

# 便携式三维显示的发展与展望

高晨, 李子寅, 吴仍茂, 李海峰\*, 刘旭\*\*

浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 移动电子设备在人们的日常生活中扮演着越来越重要的角色, 具有轻薄特性的便携式三维显示也因此受到了广泛关注。针对移动信息终端的应用需求, 重点介绍指向背光显示、压缩光场显示、集成成像显示、指向光场显示这 4 种便携式三维显示技术的研究进展, 并针对便携式设备的应用场景, 就如何有效利用显示带宽展开了分析, 最后对便携式三维显示未来的发展进行展望。

**关键词** 便携式三维显示; 指向背光显示; 光场显示; 追踪设备; 显示带宽

中图分类号 TN27 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230459

## Development and Prospect of Portable Three-Dimensional Displays

Gao Chen, Li Ziyin, Wu Rengmao, Li Haifeng\*, Liu Xu\*\*

College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

**Abstract** Mobile electronic devices are playing a more and more important role in people's daily life. Portable 3D display with thin and light characteristics has attracted wide attention. According to the application requirements of mobile information terminals, this paper mainly introduces the research progresses of four portable 3D display technologies, namely directional backlighting display, compressive light field display, integral imaging display, and directional light field display, and analyzes how to effectively utilize the display bandwidth according to the application scenes of portable devices. Finally, the future development of portable 3D display is prospected.

**Key words** portable 3D display; directional backlighting display; light field display; tracking device; display bandwidth

## 1 引言

随着手机、平板电脑等便携式显示设备的普及和性能提升, 如何在便携式显示设备上为用户提供更真实的观看体验逐渐成为近年来的研究热点<sup>[1]</sup>。相比显示二维图像, 三维图像由于呈现的深度信息令人感觉更为准确和真实, 有助于提升教育、医疗、军事等领域从业人员的工作效率<sup>[2-3]</sup>。有研究表明, 相比基于双目视差的头戴显示设备, 用户更偏好使用更舒适的、可直接观看的裸眼三维显示设备<sup>[4]</sup>。迄今为止的裸眼三维显示技术大致可以分为视差型三维显示、光场显示、体三维显示和全息显示等。传统的视差型三维显示由柱透镜阵列<sup>[5]</sup>、视差光阑<sup>[6]</sup>等光学元件组成, 将双目视差图像分别呈现给用户的双眼。相比传统方法, 基于指向背光的视差型三维显示的优势在于维持了观看者在观看区域内左眼或右眼所感知的面板分辨率。视差型

三维显示和光场显示的区别在于: 在某一时刻视差型三维显示呈现的是几个分立的视点图像, 而光场显示呈现的是在一定角度范围内连续或准连续的视点图像。光场显示技术按实现原理可划分为压缩光场显示、集成成像显示和指向光场显示 3 类。体三维显示通过点亮空间中的发光物质或者“体素”可在一定体积的空间内完成显示过程<sup>[7]</sup>, 但是需要复杂的机械扫描装置, 可移动性差。全息显示将三维场景中的物体建模为点光源<sup>[8]</sup>、面元光源<sup>[9]</sup>或者深度层光源<sup>[10]</sup>, 将所有光源发出的光波叠加为全息图并以衍射的方式显示。全息显示受制于目前空间光调制器有限的空间带宽积, 观看角度非常狭小, 更适合应用于头戴显示中。三维显示的核心就是在空间真实再现三维场景的四维光场, 特别在多人、大角度范围自由观看的场合, 三维显示就要求巨大的显示信息量与高精度的光场指向显示能力, 而这些正是当前产品化的显示器难以实现的, 因

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-06; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802200)

通信作者: \*lihaifeng@zju.edu.cn; \*\*liuxu@zju.edu.cn

此当前三维显示的性能还难以满足人们的要求。

便携式显示设备指尺寸在几英寸到三十英寸以内的显示设备<sup>[11]</sup>,外形轻薄,具备一定的续航能力,易于用户手持携带,而且观看人数少。便携式显示设备的特点导致其显示带宽和计算资源有限,但是相应地,其应用场景多为个人办公、娱乐等,观看者数量有限,往往只有一到几个人。出于保护个人隐私的需要,便携式设备往往配备有用于人脸识别的追踪模块。因此便携式三维显示可以使用追踪设备只针对观察者所在的位置显示 2D 或 3D 图像,从而有效地利用显示带宽,这就为对这类应用研究发展特定的三维显示器提供了可能。人们可以充分利用当前高分辨显示面板,发展各种新型光线偏折器件等平面光学器件,这些器件构造结构相对简单,能够很好地和现有的平板显示技术兼容,实现 2D/3D 可切换的便携式显示。

本文针对指向背光显示、压缩光场显示、集成成像显示和指向光场显示这几种适合于便携式三维显示设备的技术,列举了国内外一些研究团队所搭建的显示样机,阐述了便携式三维显示的具体原理与实现方法,最后总结了便携式三维显示尚存在的问题和未来发展方向。

## 2 指向背光三维显示

### 2.1 实现原理

指向背光显示(directional backlighting display)是针对便携式显示器的观看者人数一般就是一个人或少数几个人的特点而提出的高分辨三维显示,从而实现与二维显示分辨率相当的视觉效果,为观看者提供较好的观看体验。通常,如图 1 所示,指向背光显示系统包括指向型光学器件和高帧率液晶屏(LCD)。入射光束经指向型光学器件得到角度调制和液晶屏得到振幅调制后,全分辨率的视差图像将投射到人眼,左右视差图像交替显示,在人眼的视觉暂留时间内,观看者将获取到全分辨率的三维图像<sup>[12-14]</sup>。指向背光显示的背光光学系统复杂,需要对光束指向进行精确调控,否则图像间串扰的概率就会增大。同时,指向背光显示的视点数目通常较少,用户在使用时需位于特定位置观看,提高视点数量可提供运动视差,但这将加大背光光

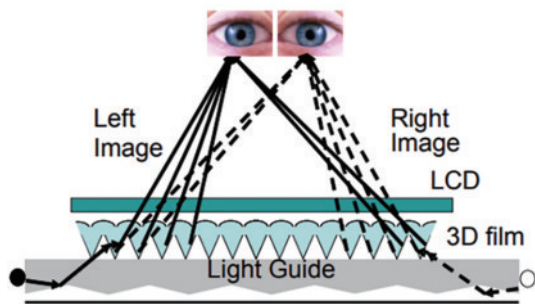


图 1 指向型背光三维显示原理<sup>[14]</sup>

Fig. 1 Principle of the directional backlighting 3D display<sup>[14]</sup>

学系统设计的难度,而且液晶屏的帧率有限,显示图像质量将不可避免受损。指向背光显示实现从 3D 向 2D 切换较为简单,只需要所有光源同时工作,且液晶屏显示无视差的图像即可。

### 2.2 实现方式

传统指向型光学器件通常由微结构光波导和三维棱镜薄膜组成<sup>[15-16]</sup>,其研究地主要集中在美国、韩国、日本等,此方法的优势在于结构轻薄,易于集成,且无需与 LCD 像素一一对准,安装难度较低,但三维棱镜薄膜无法实现对光束的精确调控,这将导致显示系统串扰增大。为了降低串扰,上海交通大学陆建钢团队<sup>[17-18]</sup>在高准直度的背光源基础上添加了分束器阵列,使得系统串扰值低于 5%,此系统还实现了显示视点数目的增加。韩国光云大学 Eun-Soo Kim 团队<sup>[19]</sup>使用全息光学元件(HOE)代替传统三维棱镜薄膜,由于 HOE 的布拉格特性,可以有效降低杂散光的影响,从而降低三维显示的串扰,提高显示效果,如图 2 所示。此外,制备的 HOE 的衍射效率约为 90%,具有较高的能量利用率。

为了增加视点数目,提供平滑的运动视差,可以通过增加扫描设备、电控器件或光源数量的方式来实现。韩国三星集团相关团队<sup>[20]</sup>在定向背光的专利中添加了准直光束偏折器件,该器件可由旋转棱镜、电湿润透镜或液晶等来实现。增加光源数目通常采用固定光源阵列,再根据需求点亮特定光源的方式实现,可使用透镜阵列实现光束的方向调控。光源数量的增加可实现大视场角、密集视点的显示,但由于透镜像差的存在,离轴光源点经透镜后的会聚点存在像差,这将导致串扰的增大,并且使显示均匀度下降。中山大学周建英团队<sup>[21-22]</sup>提出基于自由曲面的背光系统,计算光源的最佳放置位置,有效减弱了单透镜的离轴像差影响,串扰降低至 5%,系统中还添加了扩散屏,提升了显示均匀度,如图 3 所示。离轴像差的减弱,还可以通过使用偏心的透镜阵列或弯曲排布的透镜阵列实现<sup>[23-24]</sup>,为了更好的显示效果,系统中一般添加了扩散屏。日本筑波大学的 Takeya 团队<sup>[24]</sup>使用交错的菲涅耳透镜阵列,无需使用扩散屏,即可保证低串扰和高均匀度显示,且该系统无需对光源或透镜进行弯曲排布,可降低系统厚度。

鉴于目前液晶屏帧率的限制,视点数目的增多必然导致显示图像帧率的降低,为了兼顾视点数目和帧率,可将追踪设备引入到定向背光显示中。浙江大学刘旭团队<sup>[25]</sup>利用 HOE 的布拉格匹配特性制备了多指向背光源系统,如图 4 所示,该系统根据人眼位置点亮光源阵列中对应的光源,为用户提供了低串扰,且产生了平滑运动视差的三维图像。周建英课题组<sup>[26]</sup>采用 U 型的密集分布的光源阵列结构及复合菲涅耳透镜,并结合人眼追踪设备,系统扩大了显示视场角,可实现多用户同时观看。

应该说,由于指向背光显示需要满足观看者人数

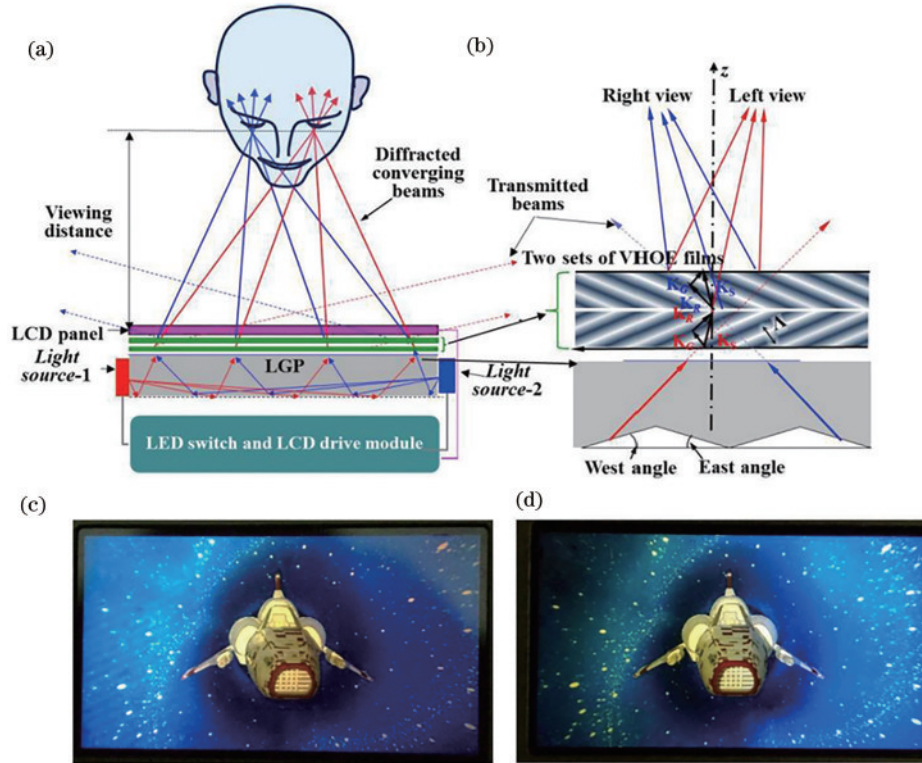


图2 Eun-Soo Kim 团队的指向背光三维显示<sup>[19]</sup>。(a)原理;(b)背光源原理;(c)(d)效果

Fig. 2 Directional backlighting 3D display system proposed by Eun-Soo Kim's team<sup>[19]</sup>. (a) Principle; (b) principle of the backlight; (c) (d) results

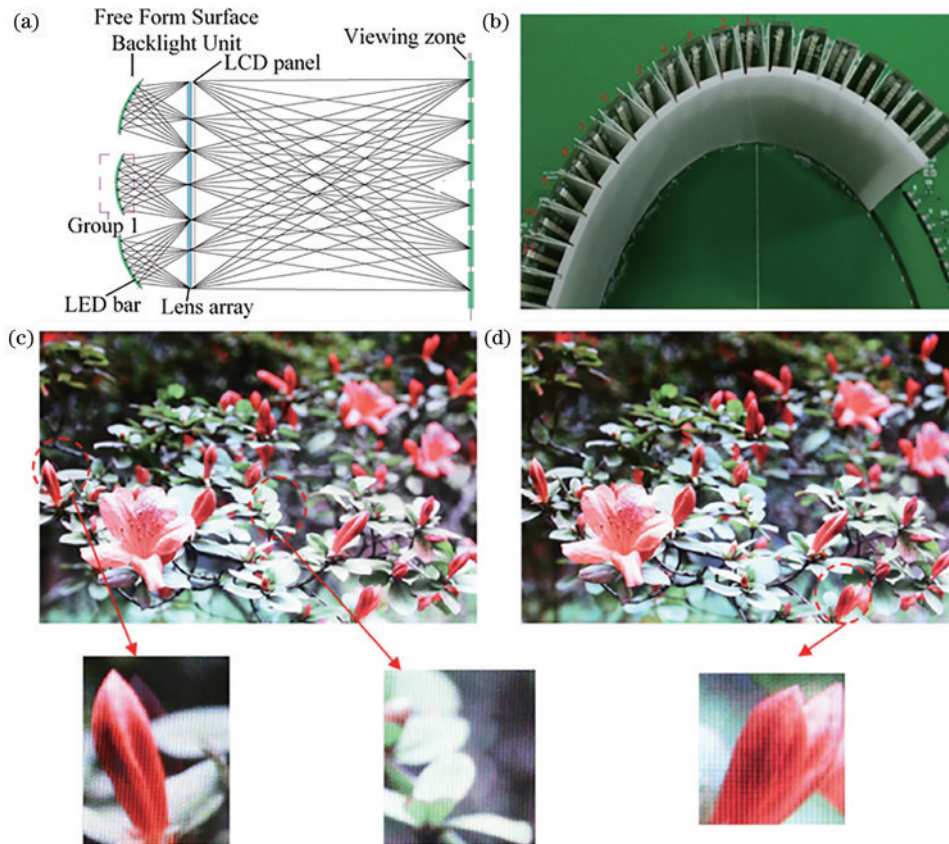


图3 周建英团队的指向背光三维显示<sup>[21-22]</sup>。(a)原理;(b)背光源的局部详细结构;(c)(d)效果

Fig. 3 Directional backlighting 3D display system proposed by Jianying Zhou's team<sup>[21-22]</sup>. (a) Principle; (b) partial detailed structure for the backlight; (c) (d) results

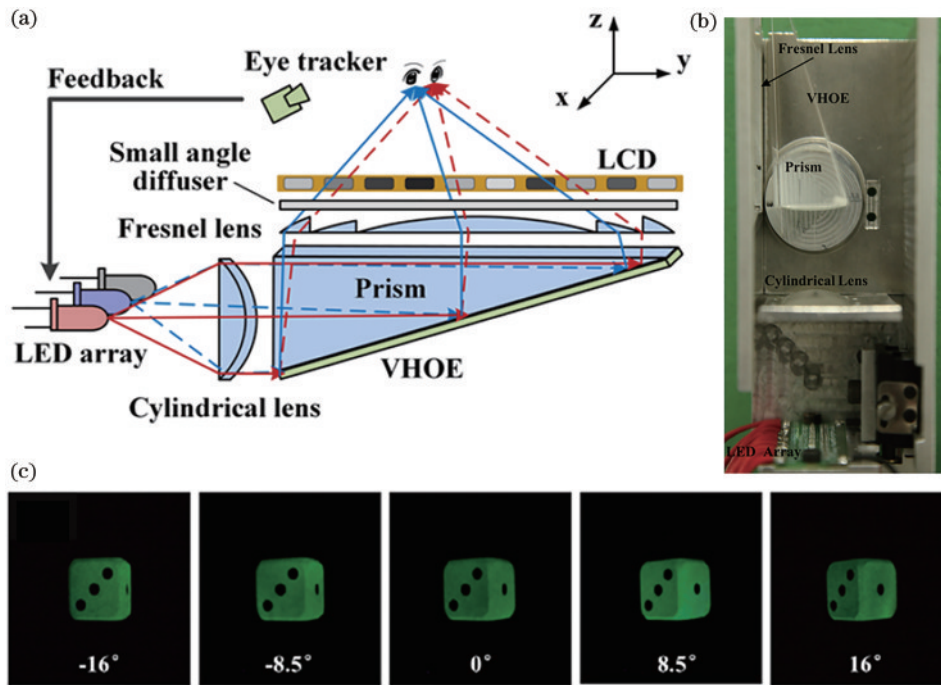


图 4 刘旭团队的指向背光三维显示<sup>[25]</sup>。(a)原理;(b)样机;(c)效果

Fig. 4 Directional backlighting 3D display system proposed by Xu Liu's team<sup>[25]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) results

少的要求,显示信息量可以大大缩减,利用眼部跟踪技术,加大观看者的位置灵活度。按照目前液晶与 OLED 显示器的分辨率现状,指向背光三维显示是在显示器分辨率有限情况下获得三维显示效果比较好的最主要的实用型三维显示技术。当然随着观看者人数的增加,显示性能就急剧下降。

### 3 压缩光场三维显示

#### 3.1 显示原理

压缩光场显示 (compressive light field display) 最早由 Lanman 等<sup>[27-28]</sup>提出。压缩光场显示利用层叠的显示层实现对一定角度范围内的光线强度的调制。压缩光场显示因采用多层结构,也称为层叠光场显示 (layered light field display)。如图 5 所示,显示层上的每个像素由于被散射屏散射或者被散射背光源照明从

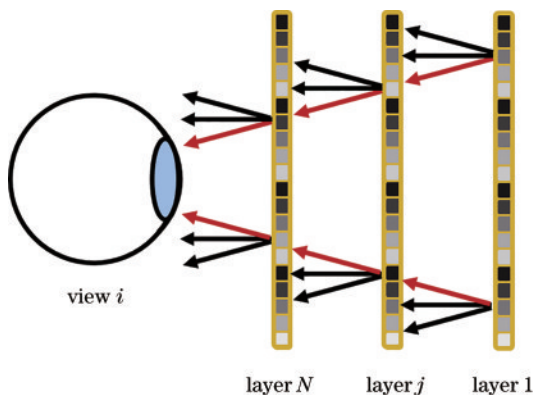


图 5 压缩光场显示原理

Fig. 5 Principle of compressive light field display

而具有一定的散射角,使得前一层显示图案的像素能够在散射角的范围内影响下一层显示图案的像素。其图像生成算法为:在给定显示系统的参数下,求解最小化重建光场和目标光场之间的误差的优化问题。压缩光场显示在数学上相当于用二维矩阵堆栈逼近更高维的三维场景的结果<sup>[29]</sup>。理论上,使用的显示层层数越多,重建出的光场越接近目标光场。压缩光场显示利用了三维场景视点图像之间的强相关性,将一定观看角度的目标光场“压缩”到多张二维图案中。但是也因此,压缩光场显示在显示不相关的多视点图像时会有很大的串扰<sup>[30-31]</sup>。随着三维场景观看角度的增大,显示系统和优化算法就越来越难以处理视点图像之间逐渐扩大的差异而造成重建光场的质量下降。因具有多层屏幕结构,压缩光场显示可以实现高动态范围<sup>[28]</sup>或者超分辨率<sup>[32]</sup>的 2D 图像显示。

#### 3.2 实现方式

早期的压缩光场显示使用的器件有液晶屏<sup>[30-31]</sup>等被动显示器件,通过优化相乘的透过率来调制背光源发出的光线,称为乘法型压缩光场显示。这种物理上直接堆叠具有像素结构的散射屏的方式会产生莫尔条纹,造成不舒适的观看体验。为了消除莫尔条纹,需要在层与层之间加入一定角度的扩散片<sup>[33]</sup>。当散射屏的像素间距变小时,前层显示屏的光线对后层显示屏的光线产生的衍射效应将会变得明显<sup>[34]</sup>。扩散片的加入和衍射效应的存在都会使得图像质量下降,另外多层液晶屏层叠的低透过率会造成显示亮度降低。因此传统压缩光场显示的层数不能一直增多。利用投影显示的方式将显示图案投射到透明的散射屏上,则发射的

光场是每层散射屏上的光强相加的结果,称为加法型压缩光场显示。基于投影的加法型压缩光场显示可以解决传统压缩光场显示亮度和图像质量较低的问题。因为投影散射屏不具有周期性的像素结构,所以几乎不会受到衍射效应的影响。

HOE具有角度选择性,对来自不同曝光角度入射的光波呈现透明状态。韩国首尔国立大学的Lee团队<sup>[35]</sup>利用HOE的这种特性,利用不同角度的投影机将显示图案投射到HOE曝光的散射屏上,实现了可应用于增强现实场景的压缩光场显示,如图6所示。但是由于HOE的角度带宽较小,该系统无法实现大角度的观看体验,并且需要空间上分立的投影显示光路,结构比较复杂。

合肥工业大学的吕国强团队将原本用于固态体三维显示<sup>[36]</sup>的具有聚合物稳定胆甾结构(PSCT)的液晶快门作为压缩光场显示的透明散射屏<sup>[37]</sup>,如图7所示,以解决多层HOE散射屏观看角度狭小和结构复杂的问题。PSCT快门有两种工作状态,不加电压时呈现不透明的散射态,加电压时呈现透明态,响应时间在1ms内。单个高速投影机依次将显示图案投影到对应深度层的快门上,当其中一层快门呈散射态时,其余快门均呈透明态。在人眼的视觉暂留时间内完成所有深度层的投影,人眼就会感觉多层图案就好像是同时显示一样。PSCT快门的开关特性同样也适合应用于增强现实中。但是该系统为了实现30°的观看角度和约为0.5m的显示深度,使用的PSCT快门层数多达6层,外形比较厚重。该显示系统的对比度相比基于多层HOE的结构有着一定下降,这是PSCT对不同波长光线的色散和透明态的PSCT仍然会对投影光产

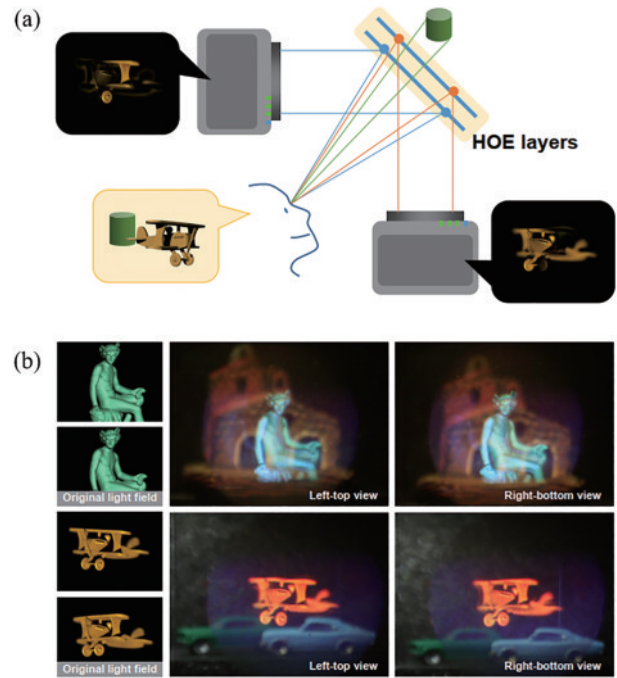


图6 ByoungHo Lee团队的压缩光场显示<sup>[35]</sup>。(a)原理;(b)效果  
Fig. 6 Compressive light field display system proposed by ByoungHo Lee's team. (a) Principle; (b) results

生一定的散射造成的。

压缩光场显示的图像质量随着重构场景到显示层的距离增加而下降。为了缓解该问题从而使显示系统更紧凑,刘旭团队<sup>[38]</sup>利用液体变焦透镜,以时分复用的方式将乘法型压缩光场显示以不同的深度进行叠加,如图8所示,该系统在保持1cm厚度的基础上,将空间分辨率从每度3.83线对提升到了每度4.68线对。

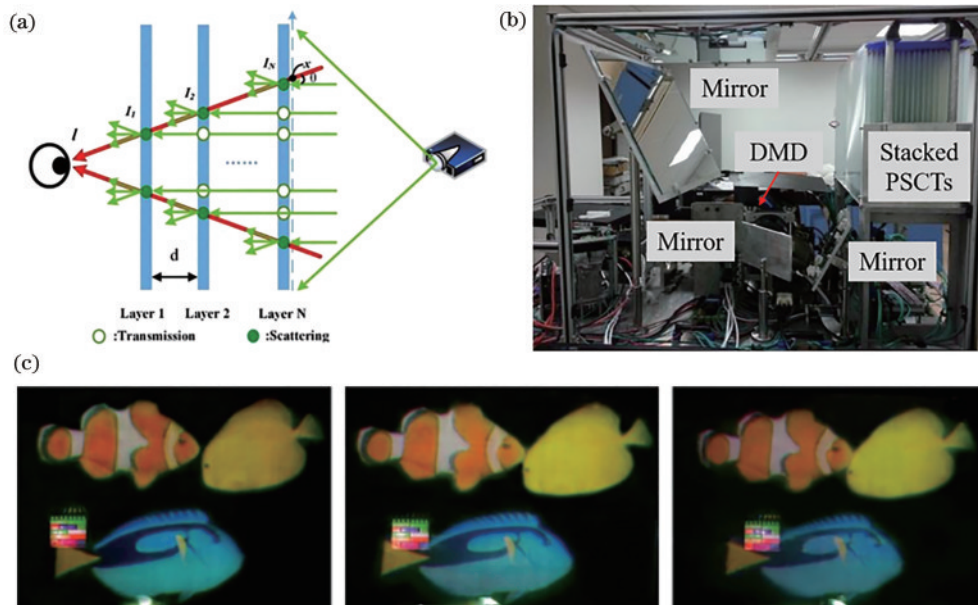


图7 吕国强团队的压缩光场显示<sup>[37]</sup>。(a)原理;(b)样机;(c)效果  
Fig. 7 Compressive light field display system proposed by Guoqiang Lü's team<sup>[37]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) results

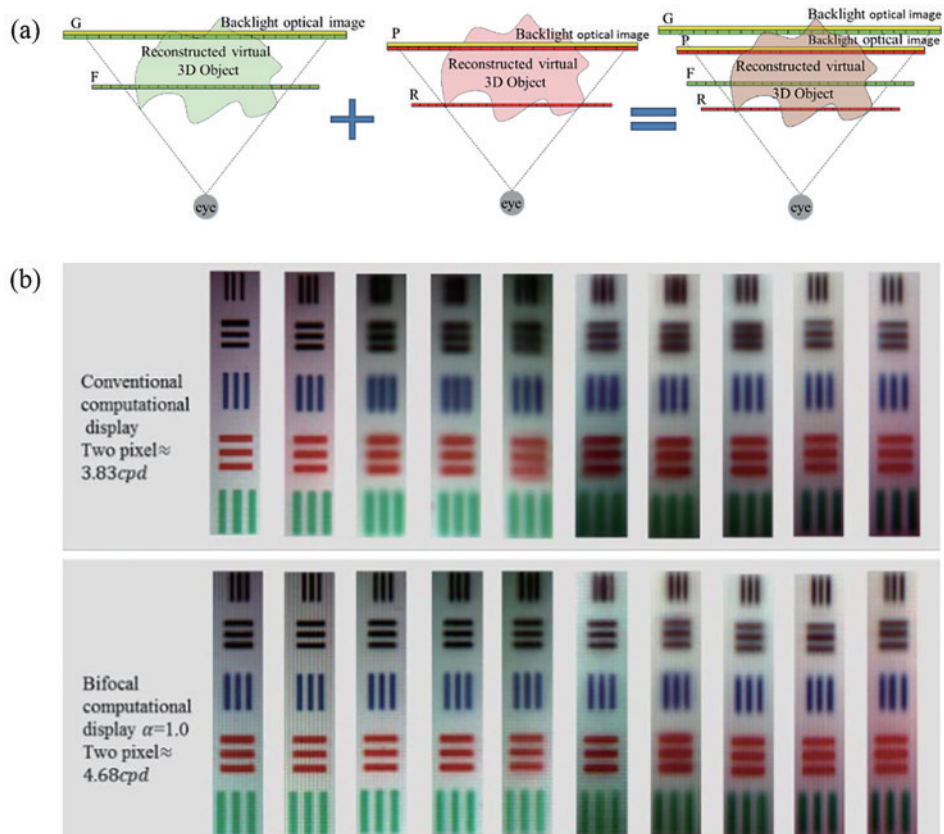


图 8 刘旭团队的大景深压缩光场显示<sup>[38]</sup>。(a)原理;(b)效果

Fig. 8 Compressive light field display system with large depth-of-field proposed by Xu Liu's team<sup>[38]</sup>. (a) Principle; (b) results

要将视点追踪设备和压缩光场显示结合从而有效利用显示带宽,大体上可以分为两种思路。一种是根据观看者位置,为不同观看角度的视点图像赋予权重,从而优化显示图案。北京邮电大学的桑新柱团队<sup>[39]</sup>将计算机视觉中的权重非负张量分解算法引入了乘法型压缩光场追踪显示装置中,实现了 $70^{\circ} \times 60^{\circ}$ 的动态观

看角度,最多支持 4 位观看者同时观看。浙江大学的刘旭团队<sup>[40]</sup>将计算机断层成像中的权重联立代数重建技术应用于加法型压缩光场显示的图案生成问题,实现了该算法的 GPU 加速程序<sup>[41]</sup>,仅使用两层主动发光的透明散射屏就得到了峰值信噪比为 30 dB 以上的高质量双目视差图像,如图 9 所示。另一种思路是保持

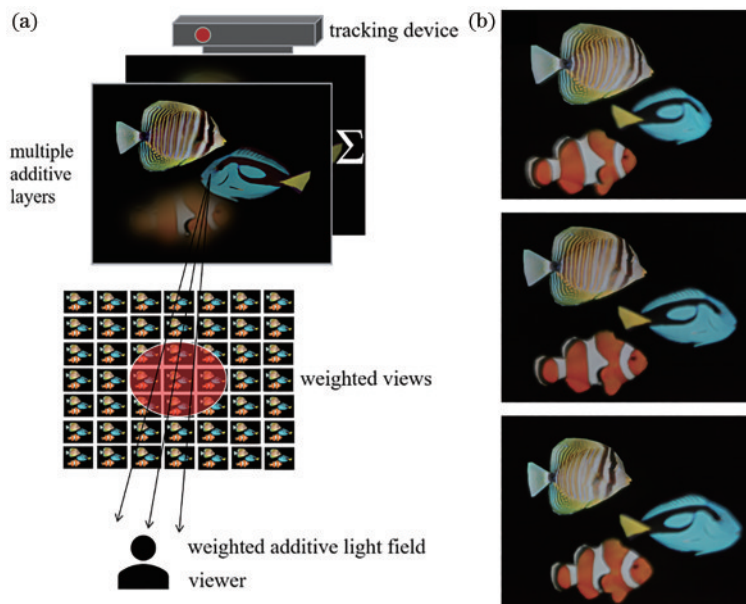


图 9 刘旭团队的压缩光场追踪显示<sup>[40-41]</sup>。(a)原理;(b)效果

Fig. 9 Compressive light field tracking display system proposed by Xu Liu's team<sup>[40-41]</sup>. (a) Principle; (b) results

各视点图像的权重相同,只显示具有中央凹特性的多层图案。在人眼视网膜黄斑的中心有一个被称为“中央凹”的凹陷区域。中央凹由密集的视锥细胞组成,负责最清晰的中央视觉,并且视觉锐度随着远离中央凹而下降。在计算机图形学和计算显示领域,注视点渲染(foveated rendering)技术通过重新分配显示像素,匹配人眼视网膜上的视锥细胞密度分布,能够在不牺牲用户观看体验的前提下减轻渲染负荷。基于人眼视网膜分辨率的这个特性,如图 10 所示,刘旭团队<sup>[42-43]</sup>提

出了一种基于视觉偏心率的压缩光场显示图案分解算法,将其运用到注视点渲染管线中,拍摄目标光场并利用  $n \times n$  像素大小的网格进行下采样,提前计算采样后多层屏幕像素之间的映射关系并将其作为查找表进行储存,根据眼球追踪模块获取注视点位置对查找表进行更新,利用更新的查找表将下采样的目标光场分解复原为多层显示图案。该系统在注视点附近提供了精确的聚焦线索,相比传统的均匀渲染方法,计算量大幅降低。

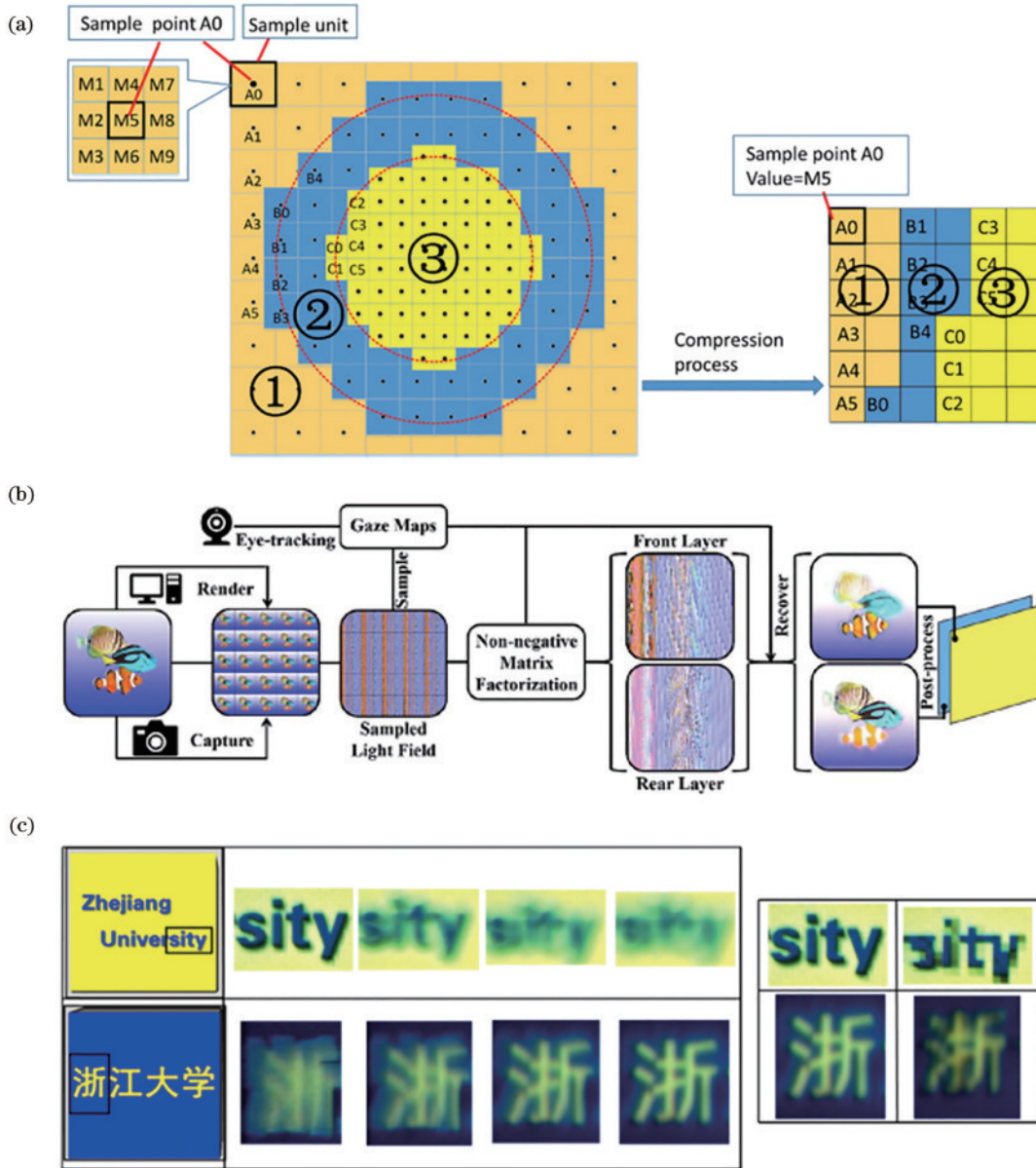


图 10 刘旭团队的压缩光场显示视网膜优化和注视点渲染管线<sup>[42-43]</sup>。(a)视网膜采样表;(b)注视点渲染管线;(c)效果  
Fig. 10 Retinal optimization and foveated rendering pipeline for compressive light field display system proposed by Xu Liu's team<sup>[42-43]</sup>.  
(a) Retinal sampling map; (b) foveated rendering pipeline; (c) results

总体而言,虽然压缩光场显示对观看者的人数限制小,但是由于便携式显示器的显示屏层数不可能太多,因此压缩光场显示有一定的三维显示效果,但显示的分辨率还不是十分理想。

## 4 集成成像三维显示

### 4.1 显示原理

集成成像显示(integral imaging display)发端自

Lippmann<sup>[44]</sup>所发明的集成摄影术,即使用微透镜阵列或者针孔阵列将不同视角的图像“集成”地记录在一张胶片上。如图 11 所示,集成成像显示的原理为集成摄影的逆过程,通过针孔阵列或透镜阵列将显示面板上的元素图像成像到不同的视点位置<sup>[45]</sup>。透镜阵列由于高光能利用率,相比针孔阵列,更常用于集成成像显示

中。集成成像显示的优点是结构紧凑简单,但是其性能参数,包括空间分辨率、角度分辨率和显示景深之间存在制约关系<sup>[46]</sup>。集成成像显示实现 3D 向 2D 的切换相对复杂一些,往往需要在透镜阵列前放置一层电控快门散射屏或者动态生成透镜阵列。

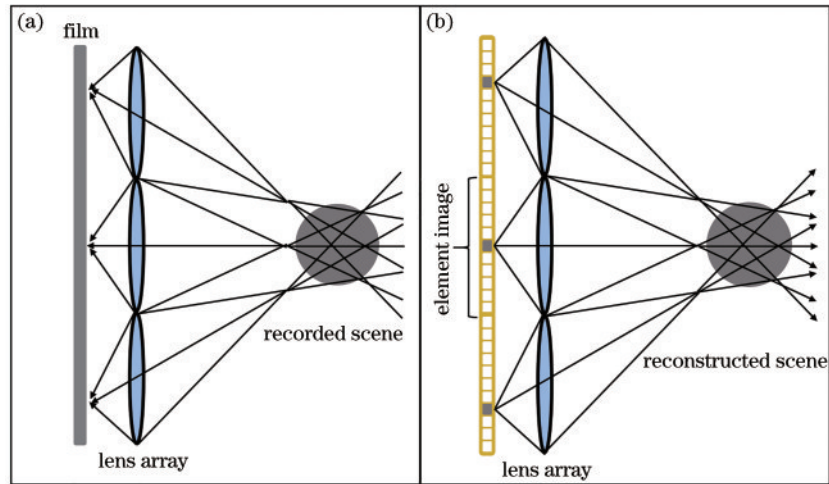


图 11 集成显示原理。(a)集成摄影;(b)集成成像

Fig. 11 Principle of integral display. (a) Integral photography; (b) integral imaging

#### 4.2 实现方式

为了减小单透镜阵列的像差,集成成像显示往往使用复合透镜或者非球面透镜阵列作为光线偏折器件<sup>[47-48]</sup>。但是复合透镜阵列非常笨重,非球面透镜则不易加工。桑新柱团队<sup>[49]</sup>提出了一种基于多深度融合

和深度学习的衍射光学元件(DOE)设计方法。该方法的仿真结果<sup>[50]</sup>如图 12 所示,结果表明将优化的 DOE 透镜阵列替代原先的复合透镜阵列,提升了集成成像显示系统的景深和像质。但是该方案尚未有实际显示样机。

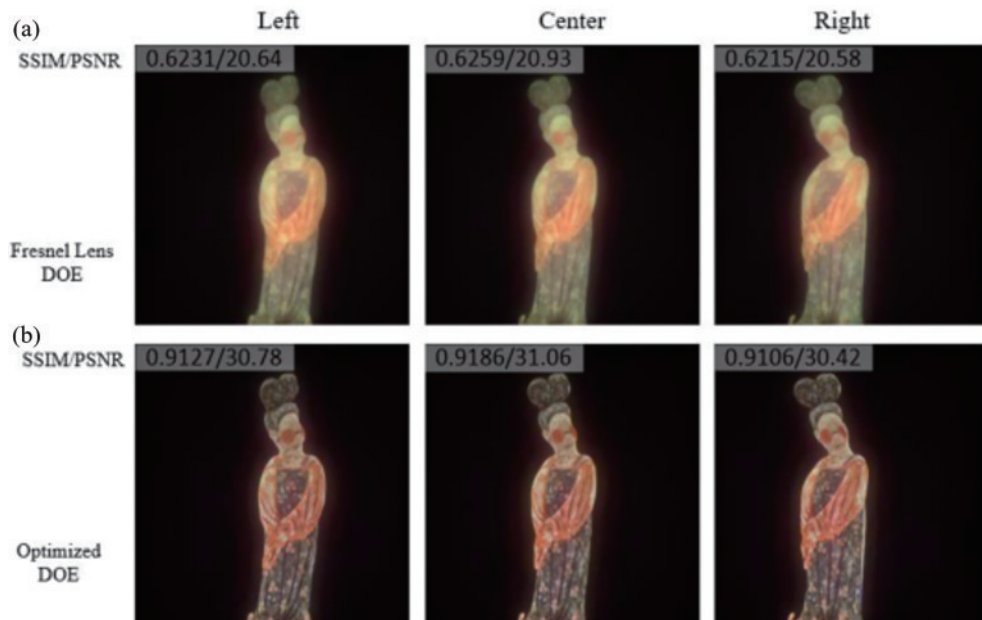


图 12 桑新柱团队的集成成像显示的仿真结果<sup>[50]</sup>。(a)传统 DOE 菲涅耳透镜;(b)优化的 DOE 透镜

Fig. 12 Simulated results of integral imaging display system proposed by Xinzhu San's team<sup>[50]</sup>. (a) Conventional DOE Fresnel lens; (b) optimized DOE lens



国内王琼华团队对集成成像显示的便携化进行了大量研究。针对集成成像显示系统的轻薄化问题,该团队<sup>[51-52]</sup>使用HOE制备透镜阵列。该团队还将HOE透镜阵列和聚合物分散液晶(PDLC)薄膜结合,实现了2D和3D可切换的集成成像显示<sup>[53]</sup>,如图13所示。PDLC与

前述的PSCT具有相似的特性,施加电压时呈透明态,撤去电压时呈散射态。当显示设备工作在3D模式时,PDLC为透明态,投影机投射元素图像,该图像被HOE透镜阵列衍射;当显示设备工作在2D模式时,PDLC为散射态,投影机投射2D图像,该图像被PDLC散射。

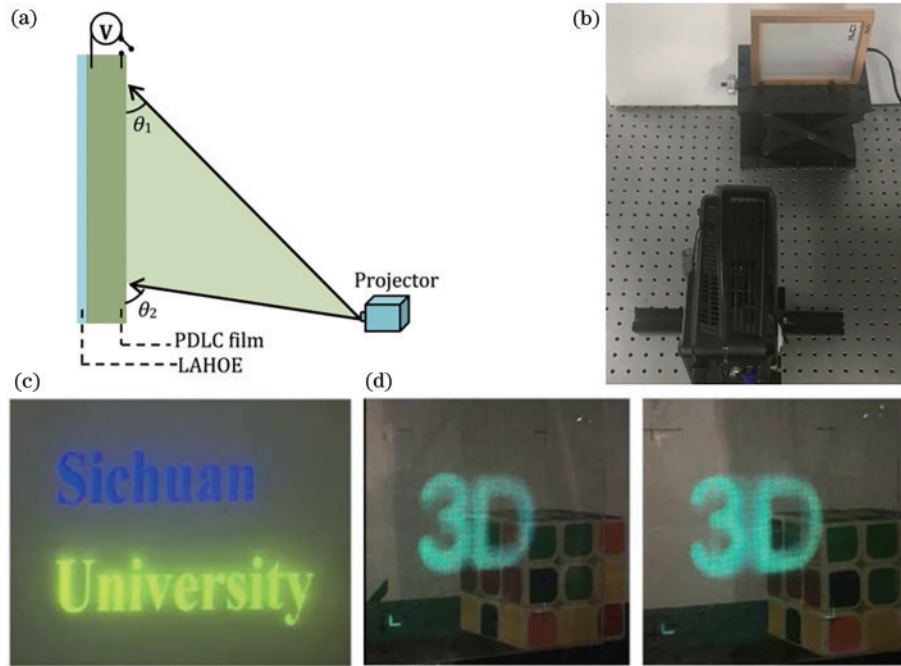


图 13 王琼华团队基于HOE和PDLC的集成成像显示<sup>[53]</sup>。(a)原理;(b)样机;(c)2D显示效果;(d)3D显示效果

Fig. 13 HOE & PDLC-based integral imaging display system proposed by Qionghua Wang's team<sup>[53]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) 2D display result; (d) 3D display results

王琼华团队<sup>[54]</sup>还实现了基于液晶微透镜阵列的3D/2D可切换集成成像显示,如图14所示。每个液晶

透镜是利用上下两层基板中特殊的通电电极分布形成的。该系统的液晶微透镜阵列始终处于通电状态。若

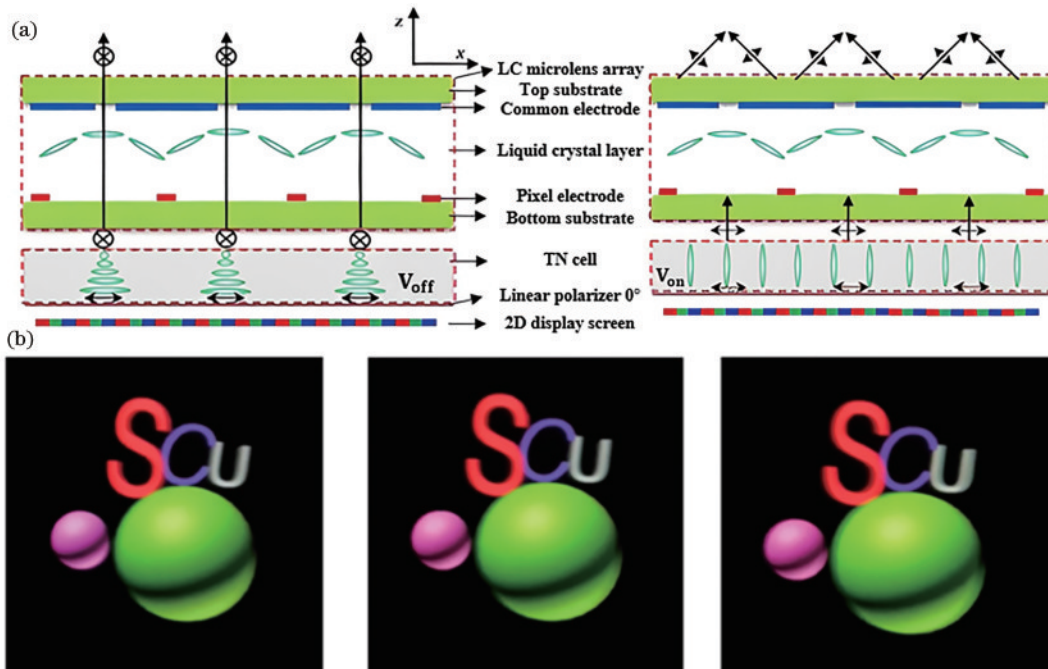


图 14 王琼华团队基于液晶微透镜阵列的集成成像显示<sup>[54]</sup>。(a)原理;(b)效果

Fig. 14 Liquid crystal micro-lens array based integral imaging display system proposed by Qionghua Wang's team<sup>[54]</sup>. (a) Principle; (b) results

显示面板的光线偏振方向平行于液晶透镜的取向, 则会被液晶透镜聚焦, 此时显示面板显示的是元素图像; 若显示面板的光线偏振方向垂直于液晶透镜的取向, 则光焦度不发生改变, 此时显示面板显示的是 2D 图像。由于制备的液晶微透镜阵列基于多层结构, 该系统的观看角度有限。

针对如何引入追踪设备, 从而为集成成像显示系统提供大动态观看角度这个问题, 世界各地的研究课题组给出了各种办法。来自美国康涅狄格大学的 Javidi 团队<sup>[55]</sup>通过追踪设备获取观看者位置, 如图 15 所示, 该方法重新进行像素映射, 可以将新生成的元素图像整合为特定观看位置的三维图像, 避免了图像的翻转, 实现了  $18.2^\circ$  的动态观看角度。该种追踪显示方

法的最大动态观看角度被追踪设备的视场角所限制。针对以上问题, 王琼华团队<sup>[56]</sup>分析了观看者位置和观看区域之间的关系, 提出了基于部分重叠观看区域的集成成像追踪显示系统, 如图 16 所示。当观察者离开跟踪范围时, 该系统根据最后一次的追踪信息对观看区域进行优化。由于几乎所有观看区域都布置在跟踪范围之外, 因此观察者可以在追踪设备的视场角外以更宽的角度观看 3D 图像。日本广播协会的相关团队<sup>[57]</sup>将集成成像追踪显示和指向背光显示结合, 如图 17 所示, 利用指向背光源以时分复用的方式将左右眼的观看区域叠加。该系统每个时刻只显示一只眼睛所对应的观看区域, 光线密度得以提升, 因此进一步增加了显示的空间分辨率和显示深度。

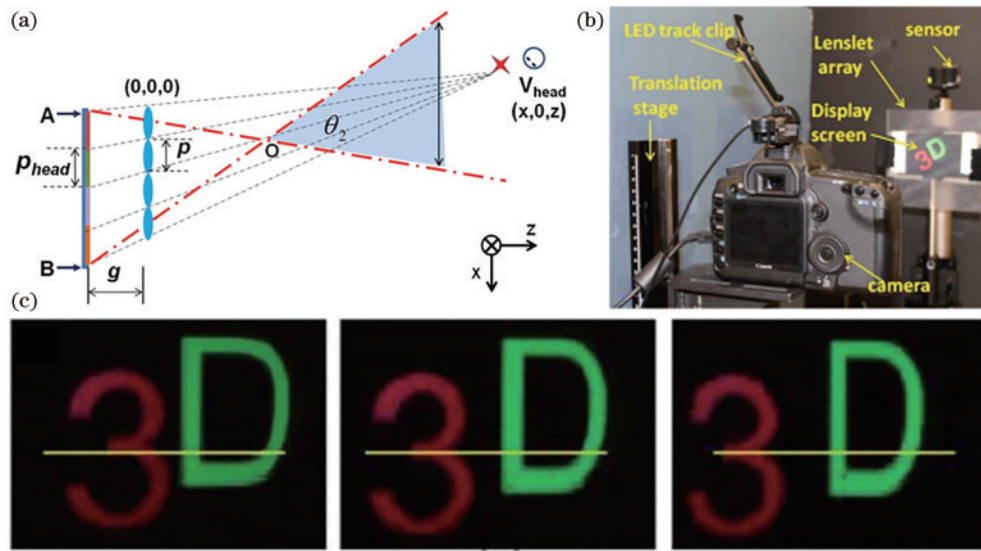


图 15 Bahram Javidi 团队的集成成像追踪显示系统<sup>[55]</sup>。(a)原理; (b)样机; (c)结果

Fig. 15 Integral imaging tracking display system proposed by Bahram Javidi's team<sup>[55]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) results

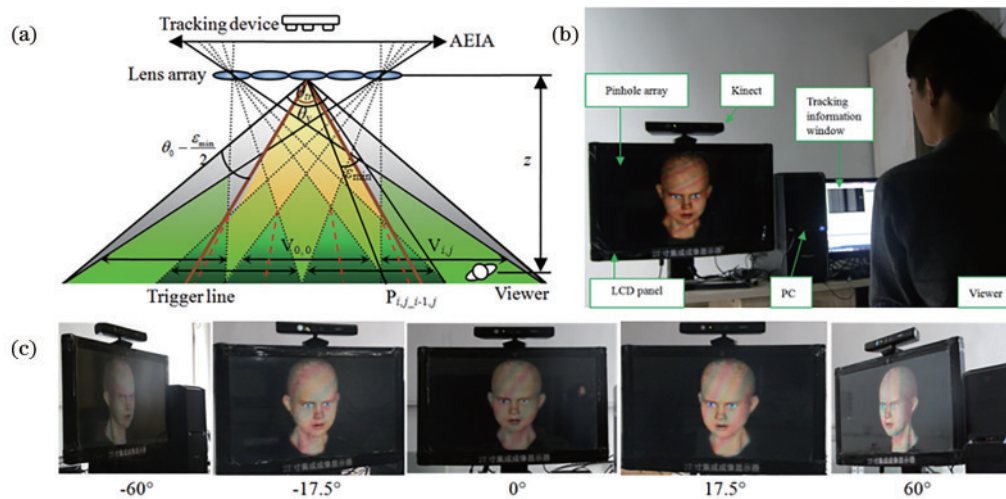


图 16 王琼华团队的集成成像追踪显示系统<sup>[56]</sup>。(a)原理; (b)样机; (c)结果

Fig. 16 Integral imaging tracking display system proposed by Qionghua Wang's team<sup>[56]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) results

人们已经在集成显示的设计与性能改善方面做了大量的研究, 但是基于集成成像的原理要求显示器必

须有极大的显示分辨率与信息量, 否则就很难获得好的三维显示效果。

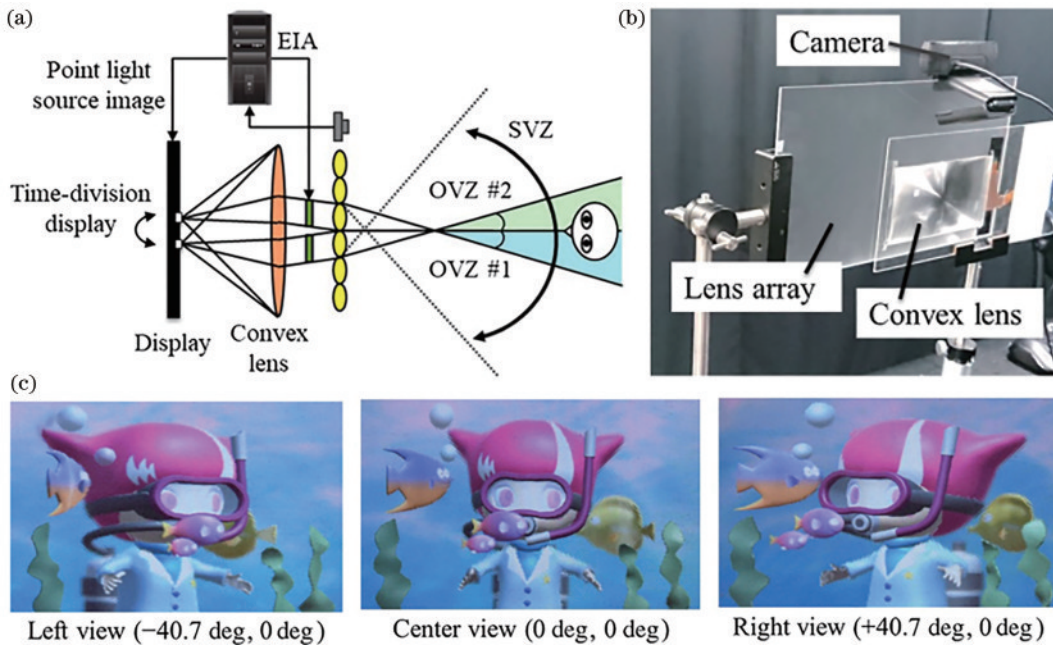


图 17 日本广播协会的相关团队的集成成像追踪显示系统<sup>[57]</sup>。(a)原理；(b)样机；(c)效果

Fig. 17 Integral imaging tracking display system proposed by Nippon Hoso Kyokai'team<sup>[57]</sup>. (a) Principle; (b) prototype; (c) results

## 5 指向光场三维显示

### 5.1 实现原理

自 2007 年美国南加州大学的 Jones 等<sup>[58]</sup>首次进行了指向光场显示(directional light field display)的原理实验起,指向光场显示即因可精确调控大量光线的方向信息而引起了众多关注。和集成成像显示相比,观看者在观看指向光场显示的三维图像时,无需位于图像源的共轭位置处。指向光场显示系统多数采用各向异性的光线调控元件,比如定向扩散屏、逐像素的衍射器件等,调控器件将视点图像信息直接投射到人眼中,使得三维显示不再受限于传统成像元件的视场角。

根据人眼的水平特性,定向扩散屏仅对竖直方向上的光线进行散射,对水平方向上的光线几乎无散射作用,通常可由光学微结构或全息结构实现。基于定向扩散屏实现的指向光场显示通常采用投影机作为图像源,投影图像经定向扩散屏后向竖直各方向扩散,经图像拼接后,观看者可观看到稳定的具有水平视差的三维图像。根据具体实现方式的差异,这种技术主要可以分为采用多投影机的拼接光场显示和采用高速投影机的扫描光场显示。定向扩散屏式指向光场显示的 2D/3D 模式切换较为简单,仅需投射未经处理的二维图像即可。

随着加工工艺的提升,逐像素衍射器件实现的指向光场显示也逐渐发展起来。此方法使用像素化的衍射器件将各个像素的光线矢量调制成多个会聚视点,每个衍射器件的周期和取向需要精确计算。基于逐像素衍射器件实现的指向光场显示通常采用液晶屏作为图像源,通过衍射器件和液晶屏的严格对准,衍射器件

对光束提供角度调制,液晶屏为光束提供振幅调制,从而实现指向光场显示。逐像素调制的衍射器件则可充分利用每个像素信息,且其设计自由度高,可实现大视场角显示,也可根据观看者的需求权衡显示分辨率和视角。衍射器件通常具有微米或纳米量级的厚度,易集成在手机、平板等移动设备上,实现便携式三维显示效果,但在使用衍射器件时,还需要关注其存在的彩色显示、大面积制备、衍射效率低、背光源的轻薄化等问题。考虑到在逐像素调制的指向光场显示中相邻像素间的方向差距可能较大,2D/3D 模式的切换实现还有待研究<sup>[59]</sup>。

### 5.2 实现方式

浙江大学刘旭团队详细地在基于定向扩散屏的指向光场显示的校准<sup>[60, 61]</sup>、均匀性<sup>[62]</sup>、串扰<sup>[63, 64]</sup>、交互<sup>[65]</sup>等方面做出了系统研究。该团队提出了可扩展的具有多屏 LCD 投影结构的指向光场显示<sup>[66]</sup>,该系统的投影机阵列中每个投影机由显示屏的子显示区域、投影透镜及孔阑组成,缩小了系统体积,如图 18 所示。同时系统利用模块化优势,以弧形 LCD 拼接和平行 LCD 拼接这两种方式分别搭建了两套针对不同应用场合的样机<sup>[67]</sup>。此系统不仅可以实现快速交互,还提供了基于聚合物分散液晶的图像自校正。

为了提高调控器件的设计自由度,逐像素衍射器件被应用于指向光场显示,苏州大学的乔文团队<sup>[68-69]</sup>在此方面做了诸多研究。为了保证相邻视点间的分离,纳米光栅的周期变化需在纳米量级,该团队自主研制了紫外连续变频纳米光刻系统<sup>[70]</sup>,周期在 30 nm~1 μm 范围内的光栅可以以 20 mm<sup>2</sup>/min 的速度得到制备。该团队使用此光刻系统实现了 32 inch 的显示效

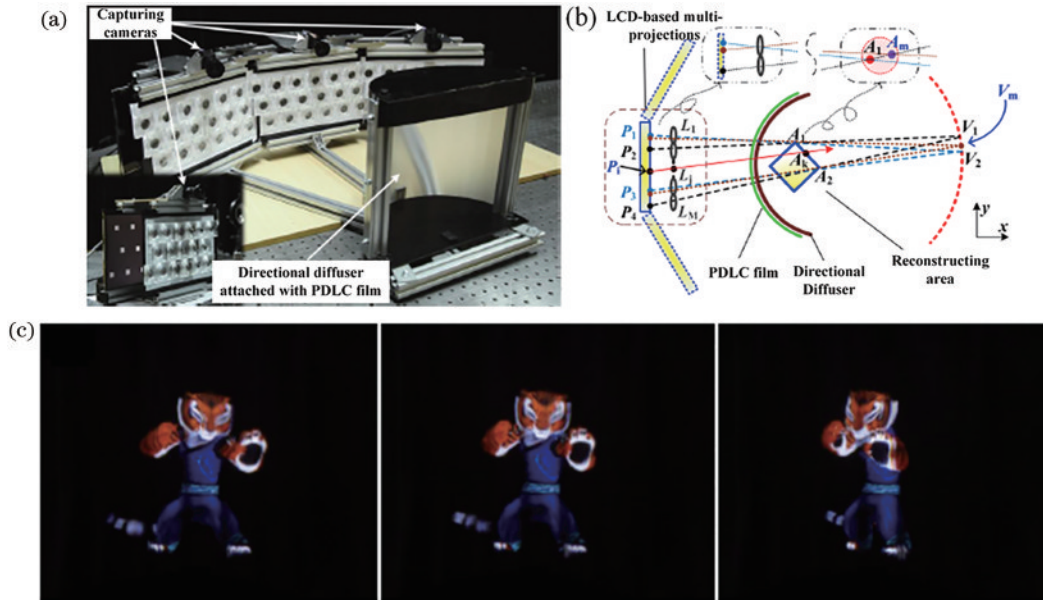


图 18 刘旭团队的可扩展的多液晶屏光场显示系统<sup>[66]</sup>。(a)样机;(b)原理;(c)效果

Fig. 18 Scalable light field display system based on multi-LCDs proposed by Xu Liu's team<sup>[66]</sup>. (a) Prototype; (b) principle; (c) results

果,大尺寸意味着需要制备的光栅数量很多,但当像素化纳米光栅制备完成后可使用纳米压印技术进行复制。

为了实现彩色显示,该团队<sup>[71]</sup>设计并制备了具有

特定尺寸的红绿蓝三层纳米光栅阵列,采用空间复用的排列方式进行白平衡调节,实现了虚实融合的彩色三维显示,如图 19 所示。针对三维显示的辐辏效应和视觉疲劳问题,该团队<sup>[72]</sup>实现了超多视点显示,该系统

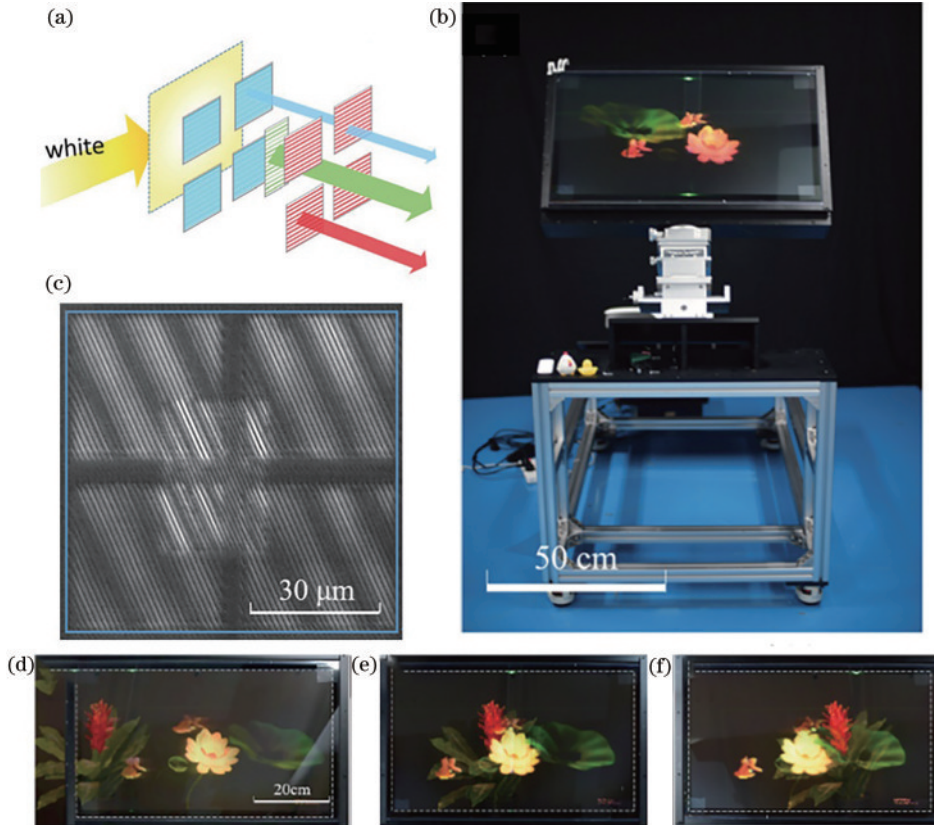


图 19 乔文团队的基于空间复用的指向光场显示<sup>[71]</sup>。(a)空间复用原理;(b)样机;(c)单亚像素的三层纳米光栅的扫描电镜图像;(d)~(f)效果

Fig. 19 Spatial multiplexing directional light field display system proposed by Wen Qiao's team<sup>[71]</sup>. (a) Schematic of spatial multiplexing; (b) prototype; (c) SEM image of three layers of metagratings with one subpixel; (d)~(f) results

在 6 inch 的衍射光栅元件上实现了 25 个视点,视点间距小于人眼平均瞳距,可提供平滑的运动视差和深度感知。针对三维显示技术的空间分辨率、角分辨率和观看角之间权衡的问题,该团队<sup>[73]</sup>使用纳米光栅形成

点/线/面等多种形状的混合视区分布,信息密度在空间上变化,实现了水平视角达 160°的全彩三维显示效果,同时,通过精心设计各视区的辐照度降低了串扰和视区间的不连续性,如图 20 所示。

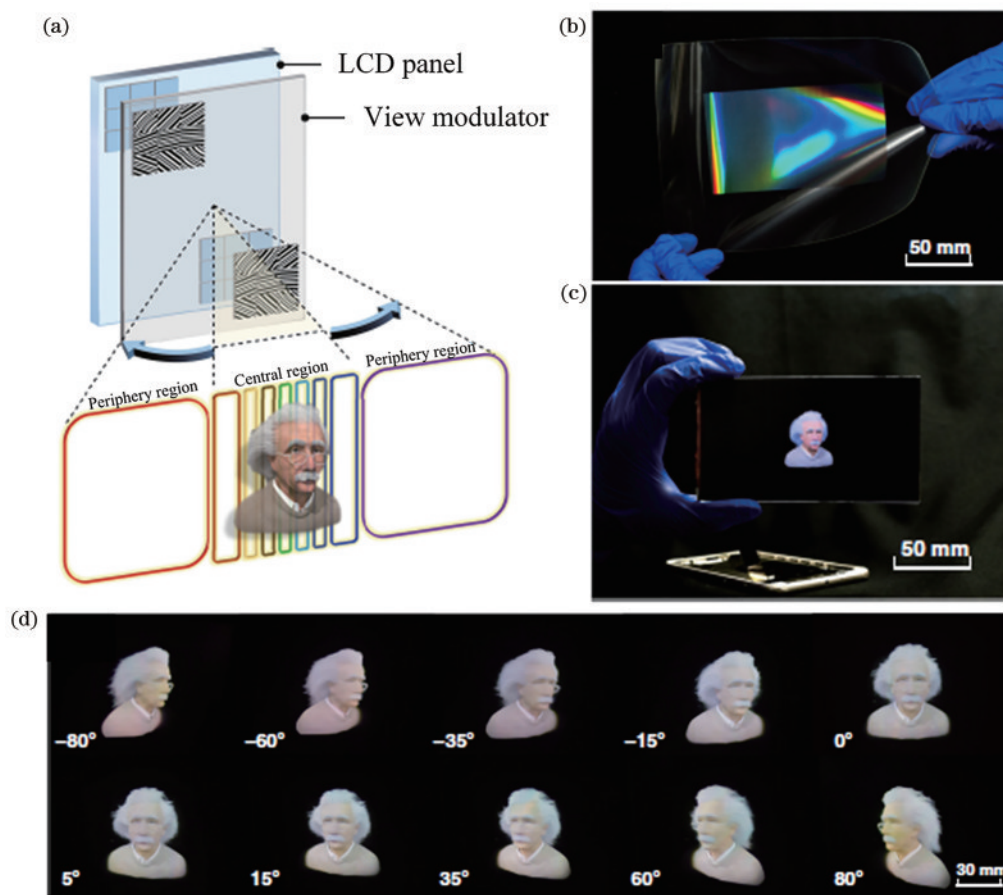


图 20 乔文团队的注视点裸眼三维显示<sup>[73]</sup>。(a)原理;(b)视点调制器实物图;(c)样机;(d)效果

Fig. 20 Foveated glasses-free 3D display system proposed by Wen Qiao's team<sup>[73]</sup>. (a) Principle; (b) photo of the view modulator; (c) prototype; (d) results

纳米光栅的衍射效率较低,其理论值为 40%,但实验测得效率值仅约 12%<sup>[74]</sup>。多台阶衍射光学元件,例如闪耀光栅、多级衍射透镜等可以有效改善这一问题,基于 4 台阶的闪耀光栅的指向光场显示系统可将光能利用率提高至 60%<sup>[75-76]</sup>。同时,多台阶的衍射光学元件还可利用高衍射级次来增加三维显示系统的观看深度范围,通过调节谐波衍射元件的高度,可将光强分布到所需的衍射级次,从而调整观看深度范围<sup>[77-78]</sup>。多级衍射透镜经优化设计后,可实现宽波段的图像显示。乔文团队<sup>[79]</sup>制备了灰度消色差衍射透镜,其衍射效率高达 82%,且可同时红绿蓝三个波长的显示图像增加观看的深度信息。然而由于加工限制,多级衍射透镜的最小特征尺寸通常比纳米光栅的最小特征尺寸大,这将导致视角损失<sup>[74]</sup>。

## 6 总结与发展

随着三维显示技术的逐渐发展,立体图像的实现

效果已经得到了显著的提升。然而三维显示不可避免地存在空间分辨率、角分辨率、观看角度之间的制约关系,这是因为为了重构高密度的光场信息,需要巨大的数据量,而现有的显示器件的信息量有限。为了更有效地利用显示带宽,为用户提供一个良好的视觉体验,在便携式三维显示方案中,指向背光显示可以借助视点追踪设备,高效利用液晶屏帧率,实现平滑运动视差、多人观看的效果;压缩光场显示也可以通过视点追踪设备实现注视点渲染,或者为不同视点图像赋予权重,优化显示图案;集成成像显示和追踪设备相结合,可以增大观看角度和分辨率;基于定向扩散屏的指向光场显示可采用追踪设备,为系统添加垂直视差。借助追踪系统可以缓解硬件上的不足,实现更好的显示效果。基于逐像素的衍射器件的指向光场显示具有设计自由度高的特点,可自定义视区形状来高效使用显示带宽,通过调控数据信息密度在空间上的变化,权衡空间分辨率、角分辨率、观看角之间的关系。在便携式

三维显示这一应用场景下,不仅追求更大的观看角度和空间分辨率,还对显示亮度和深度具有一定的要求,

本综述讨论了现有便携式三维显示的多种实现方案在亮度、观看角、分辨率和深度上的优缺点,如表 1 所示。

表 1 现有便携式三维显示的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of current portable 3D display

| Portable 3D display  | Luminance | Viewing angle /( $^{\circ}$ ) | Resolution      | Viewing distance |
|--|-----------|-------------------------------|-----------------|------------------|
| Directional backlighting 3D display <sup>[19,26]</sup>                     | High      | 15–40                         | High            | Small            |
| Compressive light field display <sup>[28,39]</sup>                         | Low       | 10–70                         | Relatively high | Large            |
| Integral imaging display <sup>[55–56]</sup>                                | High      | 18–120                        | Medium          | Small            |
| Directional diffuser based <sup>[67]</sup>                                 | High      | ~50                           | High            | Small            |
| Directional light field display Pixelated grating based <sup>[73,78]</sup> | Low       | 24–160                        | High            | Large            |
| Diffractive lens based <sup>[79]</sup>                                     | High      | ~9                            | Low             | Large            |

目前三维显示技术还处于研究阶段,真正实现实用化和商业化,推进三维显示走进人们的生活,还有很多工作需要改进。根据目前的研究进展,将未来还需要深入研究的方向简要分为 2 个方面。

1) 显示面板的带宽提升。首先,显示面板在分辨率、刷新率等方面的提升可从根本上解决三维显示数据量巨大的问题。Micro-LED 显示具有刷新率高、空间带宽积大的特点,相信随着 Micro-LED 显示的发展,可以有效改善三维显示的低分辨率问题<sup>[80]</sup>。其次,合理利用复用方式。目前三维显示多采用空分复用和时分复用的方式来提升显示带宽,考虑到人眼对一些光波物理属性的不敏感性,还可以和偏振复用、波长复用等相结合。比如,将偏振复用和时分复用相结合应用于指向背光显示中,可以提高视点数目<sup>[81]</sup>。最后,还可将不同三维显示方法结合进一步提升显示带宽。比如集成成像显示和指向背光显示结合后可提升光线密度,增大显示空间分辨率<sup>[57]</sup>。

2) 核心平面光学控光器件的改进。核心光学器件主要包括光束偏折器件和背光组件,二者需要相互配合实现控光精度和光学效率的提升。光束偏折器件可使用全息光学元件、微纳光学元件、液晶器件等实现。首先,全息光学元件作为一种波前调制元件,同样具有较高的设计自由度,但其角度带宽及波长带宽均较窄,提高感光材料的折射率调制度可以改善这一问题<sup>[82]</sup>。其次,在逐像素调节的微纳光学元件中,限制其发展的主要原因在于加工制备问题。比如要实现 32 inch 的显示,约需要  $1.68 \times 10^8$  个纳米像素<sup>[71]</sup>,未来实现大面积显示需要对制备的效率提出更高的要求。同时,可制备的最小特征尺寸的降低也有利于逐像素衍射光学元件的发展,比如,具有更高衍射效率、更大光谱响应范围的多层衍射透镜,目前其最小特征尺寸受限于制备工艺。最近发展出来的激光纳米分辨率直写技术可以实现对精度在几百纳米量级的大面积三维光学结构屏的直写加工,这些可以为高精度的像素级光线偏折屏与指向背光屏的制备奠定基础。最后,液晶器件具有可动态调整、折射率调制度大等优点。液晶的折射率调制度约为 0.2,使用液晶制备的偏振全息光学元

件有较大的波长带宽,且其偏振特性为偏振复用方式的实现提供了可能,因而可以推进偏振全息光学元件在三维显示中的应用<sup>[83]</sup>。另外,液晶器件的光学效率和观看角度还需要提高,色散需要减小。

背光系统作为三维显示系统的一个重要器件,通常存在体积较大、准直性不高等缺点,这些问题将导致三维显示效果降低,例如在逐像素衍射器件的指向光场显示中,背光源光束准直性的提升将有助于降低串扰和减少鬼像。为了更好地应用于便携式三维显示,背光系统需要满足出射光束发散角窄、均匀度高、背光面积大、结构轻薄、易加工、成本低等条件,这对背光系统的设计和制备是一个挑战。这些问题可以通过以下方式进行解决:采用波导式的背光组件实现结构的轻薄化;采用具有透镜元件和反射型微结构的两镜系统提升出射光束的准直度和均匀度<sup>[84]</sup>。

新型显示器件、微纳加工技术的发展将逐渐提升三维显示的硬件基础,算法改进以及信息传输、处理速度的加快将不断优化三维显示的效果,相信在未来,便携式三维显示的实现将有更多的方案选择、更逼真的实现效果、更舒适的观看体验。

## 参 考 文 献

- [1] Holliman N S, Dodgson N A, Favalora G E, et al. Three-dimensional displays: a review and applications analysis[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2): 362-371.
- [2] Son J Y, Son W H, Kim S K, et al. Three-dimensional imaging for creating real-world-like environments[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(1): 190-205.
- [3] 石晓卫, 苑慧, 吕茗萱, 等. 虚拟现实技术在医学领域的研究现状与进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 010006.  
Shi X W, Yuan H, Lü M X, et al. Current status and progress of virtual reality technology in medical field[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 010006.
- [4] Hoover M, Miller J, Gilbert S, et al. Measuring the performance impact of using the microsoft HoloLens 1 to provide guided assembly work instructions[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering,

- 2020, 20(6): 061001.
- [5] Lee J H, Yanusik I, Choi Y, et al. Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29788-29804.
- [6] Guo J D, Diao Z H, Yan S F, et al. Immersive autostereoscopic display based on curved screen and parallax barrier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(1): 013301.
- [7] Favolora G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure[J]. *Computer*, 2005, 38(8): 37-44.
- [8] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-16.
- [9] Zhang Y P, Fan H X, Wang F, et al. Polygon-based computer-generated holography: a review of fundamentals and recent progress[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(5): B363-B374.
- [10] Choi S, Gopakumar M, Peng Y F, et al. Neural 3D holography: learning accurate wave propagation models for 3D holographic virtual and augmented reality displays [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2021, 40(6): 1-12.
- [11] Kimmel J, Hautanen J, Levola T. Display technologies for portable communication devices[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2002, 90(4): 581-590.
- [12] Chien K W, Shieh H P D. Time-multiplexed three-dimensional displays based on directional backlights with fast-switching liquid-crystal displays[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 3106-3110.
- [13] Chen C H, Yeh Y C, Shieh H P D. 3-D mobile display based on Moiré-free dual directional backlight and driving scheme for image crosstalk reduction[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(1): 92-96.
- [14] Brott R, Schultz J. Directional backlight lightguide considerations for full resolution autostereoscopic 3D displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2010, 41(1): 218-221.
- [15] Teng T C, Tseng L W. Design of a bidirectional backlight using a pair of stacked light guide plates for large dual-view and 3D displays[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 509-516.
- [16] Ting C H, Chang Y C, Chen C H, et al. Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922-7928.
- [17] Wang Y J, Ouyang S H, Chao W C, et al. High directional backlight using an integrated light guide plate [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1567-1575.
- [18] Feng J L, Wang Y J, Liu S Y, et al. Three-dimensional display with directional beam splitter array[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1564-1572.
- [19] Hwang Y S, Bruder F K, Fäcke T, et al. Time-sequential autostereoscopic 3-D display with a novel directional backlight system based on volume-holographic optical elements[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9820-9838.
- [20] Sung G Y, Kim Y T, Nam D K, et al. Apparatus and method for displaying holographic image using collimated directional backlight unit: US9134699[P]. 2015-09-15.
- [21] Fan H, Zhou Y G, Wang J H, et al. Full resolution, low crosstalk, and wide viewing angle auto-stereoscopic display with a hybrid spatial-temporal control using free-form surface backlight unit[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(7): 620-624.
- [22] Krebs P, Liang H W, Fan H, et al. Homogeneous free-form directional backlight for 3D display[J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 112-117.
- [23] Borjigin G, Kakeya H. An autostereoscopic display with time-multiplexed directional backlight using a decentered lens array[C]//*Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019*, May 19-23, 2019, Bordeaux, France. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2019: W2A. 2.
- [24] Borjigin G, Kakeya H. Autostereoscopic displays with time-multiplexed directional backlight using curved lens arrays[J]. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2021, 9(1): 80-85.
- [25] Li Z Y, Gao C, Li H F, et al. Portable autostereoscopic display based on multi-directional backlight[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 21478-21490.
- [26] Li X K, Chen X H, He Y, et al. Multi-user, high-resolution, high-quality directional backlight autostereoscopic display[J]. *Optics Communications*, 2022, 520: 128456.
- [27] Lanman D, Hirsch M, Kim Y, 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.
- [28] Wetzstein G, Lanman D, Heidrich W, 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): 1-12.
- [29] Zhang J H, Fan Z C, Sun D W, 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.
- [30] Lanman D, Wetzstein G, Hirsch M, et al. Polarization fields: dynamic light field display using multi-layer LCDs [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 1-10.
- [31] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Tensor displays: compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2012, 31(4): 1-11.
- [32] Heide F, Lanman D, Reddy D, et al. Cascaded displays: spatiotemporal superresolution using offset pixel layers [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2014, 33(4): 1-11.
- [33] Hirsch M, Lanman D, Wetzstein G, et al. Construction and calibration of optically efficient LCD-based multi-layer light field displays[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 415: 012071.
- [34] Maimone A, Fuchs H. Computational augmented reality eyeglasses[C]//*2013 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, October 1-4, 2013, Adelaide, SA, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 29-38.

- [35] Lee S, Jang C, Moon S, et al. Additive light field displays: realization of augmented reality with holographic optical elements[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(4): 1-13.
- [36] 芦云龙, 盛杰超, 方勇, 等. 固态体积式真三维立体显示效果优化[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(5): 518-523.  
Lu Y L, Sheng J C, Fang Y, et al. Optimizing effect of solid volumetric true 3D display[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(5): 518-523.
- [37] Zhu L M, Du G, Lü G Q, et al. Performance improvement for compressive light field display with multi-plane projection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106609.
- [38] Liu M L, Lu C H, Li H F, et al. Bifocal computational near eye light field displays and structure parameters determination scheme for bifocal computational display [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4060-4074.
- [39] Chen D, Sang X Z, Yu X B, et al. Performance improvement of compressive light field display with the viewing-position-dependent weight distribution[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29781-29793.
- [40] Gao C, Dong L Q, Xu L, et al. 20.3: weighted simultaneous algebra reconstruction technique (wSART) for additive light field synthesis[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2022, 53(S1): 243-246.
- [41] Gao C, Liu X, Li H F. GPU acceleration of weighted additive light field displays[C]//*Imaging and Applied Optics Congress 2022, July 11-15, 2022, Vancouver, British, Columbia. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2022: JW2A.1.*
- [42] Liu M L, Lu C H, Li H F, et al. Near eye light field display based on human visual features[J]. *Optics Express*, 2017, 25(9): 9886-9900.
- [43] Gao C, Peng Y F, Wang R, et al. Foveated light-field display and real-time rendering for virtual reality[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(28): 8634-8643.
- [44] Lippmann G. La photographie integrale[J]. *Comptes Rendus Academie des Sciences*, 1908, 146: 446-451.
- [45] 李鹤楠. 集成成像系统中立体场景的采集、重构与显示技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021: 17-21.  
Li H N. Research on acquisition, reconstruction and display technology in integral imaging system[D]. Changchun: Jilin University, 2021: 17-21.
- [46] 王梓. 集成成像 3D 显示技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 22-26.  
Wang Z. Studies on integral imaging 3D display[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 22-26.
- [47] Gao X, Sang X Z, Yu X B, et al. 360° light field 3D display system based on a triplet lenses array and holographic functional screen[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(12): 121201.
- [48] Yang S W, Sang X Z, Yu X B, et al. 162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 33013-33021.
- [49] Xie X H, Yu X B, Gao X, et al. Extended depth of field method with a designed diffraction optical element based on multi-depth fusion and end-to-end optimization[J]. *Optics Communications*, 2022, 517: 128317.
- [50] Wang Y D, Yu X B, Gao X, et al. End-to-end optimization of an achromatic diffractive optical element array for integral imaging three-dimensional display[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 7052308.
- [51] Zhang H L, Deng H, Yu W T, et al. Tabletop augmented reality 3D display system based on integral imaging[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(5): B16-B21.
- [52] Deng H, Chen C, He M Y, et al. High-resolution augmented reality 3D display with use of a lenticular lens array holographic optical element[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(4): 588-593.
- [53] Zhang H L, Deng H, Li J J, et al. Integral imaging-based 2D/3D convertible display system by using holographic optical element and polymer dispersed liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 387-390.
- [54] Tian L L, Chu F, Zhao W X, et al. Fast responsive 2D/3D switchable display using a liquid crystal microlens array[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5870-5873.
- [55] Shen X, Corral M M, Javidi B. Head tracking three-dimensional integral imaging display using smart pseudoscopic-to-orthoscopic conversion[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(6): 542-548.
- [56] Xiong Z L, Wang Q H, Li S L, et al. Partially-overlapped viewing zone based integral imaging system with super wide viewing angle[J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22268-22277.
- [57] Okaichi N, Sasaki H, Kano M, et al. Integral three-dimensional display system with wide viewing zone and depth range using time-division display and eye-tracking technology[J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(1): 013103.
- [58] Jones A, McDowall I, Yamada H, et al. Rendering for an interactive 360° light field display[C]//*ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies, August 5-9, 2007, San Diego, California. New York: ACM Press, 2007: 40.*
- [59] 乔文, 周冯斌, 陈林森. 距离移动电子设备有多远? 裸眼 3D 显示现状与展望[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 0303002.  
Qiao W, Zhou F B, Chen L S. Towards application of mobile devices: the status and future of glasses-free 3D display[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303002.
- [60] Chen B S, Zhong Q, Li H F, et al. Automatic geometrical calibration for multiprojector-type light field three-dimensional display[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(7): 073107.
- [61] Ni L X, Li Z X, Li H F, et al. 360-degree large-scale multiprojection light-field 3D display system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(8): 1817-1823.
- [62] 王涵, 夏新星, 于超, 等. 集成光场三维显示亮度均匀性校正方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(1): 1-5, 62.  
Wang H, Xia X X, Yu C, et al. Brightness uniformity



- correction method of light field integral three-dimensional display[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2015, 49(1): 1-5, 62.
- [63] Peng Y F, Li H F, Zheng Z R, et al. Crosstalk evaluation in multiview autostereoscopic three-dimensional displays with an optimized diaphragm applied [J]. *Journal of Information Display*, 2012, 13(2): 83-89.
- [64] Zhong Q, Peng Y F, Li H F, et al. Multiview and light-field reconstruction algorithms for 360° multiple-projector-type 3D display[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4419-4425.
- [65] Su C, Xia X X, Li H F, et al. A penetrable interactive 3D display based on motion recognition (Invited Paper) [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 60007-60010.
- [66] Peng Y F, Li H F, Wang R, et al. Self-calibration three-dimensional light field display based on scalable multi-LCDs[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(12): 653-660.
- [67] 彭祎帆. 拼接视场光场三维显示机理及技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Peng Y F. Principle and establishment of the light field three-dimensional display based on spliced view-field[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [68] Wan W Q, Qiao W, Huang W B, et al. Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1114-1122.
- [69] Zhou F B, Qiao W, Chen L S. Fabrication technology for light field reconstruction in glasses-free 3D display[J]. *Journal of Information Display*, 2023, 24(1): 13-29.
- [70] Wan W Q, Qiao W, Huang W B, et al. Efficient fabrication method of nano-grating for 3D holographic display with full parallax views[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6203-6212.
- [71] Shi J C, Qiao W, Hua J Y, et al. Spatial multiplexing holographic combiner for glasses-free augmented reality [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 3003-3010.
- [72] Wan W Q, Qiao W, Pu D L, et al. Super multi-view display based on pixelated nanogratings under an illumination of a point light source[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106258.
- [73] Hua J Y, Hua E K, Zhou F B, et al. Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 1-9.
- [74] Hua J Y, Qiao W, Chen L S. Recent advances in planar optics-based glasses-free 3D displays[J]. *Frontiers in Nanotechnology*, 2022, 4: 829011.
- [75] Hua J Y, Yi D H, Qiao W, et al. Multiview holographic 3D display based on blazed Fresnel DOE[J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125829.
- [76] Zhou F, Hua J Y, Shi J C, et al. Pixelated blazed gratings for high brightness multiview holographic 3D display[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(5): 283-286.
- [77] Wu Y C, Rivenson Y, Zhang Y B, et al. Extended depth-of-field in holographic imaging using deep-learning-based autofocusing and phase recovery[J]. *Optica*, 2018, 5(6): 704-710.
- [78] 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.
- [79] 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): 288-294.
- [80] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1): 1-16.
- [81] Fan Y J, He Y, Chen X H, et al. A polarization modulated directional backlight autostereoscopic display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2023, 31(1): 3-12.
- [82] Bruder F K, Frank J, Hansen S, et al. Expanding the property profile of Bayfol HX films towards NIR recording and ultra-high index modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11765: 117650J.
- [83] Weng Y S, Xu D M, Zhang Y N, et al. Polarization volume grating with high efficiency and large diffraction angle[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 17746-17759.
- [84] 吴仍茂, 张子钧, 李子寅, 等. 一种用于裸眼三维显示的波导型高均匀度定向背光系统: CN114815298A[P]. 2022-07-29.
- Wu R M, Zhang Z J, Li Z Y, et al. Waveguide type high-uniformity directional backlight system for naked eye three-dimensional display: CN114815298A[P]. 2022-07-29.