

距离移动电子设备有多远？裸眼 3D 显示现状与展望

乔文, 周冯斌, 陈林森

(苏州大学光电科学与工程学院, 江苏苏州 215006)

摘要: 移动电子设备已成为最重要的个人交互平台, 具有轻薄型态和低功耗特质的裸眼 3D 显示亦成为重要研究领域。裸眼 3D 显示能否应用于移动电子设备, 也成为 3D 显示是否能走进千家万户, 影响人类生活习惯的一个重要评判标准。文中主要介绍和比较了与移动电子设备兼容的裸眼三维 (3D) 显示硬件实现方法和技术, 主要包括屏障视差技术、柱透镜阵列技术、时空复用技术、集成成像显示、压缩光场显示和向量光场显示技术。文中进一步分析了现有技术的瓶颈与不足, 阐释技术瓶颈的主要产生原因和解决途径, 并对裸眼 3D 显示应用于平板显示的未来发展趋势进行了展望。

关键词: 裸眼三维显示; 自由立体显示; 多视角 3D 显示; 光场显示

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0303002

Towards application of mobile devices: the status and future of glasses-free 3D display

Qiao Wen, Zhou Fengbin, Chen Linsen

(School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: Mobile device has been the most important personal computational platform. Researches increasingly focus on glasses-free 3D display that features thin form factor and low power consumption. Once glasses-free 3D display is applied in the mobile devices, it will affect or even change the observation habit and thinking manner of human being. In this paper, the solutions that were compatible with flat display were introduced. Parallax barrier, lenticular lens array, spatio-temporal multiplexing 3D display, integral 3D display, compressive lightfield display, and vector 3D display were successively introduced in detail. Furthermore, the limitations that currently prevent these technologies from commercialization were discussed in depth. Finally, the potential research trends were highlighted.

Key words: glasses-free 3D display; autostereoscopic display; multiview 3D display; light field display

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (NSFC)(61975140); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (16KJA510002); 苏州市重点产业创新前瞻性应用研究项目 (SYG201930); 江苏高校优势学科建设工程 (PAPD)

作者简介: 乔文 (1984-), 女, 特聘副教授, 主要从事微纳光学、微纳制造、微纳传感技术等方面的研究。Email: wqiao@suda.edu.cn

0 引言

作为人类获取信息的主要来源之一,视觉在日常生活中显得尤为重要。与自然景物不同,目前传统显示器件只能呈现二维图像。这种缺乏深度的平面信息在一定程度上限制了人类对广阔世界的探索与认知。研究显示,人类的大脑几乎 50% 的部分均用于参与视觉信息的处理^[1],二维图像的呈现方式导致大脑利用率降低。裸眼 3D(three dimension) 显示在影视、游戏、教育、车载、航空、医疗、军事都有巨大的应用价值。以军事领域为例,从机械制造、战场分析、军队指挥、远程操作等各个环节,都需要 3D 图像的可视化,对工作效率提升将具有巨大影响。因此,3D 显示被誉为“下一代显示技术”,成为重要研究领域和诸多显示公司争相研究的技术之一^[2-6]。

1883 年 C. Wheatstone 首次提出利用立体镜实现 3D 显示^[7]。此后的一百多年,利用不同方式实现的 3D 显示器件如雨后春笋般涌现。基于头戴式设备,如眼镜、头盔等实现的 3D 显示技术由于便利性和舒适性问题,尚未得到普及应用^[8-13]。裸眼 3D 显示,无需外戴设备只用肉眼即可获得观察物体的深度信息并形成立体视觉,受到各大主流公司和科研院所的追捧^[14-18]。裸眼 3D 显示主要可分为全息显示、体 3D 显示和多视角 3D 等^[19-22]。一些体显示技术目前已经成功应用于展厅、博物馆、舞台、广告等领域^[23-27],反响强烈。

裸眼 3D 显示的一个重要应用领域是平板显示。手机、电脑等已成为人们日常生活中获取信息的主要媒介。有调查显示,平均每人每天花在观看手机

屏幕上的时间为 5 h^[28]。因此裸眼 3D 显示是否走进千家万户,影响人类生活习惯的一个重要评判标准为:裸眼 3D 显示技术是否进入了平板显示领域^[29-34]。目前裸眼 3D 显示尚不能应用于平板显示领域的主要问题在于硬件的差距和不足。文中主要介绍和比较了与移动电子设备兼容的裸眼 3D 显示硬件实现方法和技术,分析了现有技术瓶颈与不足的主要产生原因和解决途径,并对裸眼 3D 显示应用于平板显示的未来发展趋势进行了展望。

1 自由立体 3D 显示技术概述

自由立体 3D 显示技术通过将传统平板显示屏幕与“视角调控板”结合,将平板显示屏幕图像分离到若干视角,不同视角的图像进入左右眼睛,通过双目视差获得深度信息。因此也被称为多视角 3D 显示技术。视角调控板的实现方法主要包括:视差屏障、柱透镜阵列、时空复用、集成光场、压缩光场和向量光场等^[35-41]。

1.1 基于视差屏障或柱透镜阵列的裸眼 3D 显示

视差立体图由 F. E. Ives 于 1902 年首次提出^[42]。基于视差屏障(parallax barrier)3D 显示技术在平板显示屏幕前面使用了一个遮光屏障使出射光线具有方向性,并在特定区域形成视差。如图 1 所示,屏幕的间隔距离 a 和像素间距 p 由硬件和观看条件预先确定, d 是双眼分开距离的一半。基于相似三角形可获得适当的势垒间距 b 和掩模距离 c :

$$c = \frac{p * a}{d + p}, b = \frac{2 * p(a - c)}{a}$$

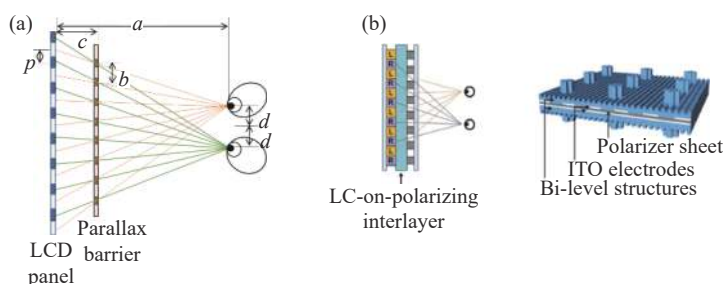


图 1 基于视差屏障的裸眼 3D 显示研究工作

Fig.1 Research on glasses-free 3D display based on parallax barrier

针对视差屏障观察范围有限等问题, T. Peterka 等人^[43]利用 LCD 屏幕动态调整条状屏障的周期、取向角、占宽比等参数,实现了更大的视场角和 2D/3D 切

换功能。进一步地,双 LCD 堆叠结构与头部跟踪装置结合,还可实现多人同时观看。然而,基于 LCD 屏幕实现的动态调制屏障比静态屏障系统在亮度和对

比度等方面有明显下降。2016 年 S. U. Kim 等人^[44]提出了一种利用偏振片上液晶 (Liquid Crystal-on-polarizing Interlayer, LPI) 结构, 替代传统双 LCD 叠层结构。如图 1(b) 所示, 一体化的屏幕集成结构缩短了 2D 显示屏幕和动态视差屏障的距离, 进而缩短了观察距离, 以用于移动平板显示领域。2016 年 S. K. Yoon^[45] 等人提出通过调整视差屏障和显示器之间距离的方法, 可改变最佳观察距离和减小串扰。将该方法与人脸追踪技术结合, 可将最佳观察距离与观察者位置匹配起来, 提高系统的可视范围。

视差屏障技术由于其制作简单、成本低等优势被率先应用于 3D 显示系统。然而该方法中光线方向调控能力与视差屏障透光孔径成反比, 光利用率较低是其主要应用瓶颈。

为解决视差屏障 3D 显示亮度低的问题, 柱透镜阵列 3D 显示技术孕育而生, 其显示原理如图 2(a) 所示。W. Hess^[46] 于 1915 年获得了一项基于一维 (1D) 透镜阵列的 3D 显示器的专利。由此柱透镜阵列 3D 显示开始快速发展。为避免莫尔条纹, 柱透镜阵列与显示屏幕像素排布方向通常有一个夹角^[47-48]。2019 年 T. Q. Huang^[49] 等人利用深度相机头部追踪系统和柱透镜阵列组合 (见图 2(b)、2(c)), 使双目视差由柱透镜显示系统提供, 运动视差由深度相机头部追踪系统提供, 视场角扩大至 56.5°。

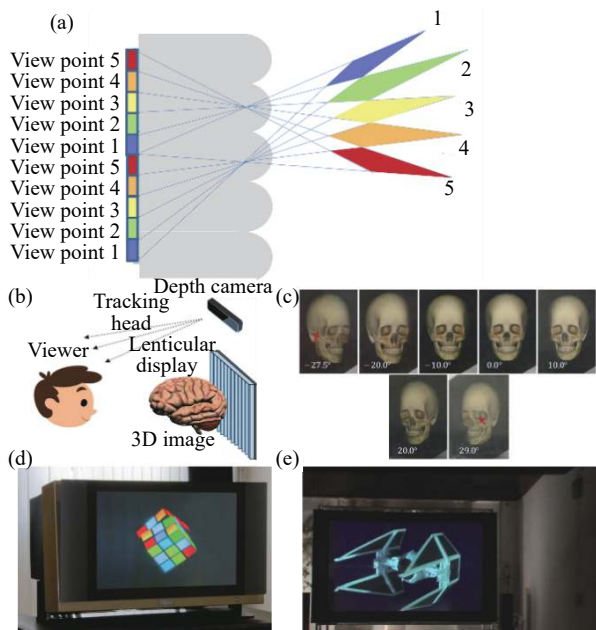


图 2 基于柱透镜阵列的裸眼 3D 显示研究工作

Fig.2 Research on glasses-free 3D display based on lenticular lens

基于柱透镜阵列的 3D 显示技术在部分手机、电视、广告机中已获得应用^[50-51], 是目前所有与平板显示结合的裸眼 3D 显示技术中商业应用最为广泛和成熟的技术。HOLOGRAFIKA 公司所研发的 HOLOVizio, 尺寸大小有 44、72、140 in(1 in=2.54 cm) 等, 其中 72in 的裸眼 3D 显示装置的视角范围可达 70°, 显示图像分辨率可达 1 280 pixel×768 pixel^[52]; 上海易维视科技有限公司研发了基于柱透镜阵列的 3D 显示系统, 并且已有多款 3D 显示电视成功商业化, 尺寸大小有 85、98 in 等, 其中 98 in 大尺寸装置最高分辨率为 3 840 pixel×2 160 pixel, 最佳可视角度达 90°^[53]。

视场角不足、无运动视差、长时间观看引起眩晕感等问题是目前制约基于柱透镜阵列的 3D 显示技术进一步发展和普及的主要因素。

1.2 时空复用 3D 显示

时空复用 3D 显示 (spatio-temporal multiplexing multi-view 3D display) 技术基于控制光线出射方向的指向型背光结构设计, 结合高速刷新新的 LCD 显示技术, 利用时间复用的方法实现全分辨率的 3D 显示效果。

时空复用 3D 显示技术一般局限于单人观看。针对这一问题, 台湾交通大学的 C. H. Ting 等人^[54] 设计了一种倒梯形微结构, 如图 3(a)、3(b) 所示, 可实现三人同时观看的 3D 显示。为降低图像串扰, 2017 年上海交通大学的 Jian-Gang Lu 课题组^[55] 提出了一种可获得高分辨率、低串扰的指向型准直结构。如图 3(c)、3(d) 所示, 通过时序切换, 可在空间形成多个视角点。J. Zhou 课题组^[56] 利用左右分布的带状光源、透镜阵列和 LCD 面板, 设计了一种分辨率高, 且具有较高亮度均匀性的指向型背光显示系统。利用自由曲面的背光系统减小离轴畸变问题, 将串扰降低至 3%, 提高了 3D 图像的清晰度和对比度。

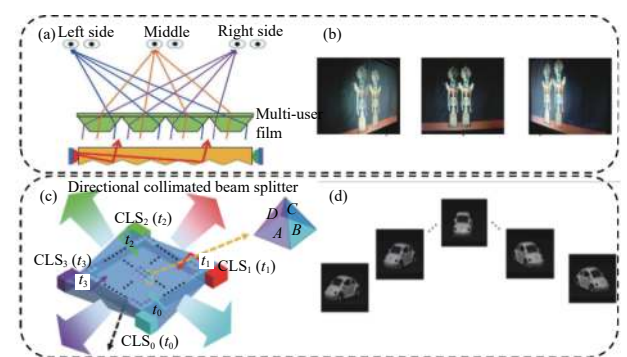


图 3 基于指向型背光结构 3D 显示系统

Fig.3 Directional backlight 3D display system

1.3 集成显示

基于柱透镜阵列的 3D 显示技术只能提供水平视差, 而基于球面微透镜阵列的集成显示 (integral display) 可再现全视差图像。这类技术首先于 1908 年被 G. Lippmann 所提出^[57]。其原理如图 4(a) 所示, 图像记录时, 记录下每个透镜元对应生成的不同视角图像。图像再现时, 多视角图像元的出射光线在微透镜阵列前方再现出来, 形成完整的 3D 图像。光场显示的优点是能够再现全视差 3D 图像, 并可提供运动视差信息。其分辨率下降严重、视场角受限等问题一直是学者们重点研究和解决的领域。

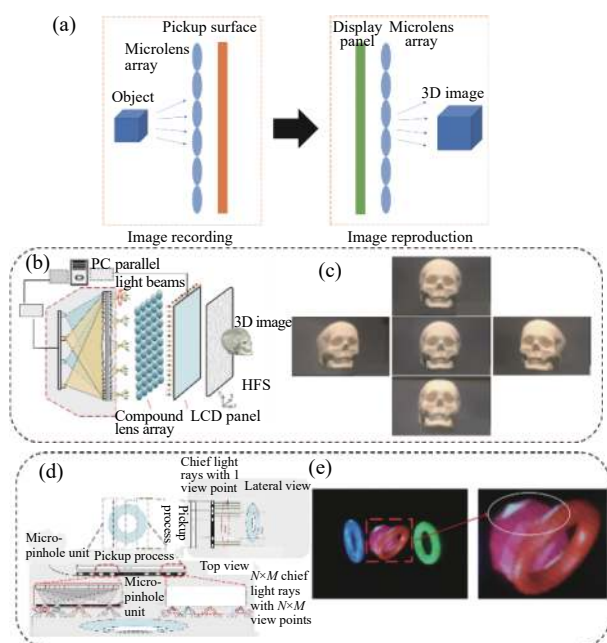


图 4 基于集成成像 3D 显示研究工作

Fig.4 Researches on 3D display based on integrated imaging

解决分辨率下降问题的一个主要途径是利用时分复用的方法, 用时间信息换空间信息。Q. H. Wang 等人^[58]提出的利用两块偏振方向互相垂直的偏振镜阵列、一个偏振开关和一块液晶面板组成的集成成像系统, 通过时序切换的方式实现无分辨率损失的双目视差 3D 图像。如图 4(b)、4(c) 所示, L. Yang 等人^[59]提出利用定向时序背光板的方法来实现复合透镜阵列的时分多路拼接, 从而产生具有较大发散角的密集点光源阵列, 以高帧速率在 LCD 面板上扫描不同图像元, 并与从定向时序背光板生成的特定平行光束进行同步, 确保了重建的 3D 图像具有更高的观看分辨率。解决分辨率下降的另一个方法是利用拼接获取更多信息量和显示幅面。2017 年, N. Okaichi 等人^[60]

提出了一种多液晶屏幕放大拼接的方法提高分辨率, 与使用单个 LCD 面板相比, 3D 显示图像质量明显提升且显示区域提高约 5.66 倍。2016 年 M. H. Song 等人^[61]提出一种由多个平面透镜阵列组成的曲面透镜阵列。通过调整透镜阵列的曲率半径, 将视场角扩大为传统平面透镜阵列的 2 倍。

除微透镜阵列外, 微孔阵列也能实现光场显示。如图 4(d)、4(e) 所示, 2018 年 L. Yang^[62] 等人提出了一种微孔 (pinhole) 阵列结构, 代替传统的狭缝光栅结构, 通过设计特殊的微针孔结构并结合全息功能屏, 增加视点密度使得运动视差更加平滑, 并且提高了视场角由原始的 20° 提高至 42.8°。

1.4 压缩光场显示

利用多层液晶屏对同一 3D 场景进行光场调制, 可实现压缩 3D 光场显示 (Compressive 3D light field display)。双层液晶屏显示原理如图 5(a) 所示。

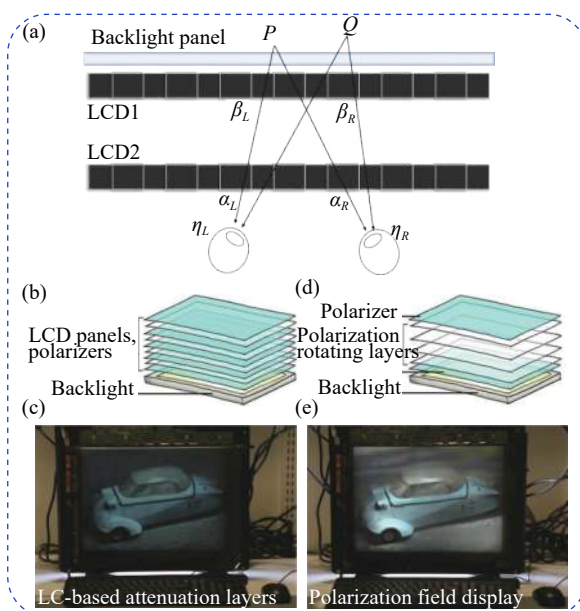


图 5 (a) 双液晶显示屏显示原理; (b)、(c) 基于衰减原理的多层 LCD 显示系统结构图; (d)、(e) 基于偏振原理的多层 LCD 显示系统结构图

Fig.5 (a) Schematic of dual LCD display; (b), (c) Structure of a multilayer LCD display system based on the attenuation layers; (d), (e) Structure of a multilayer LCD display system based on polarization layers

确定空间中 P 点位置的两条光线 η_L 、 η_R 可用两个显示屏上的像素 α_L 、 β_L 、 α_R 、 β_R 来实现。令背光源的光强为 I_{BG} , 各个像素的透过率分别为 $T(\alpha_L)$ 、 $T(\beta_L)$ 、 $T(\alpha_R)$ 、 $T(\beta_R)$, 那么人眼看到的两条光线的光强分别为:

$$I_L = I_{BG} \cdot T(\alpha_L) \cdot T(\beta_L), \quad (1)$$

$$I_R = I_{BG} \cdot T(\alpha_R) \cdot T(\beta_R). \quad (2)$$

因此,空间中的 P 点就可以被构造出来,同理另一位置的 Q 点也可以被构造出来^[63]。根据实际三维场景的光场强度分布,利用迭代算法控制每个像素的透过率,不断切换左右眼的视差图像,就可以通过层叠光线来实现三维场景的再现。

2010 年 D. Lanman 等人^[64]提出了一种基于自适应视差屏障的压缩光场显示,与传统视差屏障法不同,堆叠的 LCD 面板均可视为空间光调制器,利用时分复用的方式高速刷新 LCD 面板,实现了视差屏障能够根据显示内容的不同达到自适应的效果,较于传统视差屏障空间分辨率和显示亮度得到提高,视场角为 $10^\circ \times 10^\circ$ 。次年, G. Wetzstein^[65]提出利用层析法的原理,将 3D 物体进行层切,利用堆叠的 LCD 面板,其作用类似于多层光强衰减器,通过显示不同景深下的 3D 物体,重建 3D 的光场信息。由于基于光强衰减原理的多层液晶显示技术光利用率较低, D. Lanman^[66]还提出了基于偏振原理的压缩光场显示器概念,如图 5(c)、5(e) 所示,与基于衰减原理的多层光场显示不同,该装置中的多层 LCD 功能为电压控制的偏振器。如图 5(c) 所示,中间的 LCD 面板对光线进行偏振调制,最后一块偏振层对光线出射方向进行精准调制,重建 3D 图像。

无论是基于光强衰减原理或是偏振原理的多层液晶显示系统分辨率高,但视场角有限。通过增加显示器的层数或提高刷新率可以扩大视角。但是这两种方法都有局限性:增加显示器层数将增加硬件和计算复杂度,光学效率也会以指数形式降低。此外,目前 LCD 屏幕刷新率上限大约为 240 Hz,考虑到人眼响应时间决定了图像最低刷新频率为 60 Hz,通过时分复用方法,信息量也只能增加 4 倍。这对于追求高品质的裸眼 3D 显示是不够的。

2012 年, G. Wetzstein 等人^[67]在原先提出的基于光强衰减原理和偏振原理的多层液晶显示系统基础上,通过在多层 LCD 后部添加一块指向型背光板,提出了一项新的“张量”显示技术 (tensor display)。这种结构通过多层 LCD 屏幕和多帧率的光场分解,达到了扩大视场角的目的,视场角由原先的 $10^\circ \times 10^\circ$ 提高为 $50^\circ \times 20^\circ$ 。

此外,计算方法的突破成为压缩光场显示领域学者们研究的重点。2015 年 S. Z. Wang 等人^[68]提出了一种深度初始化方法:首先基于先验深度对光场进行

建模,再对已分层的光场图像进行优化。该方法计算周期更短,图像信噪比更小。J. H. Zhang 等人^[69]将光场的分解看成一个边界约束的非线性矩阵优化问题,并基于此提出了一个通用数学模型,既可用于基于衰减片的光场显示,也可用于基于偏振片的多层液晶 3D 显示图像。实验证明基于该算法的重构图像具有更好的图像保真度。D. Chen^[70]等人提出基于多层液晶的权重压缩光场显示,在光场显示图像优化处理时,依据观察者位置的变化,可以对 3D 图像进行优化编码,提高 3D 图像的显示质量,实现了视场角的扩大,视场角为 $70^\circ \times 60^\circ$ 。

1.5 向量光场显示

向量光场显示通过控制像素的发光方向和发散角,利用带有方向的光束重构空间三维物体。基于衍射光学的向量光场显示可对出射光的方向进行精准调控,像素尺寸和光束发散角足够小,进而模拟三维物体的出光光线。向量光场显示对集成光场显示中出现的分辨率下降、视场角较小等问题均有一定程度上的改善。

惠普实验室的 D. Fattal 等人^[71]提出了一种基于周期性纳米光栅的宽视角指向型背光设计。如图 6(a)~6(c) 所示,在准直光照射下,光栅像素的周期和取向决定视角方向。结合现有成熟的 LCD 技术,形成多视角 3D 立体显示。这种基于像素型纳米光栅的 3D 显示技术被 MIT Technology Review 评为“一种颠覆百年的 3D 显示技术”。

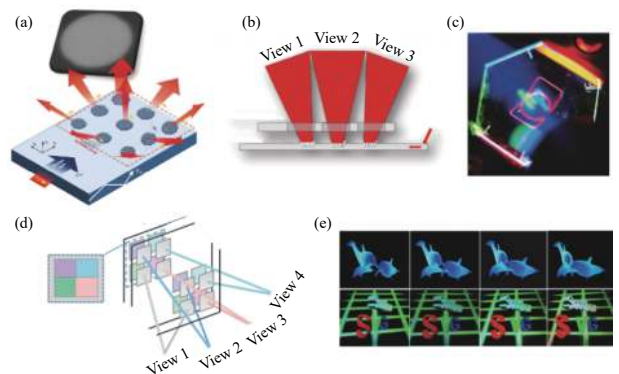


图 6 (a) D. Fattal 等人提出的 3D 显示研究; (b) 多视角调制方式示意图; (c) 实现的 3D 显示效果图^[71]; (d) W. Wan 等提出的基于像素型纳米光栅的向量光场显示^[72]; (e) 向量光场显示 3D 效果图

Fig.6 (a) 3D display research proposed by D. Fattal et al; (b) Schematic of multi-view modulation; (c) 3D display effect diagram^[71]; (d) Vector light field display based on pixel-based metagrating proposed by Wan et al^[72]; (e) 3D images based on vector light field display

笔者所在课题组 W. Wan 等人^[72]提出了一种基于像素化 metagrating 的位相与振幅分离式的视角调制方法。逐像素的 metagrating 结构设计赋予光向量更大自由度。通过理论计算会聚视点再现角间隔与像素化 metagrating 周期和取向变化的关系,发现像素内结构变化精度达到亚纳米级才能形成会聚视点。例如,为获得 0.7°的视角间隔,metagrating 的周期调控精度需达到 0.12 nm。针对亚纳米精度 metagrating 的制备难题,自主研制了紫外连续变频纳米光刻系统,可实现亚纳米调控精度的像素化 metagrating 制备。如图 6(d) 所示,为进一步验证 metagrating 对 3D 光场调制的正确性,研究团队制备了 6~32 in (1in=2.54 cm) 幅面,含不同结构参数的视角调制板。将视角调制板与液晶屏幕结合。在 LED 光源的照明下,实现了 16 个视角的精确调制,得到了视场角为 50°的真彩色 3D 显示效果,重现 3D 图像具有连续平滑的运动视差。

2 存在问题及解决方法

裸眼 3D 显示研究可分为用于视角/相位调控的硬件研究和用于内容兼容和深度优化的算法研究。软件算法可以缓解和弥补硬件不足,优化显示性能效果。目前 3D 显示的“卡脖子”问题仍然是硬件方面的不足。

硬件上的不足,是指视角分离方法和器件的设计与制备方法的不足与限制。主要表现为:眩晕感(辐辏调解矛盾)、图像串扰/鬼影、分辨率下降等问题亟待解决。此章节将主要介绍裸眼 3D 显示技术中存在的主要问题和解决方案。

2.1 图像串扰问题

图像串扰是指视角图像进入相邻视角观察区域,引起图像模糊和重影等问题。图像串扰是裸眼 3D 显示技术的共性问题,也是影响 3D 显示图样质量的关键性因素之一。严重的串扰现象将导致立体图像难以融合形成清晰的 3D 图像而失真,并导致视觉疲劳和观察不适。

P. C. Wang^[73] 曾将串扰定义为由于入射至左右眼的光线不完全分离,导致视角图像的光“泄露”到了另一只眼睛中,从而引起图像的重影,可用下列公式对串扰做出定义。

$$\text{Crosstalk}(\%) = \text{Leakage} / \text{signal} \times 100\%$$

F. L. Kooi 等人研究认为 5% 是图像串扰允许的最大值^[74], L. L. Wang 等人研究认为 5%-10% 是人眼

察觉图像鬼影的图像串扰阈值^[75], C. Y. Chiang 等人则认为人眼可以接受的最大图像串扰值是 20% 左右^[76]。可见不同系统和显示内容下,图像串扰允许值变化较大。一般地,人眼可接受的图像串扰与观察者视力情况、所显示图像对比度,图像纹理等因素有关。毫无疑问地,图像串扰值越小越好。

2015 年 S. K. Kim^[77] 利用动态眼球跟踪系统找到使用的观察视角,并将观察视角以外的像素变暗,使基于视差屏障的 3D 显示系统图像串扰降低至 7%。2017 年 J. L. Guo 等人^[78] 利用具有凹陷结构的导光背光板控制出射的照明光源位置与大小,使基于视差屏障的 3D 显示系统图像串扰降低至 1.8%。2018 年 L. Yang^[79] 利用微孔阵列与眼球追踪方法,将串扰控制在 7% 以下。

图像串扰的大小,本质上取决于多视角光线操纵能力的强弱。多视角图像的光强分布与视角调控板的设计和制备有很大关系。周期性结构对光线调制的出射光是平行光,在从一个视图到另一个视图的过渡区域中会出现串扰和重影。笔者所在课题组 W. Wan 等人^[72] 提出基于非周期结构实现会聚视点,如图 7 所示,实现全息采样 3D 显示,可极大地降低串扰,消除鬼影。

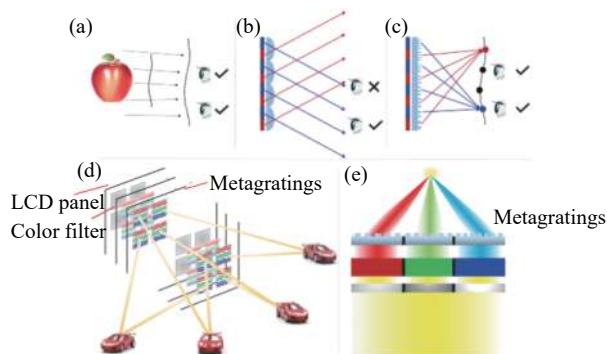


图 7 基于 metagratings 的向量光场工作原理:(a) 全息图波前重建的示意图;(b) 基于周期性结构的多视角 3D 显示工作原理;(c) 基于 metagratings 的全息采样显示原理;(d) LCD 屏,彩色滤光片及 metagratings 组合全彩色动态 3D 显示示意图;(e) metagratings 将出射的光束合并形成彩色像素的工作示意图

Fig.7 Schematic of the vector light field 3D display based on metagratings; (a) Schematic of the wavefront reconstructed by hologram; (b) Schematic of multiview 3D displays based on periodic structures; (c) Schematic of holographic sampling displays based on metagratings; (d) Schematic of the full-color video rate 3D displays by combining a LCD, color filters and the metagratings; (e) Schematic of the metagratings combining emitted beams to form a color pixel

2.2 空间分辨率与角分辨率的矛盾

所谓分辨率的降低,即对于具有 N 个视图的 3D 显示器,单个视图的图像分辨率降低至原显示器分辨率的 $1/N$ 。

已知人眼分辨率为 $1(\prime)$,对应明视距离 50 cm 处人眼最小可分辨结构尺寸为 0.15 mm。

根据衍射极限,可得 0.15 mm 大小光阑的衍射发散角为:

$$\Delta\theta = 1.22\lambda/D = 1.22 \times 500 \text{ nm}/0.15 \text{ mm} = 0.23^\circ$$

式中: λ 为工作波长,取中间值 500 nm。 D 为光阑大小。即裸眼 3D 显示系统理想情况下的单个视角发散角度应为 0.23° 。对应于 180° 可视窗口中需要 782 个水平视角。由此可知,仅具有水平视差的裸眼 3D 显示屏幕上面积为 $0.15 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ 的单个像素内需要实现 782 个视角(子像素),即像素数密度约为 $35\ 000/\text{mm}^2$ 。同时考虑水平视差和垂直视场,一个理想的裸眼 3D 显示需要比 2D 显示高 $782 \times 782 \approx 10^6$ 倍的显示信息量!

在屏幕像素数一定的条件下,裸眼 3D 显示的空间分辨率和角分辨率是一对辩证矛盾体。提高所有视角的空间分辨率可提高图像清晰度,但意味着视点数目减少,角分辨率下降。另一方面,提高角分辨率可扩大视场角或视角变换更连贯,却带来图像颗粒感增强,空间分辨率下降的问题。在总信息量一定的条件下,更多的信息是给予平面空间(提升清晰度)还是深度空间(提升视场角或景深),如同“鱼”和“熊掌”不能兼得,成为一对不可调和的矛盾体。

2017 年英国剑桥大学的 K. Li 等人^[80]提出了用于手机的全分辨率裸眼 3D 显示技术。如图 8 所示,每个液体透镜覆盖相邻两列像素图像。液体透镜时序的移动一个亚像素,导致前一刻进入左眼的像素在下一刻进入右眼,而前一刻进入右眼的图像像素在下一刻进入左眼。在人眼视觉暂留效应下,人眼能够在保持显示面板本身的图像分辨率的同时,获得物体深度信息。此外,该方法还可实现无分辨率损失的 2D/3D 显示模式切换。其左右视角图像串扰分别为 26% 和 41%,更小的液晶层和更连续的相位可进一步降低图像串扰的影响。

2.3 辐辏调节矛盾

多视角 3D 显示中最主要的问题之一是辐辏调

解矛盾引起的眩晕感。如图 8(a) 所示,人眼通过多个途径感知物体深度信息。“调节”是指单个眼睛具有调焦功能。睫状肌调节晶状体的曲率,使不同深度的观察物体在视网膜上都可呈现清晰图像。“辐辏”是指人眼观察远近物体时,双眼观看方向之间的角度。观察自然物体时,单眼调焦和双眼会聚过程获得的物体深度信息吻合。然而,观察 3D 显示屏幕时,单眼调焦获得的深度信息仍然是屏幕距离,而双目会聚过程提供的视差信息在屏幕前方或后方。两者信息不一致,即辐辏调节矛盾导致感知混乱并引起不适。

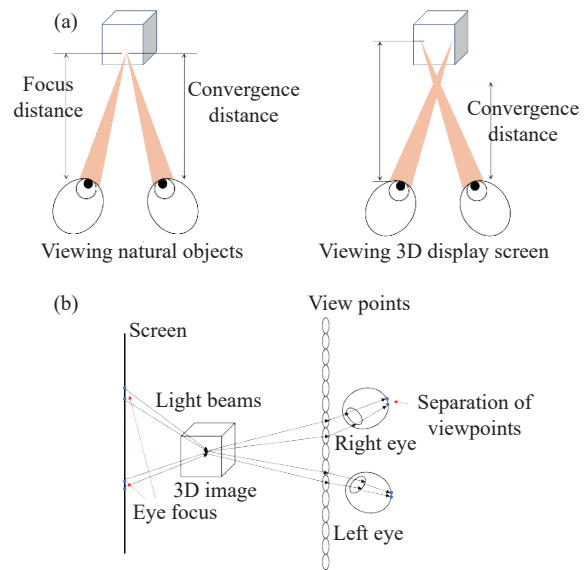


图 8 (a) 辐辏调节矛盾机理; (b) 超多视点分布 3D 显示原理示意图
Fig.8 (a) Schematic of vergence and accommodation conflict; (b) Schematic of super multi-view 3D display

B. C. Kan 等人^[81]提出视差分布,观看条件,亮度信息以及感知和认知不一致都会引起视觉疲劳。因此,他们提出了一种基于辐辏一致性的 3D 图像舒适度客观评估方法。其中 N 和 M 是图像的宽度和高度,而 $w_+(x, y)$ 和 $w_-(x, y)$ 分别表示标准化的正和负视差舒适度评估因子。通过计算舒适度评估因子的平均值来描述视觉舒适度。该方法的度量范围在 0 和 1 之间,其中 0 和 1 分别代表最佳和最差舒适度。如果超出舒适范围,则像素级归一化舒适度评估因子的平均总和将接近 1,反映该图像导致视觉疲劳。视差舒适度评估因子 VC 可表达为:

$$VC = \sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M \frac{w_+(x, y) + w_-(x, y)}{NM} \quad (3)$$

归一化的正视差舒适度评估因子为:

$$w_+ = \begin{cases} \frac{d_1 - d(x,y)}{\max(d_1 - d(x,y))}, d(x,y) \leq d_1 \\ \left(\frac{d(x,y)}{d_1}\right)^2, d_1 < d(x,y) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d(x,y)$ 是每个像素的视差, 而 d_1 是正视差舒适范围的边界值。基于尺度不变特征变换 (SIFT) 的稀疏匹配算法可用于获得每个像素的视差。

$$w_- = \begin{cases} \frac{d(x,y) - d_2}{\max(d(x,y) - d_2)}, d(x,y) \geq d_2 \\ \left(\frac{d(x,y)}{d_2}\right)^2, 0 < d(x,y) < d_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: d_2 是负视差舒适范围的边界值。 d_1 和 d_2 可以通过 t_1 和 t_2 的几何转换来获得, 而 t_1 和 t_2 则由实际的观看距离确定。 t_1 是屏幕后面的远侧深度, t_2 是屏幕前面的近侧深度。舒适水平视差范围内的视差比例分别由公式 (4) 和 (5) 计算。文中假设未交叉视差的值 (在屏幕后面) 为负, 而交叉视差的值 (在屏幕前面) 为正。

除了在数值上分析 3D 图像显示中的辐辏调节矛盾问题, 学者们进一步研究了减小辐辏调节矛盾的技术途径。

在具有多个会聚视点的裸眼 3D 显示技术中, 单个瞳孔可同时观看到两个以上的视角, 多条经过 3D 物体中同一点的光线同时进入人眼 (例如右眼), 成像于视网膜上, 根据光线可逆原理, 人眼会聚焦在 3D 物体的像素点上 (而不是显示屏上), 这样便实现了单眼调焦效果。当单个眼睛能够看到两幅以上视角图像时, 实现单眼视差效果, 即单眼聚焦的位置位于显示物体上, 与双眼聚合的位置相同, 减小了辐辏调节矛盾, 同时实现了连续的动态视差, 使观看效果更加自然。

H. Mizushina 等人^[82]在 2017 年对超视点分布 3D 显示技术进行了研究。通过跟踪人眼瞳孔大小, 晶状体屈光度等参数进行比较, 发现与双视差图像相比, 超视点分布视差图像增大了人眼调节的范围。人眼观察超视点分布视差图像时的辐辏-调节函数斜率与观察真实物体时的斜率相似, 表明超视点分布视差图像可以减少辐辏调节冲突, 缓解长时间观看引起的视疲劳。

由笔者所在课题组 W. Wan^[72]设计的基于 metagrating 对光线进行像素化相位调制以形成会聚视点。当视点密集时, 全息采样能够形成近似连续的光场。拥有四个可调参数 (周期, 方向以及 2 维位置信息) 的 metagrating 对光线有着良好的调控作用。如图 9 所示, 利用 16 个视点就使人眼在实际观看时能够单眼聚焦在虚拟 3D 图像上, 提高了角分辨率, 消除了辐辏调节矛盾的影响。

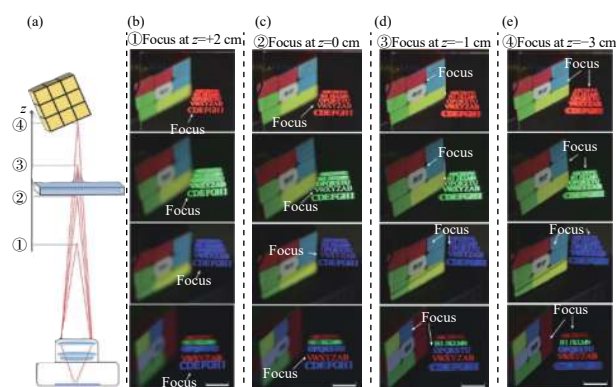


图 9 具有连续 3D 光场信息的全息采样 3D 显示; (a) 表示利用相机记录 3D 场景的过程示意图; (b)~(e) 表示不同深度下全息采样 3D 显示

Fig.9 Holographic sampling 3D display with a continuous 3D lightfield; (a)Schematic of recording process of a 3D scene by a digital camera; (b)-(e) Captured photos at different depth from a holographic sampling 3D display

3 总结与讨论

传统的基于视差屏障的 3D 显示技术由于其制备过程简单、成本较低、易于实现等优点最早得到应用。然而由于视差屏障存在对光线的物理遮挡, 导致所显示的 3D 图像亮度降低。与视差屏障的作用类似, 基于柱透镜阵列的 3D 显示技术由于显示亮度的提升, 成为目前较为成熟和普遍的 3D 显示方法。例如国外的 HOLOGRAFIKA 公司开发的 HOLOVizio、上海易维视等已成功开发出多款电视机、广告机、教育机。然而, 图像串扰等问题成为其技术推广的瓶颈。基于微透镜阵列的 3D 显示由于具有近似连续的视差信息 3D 图像重建、可实现全视差且易于制备等优点, 成为广大研究机构调研的对象。该技术通过透镜阵列记录和再现大量图像元, 可实现不同景深调

节。分辨率损失严重、视场角较小是限制其发展的主要因素。

传统的裸眼 3D 显示大多是采用几何光学的方式对显示屏像素的出射方向进行调控,由于制备精度与调控精度有限,得到的视角不连续、串扰大,容易产生视觉疲劳等缺点。向量光场显示将显示的视角图像像素逐一与纳米光栅像素匹配,经过纳米结构对光的方向性调制,视角图像被分离于不同的视点位置,重构 3D 图像。目前裸眼 3D 技术存在较多优缺点,如表 1 所示。相较于其他技术,向量光场显示对光调制方向更具任意性,视角调制范围更广、自由度更高,能够实现大视场角、全视差、超薄化的 3D 图像显示。

无论基于哪种方法,3D 显示的终极目标是真实再现自然物体所产生的光场。考察空间内任意点发出光线,可用 7 个独立变量表达: $P(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ 。略去传播损耗,需要至少 4 个独立变量描述该传播光

线: $P(x, y, \theta, \varphi)$ 。这个光函数包含了两个空间变量 (x, y) 和两个角度变量 (θ, φ)。因此,对应于 4 个独立变量的光线传播函数,一个 3D 显示器件需要具有至少 4 个独立可调控量的视角调控器件才能再现所要表达的光函数。

因此,无论视差屏障、柱透镜阵列、微透镜阵列还是纳米结构阵列,都需要至少 4 个独立可调控的结构参数实现光线重构。以基于微透镜阵列的光场显示为例,这种周期性的微纳结构元件中,位置参量 (x, y) 与角度参量 (周期,透镜曲率半径) 并不完全独立。因此出射光线具有方向性,但不能再现具有 4 个独立变量的光函数。而重构光函数的方法应是解耦位置参量和角度参量,实现真正 4 个独立变量的结构参数。换句话说,无论是基于宏观结构,还是微纳结构的视角调控板,其未来发展方向应是逐区域 (或逐像素) 的设计和优化,以实现光线的精准调控。

表 1 目前裸眼 3D 技术存在的优缺点

Tab.1 Advantages and disadvantages of current autostereoscopic 3D technologies

Glasses 3D technologies	Advantages	Disadvantages	Viewing angle/(°)	Reference
Parallax barrier 3D display	1. Easy to fabricate 2. Low cost	1. Low brightness 2. Limitation of observation area 3. Small range of motion parallax	18°-90°	[43-45]
Lenticular lens 3D display	1. Low cost	1. Severe crosstalk between images 2. Small range of motion parallax	56.5°-90°	[49][51]
Integral imaging 3D display	1. Full parallax 2. Easy to fabricate	1. Limited resolution 2. Small viewing angle 3. Limited depth range	26°-86°	[58-62]
Compressive light field display	1. Full parallax 2. High spatial resolution	1. Large thickness 2. Low light utilization 3. Small viewing angle	10°×10°-70×60°	[67-68][70]
Vector light field display	1. Full parallax 2. Large viewing angle	1. Hard to fabricate	90°-112°	[71-72]

随着加工手段的不断进步,基于金刚石车床的传统加工方法和激光直写的微纳加工平台为多视点 3D 显示的视角调控器件提供了多样的加工选择。加工平台在制备效率,加工幅面,形貌精度和数据处理上的进一步提升,具有非周期结构的大幅面视角调控器制备将成为可能。

从应用来看,眩晕感 (辐辏调解矛盾)、图像串扰/鬼影、分辨率下降等问题是目前科研工作者关注的焦点。然而如要成功应用于平板显示领域,除质轻体薄和低功耗外,还需解决 2D/3D 模式可切换、与新型显

示 (OLED, μ LED 等) 方式兼容性、柔性折叠屏幕等方面的应用层次需求。实际上,目前大多数技术不能兼顾所有问题。常常在解决一个问题的同时,又引入新的问题。基于 microLED 或 μ LED 屏幕的平面指向性光源,与向量光场显示结合的技术路径,利用时空复用提升显示信息量,通过光场算法、智能制造等领域的产研协同,有望在数年内突破相关技术瓶颈,在移动终端实现无视觉疲劳的裸眼 3D 显示。

另外,5G 时代的来临将为裸眼 3D 的信息传输提供飞跃性的性能提升。由 microLED 显示技术带来的

模块化设计, 通过将微小面板进行无缝拼接, 有效地扩大了显示系统的信息量。裸眼 3D 显示的普及发展, 不仅需要光学领域的技术变革, 更需要制造、芯片、算法、网络等整个产业链的协同合作, 使信息处理能力获得质的飞跃。未来的通信技术、microLED、微纳光学制备技术三者有机结合, 或将会引领整个 3D 显示产业的创新和生态链发展。

参考文献:

- [1] Marieb E N, Hoehn K N. Human Anatomy & Physiology[M]. New York: Pearson Education, 2007: 1-32.
- [2] Sando Y, Barada D, Yatagai T. Full-color holographic 3D display with horizontal full viewing zone by spatiotemporal-division multiplexing [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7622-7628.
- [3] Wang Qionghua, Ji Chaochao, Li Lei, et al. Dual-view integral imaging 3D display by using orthogonal polarizer array and polarization switcher [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 9-16.
- [4] Sando Y, Barada D, Yatagai T. Optical rotation compensation for a holographic 3D display with a 360 degree horizontal viewing zone [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(30): 8589-8595.
- [5] Yang Lin, Dong Haiwei, Alelaiwi Abdulhameed, et al. See in 3D: state of the art of 3D display technologies [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2016, 75(24): 17121-17155.
- [6] Lee Chang-Kun, Soon-Gi Park, Seokil Moon. Viewing zone duplication of multi-projection 3D display system using uniaxial crystal [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8458-8470.
- [7] Wheatstone C. Contributions to the physiology of vision-Part 1. On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1838, 128: 371-394.
- [8] Chang Joonho, Seung Ki Moon, Kihyo Jung, et al. Glasses-type wearable computer displays: usability considerations examined with a 3D glasses case study [J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 61(5): 670-681.
- [9] Kapteijns G, Bouchbinder E, Lerner E. Universal nonphononic density of states in 2D, 3D, and 4D glasses [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(5): 055501-055506.
- [10] Pang T Y, Lo T S T, Ellena T, et al. Fit, stability and comfort assessment of custom-fitted bicycle helmet inner liner designs, based on 3D anthropometric data [J]. *Applied Ergonomics*, 2018, 68(4): 240-248.
- [11] Feng Zhuming, Jiang Fei, Shen Ruimin. Virtual glasses try-on based on large pose estimation [J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 131: 226-233.
- [12] Lu Yang, Wang Shigang, Zhao Wenting, et al. Technology of virtual eyeglasses try-on system based on face pose estimation [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 582-588.
- [13] Liao Hongen, Makoto Iwahara, Nobuhiko Hata, et al. High-quality integral videography using a multiprojector [J]. *Optics Express*, 2004, 12(6): 1067-1076.
- [14] Zhao Dong, Su Baiquan, Chen Guowen, et al. 360 degrees viewable floating autostereoscopic display using integral photography and multiple semitransparent mirrors [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9812-9823.
- [15] Teng Dongdong, Xiong Yi, Liu Lilin, et al. Multiview three-dimensional display with continuous motion parallax through planar aligned OLED microdisplays [J]. *Optics Express*, 2015, 23: 6007-6019.
- [16] Zhou Mingcai, Wang Haitao, Li Weiming. A unified method for crosstalk reduction in multiview displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(6): 500-507.
- [17] Wanner S, Goldluecke B. Variational light field analysis for disparity estimation and super-resolution [J]. *IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell*, 2014, 36: 606-619.
- [18] Zhang Jianlei, Wang Xiaorui, Wu Xiongxiang, et al. Wide-viewing integral imaging using fiber-coupled monocentric lens array [J]. *Optics Express*, 2015, 23(18): 23339-23347.
- [19] Hua Hong, Bahram Javidi. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [20] Takaki Y, Yamaguchi Y. Flat-panel see-through three-dimensional display based on integral imaging [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1873-1876.
- [21] Lee Chang-Kun, Moon Seokil, Lee Seungjae, et al. Compact three-dimensional head-mounted display system with Savart plate [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19531-19544.
- [22] Hong Keehoon, Yeom Jiwoon, Jang Changwon, et al. Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 127-130.
- [23] Yeom Han-Ju, Kim Hee-Jae, Kim Seong-Bok, et al. 3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32025-32034.
- [24] Li Gang, Lee Dukho, Jeong Youngmo. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [25] Chen Zhidong, Sang Xinzhu, Lin Qiaojun, et al. A see-through holographic head-mounted display with the large viewing angle [J]. *Optics Communications*, 2017, 384: 125-129.
- [26] Zhu Long, Wang Jian. Arbitrary manipulation of spatial

- amplitude and phase using phase-only spatial light modulators [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7441.
- [27] Chen Zhidong, Sang Xinzhu, Lin Qiaojuan, et al. Acceleration for computer-generated hologram in head-mounted display with effective diffraction area recording method for eyes [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(8): 080901.
- [28] Jia Haijuan, Ma Anduo, Wang Huixue. Statistical analysis of people's use of mobile phones [J]. *KeJiFeng*, 2019, 23: 241. (in Chinese)
- [29] Xie Wei, Wang Yazhou, Deng Huan, et al. Viewing angle-enhanced integral imaging system using three lens arrays [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(1): 011101.
- [30] Yan Zhiqiang, Yan Xingpeng, Jiang Xiaoyu, et al. Integral imaging based light field display with enhanced viewing resolution using holographic diffuser [J]. *Optics Communications*, 2017, 402: 437–441.
- [31] Zhang Xinran, Chen Guowen, Liao Hongen. High-quality see-through surgical guidance system using enhanced 3-D autostereoscopic augmented reality [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2017, 64(8): 1815–1825.
- [32] Fan Zhencheng, Chen Guowen, Xia Yan, et al. Accurate 3D autostereoscopic display using optimized parameters through quantitative calibration [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(5): 804–812.
- [33] Fan Zhencheng, Zhang Sen, Weng Yitong, et al. 3D quantitative evaluation system for autostereoscopic display [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1185–1196.
- [34] Johnson P V, Parnell J A, Kim J, et al. Dynamic lens and monovision 3D displays to improve viewer comfort [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11808–11827.
- [35] Hahn J, Kim H, Lim Y, et al. Wide viewing angle dynamic holographic stereogram with a curved array of spatial light modulators [J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12372–12386.
- [36] Ting Chih-Hung, Chang Yu-Cheng, Chen Chun-Ho, et al. Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922–7928.
- [37] David Fattal, Zhen Peng, Tho Tran, et al. A multi-directional backlight for a wide-angle glasses-free three-dimensional display [J]. *Nature*, 2013, 495(7441): 348–351.
- [38] Li Junchang, Tu Han-Yen, Yeh Wei-Chieh, et al. Holographic three-dimensional display and hologram calculation based on liquid crystal on silicon device [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): G222–G231.
- [39] Fan Zhencheng, Weng Yitong, Chen Guowen, et al. 3D interactive surgical visualization system using mobile spatial information acquisition and autostereoscopic display [J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2017, 71: 154–164.
- [40] Geng Jason. Three-dimensional display technologies [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456–535.
- [41] Son J Y, Lavid B. Three-dimensional imaging method based on multiview images [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(1): 125–140.
- [42] Ives F E. A novel stereogram [J]. *J Franklin Inst*, 1902, 153: 51–52.
- [43] Peterka T, Kooima R L, Sandin D J, et al. Advances in the Dynallax solid-state dynamic parallax barrier autostereoscopic visualization display system [J]. *IEEE Trans Vis Comput Graph*, 2008, 14: 487–499.
- [44] Kim Se-Um, Kim Jiyeon, Suh Jeng-Hun, et al. Concept of active parallax barrier on polarizing interlayer for near-viewing autostereoscopic displays [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25010–25018.
- [45] Yoon S K, Khym S, Kim H W, et al. Variable parallax barrier spacing in autostereoscopic displays [J]. *Optics Communications*, 2016, 370: 319–326.
- [46] Hess W. Stereoscopic picture: US, US1128979 [P]. 1915-02-16.
- [47] Kim B-S, Lee S-C, Kim K-W, et al. Three dimensional analysis of the autostereoscopic display with an array of lenticulars [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2015, 612(1): 46–55.
- [48] Yang Le, Sang Xinzhu, Yu Xunbo, et al. Demonstration of an improved integral imaging with large viewing angle based on two crossed lenticular lens combined arrays [J]. *Optik*, 2018, 172: 578–584.
- [49] Huang Tianqi, Han Boxuan, Zhang Xinran, et al. High-performance autostereoscopic display based on the lenticular tracking method [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20421–20434.
- [50] 侯华为. 一种基于柱状透镜裸眼3D的户外广告机: 中国, 206516297 U[P]. 2017-09-22.
- [51] 张毅军. 一种裸眼3D广告机: 中国, 207115917 U[P]. 2018-03-16.
- [52] Tibor Balogh, Holografika Inc. <https://holografika.com/722rc/>.
- [53] 上海易维视科技有限公司. http://www.evistek.com/e5788e1f-5b15-32d3-3116-f7cc4fb69e15/product_TV_98inch.shtml.
- [54] Ting Chih-Hung, Chang Yu-Cheng, Chen Chun-Ho, et al. Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922–7928.
- [55] Feng Jinling, Wang Yijun, Liu Shiyu, et al. Three-dimensional display with directional beam splitter array [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1564–1572.
- [56] Peter Krebs, Liang Haowen, Fan Hang, et al. Homogeneous free-form directional backlight for 3D display [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 112–117.
- [57] Lippmann G. Épreuves réversibles. Photographies intégrales [J].

- C. R. Acad. Sci.*, 1908, 146: 446–451.
- [58] Wang Qionghua, Ji Chaochao, Li Lei, et al. Dual-view integral imaging 3D display by using orthogonal polarizer array and polarization switcher [J]. *Optics Express*, 2016, 24(1): 9–16.
- [59] Yang Le, Sang Xinzhu, Yu Xunbo, et al. Viewing-angle and viewing-resolution enhanced integral imaging based on time-multiplexed lens stitching [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15679–15692.
- [60] Okaichi N, Miura M, Arai J, et al. Integral 3D display using multiple LCD panels and multi-image combining optical system [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2805–2817.
- [61] Song M H, Jeong J S, Erdenebat M U, et al. Integral imaging system using an adaptive lens array [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6399–6403.
- [62] Yang Le, Sang Xinzhu, Yu Xunbo, et al. Demonstration of a large-size horizontal light-field display based on the LED panel and the micro-pinhole unit array [J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 140–145.
- [63] Su Chen, Li Haifeng. Review of research on light field 3D display applied to mixed reality [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, 28(6): 905–912. (in Chinese)
- [64] Douglas Lanman, Matthew Hirsch, Yunhee, et al. Content-adaptive parallax barriers: optimizing dual-layer 3D displays using low-rank light field factorization [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(6): 1–10.
- [65] Gordon Wetzstein, Douglas Lanman, Wolfgang Heidrich, et al. Layered 3D: tomographic image synthesis for attenuation-based light field and high dynamic range displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 95.
- [66] Douglas Lanman, Gordon Wetzstein, Matthew Hirsch, et al. Polarization fields: dynamic light field display using multi-layer LCDs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 1.
- [67] Wetzstein Gordon, Lanman Douglas R, Hirsch Matthew Waggener, et al. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 80.
- [68] Wang Shizheng, Zhuang Zhenfeng, Phil Surman, et al. Two-layer optimized light field display using depth initialization[C]//2015 Visual Communications and Image Processing (VCIP), 2015: 1–4.
- [69] Zhang Jiahui, Fan Zhencheng, Sun Dawei, et al. Unified mathematical model for multilayer-multiframe compressive light field displays using LCDs [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2019, 25(3): 1603–1614.
- [70] Chen Duo, Sang Xinzhu, Yu Xunbo, et al. Performance improvement of compressive light field display with the viewing position dependent weight distribution [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29781–29793.
- [71] David Fattal, Zhen Peng, Tho Tran, et al. A multi-directional backlight for a wide-angle glasses-free three-dimensional display [J]. *Nature*, 2013, 495: 348–351.
- [72] Wan Wenqiang, Qiao Wen, Pu Donglin, et al. Holographic sampling display based on metagratings [J]. *ISCIENCE*, 2020, 23(1): 100773.
- [73] Wang Pei-Chia, Hwang Sheue-Ling, Huang Hsin-Ying, et al. System cross-talk and three-dimensional cue issues in autostereoscopic displays [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2013, 22(1): 013032.
- [74] Frank L Kooi, Alexander Toet. Visual comfort of binocular and 3D displays [J]. *Displays*, 2004, 25(2-3): 99–108.
- [75] Wang Lili, Kees Teunissen, Tu Yan, et al. Crosstalk evaluation in stereoscopic displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(4): 208–214.
- [76] Chiang Chieh Yao, Chen Kuo Tsung, Chang Yu Cheng, et al. The effect of crosstalk for stereoscopic 3D "dynamic" moving images [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2009, 40(1): 808–811.
- [77] Kim Sung-Kyu, Yoon Ki-Hyuk, Yoon Seon-Kyu, et al. Parallax barrier engineering for image quality improvement in an autostereoscopic 3D display [J]. *Optics Express*, 2015, 23(10): 13230–13244.
- [78] Lv Guojiao, Zhao Baichuan, Wu Fei, et al. Autostereoscopic 3D display with high brightness and low crosstalk [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2792–2795.
- [79] Yang Le, Sang Xinzhu, Yu Xunbo, et al. A crosstalk-suppressed dense multi-view light-field display based on real-time light-field pickup and reconstruction [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 34412–34427.
- [80] Li Kun, Ali Özgür Yöntem, Deng Yuanbo, et al. Full resolution auto-stereoscopic mobile display based on large scale uniform switchable liquid crystal micro-lens array [J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 9654–9675.
- [81] Kan Bochao, Zhao Yan, Wang Shigang. A 3D video visual comfort evaluation method on the consistency of accommodation and convergence [J]. *Optoelectronics Letters*, 2017, 13(3): 233–236.
- [82] Haruki Mizushima, Junya Nakamura, Yasuhiro Takaki, et al. Super multi-view 3D displays reduce conflict between accommodative and vergence responses [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(12): 747–756.