53-54.
卜登立. 多路模拟开关 CD4067 在 LED 点阵显示屏中的应用[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(8): 53-54.
- [17] Lü Xiangfeng, Gao Honglin, Ma Liang, *et al.* Serial communication based on LabVIEW [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2009, 28(12): 27-42.
吕向锋, 高洪林, 马亮, 等. 基于 LabVIEW 串口通信的研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(12): 27-42.
- [18] Fiorentin P, Scroccaro A. Detector-based calibration for illuminance and luminance meters-experimental results [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(5): 1375-1381.