

基于人眼视觉特性的三维显示技术

王书路¹ 明海¹ 王安廷¹ 许立新¹ 张涛²

(¹ 中国科学技术大学光学与光学工程系, 安徽 合肥 230026; ² 重庆卓美华视光电有限公司, 重庆 401520)

摘要 人眼是三维显示的第一接受器官, 在深度视觉、空间/时间分辨、颜色/亮度响应等过程有其独特作用。针对三维显示中的立体图像质量、观看舒适度和临场感特性, 对自由立体显示器中立体视疲劳、表面形变、大视场角显示质量和色带效应进行研究, 从柱透镜的脉冲响应函数出发进行分析, 并提出解决方法, 在此基础上将多视点自由立体显示用于澄江古生物群科普宣传。同时讨论了集成成像中单元图像处理、立体深度和显示分辨率的问题, 以及全息显示技术中的人眼视觉特性。

关键词 视觉光学; 三维显示; 自由立体显示器; 人眼视觉特性; 集成成像; 全息显示

中图分类号 TN27 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209007

Three-Dimensional Display Based on Human Visual Perception

Wang Shulu¹ Ming Hai¹ Wang Anting¹ Xu Lixin¹ Zhang Tao²

¹ Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China
² Chongqing JOMVS Photoelectricity Co., Ltd, Chongqing 401520, China

Abstract Human eye is the key organ of three-dimensional display, it plays unique roles in perception including depth visual, space/time resolution, color/brightness response, etc. The critical characteristics of three-dimensional display such as stereo-image quality, viewing comfort, and effect of presence are investigated. The stereo visual fatigue, surface deformation, image quality of large view angle, and color ribbon effect in auto-stereoscopic display are researched. The impulse response function of lenticular lens is analyzed, and solutions are put forward. Multi-view auto-stereoscopic display is used in the science popularization of Chengjiang Biota. Unit image processing, stereo depth and resolution of integral imaging, as well as the human visual effects in holographic display are also discussed.

Key words visual optics; three-dimensional display; auto-stereoscopic display; human visual perception; integral imaging; holographic display

OCIS codes 120.2040; 130.3120; 330.1400; 330.1720

1 引言

三维显示可以带来更接近于真实世界的立体感和临场感, 能够更加全面、直观地呈现深度信息, 因此它在工业、医学、军事等方面具有重要应用价值。随着光学和数字信息技术的进步, 三维显示成为当前信息显示领域的热门话题之一。

传统三维显示手段已十分成熟, 目前的研究主要集中在自由立体显示、集成成像和全息等方向^[1-6], 麻省理工学院、东京大学、剑桥大学等研究

单位在这些领域展开了广泛的研究。同时飞利浦、夏普等公司^[7]也积极开发三维显示技术, 推出了各自的三维显示产品。国内如深圳超多维、重庆卓美华视等公司也积极跟进三维显示器的研发生产。目前的自由立体显示仍广泛面临着立体视疲劳、显示质量低等限制, 针对具体技术还存在着器件表面形变、串扰和彩色条纹等一系列问题。这些问题制约着三维显示技术的推广发展, 亟待解决。

信息显示领域一个明显的新动向是研究重点逐

收稿日期: 2013-11-19; 收到修改稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(41020006)、国家基础科学人才培养基金(J1103207)、中国科学院研究生创新基金

作者简介: 王书路(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事三维显示方面的研究。E-mail: slwangwz@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 明海(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术、微纳光子学等方面的研究。

E-mail: minghai@ustc.edu.cn(通信联系人, 中国光学学会会员号: S042011096S)

渐从单纯技术指标的优化转向与人性化设计相结合,其中特别注意到人眼是三维显示的第一接受器官,在光刺激响应和形成立体视感等过程中有其独特作用。为研发生产出让使用者更满意的三维显示技术和器件,人眼视觉特性的影响不可忽视。

三维显示质量的评价目前还没有较全面的研究,大部分针对三维显示主观性能的研究都集中在立体图像质量、观看舒适度和临场感这三大特性上。在三维显示过程中,立体像的角度、深度、清晰度以及图像的颜色、亮度、对比度等因素,都可能对三维显示效果产生重要影响。另外,面向视频内容的三维显示还需要进一步考虑刷新率、视频的景深变化等动态复杂因素。

本文从人眼视觉特性出发,对自由立体显示中的关键参数、表面形变、大离轴角显示质量和颜色还原进行分析,并讨论集成成像、全息等三维显示技术中与视觉特性相关的问题。

2 人眼视觉特性

人眼是三维显示的直接感受器官,视觉形成的过程中,人眼的光学像差、视网膜对不同波长、不同光强光束的敏感程度、以及人脑形成深度知觉的机制都会影响到最后人所感受到的三维显示图像。人眼有深度、空间、时间、亮度和色彩分辨能力,这些基本功能与三维显示器件的三维深度、分辨率、刷新率、亮度与对比度和色彩丰富度等光电特性息息相关^[8]。

2.1 深度知觉

对三维显示中最为关键的三维深度信息,需要双眼的共同配合和人脑空间知觉机制的参与。人获得三维显示图像的深度信息主要有以下几种机制:

1) 双目视差:人的双眼具有位置差异,当观察同一物体时,左右眼所观测到的物体图像是不完全一样的,这种差异就被称为双目视差。中等视距时,双目视差信息是深度感的最重要暗示,这一深度机制也是目前三维显示形成深度知觉的主要原理所在。

2) 移动视差:观察物体时,当人移动自己头部的位置,将会看到不同的截面,这样就能在人脑中形成立体感,移动视差即使是单眼观看,也能形成深度知觉。

3) 调节作用:这是一种单眼深度暗示,只有在与双目暗示共同配合、且物体距眼睛较近时才发生作用。当观察不同距离的物体时,眼球附近肌肉会拉伸或者收缩从而将眼球的焦点定在不同位置,而大脑通过获取肌肉的变化信息得到物体离眼睛距离的信息,从而获得深度知觉。

4) 会聚作用:两眼与物体有着一定夹角,当物点向人眼移近时,两眼视轴所构成的角度会逐渐增大,两眼球都会稍向内侧转动以便对准物点,从而产生立体感,这种深度暗示一般要在眼睛离物体比较近时才明显。

在各种三维显示中,全息显示将三维像直接呈现在空间中,人眼在观看全息显示像时与观看自然物体几乎没有区别,调动了人形成深度知觉所需的所有机制。集成成像虽然也有在空间中成像的机制,但存在着具体的成像共轭面,不如全息成像完美。自由立体显示模拟双目视差机制,也部分涉及移动视差与会聚作用,这种技术也能很好地实现三维显示。

2.2 空间分辨

人眼的空间分辨能力可以概括为区分一定空间距离的两个物体的能力,标准视力表所测得的是正常视力(分辨视角约 $1'$),表示辨别高对比度的文字或符号细节的能力。然而,三维显示所用的显示光阀(面板或芯片)器件,多采用规则矩阵形式的像素结构,人眼识别微小像素偏移的能力,用游标视力来衡量(分辨视角为 $5''\sim 20''$)。所以在确定显示器应有的分辨率时,应按游标视力所决定的分辨视角来要求像素尺寸。

在集成成像显示中,其单元像显示面尺寸是比较小的,受限于该显示面的分辨率,人眼观看集成成像所成的三维像时,会觉得不够清晰。对自由立体显示而言,后侧显示面微小的像素在经过柱透镜的成像作用后,会有横向上的放大,从而在人眼观看时显得不够清晰。

2.3 时间分辨

人眼对间断光刺激的时间分辨响应主要与刺激光的闪光频率有关,当人眼接受闪烁光刺激时,主观上引起的感觉介于闪烁和稳定之间时的闪光频率称为临界闪烁光频率(CFF),CFF与人眼所接受刺激光的闪烁振幅、平均光强、波长分布以及被刺激的视网膜部位和测试光环境有关,对显示动态图像的情况而言,CFF典型值在 $40\sim 60$ Hz。

相应地,动态三维显示受到其采用的显示光阀的响应速度限制,都有一定的显示刷新率,即单帧图像切换的时间频率。当三维显示刷新率高于CFF时,人即可接受快速切换的单帧图像为动态图像。一般地,三维显示器件的电子响应以及光阀物理响应速度会设计成高于该值,主流显示器的刷新率均可达到 60 Hz。利用数字光处理(DLP)器件以 120 Hz的刷新率交替显示视差图像,已可以实现单投影时序性三

维激光显示^[9]。

对三维显示所采用的发光二极管(LED)背光源,可利用LED的快速响应特性进行动态调制,此外,还可设计LED的光谱特性以符合人眼光视效函数所描述的亮度分辨特性,从而最终实现高对比度、绿色节能和人性化的三维显示背光源。

2.4 亮度分辨

人眼对可见光谱内各波长刺激均能响应,但各波长的光强引起的人眼光感受并不一致。光强较强时,光谱光视效函数峰值约在555 nm处,如图1虚线所示;光强较弱时,光谱光视效函数峰值约在507 nm处,如图1实线所示。国际照明委员会(CIE)根据主观统计实验确定光谱光视效函数标准,称之为“标准光度观察者”。

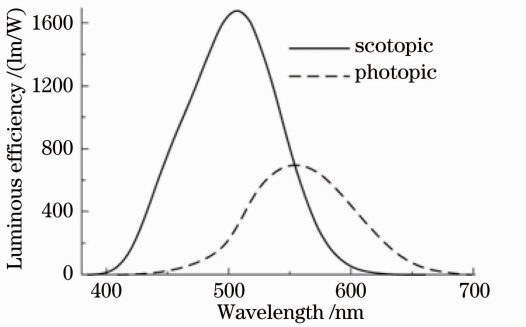


图1 光谱光视效函数曲线

Fig. 1 Spectral luminous efficiency function

三维显示器往往工作在人眼明视觉的亮度范围内,在设计其光源系统时,不应过分追求高光强,如能综合优化考虑典型观看条件下人眼所接收的不同波长成分,对提升三维显示质量有很大意义。

2.5 颜色分辨

人眼的色觉能力来源于视网膜上不同视锥细胞的分布。视锥细胞有三种,其含有的视色素分别对蓝色、绿色和红色波段光最为敏感,上述分布机制使得人眼对不同波长的光能产生不同的对比度响应。

人眼较高的色分辨能力要求三维显示具有良好的颜色表达性能。显示器的色合成原理目前有分像素的空间合色和时序合色。在设计显示器时,需要针对不同的合色原理结合人眼色分辨特性来讨论。同样地,CIE也根据主观统计实验制定色度标准,称为“标准色度观察者”。

3 自由立体显示器的人眼视觉效应

自由立体显示是一种裸眼三维显示技术,通过在普通平板显示器前设计周期性遮挡或折射结构,

在显示器前的自由空间中形成多个视差图像观看区,利用人眼的双目视差特性形成深度知觉,从而实现裸眼三维显示。该技术可以充分利用平板显示技术的现有成果,是有潜力且可行性高的三维显示技术,也是目前三维显示领域的一个重要研究方向。

3.1 自由立体显示中的视疲劳与柱透镜像差问题

人眼在观看自由立体显示器上的立体图像时,两眼会聚在立体图像的位置上,焦点调节则在显示平面上,即会聚作用与调节作用不一致,这是影响立体观看舒适度乃至引发视疲劳的主要生理原因^[10]。

不同的视差下,会聚作用与调节作用的差异也不同,其差异值 Δd 可以用所注视三维图像凹进/凸出显示平面的尺度来表征,如图2所示,正/负视差下,视差 ΔI 与差异值 Δd 的关系为

$$\begin{cases} \Delta d_+ = \frac{\Delta I \cdot D}{w - \Delta I} \\ \Delta d_- = \frac{\Delta I \cdot D}{w + \Delta I} \end{cases} \quad (1)$$

式中 w 为人眼瞳距, D 为人眼与屏幕距离。差异值 Δd 表征了会聚作用与调节作用的差异程度,若立体像凹进/凸出屏幕尺度过多,使 Δd 超出融合范围,观看者无法将左右视差图像融合而产生复视,从而引发不适甚至视疲劳。其中,因为调节作用和会聚作用的有效距离较近,立体像凸出的情况更容易引发不适^[11]。

对于二视点立体显示,观看者的头部移动会使其进入串扰区或反视差区,很容易破坏已形成的深度知觉,损害显示的观看舒适性,其单个立体视区张角较小,典型值约为 15° ,不利于多人户外观看。二视点自由立体显示技术一般使视差障碍或柱透镜阵列沿竖直方向,恰好与显示面板的像素分布平行,两

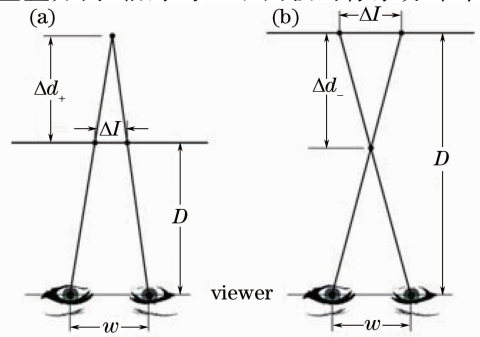


图2 显示面、像点与双眼的几何关系。(a)正视差;
(b)负视差

Fig. 2 Geometric relationships between display surface, image point and viewer eyes. (a) Positive parallax; (b) negative parallax

种周期性结构共同作用,产生的彩色叠栅条纹也会影响立体显示质量。

由于二视点自由立体显示的诸多问题,采用柱透镜阵列的多视点自由立体显示技术逐渐成为自由立体显示研究主流。由于视点数的增加,立体视区张角相对二视点增大为 m 倍(m 为视点数),同一立体视区的相邻任意两个视点均可以形成双目视差,使得深度知觉的形成更为自然,立体观看舒适度更好,临场感更强,更适于公众场合立体显示。彩色叠栅条纹的问题,可以通过改变柱透镜阵列倾斜角来进行优化解决。

视点数的增加对多视角自由立体的显示分辨率提出了挑战。多视点自由立体显示像素点的横向尺寸约为原先的 $m/3$ 倍,纵向尺寸约为 3 倍,将使像素点尺寸不容易达到人眼空间分辨的要求。可以看出,视点数 m 越多,实际显示像素点越大,显示分辨率越低,因此视点数增加也是有限制的。多视角自由立体显示器往往需要采用超高分辨率显示面板(2560 pixel×1440 pixel 或更高),1920 pixel×1080 pixel 面板分辨率已无法满足图像清晰度的要求。考虑到这些限制,目前多视点自由立体显示,视点数一般不超过 8 个。为了达到更好的显示效果,多视点自由立体显示器屏幕尺寸较大,视场角较广,这就带来了显示器表面柱透镜阵列形变以及像差的问题。

m 视点自由立体显示器如图 3(a)所示,这里以中心处第 k 和 $k+1$ 个视点为例,解释视点与像素分

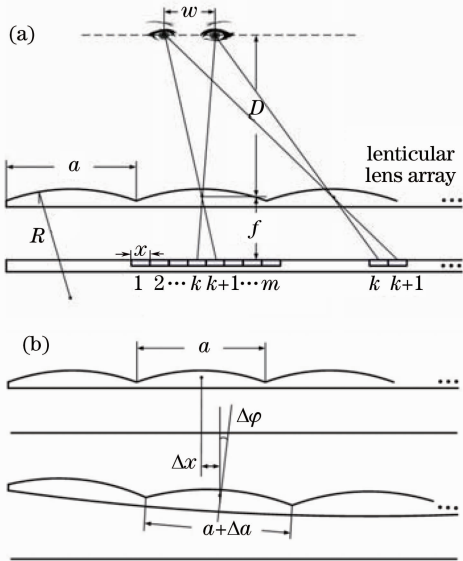


图 3 自由立体显示器。(a)结构及关键参数;(b)形变及参数变化

Fig. 3 Auto-stereoscopic display. (a) Structure and key parameters; (b) deformation and parameters variation

布的几何关系。单个柱透镜曲率半径 R 、与后侧显示面板的间距 f 、阵列周期宽度 a 和排布倾斜角 θ 等均是需要设计的参数。针对使用场合与人眼深度知觉机制的典型作用距离来确定观看距离 D ,针对该距离下空间分辨特性确定视点数 m ,再结合所使用显示面板的尺寸 Z'' 、分辨率(u pixel× v pixel)等参数,确定设计指标。

由所使用显示器的尺寸与分辨率,得到其单个子像素尺寸 $x \times y$,认定典型瞳距 $w=65$ mm,由几何光学的分析,得到两项最关键的参数,柱透镜阵列周期 $a=mxD\cos\theta/(D+f)$,曲率半径 $R=(n-1)f/n$ 。其中柱透镜倾斜角 θ 要针对彩色叠栅条纹问题进行实验优化。如要考虑进一步的优化处理,可综合归纳设计参数与约束条件,采用离散多参数约束问题的合适优化算法来计算处理。

在上述过程中,设计参数对中间立体视区的中心视点为最优,使得中心位置能达到相对最好的立体图像质量、观看舒适度和临场感。其他立体视区分布在中心立体视区的两侧,立体图像质量下降。

柱透镜在具有屈光度的方向上(定义为 x 方向),与普通球面透镜具有类似的光线偏折效果,柱透镜的透射函数可以写成

$$t(x, y) = \exp(jkn\Delta_0) \cdot \exp[-jkx^2/(2f')]. \quad (2)$$

从频谱分析的角度,柱透镜只在 x 方向保留了傅里叶变换性质, y 方向只是改变恒定的相位。因此,此处考虑衍射受限系统中柱透镜在 x 方向上的一维脉冲响应函数

$$h(x_i - \tilde{x}_0) = \frac{1}{\lambda^2 d_0 d_i} \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda d_i} (x_i - \tilde{x}_0) x\right] dx, \quad (3)$$

对人眼观看自由立体显示而言,式中 $P(x)$ 是以柱透镜节距为尺寸的矩孔函数,因此,柱透镜对点光源的脉冲响应,在 x 方向上与球面透镜类似。另外,柱透镜是对显示面板上像素所发出的光进行偏折,属于非相干照明,其光学传递函数 (OTF) 为

$$\mathcal{H}(\xi) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} |h(x_i)|^2 \exp(-j2\pi\xi x_i) dx_i}{\int_{-\infty}^{+\infty} |h(x_i)|^2 dx_i} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) P(x + \lambda d_i \xi) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(x) dx}. \quad (4)$$

OTF 的模即为调制传递函数(MTF),即对较大角度处的高频分量,MTF 值会下降,需要注意的是,(2)~(3)式的讨论均是在理想条件下,若考虑到其柱透镜的波像差 $\exp(jkW)$,光瞳函数变为 $\tilde{P}(x) = P(x)\exp[jkW(x)]$,MTF 会发生一定变化,但是总体分布趋势不变。

以 8 视点 46"显示器为例,图 4(a)为单个柱透镜的像差曲线,其中 W 是波像差,由通过柱透镜后的光程差来表征, a 在这里表示柱透镜阵列的节距,即横向(x 方向)通光口径。自由立体显示中使用的柱透镜,主要作用不是成像,而是将显示面发射光束进行方向上的改变,因此不同于普通成像透镜的像差,这里是用波像差的方式来讨论像差所引起的影 响。由于存在色差,三种颜色的像差曲线略有差别,曲线形状表明此时慧差影响较大。实际自由立体显示器的使用中,大视角情况下的像差将引起显示性

能的直接下降。令第 1 视角(中心视角)图像为白底黑“1”字,其余视角均为黑色,如图 4(b)所示,于中心视区处,可以观察到第 1 视角图像在屏幕较大区域有均匀分布,而在大视角角下(约 32°),如图 4(c)所示,第 1 视角区域有所缩小,串扰的中间灰度区域也占据了很大部分面积。虽然自由立体显示所用的不同视点图像只是存在视差范畴上的微小差异,但在串扰区中,人眼将直接感受到两套甚至多套图像,干扰甚至排斥深度知觉的生成,这样会导致立体图像质量下降,人眼观看舒适度下降,同时临场感也不会形成。考虑到成本的原因,目前自由立体显示用的柱透镜阵列一般采用大规模涤纶树脂(PET)材料压膜,面型往往简单地设计为圆柱面,没有针对像差进行精确的优化和设计。在进一步设计自由立体显示器时,应考虑大视角时的柱透镜像差进行光学参数优化。

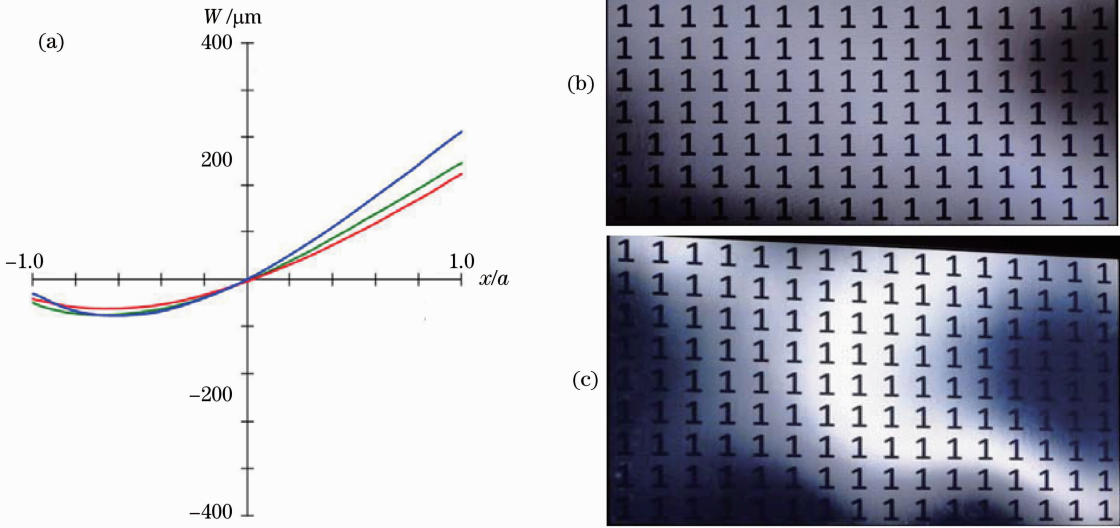


图 4 (a)单个柱透镜像差曲线;(b)中心视区 1 视点图像区域;(c)大视角下(32°)1 视点图像区域

Fig. 4 (a) Aberration curve of lenticular lens; (b) image zone of viewpoint 1 in centre viewing area; (c) image zone of viewpoint 1 in large viewing angle (32°)

3.2 柱透镜阵列形变对自由立体显示的影响

前面分析均是针对较为理想的条件做出的,实际使用的自由立体显示器由于屏幕尺寸较大,表面柱透镜阵列存在不同程度的形变。如图 3(b)所示,假设显示器某处柱透镜光轴角度改变 $\Delta\varphi$,光轴位置偏离 Δx ,节距改变 Δa 。其中,柱透镜光轴角度改变及位置偏离的影响可以等效地认识为显示面像素发光中心的移位。另外,节距的改变,会将原有的视角位置分布将发生改变,这会引引起比无应变条件下更严重的串扰问题,会大大增加观看者的用眼负担。

在 8 视角 46"自由立体显示中,用白底“2”字标记中心视角,其余视角分别用黑底“1”、“3”字标记,在最佳观看距离处拍摄屏幕,如图 5 所示,可见只有中间区域处图像质量较好,两侧图像串扰十分明显。图 4(b)、(c)所示的中心视角图像区域是不规则的,这也是受到柱透镜阵列形变的影响。

目前实际生产中使用的柱形透镜阵列,多采用薄膜,与平板玻璃贴合后,再依据与后侧平面显示器的相互位置进行固定。为了避免形变所导致的图像串扰问题,在装配加工过程中,应控制贴膜时的表面

平整度,考虑到平板玻璃本身的重力作用,并在设计中减少显示器使用时的发热影响。

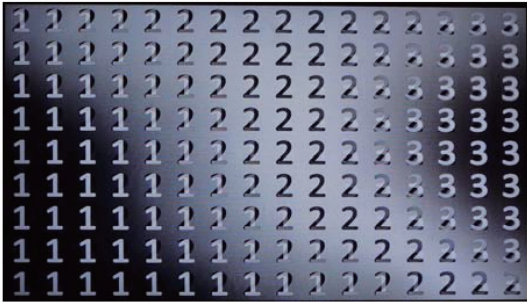


图 5 因表面形变而引起的显示器图像串扰
Fig. 5 Image crosstalk caused by the monitor's surface deformation

3.3 色分辨能力对自由立体显示影响

人眼的亮度分辨与颜色分辨之间存在差异性。CIE 在制定色度标准时,所定义的三原色分别为 700 nm(红)、546.1 nm(绿)和 435.8 nm(蓝)的单色可见光。在匹配等能白光时,三原色的辐亮度比率为 72.0962:1.3791:1.0000,描述了不同波长的物理光强度。考虑到人眼的亮度分辨特性,经过光谱光视效函数转换,匹配等能白光时,三原色单位的光亮度比率为 1.0000:4.5907:0.0601,即人眼的亮度分辨与颜色分辨在不同波长上存在不一致性。

对自由立体显示而言,采用国家电视标准委员会(NTSC)的显示器三基色标准,不能直接引用 CIE 的红、绿、蓝三色(RGB)人眼光亮度比率数据,需要进行必要的色品坐标转换。NTSC 的三基色色品坐标 (x, y) :红(0.67, 0.33),绿(0.21, 0.71),蓝(0.14, 0.08),由 x - y 系统转换成 RGB 系统,得到 NTSC 三基色 RGB 系统色品坐标 (r, g, b) ,可以从 RBG 三原色单位的光亮度比率得到显示三基色光亮度比率,由

$$\begin{cases} l_R r_R + l_G r_G + l_B r_B = 1.0000 \\ l_R g_R + l_G g_G + l_B g_B = 4.5907, \\ l_R b_R + l_G b_G + l_B b_B = 0.0601 \end{cases} \quad (5)$$

计算得到 $l_R:l_G:l_B = 1.00:2.15:0.24$ 。可以看到,绿光在匹配白光时占比是很大的。一般的使用中,绿光子像素的亮度往往要高出红、蓝子像素几倍。对于多视角自由立体显示的单色子像素在任一视角观看时在水平方向上拓宽 m 倍(m 为视点数),使得等效单色子像素的尺寸不容易满足人眼空间分辨能力对显示分辨率的要求。在显示效果上,将形成宏观的以绿色为“明”中心,红、蓝色为“暗”中心的条纹,如图 6(a)所示,人眼颜色分辨能力差异以及自

由立体实际显示分辨率限制会引起色带效应,以及实际显示图像不同色块间的锯齿分界线,如图 6(b)所示。

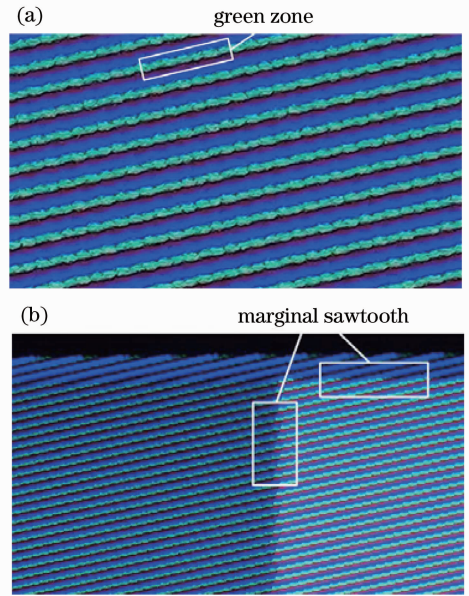


图 6 (a)人眼颜色分辨能力差异引起的色带效应;(b)不同色块边缘处的锯齿效应
Fig. 6 (a) Color ribbon effect caused by the different response of colors of human eye; (b) edge sawtooth effect of different color zones

以 8 视点 46"自由立体显示器在 3m 最佳距离处的效应为例,明暗条纹对人眼的角间距约为 $0.9'$,超过游标视力的分辨阈,接近正常视力的分辨阈。再与自由立体显示器表面已有的周期性结构相互作用,形成更为宏观的叠栅条纹。条纹与锯齿的存在,将大大降低立体图像质量,同时,影响到人眼对双目视差的分辨,使得临场感降低。

对这种人眼颜色分辨特性所引发的条纹和锯齿效应,或可通过进一步提高显示面板分辨率(如采用目前已开发出的 4K 高清屏幕)以及改变空间合色像素排布,如改变带状排布为三角形排布来解决。

4 自由立体显示在科普中的实际应用

多视点自由立体显示技术,虽能改善立体观看舒适度,但仍然不同程度上存在视疲劳,因此还不适于在长时间观看。目前,多视点自由立体显示更多地应用于户外广告、博物馆和机场等公众场合。

对上述的一些生产线上亟待解决的关键技术问题进行研究,从人眼视觉特性的角度分析,为自由立体显示的应用奠定基础。同时抓住科普宣传手段生动、互动性强、不需长时间观看的特点,在历届科技

活动中,应用多视点自由立体显示器向近万名受众进行了科普宣传,针对20世纪最惊人的古生物学发现——澄江古生物群的珍贵化石资料进行三维显示重现,针对视觉特性中的显示串扰、深度失真等问题,通过图像处理的办法进行优化,获得三维复原视频与图片,在多视点自由立体显示器上进行显示推广,并在第四届中国科博会上进行展示,如图7所示。



图7 澄江古生物的三维显示

Fig. 7 Three-dimensional display of Chengjiang Biota

5 集成成像与全息显示中的人眼视觉效应

集成成像受限于透镜阵列结构所对应的单元像显示面尺寸,使得最终显示分辨率不高,距离人眼空间分辨的要求存在一定差距。目前全光集成成像中,拍摄与显示往往采用同一套透镜阵列共轭关系,显示器件分辨率不能满足再现所拍摄子单元像的要求。如果通过截取所拍摄到的有效子单元图像并加以放大,改变显示时的透镜阵列参数,可以提高人眼所看到的立体像的清晰度。

另外,集成成像的子单元显示面的成像共轭面与三维像位置不一致,在一定程度上也会使人眼产生会聚/调节作用差异。人眼焦点调节在共轭面上,两眼会聚于三维像,这种差异将引起集成成像显示所特有的像面割裂现象,导致所成像在人眼观看时不连续^[12]。这种图像割裂实际上是一种网格噪音,利用具有高斯权重形式的计算集成成像重建方法可以有效消除。传统集成成像的立体像重建过程,其单元像光场并未经过处理,由光线场理论可得

$$O_{pq}(x, y, z) = I_{pq} \left(s_x p - \frac{x - s_x p}{M}, s_y p - \frac{y - s_y q}{M} \right), \quad (6)$$

式中 I_{pq} 为第 p 行第 q 列的单元像, $O_{pq}(x, y, z)$ 为空间 (x, y, z) 坐标处 I_{pq} 单元像的逆向投影,括号内为坐标转换光场几何关系,这里省去了表征逆向投影距离的

分母常数。重建像即为 O_{pq} 的总和 $O(x, y, z) = \sum_{(p, q)} O_{pq}(x, y, z)$ 。如上述,这种自然重建方式会产生图像割裂,影响人眼观看的立体图像质量。为解决这一问题,在逆投影过程中加入高斯权重因子:

$$O_{pq}(x, y, z) = I_{pq} \left(s_x p - \frac{x - s_x p}{M}, s_y q - \frac{y - s_y q}{M} \right) \times \exp \left[-\frac{(x - s_x p)^2 + (y - s_y q)^2}{2\alpha} \right]. \quad (7)$$

这样形式的子单元像逆投影可以使各个子单元像在重建立体像时,不再具有可见的割裂边缘,通过在重建光场中插入高斯权重因子进行图像处理,可以避免严重的像面割裂现象,从而提高三维显示质量^[13]。

集成成像的阵列中透镜个数较多,用于显示成像的子单元图像数据量较大,图像数据处理的速率也在一定程度上限制了集成成像阵列个数与显示尺寸。

全息显示由于其空间中直接成像的优势,可以做到静态再现深度知觉。对三基色激光用于再现的全息显示,再现得到的彩色立体像是由三束激光在三幅全息图上分别衍射,由于绿光占比最大,为红光和蓝光的2~9倍,如不考虑人眼的颜色分辨特性,在颜色复现上容易失真,激光的高相干性也会使得主观散斑影响再现像的图像质量。在数字计算全息显示方面,人眼观看动态三维显示的需求要求显示刷新率至少达到60 frame/s,而全息显示由于需要再现三维像的振幅和相位信息,图像数据量巨大,目前的计算、显示和数据传输器件均限制了其刷新率使其暂时难以满足人眼动态显示的要求^[14-15]。

自由立体显示、集成成像与全息技术有各自的特点。自由立体显示技术由于对显示元件的分辨率、响应速度要求相对较低,光学结构相对简单,与现在主流液晶显示屏兼容,容易实现大屏幕、高分辨率和高临场感的三维显示,目前已进入产业化阶段。集成成像虽然不易引起视疲劳,但对显示元件的分辨率要求更为严苛,目前还处于针对小型器件的研发阶段。全息显示的三维信息最多,不过其需要对海量数据进行高速处理,动态全息显示难以达到高的刷新率,目前还处于应用基础的研究阶段。

6 结 论

着重研究影响多视点自由立体显示的图像质量、观看舒适度和临场感的立体视疲劳、大视场角图像质量、表面形变、色带效应等问题。同时讨论了集成成像和全息显示技术中的人眼视觉效应。人眼视

觉特性在三维显示中还有许多问题需要深入研究,人对三维显示质量的主观感受不仅仅是观察到的图像质量各属性的加权之和,还包含人眼对光刺激的成像、响应以及人脑的复杂认知过程。三维显示质量是由三维显示器件的光电特性所决定的,现有的显示器件质量评价方法并不能反映人眼视觉系统在观看视频图像时的非线性信号处理过程和大脑的视觉认知过程。因此,基于三维显示器件的光电特性与人眼对三维显示的视觉认知过程的研究,对实现显示器件更高的图像质量、观看舒适度和临场感具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Blanche P A, Bablumian A, Voorakaranam R, *et al.*. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. *Nature*, 2010, 468(7320): 80–83.
- 2 Shen Chuan, Zhang Cheng, Liu Kaifeng, *et al.*. Research on issues about reconstructed holographic image based on a pixelated spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0309001.
沈 川, 张 成, 刘凯峰, 等. 基于像素结构空间光调制器的全息再现像问题研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0309001.
- 3 Tao Y H, Wang Q H, Gu J, *et al.*. Autostereoscopic three-dimensional projector based on two parallax barriers[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3220–3222.
- 4 Love G D, Hoffman D M, Hands P J W, *et al.*. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display[J]. *Opt Express*, 2009, 17(18): 15716–15725.
- 5 Park J H, Hong K, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(34): H77–H94.
- 6 Dong Lei, Yang Fugui, Chang Hong, *et al.*. Development of three-dimensional stereoscopic display techniques[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(2): 88–92.
董 磊, 杨福桂, 常 宏, 等. 立体显示技术的研究进展[J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(2): 88–92.
- 7 Urey H, Chellappan K V, Erden E, *et al.*. State of the art in stereoscopic and autostereoscopic displays[J]. *Proc IEEE*, 2011, 99(4): 540–555.
- 8 Li Fengming. *System of Ophthalmology*[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 1996. 369–459.
李凤鸣. *眼科全书*[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996. 369–459.
- 9 Lei Dong, Anting Wang, Fugui Yang, *et al.*. Single 3D laser projector with speckle suppression[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(s2): s21102.
- 10 Kawashima K, Okamoto J, Ishikawa K, *et al.*. Parameter Comparison of Assessing Visual Fatigue Induced by Stereoscopic Video Services[M]//Randall Shumaker. *Virtual Augmented and Mixed Reality. Designing and Developing Augmented and Virtual Environments*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 175–183.
- 11 Zhao W X, Wang Q H, Wang A H, *et al.*. Autostereoscopic display based on two-layer lenticular lenses[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(24): 4127–4129.
- 12 Martínez-Cuenca R, Saavedra G, Pons A, *et al.*. Facet braiding: a fundamental problem in integral imaging[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(9): 1078–1080.
- 13 Xu Jing, Ming Hai. Enhanced depth extraction based on integral imaging with linear interpolation [J]. *Chinese J Quantum Electronics*, 2012, 29(2): 135–141.
徐 晶, 明 海. 基于集成成像的深度提取线性插值增强方法[J]. *量子电子学报*, 2012, 29(2): 135–141.
- 14 Yaras F, Kang H, Onural L. State of the art in holographic displays: A survey[J]. *J Display Technol*, 2010, 6(10): 443–454.
- 15 Wang Yujia, Jiang Zhuqing, Wang Zhe, *et al.*. Three-dimensional imaging for micro-optical component by using dual-wavelength digital holography [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 38(s1): s109005.
王羽佳, 江竹青, 王 喆, 等. 基于双波长数字全息的微光学元件三维成像方法[J]. *中国激光*, 2012, 38(s1): s109005.

栏目编辑: 何卓铭