

眼镜式立体显示中的串扰分析及消除方法研究

夏振平 李晓华 崔 渊 陈 磊

(东南大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 随着立体显示技术的广泛应用, 立体显示图像质量受到了越来越多的重视。目前, 串扰现象是影响立体显示技术中图像质量和观看舒适度最主要的因素之一。为消除眼镜式立体显示技术中的串扰现象, 提出了一种基于图像处理的串扰消除方法。该方法从观看者的角度出发, 将观看通道与非观看通道具有相同灰度时透过观看通道眼镜测得的亮度定义为理想输出亮度, 利用亮度计测量得到的眼镜式立体显示器的光输出特性, 经过计算得到左右视图灰度查找表, 应用左右视图灰度查找表在显示立体图像时消除串扰。分析结果表明, 提出的方法平均串扰减少率的理论值高达 75%。同时, 提出的方法合理利用了非观看通道的漏光等串扰信号, 将立体图像亮度提高了 12%。提出的方法应用简单, 同时适用于时间复用和空间复用的眼镜式立体显示技术。

关键词 测量; 串扰测量; 串扰消除; 立体显示; 液晶显示

中图分类号 TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1012002

Crosstalk Analysis and Cancellation Method Study in Stereoscopic Displays

Xia Zhenping Li Xiaohua Cui Yuan Chen Lei

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University,
Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract With the increasing application of stereoscopic displays, the performance of stereoscopic displays attracts more and more attention. Crosstalk is one of the main perceptual factors influence image quality and visual comfort. To eliminate the crosstalk of liquid crystal based stereoscopic displays, based on a novel image processing crosstalk cancellation method is proposed. The proposed method reduces crosstalk from the aspect of the observer, and the light measured when the non-observed channel has the same gray level as the observed channel is defined as the ideal light output of the channel under test. The light output characteristic of specific stereoscopic display is measured using time average luminance meter and look up table is derived for crosstalk reduction. The theoretical calculation results show that the proposed method reduces crosstalk by 75% in average. Besides, the proposed method makes full use of the light leaked from the other eye view, which improves the luminance by about 12% according to the experiment. The proposed method can be applied both on time-multiplexed and on spatial-multiplexed stereoscopic display technologies and is easily implemented.

Key words measurement; crosstalk measurement; crosstalk cancellation; stereoscopic; liquid crystal display

OCIS codes 120.1880; 110.3000; 110.4280; 120.2040

1 引 言

如今, 大量的立体电视、立体显示器涌入消费市场, 并且由于其价格日趋下降, 正被越来越多的消费

者所接受, 有关立体显示的研究也越来越广泛和深入^[1~4]。

目前立体显示主要是通过给人的双眼分别提供

收稿日期: 2012-04-11; **收到修改稿日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327705)和国家 863 计划(2012AA03A302)资助课题。

作者简介: 夏振平(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事立体显示图像质量测量、评价和优化等方面的研究。

E-mail: xzp@seu.edu.cn

导师简介: 李晓华(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事平板显示器测量、评价和标准制定等方面的研究。

E-mail: lxh@seu.edu.cn(通信联系人)

具有左右视差的图像,让观看者感受到立体深度。立体显示中所用的左右视图分别从人的双眼位置拍摄得到。左右视图应该分别投射到观看者的左右眼,然而由于种种原因,具有视差的左右视图并不能被完全分离,观看者左、右眼会分别看到本不该看到的另一只眼的图像,即产生所谓的“鬼影”。Seigel^[5]将“鬼影”解释为由串扰产生的特别的图像感知模式,其中串扰是指左右眼视图的电或光信号的混合。Meesters等^[6]的研究表明,串扰现象是影响立体显示图像质量和视觉舒适度的主要视觉因素之一。

为提高立体显示的图像质量,针对串扰现象提出了各种减小和消除串扰的方法^[7~12]。传统的串扰消除方法包括选择快速响应的液晶材料^[8]、提高帧频和应用背光调制技术等^[9]。然而这些方法在减少串扰的同时增加了成本或者带来了其他问题,例如闪烁感和亮度的降低。最近,提出的一些基于图像处理的串扰消除方法,避免了上述传统方法引起的问题。Chang等^[10]通过从观看通道减去非观看通道漏光的方法消除串扰,但是他们忽略了双眼通道的相互作用,导致串扰消除效果不理想。这种相减法只能运用于漏光产生串扰的立体显示技术中,而且这会降低立体图像的亮度。Jung等^[11]提出了一种过驱动的方法来消除主动偏光式立体显示技术中的串扰,但文中并未提及如何确定过驱动灰度的方法。Iwanaka等^[12]在主动快门式立体显示的串扰消除中,从显示器的输出亮度响应出发,定义了理想的输出亮度响应,通过改变输入灰度调节输出亮度响应,使实际输出亮度与理想输出亮度相同或接近,从而达到消除串扰的目的。然而,这种方法没有考虑到快门眼镜的作用,串扰消除效果不理想。未被考虑的眼镜不同步、关闭不完全等因素都是造成串扰的重要原因。

通过测量分析了眼镜式立体显示中串扰产生的主要原因,提出了一种新的基于图像处理的串扰消除方法。该方法从观看者的角度出发,包含了所有可能产生串扰的因素。本文主要以时间复用的主动快门式立体显示技术和空间复用的偏光式立体显示技术为讨论对象,但结果也适用于其他不同的眼镜式立体显示技术。

2 串扰源测量分析

眼镜式立体显示技术主要可以分为三类:时间复用式、空间复用式和波长复用式^[13]。目前市场上立体显示器以时间复用的主动快门式立体显示和空

间复用的偏光式立体显示为主,故以这两种眼镜式立体显示技术为研究对象。图1为眼镜式立体显示串扰的原理框图,其中串扰定义为 $\alpha_1 L_1 / (\beta_1 L_r)$ ^[14]。对于空间复用的偏光式立体显示技术,左右视图液晶的响应是相互独立的。而时间复用的主动快门式立体显示的左右视图采用同一位置的液晶显示,由于液晶的慢响应,左右视图的相互作用可能引起串扰,下面通过测量和分析研究时间复用的主动快门式立体显示中串扰产生的原因。

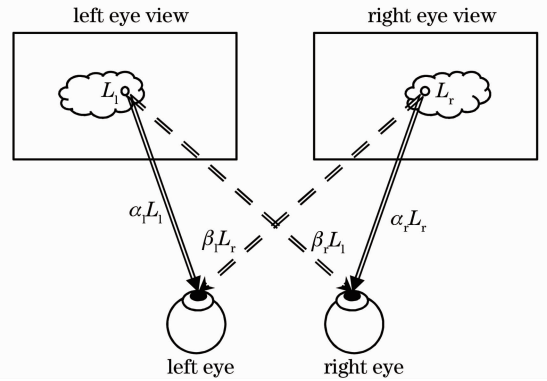


图1 眼镜式立体显示串扰原理框图

Fig.1 Block diagram of crosstalk principle for stereoscopic displays

2.1 光学测量

为研究时间复用的主动快门式立体显示的串扰来源,同时测量了显示器直接输出以及通过快门眼镜测量的瞬态亮度响应。图2为瞬态亮度响应测量设置示意图。瞬态亮度响应通过基于符合人眼明视觉特性曲线的光电二极管和高模/数(A/D)采样率的亮度测量系统测量,当测量透过快门眼镜的瞬态亮度响应时,测量探头正对左或右眼镜片的中心位置,同时,测量探头、快门眼镜和显示器尽可能贴近放置[图2(a)];当测量显示器直接输出的瞬态亮度响应时,从图2(a)中取走眼镜,测量探头的位置不变[图2(b)]。实验测量了左右通道在左右视图各9个灰度所有组合的瞬态亮度响应,所有测量均在暗室中进行。

2.2 串扰源分析

图3为主动快门式立体显示瞬态亮度测量结果的例子。图3中,当测量左眼通道时,左眼视图的灰度为255,右眼视图的灰度为0。与此相对应,当测量右眼通道时,右眼视图的灰度为255,左眼视图的灰度为0。瞬态亮度响应分别从显示器上直接测量和透过快门眼镜测量。

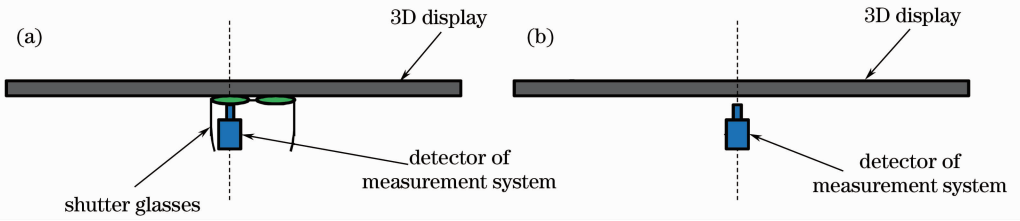


图 2 瞬态亮度响应测量设置俯视图。(a)透过快门眼镜测量；(b)显示器直接输出测量

Fig. 2 Top view of temporal luminance response measurement setup. (a) Luminance measurement through shutter glasses; (b) direct display luminance measurement

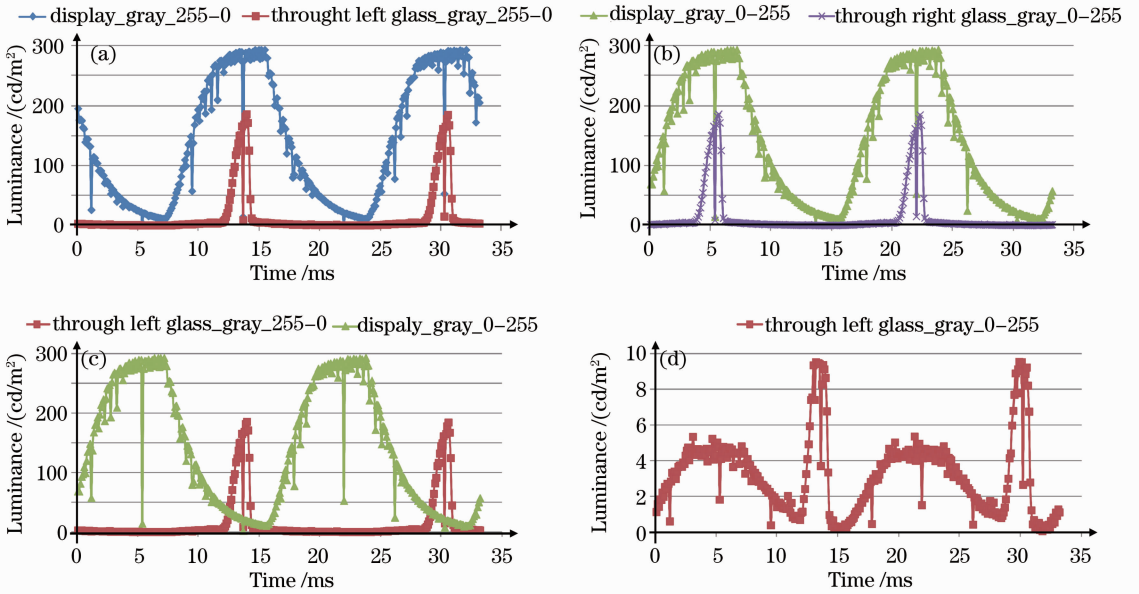


图 3 瞬态亮度响应测量结果示例。(a)左眼视图从显示器上直接测量和透过眼镜测量；(b)右眼视图从显示器上直接测量和透过眼镜测量；(c)串扰源说明；(d)串扰源信号

Fig. 3 Measurement result example of luminance response curve. (a) Left eye views from display and through shutter glasses; (b) right eye views from display and through shutter glasses; (c) illustration of crosstalk source; (d) crosstalk source signal

从图 3 的测量结果可以看出，主动快门式立体显示的串扰源主要分为两个部分：1) 快门眼镜关闭不完全，在快门眼镜关闭时造成的漏光；2) 显示器液晶的慢响应使显示器亮度不能达到理想值，在快门眼镜开启时造成的透光。图 4 列出了左视图灰度为 0，右视图灰度为不同值时从左通道测量的瞬态亮度响应。其中图 4(a)和图 4(b)分别为右眼视图和左眼视图直接从显示器上测量的瞬态亮度响应，图 4(c)和图 4(d)分别为右眼视图和左眼视图透过左快门眼镜测量的瞬态亮度响应。图 4(c)为快门眼镜关闭不完全导致的漏光，图 4(d)为液晶慢响应导致的左右视图之间的相互作用产生的透光，可以看出这两种串扰源信号的比例相当，在快门式立体显示串扰源的分析中具有同等重要的作用。

通过基于高响应亮度测量系统测量的瞬态亮度

响应结果及以上的说明分析，基于液晶显示的快门式立体显示的串扰源可以总结为两类：1) 快门眼镜漏光造成的串扰，2) 显示器左右视图输出的相互作用造成的串扰。

3 串扰消除方法

在先前的串扰消除方法研究中，研究重点集中在显示器上，针对不同立体显示技术的特点分别使用不同的串扰消除方法^[10,12]。除此之外，先前的研究在将造成串扰的漏光等去除的同时，降低了立体图像的亮度^[10]。本文提出的串扰消除方法从观看者的角度出发，涵盖了所有可能造成串扰的因素，适用于各种眼镜式立体显示技术。同时合理利用了串扰源信号，提高了立体图像的亮度。

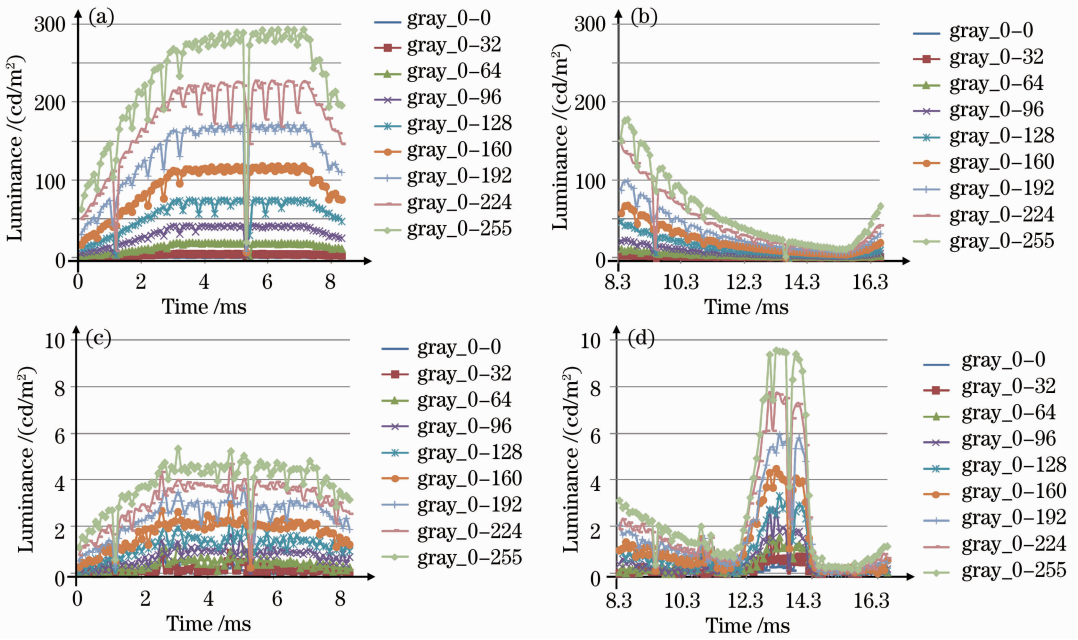


图 4 漏光和左右视图相互作用的瞬态亮度响应示例。(a)从显示器测量的右眼视图；(b)从显示器测量的左眼视图；(c)透过眼镜测量的右眼视图；(d)透过眼镜测量的左眼视图

Fig. 4 Luminance curves example of light leakage and temporal luminance response with interaction between left and right eye views. (a) Right eye view directly from display; (b) left eye view directly from display; (c) right eye view through left shutter glass; (d) left eye view through left shutter glass

3.1 理想无串扰亮度

从观看者的角度分析,串扰现象的产生是由实际看到的光亮度和设定的光亮度不同所造成的。所以,串扰消除方法的第一步是选择和定义理想的观看亮度,对于每一个灰度都有对应的理想观看亮度值。在灰度间(G-to-G)的串扰定义和评价方法研究中,三组研究人员^[11,15,16]分别提出了三种不同的定义,尽管现在还没有一个公认的灰度间的串扰定义^[17],但是在这三个不同的定义中,同时将左右视图灰度相同时串扰定义为零,即理想情况。实际情况也是如此,可以假设,如图 5 中背景显示左眼视图,中间显示右眼视图,当显示的左右眼图像具有相同的灰度时,是感觉不到串扰的。基于此在串扰消除方法中也可使用左右视图灰度相同时测量到的亮度来定义理想观看亮度。提出的人眼理想观看亮度是当左右眼视图灰度相同时,从观看通道和非观看通道透光的亮度总和。

对于时间复用的快门式立体显示和空间复用的偏光式立体显示分别定义了各个灰度的理想观看亮度。图 6 为两种立体显示器的亮度输出示意图。在快门式立体显示中,由于显示器液晶的慢响应作用,左右眼视图会互相作用,显示器的实际亮度输出与

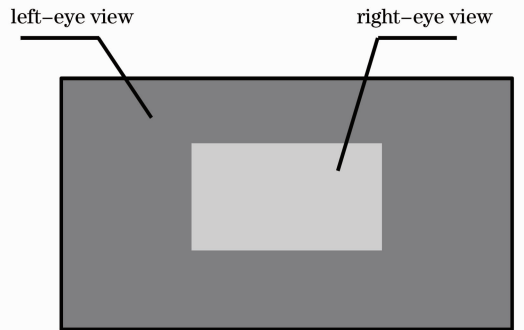


图 5 眼镜式立体显示中观看到的串扰

Fig. 5 Observed crosstalk in stereoscopic display

理想响应下的理想亮度输出有很大差别[图 6(a)],其中 $S_{ideal}^{L(i)}$ 和 $S_{ideal}^{R(j)}$ 分别为显示器左右视图的理想亮度输出。只有当左右视图灰度相同时,左右视图液晶响应的相互作用才会消失,实际的亮度输出与理想亮度输出相同[图 6(a)和(b)]。对于空间复用的偏光式立体显示,显示器输出的左右视图亮度响应不会相互干扰,图 6(d)定义了当左右视图灰度分别为 i 和 j 时左右视图的亮度输出 $P^{L(i)}$ 和 $P^{R(j)}$ 。图 7 从观看者的角度出发,合理利用了非观看通道漏光等串扰源来定义人眼的理想观看亮度。其中 α 和 β 是眼镜的透射率。

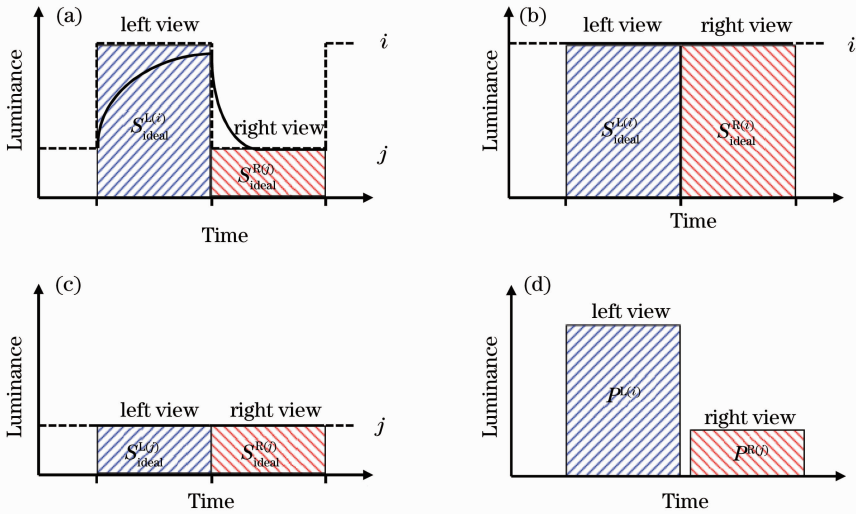


图 6 立体显示器亮度输出示意图。(a)快门式立体显示器亮度输出,左右视图灰度分别 i 和 j ; (b)快门式立体显示器亮度输出,左右视图灰度分别 i 和 i ; (c)快门式立体显示器亮度输出,左右视图灰度分别 j 和 j ; (d)偏光式立体显示器亮度输出,左右视图灰度分别 i 和 j

Fig. 6 Luminance output of 3D displays. (a) Luminance output of shutter type 3D display with left and right eye views gray levels i, j ; (b) luminance output of shutter type 3D display with left and right eye views gray levels i, i ; (c) luminance output of shutter type 3D display with left and right eye views gray levels j, j ; (d) luminance output of polarizer type 3D display with left and right eye views gray levels i, j

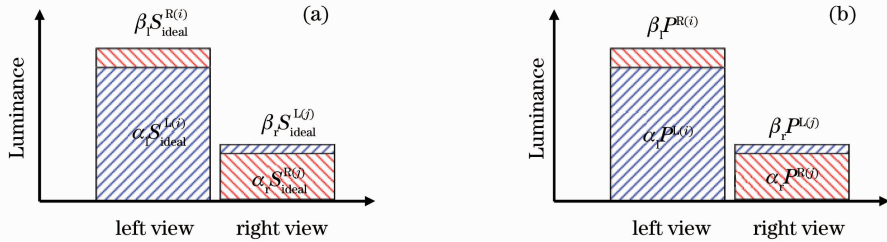


图 7 人眼理想观看亮度定义。(a)快门式立体显示技术; (b)偏光式立体显示技术

Fig. 7 Definition of ideal luminance perceived by human eyes. (a) Shutter type stereoscopic display technology; (b) polarizer type stereoscopic display technology

显示器的伽玛(γ)特性是指对应输入信号变化时显示器的光输出变化特性。由于

$$L^{L(i)} = \alpha_1 L^{L(255)} \left(\frac{i}{255}\right)^\gamma + \beta_1 L^{R(255)} \left(\frac{i}{255}\right)^\gamma = [\alpha_1 L^{L(255)} + \beta_1 L^{R(255)}] \left(\frac{i}{255}\right)^\gamma, \quad (1)$$

提出的人眼理想观看亮度定义保持了显示器原有的伽玛特性,增强了立体图像的亮度。(1)式中的透射率 α 和 β 在左右视图灰度相同时保持不变。

3.2 方法实施过程

根据以上人眼理想观看亮度的定义来进行串扰消除,首先利用亮度计测量立体显示器透过眼镜的亮度特性。显示器的输入信号为左右视图灰度组合,立体显示器的红、绿、蓝三色,以及左右通道分别测量,最终每种颜色的每个通道分别得到一个 256×256 亮度矩阵(8 bit 显示器)。当左右视图灰度相同

时,透过眼镜测量得到的亮度为人眼的理想观看亮度。图 8 为提出的串扰消除方法实施流程图,其中最重要的一个步骤是根据测量得到的立体显示器透过眼镜的亮度特性计算得到左右视图灰度查找表。当某一像素左右眼视图的输入灰度分别为 i 和 j 时,通过左右眼通道测量得到的实际亮度分别为 $L^{L(i,j)}$ 和 $L^{R(i,j)}$,而左右眼通道的理想观看亮度分别为 $L^{L(i,i)}$ 和 $L^{R(j,j)}$ 。现定义矫正后的左右眼视图的输入灰度分别为 k 和 l ,则矫正后的左右眼通道亮度分别为 $L^{L(k,l)}$ 和 $L^{R(k,l)}$ 。矫正后的左右眼视图的输入灰度

k 和 l 由(2)式来决定:

$$D_{\text{dif}} = \left| \frac{L_{\text{cali}}^L - L_{\text{ideal}}^L}{L_{\text{real}}^L - L_{\text{ideal}}^L} \right| + \left| \frac{L_{\text{cali}}^R - L_{\text{ideal}}^R}{L_{\text{real}}^R - L_{\text{ideal}}^R} \right| = \left| \frac{L^{L(k,l)} - L^{L(i,i)}}{L^{L(i,j)} - L^{L(i,i)}} \right| + \left| \frac{L^{R(k,l)} - L^{R(j,j)}}{L^{R(i,j)} - L^{R(j,j)}} \right|. \quad (2)$$

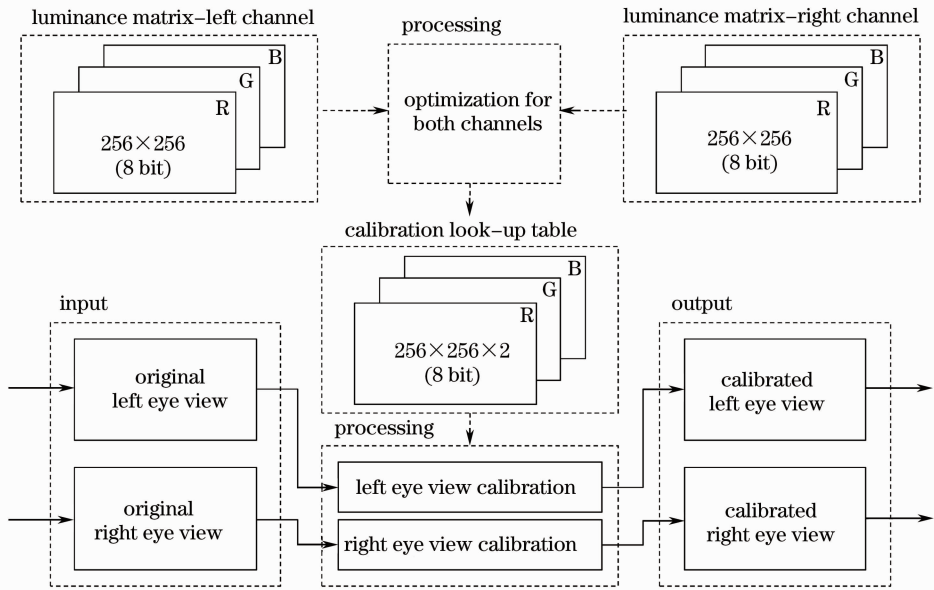


图 8 串扰消除方法实施流程图

Fig. 8 Implementation flow chart of proposed crosstalk cancellation method

(2)式定义了矫正亮度与理想亮度差和实际亮度与理想亮度差之间的比值,比值越小说明串扰的消除效果越好。由于左右视图亮度之间的互相制约作用,定义左右通道比值和最小时所对应的左右眼视图的输入灰度 k 和 l 为最佳值,这样能使立体显示的整体串扰效果最小。

根据以上矫正灰度的确定方法,计算出红、绿、蓝三色下所有灰度组合的矫正灰度,对每一颜色可以得到一个 $256 \times 256 \times 2$ 的矩阵,这就是串扰矫正查找表,所有输入的原始左右视图都可以根据查找表得到矫正后的左右视图输入信号。

3.3 串扰消除效果

依照以上串扰消除方法实施流程对立体显示器

进行串扰消除。将归一化后的原始串扰和应用消除方法后的串扰进行了比较(图 9)。串扰定义为实际亮度与理想亮度差的绝对值。原始串扰大小 T_{ori} 是原始输出亮度 L_{real} 与理想亮度 L_{ideal} 之差的绝对值,即

$$T_{\text{ori}} = |L_{\text{real}} - L_{\text{ideal}}|, \quad (3)$$

矫正后的串扰大小 T_{cali} 是矫正后的输出亮度 L_{cali} 与理想亮度 L_{ideal} 之差的绝对值,即

$$T_{\text{cali}} = |L_{\text{cali}} - L_{\text{ideal}}|, \quad (4)$$

图 9 中考虑了所有的左右视图灰度组合,从原始串扰[图 9(a)]和矫正后的串扰[图 9(b)]比较当中可以发现,中间灰度组合的串扰在矫正后几乎完全消除,只有极高灰度和极低灰度部分由于无法进行调整使串扰无法消除。经过理论计算,使用本文提出

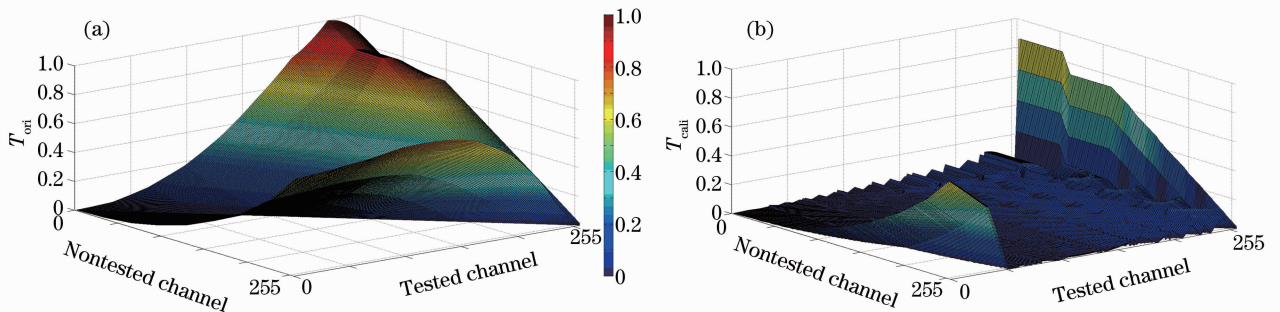


图 9 归一化后的串扰大小。(a)原始串扰;(b)矫正后的串扰

Fig. 9 Normalized amount of crosstalk T . (a) T_{ori} ; (b) T_{cali}

串扰消除方法时,所有灰度组合的平均串扰消除率高达 75%。中间灰度组合的理论串扰消除率为 100%,但由于灰度及其对应亮度是离散数据的原因,只有部分灰度组合串扰消除率为 100%,其他中间灰度组合略低于 100%。例如,左右眼视图灰度组合为 64 和 192 时,串扰消除率为 98%。在先前的研究中^[12],利用基于显示器的串扰消除方法的串扰平均消除率为 70%,左右眼视图灰度组合为 64 和 192 时,串扰消除率为 94%。因此利用本文提出

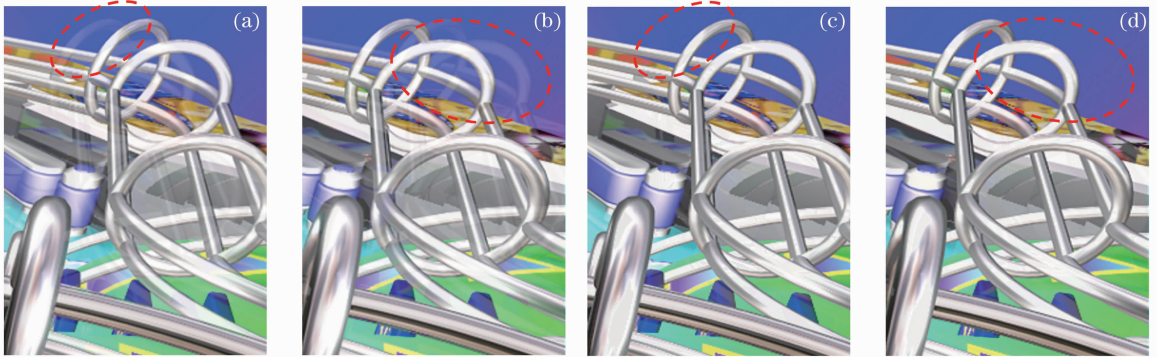


图 10 观看到的立体图像左右视图。(a)原始左视图; (b)原始右视图; (c)应用串扰消除方法后的左视图; (d)应用串扰消除方法后的右视图

Fig. 10 Stereo image of both eye views. (a) Original left image; (b) original right image; (c) calibrated left image; (d) calibrated right image

以上的讨论、计算和实验都基于静态图像。在动态视频图像中,由于液晶的慢响应,显示器当前图像的亮度输出特性可能受到先前几帧图像内容的影响。因此,动态视频图像的串扰消除过程中,串扰左右视图灰度查找表不仅仅依赖于当前左右视图的灰度组合,还应该考虑先前几帧图像内容。虽然讨论重点放在了目前广泛应用的眼镜式立体显示技术上,但是提出的基于图像处理的串扰消除方法同样可以经过修正后应用于自由立体显示技术^[18~21]中。这些内容将在下阶段研究中涉及。

4 结 论

利用高采样率的瞬态亮度响应测量系统测量和分析了时间复用的主动快门式立体显示技术的串扰来源。基于液晶显示的快门式立体显示的串扰源主要有快门眼镜漏光造成的串扰和显示器左右视图输出的相互作用造成的串扰。为了消除不同立体显示技术所有可能的串扰因素,从观看者的角度出发,提出了一种基于图像处理的串扰消除新方法。该方法将非观看通道与观看通道具有相同灰度时透过观看通道眼镜测得的亮度定义为理想输出亮度,利用亮

的串扰消除方法考虑了所有可能产生串扰的因素,可以达到更高的串扰消除率。另外,本文提出的方法合理利用了非观看通道的漏光等串扰源信号,根据计算,立体图像的平均亮度可以提高 12%。

图 10 为自然立体图像的串扰消除效果比较,左右眼看到的亮度经过转换归化到二维图像上,原始立体图像的左右眼视图都可以看到明显的串扰[图 10(a)和(b)],经过图像处理消除串扰后的立体图像左右眼视图无明显串扰[图 10(c)和(d)]。

度计测量得到的眼镜式立体显示器的光输出特性,并经过计算得到左右视图灰度查找表,应用左右视图灰度查找表在显示立体图像时消除串扰。分析结果表明,提出的方法理论串扰消除率平均可达 75%。同时,由于提出的方法合理利用了非观看通道的漏光等串扰源信号,立体图像亮度提高了 12%。这种方法简单易行,同时适用于时间复用和空间复用的眼镜式立体显示技术。

参 考 文 献

- Huang Tao, Zhu Quidong, Hao Qun *et al.*. Study on distortion elimination in stereoscopic display systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 405~410
黄涛,朱秋东,郝群等. 立体显示系统的消畸变研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 405~410
- Yao Zhenning, Li Haifeng, Liu Di *et al.*. An analysis of omnidirectional 3D display system based on scanning LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1233003
姚振宁,李海峰,柳迪等. 基于LED扫描的全景三维显示系统研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1233003
- Zheng Huadong, Dai Linmao, Yu Yingjie *et al.*. Optimum design of lenticular lens for auto-stereoscopic display [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 215~218
郑华东,代林茂,于瀛洁等. 基于正交柱透镜光栅的计算全息三维成像[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 215~218
- Wang Fang, Li Da, Zhao Xing *et al.*. Study on the stereo depth of integral imaging three-dimensional display system [J]. *Chinese*

- J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s109002
王 芳, 黎 达, 赵 星等. 集成成像三维显示系统立体深度的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(s1): s109002
- 5 M. Siegel. Perceptions of crosstalk and the possibility of a zoneless autostereoscopic display [C]. *SPIE*, 2001, **4297**: 34~41
- 6 L. Meesters, W. IJsselsteijn, P. Seuntiëns. A survey of perceptual evaluations and requirements of three-dimensional TV [J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, **14**(3): 381~391
- 7 Xiaofang Li, Qionghua Wang, Yuhong Tao *et al.*. Crosstalk reduction in multi-view autostereoscopic three-dimensional display based on lenticular sheet [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(2): 021001
- 8 D. Suzuki, T. Fukami, E. Higano *et al.*. Crosstalk-free 3D display with time-sequential OCB LCD [C]. SID 09 DIGEST, 2009. 428~431
- 9 M. Hammer, E. H. A. Langendijk. Reduce cross-talk in shutter-glass-based stereoscopic LCD [J]. *J. SID*, 2010, **18**(8): 577~582
- 10 Y. C. Chang, C. Y. Ma, Y. P. Huang. Crosstalk suppression by image processing in 3D display [C]. SID 10 DIGEST, 2010. 124~127
- 11 S. M. Jung, Y. B. Lee, H. J. Park *et al.*. Improvement of 3-D crosstalk with over-driving method for the active retarder 3-D displays [C]. SID 10 DIGEST, 2010. 1264~1267
- 12 Y. Iwanaka, T. Mita, M. Baba. Image processing-based crosstalk reduction for stereoscopic displays with shutter glasses [C]. SID 11 DIGEST, 2011. 816~819
- 13 K. Teunissen, A. Sevo, A. Dalfsen *et al.*. Perceptually relevant characterization of stereoscopic displays [C]. SID 11 DIGEST, 2011. 994~997
- 14 K. C. Huang, C. H. Tsai, K. Lee *et al.*. Measurement of contrast ratios for 3D display [C]. *SPIE*, 2000, **4080**: 78~86
- 15 C. C. Pan, Y. R. Lee, K. F. Huang *et al.*. Cross-talk evaluation of shutter-type stereoscopic 3D display [C]. SID 10 DIGEST, 2010. 128~131
- 16 M. Barkowsky, S. Tourancheau, K. Brunnström *et al.*. Crosstalk measurements of shutter glasses 3D displays [C]. SID 11 DIGEST, 2011. 812~815
- 17 A. J. Woods. How are crosstalk and ghosting defined in the stereoscopic literature [C]. *SPIE*, 2011, **7863**: 78630Z
- 18 K. Omura, S. Shiwa, T. Miyasato. Lenticular autostereoscopic display system; multiple images for multiple views [J]. *J. SID*, 1998, **6**(4): 313~324
- 19 N. Takanashi, S. Uehara, J. Ishii *et al.*. Dual-lenticular-lens-based 2-D/3-D convertible autostereoscopic display [J]. *J. SID*, 2004, **12**(3): 335~340
- 20 Zhou Lei, Wang Qionghua, Tao Yuhong *et al.*. Optimum design of lenticular lense for auto-stereoscopic display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3506~3510
周 磊, 王琼华, 陶宇虹等. 自由立体显示用柱面透镜光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3506~3510
- 21 Qionghua Wang, Yuhong Tao, Wuxiang Zhao *et al.*. A full resolution autostereoscopic 3D display based on polarizer parallax barrier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(1): 22~23

栏目编辑: 何卓铭