

特色专题

光场显示研发进展

彭玉颜¹, 康家欣¹, 周雄图^{1,2*}, 张永爱^{1,2}, 郭太良^{1,2}, 吴朝兴^{1,2}

摘要 光场显示具有数据量小、结构简单、易于集成化等优点,使其在军事、医学、教育、娱乐等领域具有巨大的应用潜力。然而,全彩色、大视角、高分辨率、大景深的光场显示受限于高分辨率显示器、光调制器、智能算法、超高速计算机等技术的发展。近年来,人们致力于探索新的设计策略、新的器件结构和潜在的应用。综述了三维(3D)显示技术的发展与分类以凸显出光场显示的优势;阐述了光场显示的概念与意义;介绍了光场显示中的集成成像光场显示、投影光场显示和层光场显示的发展及主要技术挑战。强调了在新形势下对光场显示的新要求,并提出对中国发展光场显示的建议,即加强技术创新平台建设,推动光场显示与其他前沿技术的融合,重点攻克关键技术和产业链瓶颈,促进产学研合作,以确保在全球高科技领域的竞争力。

关键词 3D显示;光场显示;集成成像光场显示;投影光场显示;层光场显示

三维(three-dimensional, 3D)显示器是最有前途的显示器之一,可以提供逼真的3D图像,并有可能改变娱乐、教育、医疗保健、制造业和其他领域使用的消费电子产品^[1-2]。根据是否存在显示机理和人眼视觉生理之间的矛盾,可将3D显示分为助视/光栅3D显示和真3D显示2大类。助视/光栅3D显示利用双目视差的原理,借助光栅、柱透镜等精密光学调控元件的分光作用,使左右眼接收到具有一定视差的图像,再通过大脑的融合实现立体观感^[3]。然而,由于只提供了单一视差深度图像,存在辐辏调节矛盾,长时间观看会产生视觉疲劳、眩晕等不适感^[4]。真3D显示是通过各种手段在空间里直接显示出物体图像或者物体在一定空间内成再现图像,不存在显示机理与人眼视觉生理之间的矛盾,没有立体观看疲

劳^[5]。真3D显示目前大致包括全息3D显示、光场3D显示(简称“光场显示”)和体3D显示。自1948年Gabor提出全息显示技术^[5]及激光器的出现,全息3D显示得到快速发展。全息3D显示是利用光的干涉原理将3D物体发出光线的振幅和相位信息记录下来,然后利用光的衍射原理将其再现出来。如果能充分地记录3D物体的所有信息,那么全息3D显示理论上可以恢复现实场景的所有视觉信息,实现理想的3D显示。然而,现实场景的所有视觉信息是非常庞大的,对信息处理、传输的要求非常高,因此,要实现全彩色、高分辨率的动态全息3D显示需要信息处理能力极其强大的计算机。体3D显示利用显示源像素或是电离微粒子在空间中构建真实的体像素点,再现的3D图像立体感强^[6]。这种方法原理简单且易于批量化制备,但是其显示的3D图像尺寸比较小,要实现大尺寸的、体像素点不会相互遮挡的体3D显示是该技术的难点。相比于全息3D显示和体3D显示,

1. 福州大学物理与信息工程学院,福州 350108

2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室,福州 350108

收稿日期:2024-03-12;修回日期:2024-11-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB3606603);福建省光电子信息科技创新实验室项目(2021ZZ130);福建省自然科学基金项目(2021J01577)

作者简介:彭玉颜,博士研究生,研究方向为3D显示,电子邮箱:yuyan_peng@sina.com;周雄图(通信作者),教授,研究方向为信息显示技术,电子邮箱:xizhou@fzu.edu.cn

引用格式:彭玉颜,康家欣,周雄图,等. 光场显示研发进展[J]. 科技导报, 2025, 43(2): 34-41; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.03.01109

光场显示具有数据量小(只关注物体表面的光强度)、结构简单、更易实现等优点,使得其获得更多研究人员的青睐^[7-8]。根据重建光场数据的方式不同,光场显示技术可以分为集成成像光场显示、投影光场显示和层光场显示3大类。

1 光场显示概念与意义

1.1 光场显示概念

“光场”的概念最初是1939年由Gershun^[9]提出的,1996年,Levoy等^[10]和Gortler等^[11]等将光场的概念具体化,提出了如图1(a)所示的4D光场渲染理论。4D光场渲染理论是在不考虑光线的方向和波长,只考虑方向和位置的条件下,用 (u, v) 和 (s, t) 表示空间中不同位置的2个平面的坐标系,定向线将 uv 平面上的点连接到 st 平面上的一个点^[4]。4D光场渲染理论的出现,促进了光场显示的发展。光场显示原理如图1(b)所示,主要包含光场采集和光场重构2个阶段。光场采集阶段是指3D目标物体发出的任意光线被采集平面1和采集平面2记录;光场重构阶段是通过调制平面对光线的方向角进行调制,实现光场采集的逆过程,重构出目标物体原始光场被采集的光线。光场显示可以再现3D物体发出的光线的强度、颜色和方向,如果光场采集的数据足够大,这种方式能完美地拟合出原始场景的全部光线分布,能获得很好的3D效果。相比于视差型3D显示技术,光场显示能给观看者提供物理景深和心理景深,

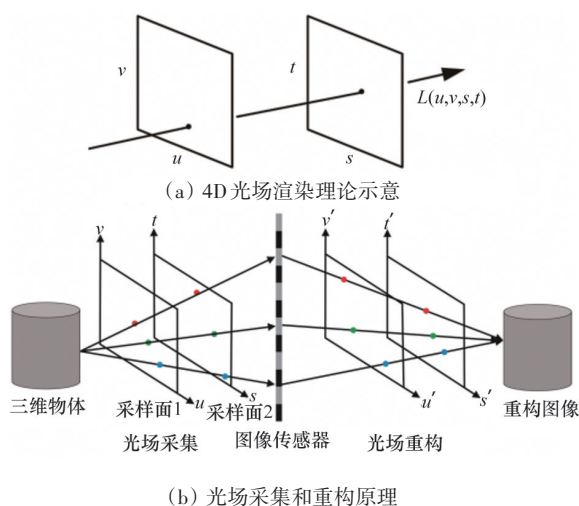


图1 光场显示原理

不存在显示机理与人眼视觉生理之间的矛盾,观看者不会产生立体观看疲劳。

1.2 光场显示的意义

元宇宙的兴起,带动了近眼显示产业的发展,而光场显示是实现近眼显示3D效果的重要技术之一。光场显示技术是利用光电传感器模拟人的眼睛记录真实的3D场景,然后利用特殊显示和光控器件重新构建3D物体的光场信息,这些光场信息能够给观看者提供真实的、具有连续视角的3D效果。重新构建3D物体的光场信息越多,光场显示的3D效果就越优越,但这些信息量比常规平面显示器的信息量大了好几个数量级,因此,对现有显示技术提出了新的挑战。

中国在超高分辨率显示屏、光场显示技术等方面已具有较好基础,显示技术已经经历了轻薄化和大型化的发展阶段;但是应该看到,中国在光场显示技术领域还存在一些关键技术短板和产业链条断点,如超高分辨率3D显示、3D图像重构模型的快速建模、3D图像实时重构与播放、人工智能算法等关键问题。为避免光场显示技术与产业再次落后于国外,中国应该加强光场显示技术的研发,这不仅是一个技术性的问题,同时也是一个战略性的问题。

2 光场显示的发展及主要技术挑战

光场显示发展至今,性能已经得到很大的提升。

2.1 集成成像光场显示

集成成像光场显示起源于集成摄影技术,由Lippman于1908年提出^[12]。集成成像光场显示技术包含记录阶段与重构阶段。在记录阶段,3D物体的不同视角的信息通过微透镜阵列成像在记录屏上形成微单元图像阵列;利用记录设备,如电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)记录微单元图像阵列信息,并将其转化成数字微单元图像;在重构阶段,经过计算机对这些数字微单元图像做预处理,最后将其输出到高分辨率的显示设备上^[13]。

通常采用3D图像分辨率 R_i 、观看视角 Ω 、3D图像景深 ΔZ_m 来分析、表征集成成像光场显示系统(图2),由这3个观看参数描述集成成像光场显示系统的特征得到公式(1)^[6]:

$$R_d^2 \Delta Z_m \tan\left(\frac{\Omega}{2}\right) = R_d \quad (1)$$

式中, R_d 为显示屏的分辨率。

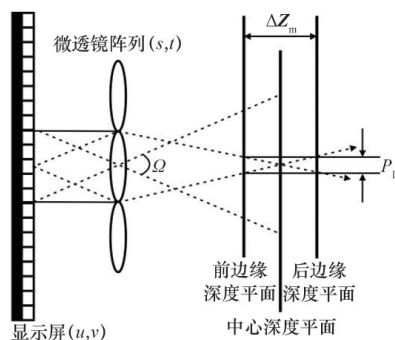


图2 集成成像光场显示系统的观看参数示意

由式(1)可知,集成成像光场显示的 R_d 、 Ω 、 ΔZ_m 相互制约;当 R_d 不变时,这3个参数其中1个提升必会导致其他2个参数的下降,所以想同时提升这3个参数,首先要提高显示屏的分辨率。由于显示屏分辨率低、透镜自身像差等的影响,集成成像光场显示仍存在一些技术挑战。科研人员针对集成成像光场显示存在的技术挑战(如3D图像分辨率低、观看视角窄、3D图像景深小、串扰严重等)进行了大量的研究^[14-15]。目前,已有学者成功利用2块拼接的8K液晶显示面板和一个光整形扩散屏再现高分辨率3D图像^[16];利用曲面微透镜阵列配合曲面显示屏实现 $80^\circ \times 50^\circ$ 视场角的集成成像光场显示^[17];通过多焦距微透镜阵列来增加中心深度平面的数量,将集成成像系统的景深从24.5 mm增加到190 mm等^[18]。但是要实现高分辨率、大视场角、大景深的集成成像光场显示,还需要进一步研究。

提高集成成像光场显示系统的3D图像分辨率,最简单的方法是减小微透镜单元的节距,但是这种方法会降低微透镜单元所覆盖像素的数量,这将减少进入微透镜单元的光线数,进而降低3D重构图像的质量。这种方法虽然简单,但是需要配备超高分辨率的显示屏与高精度微透镜阵列才能设计出高质量的3D重构图像且两者的对准要求极高。值得注意的是,杂散光会穿过相邻微透镜之间的间隙,进而降低集成成像的重构效果。通过合理地排布微透镜阵列/增加掩膜,减小相邻微透镜之间的空白区域是

一种简单有效的降低集成成像光场显示系统的串扰,提升重构图像分辨率的手段^[19]。2020年,Wen等^[20]采用六角形排列微透镜阵列以提高集成成像系统投影像素的有效性,实现了在不显著减少视角数的情况下提高视角图像的分辨率。这种方法虽然简单且成本低,但是重新排布微透镜阵列需要配套的微单元图像;此外,增加掩膜能降低杂散光的影响,但这也导致系统总体亮度下降,需要增加配备高亮度的显示屏才能保证3D重构图像的质量。值得一提的是,随着人工智能的兴起,可以利用其(如深度神经网络)优化系统的视觉分辨率,2024年,Yang等^[21]提出了一种基于深度神经网络的分辨率增强方法,除了利用全息功能屏和实现元素图像阵列渲染的平衡分辨率外,还可以提高每个重构视图的显示质量。这将是促进集成成像光场显示技术商用的有效手段^[22-24]。

集成成像光场显示的观看视角是由微透镜阵列与显示屏之间的距离决定的,这个距离通常较小(一般等于微透镜焦距),这就导致观看视角通常小于 10° 。扩展系统的观看视角能极大地提高集成成像光场显示的重构效果。采用曲面微透镜阵列与曲面显示器结合是最常用的提高系统视场角的手段^[25]。2023年,Wang等^[17]提出的一种基于多个虚拟相机阵列的曲线计算机生成集成成像方法,能为弯曲集成成像系统生成正确的弯曲微单元图像阵列,使得系统呈现出逼真的3D图像。曲面显示屏需要显示正确的弯曲微单元图像,这与曲面显示屏的弯曲关系是一致的,否则显示出来的重构图像将会失真。在系统的基础上配合偏振开关与时分复用技术,利用人眼视觉暂留效应通常能将系统的观看视角增大1倍;这种方法对显示屏的刷新率要求较高,要实现实时集成成像光场显示系统的难度很大。

提高集成成像光场显示系统的景深,主要是通过增加系统中心深度平面的个数,即要求微透镜阵列具有多种焦距。常见的有焦距固定不变的固体式多焦距微透镜阵列^[26]与焦距可调节的调谐式多焦距微透镜阵列^[27-28]。前者焦距固定,同一个微透镜阵列中具有 n 种焦距,实现了 n 个中心深度平面,但重构图像分辨率将下降为原来的 $1/n$,中心深度平面个数越多则牺牲越多的分辨率;后者常使用时分复用技

术实现中心深度平面的切换,这将限制其在优质实时3D系统的使用。2022年,Wang等^[29]提出了一种用于调节光场成像系统景深的低压驱动的液晶微透镜阵列,该液晶透镜具有高质量的干涉环和可调谐的焦距,基于该结构的集成成像系统可以清晰地捕获深度增大的3D信息。值得一提的是,在优化光学器件结构的基础上,增加智能图像处理也能有效地扩展集成成像系统的景深^[30]。

此外,通过优化微透镜阵列的结构并结合定向扩散屏、掩模、全息功能屏、全息光学元件等器件也能实现扩展集成成像光场显示观看效果的目的^[31-34]。

2.2 投影光场显示

投影光场显示最初由Balogh等^[35]在2007年提出,其利用64台投影仪实现50°观看视角的投影光场显示系统。目前科研人员已实现了最大空间分辨率约为33万像素的光场3D图像再现^[36]。根据投影光场显示系统使用投影仪的数量将其分为单个投影仪式(又称为扫描式光场显示)与投影仪阵列式。2023年,Yamauchi等^[37]提出了基于时分复用的新型光场显示技术,该显示器由高速投影仪和无源屏幕组成;高速放映机通过高速改变光源的波长,将单色图像投射到屏幕上;屏幕具有光谱特性,通过色散在水平方向上根据投影图像的波长向不同视点传送图像。

单个投影仪式光场显示原理如图3(a)所示,高速投影仪作为光场的 (u,v) 平面,定向扩散器则是光场的 (s,t) 平面。高速投影仪投影出各方向图像,通过定向扩散器的高速旋转,重构出3D物体任意方向的角度信息。这种采用时分复用的光场显示系统具有高分辨率和大视角的优点,但是其依赖于人眼视觉的残留效应,必须通过提高图像刷新率才能带来更好的3D效果^[38]。此外,高速旋转的定向扩散器是一种机械运动部件,这也会影响光场显示系统的可靠性和稳定性。投影仪阵列式光场显示(图3(b))利用在不同空间的投影仪相互交叠的空间像素实现3D光场的空间拼接^[39]。

根据投影光场显示系统的几何关系可知,其观看视角可由式(2)计算得到。

$$\theta = 2 \left\{ \arctan \left[\frac{(N-1) \times P}{2d_1} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, P 是相邻投影单元的间隔, N 是投影单元的数

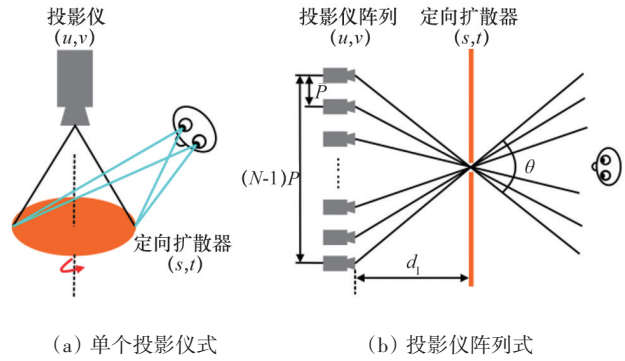


图3 投影光场显示原理

目, d_1 是投影阵列与定向扩散屏的距离, θ 是显示系统的观看视角。

P 太大会导致3D图像分辨率下降, d_1 过小会影响光线的入射,所以系统观看视角的提高有赖于 N 的增大。此外,使用大量的高分辨率投影仪能有效提高系统的观看角度,也使得系统更适合显示大尺寸、高分辨率的3D场景。但大量投影仪的使用增加了系统的成本。值得一提的是,定向扩散器在水平方向的发散角小,但在垂直方向的发散角大,限制光场显示系统的垂直视差,进而降低3D显示的质量。

2.3 层光场显示

层光场显示(也称为叠层光场显示)如图4所示,由背光板与多个不共面的液晶显示面板/亚克力板与光学胶片组成。其中,显示层1和显示层2分别作为光场的 (u,v) 平面和 (s,t) 平面;控制不同层的像素点对光的透过率可以控制光线的方向,所以通过组合不同的像素,层光场显示可以在一定空间范围内的

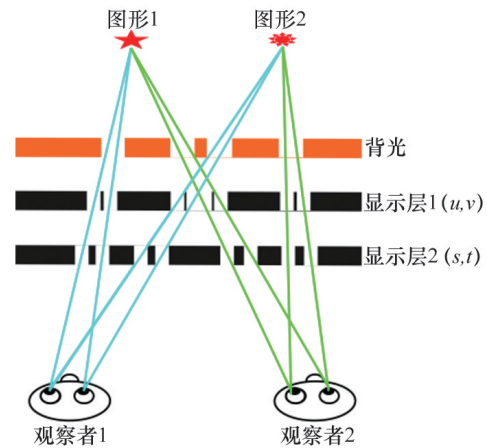


图4 层光场显示原理

任意位置重建3D图像。目前已有科研人员成功在 $46.3 \times 28.9 \text{ cm}^2$ 的显示面积上构建了设计空间分辨率约为 640×360 、角度分辨率为 166×166 、视角为 $45^\circ \times 45^\circ$ 的超分辨率全视差3D光场显示器^[40]。层光场显示的层数越多则系统的景深越大,3D效果就越优质。2021年,Zhu等^[41]提出了利用聚合物稳定胆甾质织构快门和数字微镜器件实现多平面投影的压缩光场显示,该系统可以在保持高亮度的同时增加物理堆叠层的数量,从而实现大景深和高保真的3D图像。但是液晶及偏振片的低透光率会极大地降低背光光线的利用率;且随着层数的增加,系统光线的损失将加剧,进而降低光场显示的3D效果。在技术上,通过结合复用技术与动态背光模块等光学器件来模拟多层液晶面板的对像素点控制,可以有效地解决这个问题^[42]。动态背光模块可有效地操控光线,提高光线的利用率;此外,该模块可作为层光场显示系统的一层,减少了液晶面板的层数,进而弱化了光的衰减、降低了系统的复杂度、增大了观看视角。随着显示技术的快速发展,能胜任动态背光模块的物理器件很多,如具有高对比度、长寿命的可实现大于8K分辨率的迷你发光二极管(Mini-LED),或者是自发光的能轻松实现8K分辨率的具有高刷新率、低功耗优点的微型有机发光显示器(organic light emitting display, Micro-OLED),或是高亮度、高光电转换效率、高色彩饱和度的量子点等。这些性能优异的显示技术虽可以推动层光场显示的发展,但是层光场显示在深度方向的不连续导致3D图像失真是不可忽略的一个问题。针对这一问题,可增加计算机辅助设计来实现3D深度图像的保真,这也是层光场显示值得深入研究的一个方向。

随着显示器件与工艺技术的快速发展,出现了一种新型层光场显示——矢量光场显示,它由定向背光板和液晶显示面板/投影仪组成。定向背光板由光源与光波导组成,每个像素的光线方向与发散角由高精度光波导控制,通过控制这些光线的方向可以实现3D场景的重建^[43-45]。此外,利用时间复用技术能有效地利用时间冗余来增加显示器的信息量。2023年,Hua等^[46]提出了一种时分复用的矢量光场显示器,利用时间冗余来增加显示器的信息量,构建的矢量光场显示系统水平视野达到 51° 。

3 光场显示的新形势与新要求

随着第5代/第6代移动通信、物联网和人工智能等新信息技术的快速发展,信息显示发生了深刻的变化。中国显示产业已跻身世界一流,从“跟跑”“并跑”,到实现了“领跑”。“跟跑”是有方向的,但是“领跑”,该往哪个方向跑,对中国显示企业的创新实力和未来趋势的判断力提出了更高的要求^[47]。新型3D显示技术正朝着视觉更自然、用户更友好的方向发展。因此,3D显示器由于其更强的真实感而得到很多关注,其中,光场3D显示器被认为是未来潜在的3D显示器。

集成成像光场显示是利用光路可逆原理,采用微透镜阵列再现记录阶段3D场景的光线,能正确显示物体之间的遮挡关系、具有连续平滑的视点信息,符合人类观看的特征且观看者无需佩戴助视设备,是目前成本较低、3D效果较好的一种真3D显示。随着工艺技术的发展,集成成像光场显示经常被用于具有很强沉浸感的人机交互设备——近眼显示,这也将推进集成成像光场显示集成化的发展。此外,集成成像光场显示还被应用于具有大视角的桌面显示,相比于近眼显示,桌面显示则无需观看者佩戴设备。但是由于集成成像光场显示的视场角、景深、分辨率这3个参数相互制约,无法同步提升,所以现在众多研究都集中在这三者的提升上。随着具有自由调控光的相位功能的超表面的发展,集成成像光场显示这个问题将有望得到解决。例如,经过人为设计的超透镜能实现一个超透镜单元就具有多个不同焦距的焦点,那对应的超透镜阵列就能实现在不降低分辨率的前提下提升集成成像光场显示系统的景深。值得一提的是,复用技术与高精度空间光调制器的发展也将推进高质量集成成像光场显示的商用进程。

投影光场显示在原理上与集成成像光场显示相似,根据投影仪使用的台数被分为投影仪阵列式与单个投影仪式。对于前者,主要是采用投影仪阵列代替了集成成像光场显示系统中的微透镜阵列,利用投影仪阵列投射出的光线进行高密度叠加,进而实现3D图像的显示;展示的3D效果越逼真则需要越多的投影仪,这将增大系统的体积且加大系统校准

的困难、成本也随之提高。对于后者,还需配备多路复用技术与投影屏、全息光学元件、旋转反射器件等光学器件模拟出投影仪阵列的效果,进而实现3D显示;这对投影仪的投影速度提出了更高要求,此外,若要实现动态3D显示,则要求图像源有较高的刷新率,这种方法所使用的多路复用技术很依赖高速计算机,与其他配备的光学器件之间的校准也是投影光场显示在新形势下需要解决的一个难题。

层光场显示需要堆叠不同数量的液晶面板来提高重构3D场景的景深,其具有较为连续的视场,比较适用于小尺寸的移动光学设备。若要增大3D显示效果则需要堆叠一定数量的液晶屏,这将引起2个不容忽视的问题:一是随着液晶屏数量的提升,系统的视场角也随之降低;二是增加液晶屏的数量,会增大3D显示系统的体积、提高系统的成本、降低其实用性。微纳显示技术日新月异的新形势下,性能优异的动态背光模块必将加速层光场显示的发展。此外,层光场显示引申出的矢量光场显示提升了光场显示的性能。矢量光场显示具有可视角度大、体积小、能耗低等优点,但是由于其使用的光学器件精度达到纳米级别,对制作工艺的精度提出了更高要求。高精度光学器件推动高质量层光场显示的发展,而这将提高层光场显示系统的成本,限制其大规模生产的步伐,也将是光场显示又一个需要重视的研发方向。

4 结论

光场3D显示是真3D显示的一种,通过光传感器模拟人眼接收3D物体发出的光,然后利用特殊器件与光传感器接收的信息再重现出真实的3D场景;它重建的3D场景能正确地描述被记录场景的空间特性,此外,重构的3D场景符合人眼观看的特性,能还原被记录物体之间相互遮挡的关系。光场3D显示技术是一种数据量小、结构简单、易于集成化且符合人类观看习惯的3D显示技术,有望被应用于军事、医学、教育、娱乐等领域。随着工艺技术与计算机科学技术等相关领域的发展,光场显示技术已经得到大力发展。但应该看到,中国在光场显示领域还存在一些关键技术短板和产业链条断点。为避免中国高

科技终端设备技术与产业再次落后于国外,建议促进光场显示与物联网、人工智能、大数据等交叉融合。根据光场显示的主要技术挑战及元宇宙的兴起,前瞻性地研发柔性全彩Micro-LED/OLED显示屏及相应的柔性光场调控器;建立3D图像重构模型,发展3D图像重构与播放;研发感存算显一体化技术,解决虚实融合、生命健康监测、高性能芯片、人工智能算法等关键问题,实现3D图像重构与感存算显及播放;在显示材料与器件上,发展高效率、高均匀性的微纳显示发光材料、图形化发光阵列,开发万级及以上极高平面位置显示器(plan position indicator, PPI)和高光效、高亮度的发光显示;在器件与系统集成技术上,发展微显示器件、成像光学器件等多器件耦合及光场显示系统集成技术。此外,建议中国加强光场显示技术创新平台的建设,并设立光场显示研发重点专项,通过学术研讨会等形式梳理光场显示的技术难点、技术差距和问题等,凝练出光场显示核心材料、关键技术、核心装备等研发内容;充分发挥显示龙头企业在光场显示技术创新中的主体地位,以新型举国体制推动产学研在光场显示技术方面的创新合作。

参考文献(References)

- [1] Kim G, Kim Y, Yun J, et al. Metasurface-driven full-space structured light for three-dimensional imaging[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 5920.
- [2] Sun Q L, Wang C L, Fu Q, et al. End-to-end complex lens design with differentiate ray tracing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(4): 1-13.
- [3] 王琼华. 3D显示技术与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [4] 康家欣, 王文雯, 彭玉颜, 等. 光场显示技术的研究现状与发展趋势[J]. 光电子技术, 2023, 43(2): 116-128.
- [5] Liu Z S, Li D H, Deng H. Wide-viewing-angle integral imaging system with full-effective-pixels elemental image array[J]. Micromachines, 2023, 14(1): 225.
- [6] Downing E, Hesselink L, Ralston J, et al. A three-color, solid-state, three-dimensional display[J]. Science, 1996, 273(5279): 1185-1189.
- [7] Hsu C H, Wu Y L, Cheng W H, et al. HoloTube: A low-cost portable 360-degree interactive autostereoscopic display[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(7): 9099-9132.

- [8] Xie X H, Yu X B, Fu B S, et al. High-quality reproduction method for three-dimensional light-field displays using parallax-view information synthesis and aberration precorrection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 173: 107930.
- [9] Gershun A. The light field[J]. *Journal of Mathematics and Physics*, 1939, 18(1-4): 51-151.
- [10] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]//*Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 1996: 43-54.
- [11] Gortler J S, Grzeszczuk R, Szeliski R, et al. The lumigraph [C]//*Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York, USA: Association for Computing Machinery, 1996: 31-42.
- [12] Lippmann G. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief[J]. *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, 1908, 7(1): 821-825.
- [13] 彭玉颜. 用于集成成像3D显示的微透镜阵列研制[D]. 福州: 福州大学, 2017.
- [14] Chao C H, Liu C L, Chen H H. Time-division multiplexing light field display with learned coded aperture[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2023, 32: 350-363.
- [15] Ma H W, Yao J H, Gao Y Q, et al. Parameter optimization method for light field 3D display[J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 42206-42217.
- [16] Xing Y, Lin X Y, Zhang L B, et al. Integral imaging-based tabletop light field 3D display with large viewing angle[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2023, 6(6): 220178.
- [17] Wang H, Deng H, Guo Z D, et al. Curved computer-generated integral imaging based on backward ray-tracing technique[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(1): 1-6.
- [18] Jiang L J, Lin J F, Rao F B, et al. Dual-mode optical see-through integral imaging 3D display with large depth of field[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 175: 107986.
- [19] Bae S I, Kim K, Jang K W, et al. High contrast ultrathin light-field camera using inverted microlens arrays with metal-insulator-metal optical absorber[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(6): 2001657.
- [20] Wen J, Yan X P, Jiang X Y, et al. Comparative study on light modulation characteristic between hexagonal and rectangular arranged macro lens array for integral imaging based light field display[J]. *Optics Communications*, 2020, 466: 125613.
- [21] Yang L, Shen J Q. Deep neural network-enabled resolution enhancement for the digital light field display based on holographic functional screen[J]. *Optics Communications*, 2024, 550: 130012.
- [22] Yan X P, Yan Z, Jing T, et al. Enhancement of effective viewable information in integral imaging display systems with holographic diffuser: Quantitative characterization, analysis, and validation[J]. *Optics and Laser Technology*, 2023, 161: 109101.
- [23] Yan Z, Yan X P, Jiang X Y, et al. Calibration of the lens' axial position error for microlens array based integral imaging display system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106585.
- [24] Cai Z W, Chen J W, Pedrini G, et al. Lensless light-field imaging through diffuser encoding[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 143.
- [25] Wang W W, Chen G X, Weng Y L, et al. Large-scale microlens arrays on flexible substrate with improved numerical aperture for curved integral imaging 3D display[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11741.
- [26] Wang W W, Zhang Y A, Wu C X, et al. Enhanced depth of field of integral imaging display using bifocal microlens array fabricated by two-step lithography[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2023, 31(7): 494-503.
- [27] Li Q, Zhong F Y, Deng H, et al. Depth-enhanced 2D/3D switchable integral imaging display by using n-layer focusing control units[J]. *Liquid Crystals*, 2022, 49(10): 1367-1375.
- [28] Zhang Y A, Weng X Y, Liu P H, et al. Electrically high-resistance liquid crystal micro-lens arrays with high performances for integral imaging 3D display[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 125299.
- [29] Wang W W, Chen W D, Peng Y Y, et al. Low-voltage driving high-resistance liquid crystal micro-lens with electrically tunable depth of field for the light field imaging system[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 17442.
- [30] Zhou R Y, Wei C X, Ma H W, et al. Depth of field expansion method for integral imaging based on diffractive optical element and CNN[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 38146-38164.
- [31] Yang L, Sang X Z, Yu X B, et al. Demonstration of an improved integral imaging system with large viewing angle using the micro-lens array mask[J]. *Optik*, 2019, 182: 1113-1119.
- [32] Gao X, Sang X Z, Xing S J, et al. Full-parallax 3D light field display with uniform view density along the horizontal and vertical direction[J]. *Optics Communications*, 2020, 467: 125765.
- [33] Yan Z, Yan X P, Huang Y Q, et al. Characteristics of the holographic diffuser in integral imaging display systems: A quantitative beam analysis approach[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 139: 106484.
- [34] Lv Z L, Li J N, Yang Y, et al. 3D head-up display with a multiple extended depth of field based on integral imaging and holographic optical elements[J]. *Optics Express*, 2023,

- 31(2): 964–975.
- [35] Balogh T, Kovacs P T, Barsi A. Holovizio 3D display system[C]//Proceedings of 3DTV Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 1–4.
- [36] Watanabe H, Okaichi N, Omura T, et al. Aktina Vision: Full-parallax three-dimensional display with 100 million light rays[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 17688.
- [37] Yamauchi M, Yendo T. Light field display using wavelength division multiplexing[J]. ITE Transactions on Media Technology and Applications, 2023, 11(2): 49–55.
- [38] Zhang H L, Deng H, Ren H, et al. See-through 2D/3D compatible integral imaging display system using lens-array holographic optical element and polymer dispersed liquid crystal[J]. Optics Communications, 2020, 456: 124615.
- [39] Doronin O, Bregovic R, Gotchev A. Optimized 3D scene rendering on projection-based 3D displays[C]//Proceedings of 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 580–584.
- [40] Wang P, Sang X Z, Chen D, et al. Computational super-resolution full-parallax three-dimensional light field display based on dual-layer LCD modulation[J]. IEEE Access, 2020, 8: 81045–81054.
- [41] Zhu L M, Du G, Lv G Q, et al. Performance improvement for compressive light field display with multi-plane projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 142: 106609.
- [42] Zhu L M, Chen Q Y, Chen T, et al. High-brightness hybrid compressive light field display with improved image quality[J]. Optics Letters, 2023, 48(23): 6172–6175.
- [43] Li Y, Qiao W. Vector light field 3D display with multi-directional backlight[C]//Proceedings of International Conference on Precision Instruments and Optical Engineering (PI-OE 2022). Guangzhou: SPIE, 2023: 120–125.
- [44] Zhou F B, Zhou F, Chen Y, et al. Vector light field display based on an intertwined flat lens with large depth of focus[J]. Optica, 2022, 9(3): 288.
- [45] Shi J C, Hua J Y, Zhou F B, et al. Augmented reality vector light field display with large viewing distance based on pixelated multilevel blazed gratings[J]. Photonics, 2021, 8(8): 337.
- [46] Hua J Y, Li Y, Ge P R, et al. Time-multiplexed vector light field display with intertwined views via metagrating matrix[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107527.
- [47] 欧阳钟灿. 中国新型显示技术发展之路[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 92–95.

Research progress of light field display and development suggestions

PENG Yuyan¹, KANG Jiaxin¹, ZHOU Xiongtu^{1,2*}, ZHANG Yongai^{1,2}, GUO Tailiang^{1,2}, WU Chaoxing^{1,2}

1. College of Physics and Information Engineering of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, China

Abstract With the benefits of small data volume, simple structure, and easy integration, light field display(LFD) has a great potential to be applied in military, medical, educational, entertainment, and other fields. However, the LFD with full color, large field of view, high-resolution, and big depth of field was limited by the high-resolution displays, light modulators, intelligent algorithms, ultra-fast computers and other technologies. Recently, efforts were made to investigate novel design methodologies, new device structure, and prospective applications. In this article, the evolution and classification of three-dimensional display technologies were reviewed to illustrate the benefits of LFD. Then, the concept and importance of LFD were explained. Following that, a full overview of the evolution and major technical issues of integrated imaging LFD, projection LFD, and layer LFD was provided. Finally, the new requirements for LFD in novel setting were presented and recommendations for LFD development in China were highlighted. LFD can perfectly duplicate real 3D scenes and match the viewing characteristics of the human eye, therefore it has a broad application prospect. To promote technological progress in the field in China, suggestions were made to strengthen the construction of technology innovation platforms, promote the integration of LFD with other innovative technologies, prioritize key technological breakthroughs and industry chain bottlenecks, promote industry-university research cooperation, and ensure global high-tech competitiveness.

Keywords 3D display; light field display; integral imaging light field display; projection light field display; layer light field display



(责任编辑 王微)