

## 光场显示技术的研究现状与发展趋势\*

康家欣<sup>1</sup>, 王文雯<sup>1</sup>, 彭玉颜<sup>1</sup>, 张家振<sup>1</sup>, 周雄图<sup>1,2</sup>, 严群<sup>1,2</sup>,  
郭太良<sup>1,2</sup>, 张永爱<sup>1,2\*\*</sup>

(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)

**摘 要:** 目前常用的三维显示技术, 一般是通过人眼的双目视差和视觉暂留效应实现的三维效果。由于丢失了深度信息, 会引起辐辏调节冲突, 使观看者产生不适感。光场显示是通过复现物体表面光线的真三维显示技术, 其拥有良好的用户体验, 符合人们对于未来显示的需求。文章梳理了各种光场显示技术的原理和特点, 分析了国内外光场显示技术的发展现状, 整理了国内外的研究进展和代表性样机的性能, 最后对我国光场显示的发展进行了展望。我国光场显示虽然起步稍晚, 但经过多家科研机构的一致努力, 已在国际上拥有一定的地位。

**关键词:** 光场显示; 三维显示; 集成成像; 近眼显示; 悬浮光场显示

**中图分类号:** TN27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)02-0116-13

## Research Status and Trends of Light Field Display Technology

KANG Jiaxin, WANG Wenwen, PENG Yuyan, ZHANG Jiazhen, ZHOU Xiongtu,  
YAN Qun, GUO Tailiang, ZHANG Yongai

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN; 2. Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350108, CHN)

**Abstract:** Currently, the most widely used three-dimensional (3D) display technology often uses the binocular parallax and transient visual effect of the human eye to generate the three-dimensional impression. The lack of depth information will lead to a conflict in the convergence adjustment and discomfort for the viewer. A true 3D display technology, light field display reproduces light on an object's surface, offers a positive user experience, and it satisfies people's needs for future displays. In this paper, the principles and characteristics of various light field display technologies were combed, the development of light field display technologies at home and abroad were analyzed. Then, the research progress and the performance of representative prototypes were sorted out. Finally, the development of light field display in China was prospected. Despite China's light field exhibition getting off to a rather late start, it

收稿日期: 2022-12-14

\* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3606600); 福建省自然科学基金(2021J01577)

作者简介: 康家欣(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为液晶透镜、3D显示技术; (E-mail: 475696409@qq.com)

王文雯(1997—), 女, 博士研究生, 研究方向为集成成像3D显示技术; (E-mail: 1172160632@qq.com)

张永爱(1977—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为新型显示技术、3D显示技术。(E-mail: yongaizhang@fzu.edu.cn)

\*\* 通讯作者

has earned some notoriety abroad thanks to the combined efforts of various academic organizations.

**Key words:** light field display; three-dimensional display; integral imaging display; near-eyes display; floating light field display

## 引言

研究表明,人类通过视觉获取的信息占80%以上<sup>[1]</sup>,然而,传统的二维(Two-dimensional, 2D)显示只能获取空间物体某一截面的2D图像信息,由于缺乏真实的深度信息,在展示高纬度的图形时会造成混淆,无法正确表示空间关系和深度信息。因此,具有更好沉浸感的三维(Three-dimensional, 3D)显示技术应运而生,是新型显示技术的重要发展方向。

根据引起人眼立体机制的不同,现有的3D显示可分为助视3D显示、双目视差3D显示和真3D显示三大类(如图1)。观看者需要佩戴眼镜的助视3D显示技术随着2009年3D电影《阿凡达》的上映已成熟并商业化;双目视差3D显示是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。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。

对比前两种3D显示技术,真3D显示(大致分为光场显示和全息显示两种),可以提供近乎真实的3D图像信息和真正的物理景深,在3D传感器<sup>[2-3]</sup>、3D电视<sup>[4]</sup>、医学成像<sup>[5]</sup>等方面取得了很好的进展。全息显示理论上可以恢复空间物体全部的视觉信息,重构出完全逼真的场景。然而,由于需要处理大量的场景数据,在计算速度和传输速率方面有明显的技术限制,因此,很难实现多色和高分辨率的动态场景显示<sup>[6]</sup>;而光场显示只关注物体表面的光强度,舍弃了对人眼无用的光相位信息,因此数据量大幅度减少,只需一次曝光就可以记录空间物体所有的光场信息,其结构简单、性能优良,获得众多学者研究并逐步进入大众视野。

光场显示技术主要分为集成成像光场显示、光场扫描显示、投影阵列光场显示、层叠光场显示、矢量光场显示、近眼光场显示和悬浮光场显示等。本文旨在介绍光场显示的分类、梳理其最新研究成果并对未来进行展望,帮助研究学者更全面了解该领域的研究进展。

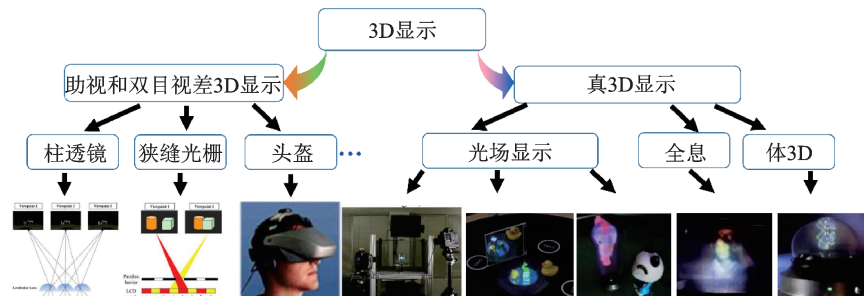


图1 三维显示技术分类

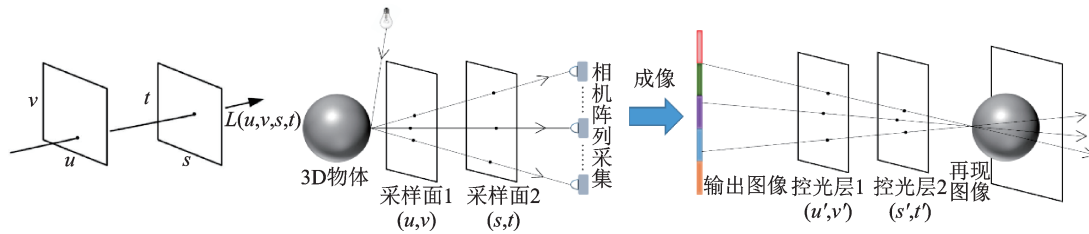
Fig.1 Classification of 3D display technology

## 1 光场显示的概念与重要意义

### 1.1 光场显示概念

光场是光线在空间中的分布,光场成像的雏形可以追溯到1903年Ives发明的双目视差显示系统中运用的针孔成像技术<sup>[7]</sup>。1908年Lippman对Ives的装置进行改进,用微透镜阵列代替针孔阵列<sup>[8]</sup>,直到Gershun在1936年提出光场是分布于三维空间中所有矢量光线的集合<sup>[9]</sup>。但受到当时计算能力及工艺

水平限制,光场理论难以得到有效验证和实践。1992年Adelson提出了7D全光函数理论<sup>[10]</sup>,用来表示发光点的位置、方向、波长和时间,但七维函数的计算量十分巨大。而在1996年Levoy<sup>[11]</sup>和Gortler<sup>[12]</sup>将光场概念具体化,提出了如图2所示的4D光场渲染理论,即在不考虑光线的时间和波长,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两个平面的坐标系,定向线将 $uv$ 平面上的点连接到 $st$ 平面上的一个点。光场表征理论的不完善也加速了光场显示设备的研究和发展。

图 2 4 维函数表征示意图<sup>[11]</sup>和光场显示原理图Fig.2 4D flow chart of light field function<sup>[11]</sup>and concept of light field display

## 1.2 光场显示的意义

光场显示技术是模拟人眼观察真实三维场景接受到的漫反射光分布,利用特殊显示和控光器件重构三维空间光场信息的三维显示技术,能够给观看者提供真实的三维动态显示效果。要实现光场显示,需要构建一种可以控制平面或柱面显示屏上每个点的光线强度和方向的显示器。光场三维显示是在重新构建三维物体的发光分布基础上实现的一种三维显示,因此具有连续视角、消除聚焦辐辏冲突<sup>[13]</sup>等特点,但它所需要的信息量相比常规平面显示器信息量增大了数个量级,因此对现有显示技术提出了新的挑战。

显示技术在中国得到了大力发展,已经经历了轻薄化和大型化的发展阶段,目前正处在精细化的关键阶段,超高清视频产业将推动显示的立体化进程。三维显示技术与产业是新型显示产业重要组成部分和重点发展方向。发达国家不仅在立体显示技术和设备方面拥有大量相关专利和知识产权,而且已经逐步往产业化方向发展。因此,保持与世界先进水平同步,并形成自主知识产权的立体显示核心关键技术,开展裸眼三维显示技术的研究,不仅仅是一个技术性的问题,同时也是一种战略性的问题。

## 2 光场显示技术现状与发展趋势

国内开展光场显示的几家单位长期坚持相关技术的研究,在光场三维显示的机理、光学系统设计理论、三维图像显示景深模型构建与优化方法、基于集成成像和全息功能屏的大视角光场显示方法、基于非球面透镜阵列和全息功能屏的大尺寸、大视角光场显示系统构建等领域取得很多创新性的成果。浙江大学开发了探入式悬浮光场 3D 显示系统,实现了 360°交互式桌面光场 3D 显示,该系统可稳定识别多种手部动作,拥有顺畅的 3D 图像交互体验<sup>[14-15]</sup>。该系统引入了人眼跟踪模块,保证了

观看者在移动过程中始终能接收到正确的图像信息。北京航空航天大学与四川大学研制了多种尺寸的集成成像光场 3D 显示器,具有结构紧凑、功耗低的优点;实时 3D 光场拍摄与显示系统显著提升了 3D 信息的处理速度,实现了对真实场景信息的实时采集与光场重构;搭建的桌面光场显示系统如图 3(a)所示,在不引入机械运动器件的前提下实现了 360°的环视观看视角<sup>[16]</sup>。北京邮电大学将全息功能屏引入光场显示,通过光学优化设计的方法提升透镜阵列的成像质量,搭建了大视角的动态光场显示系统,其显示效果如图 3(c)所示,在面向光场显示的光机设计上积累了丰富的经验,并提出了基于反向光线追踪的 3D 内容制作方法,大大提升了虚拟 3D 内容的生成速度<sup>[17-18]</sup>。清华大学将集成成像与图像悬浮器件结合,实现了 3D 医学图像的悬浮显示<sup>[19]</sup>,系统配置如图 3(b)所示,推动了光场显示技术在生物医疗方面的应用等。

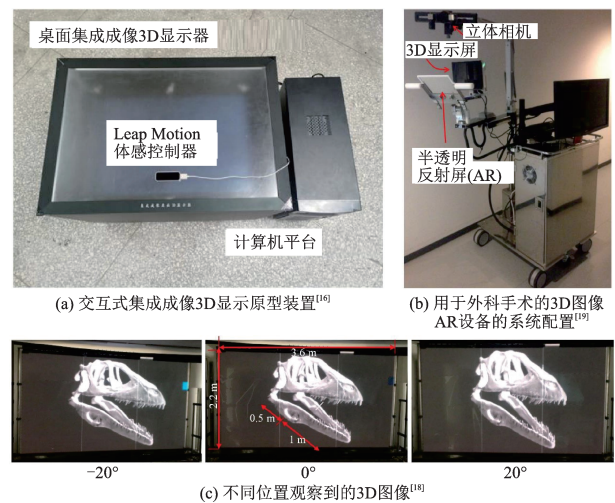


图 3 国内对于光场显示研究的成果

Fig.3 Domestic research on light field displays

在国外,美国南加州大学提出了如图 4 所示的基于超薄投影仪的三维显示系统,采用凸面反射显示屏,具有较大的水平视角<sup>[20]</sup>。之后通过增加投影仪的数量,实现了如图 4(a)所示的真人大小的多投影光场显示系统,延迟较低,可以实现实时对话<sup>[21]</sup>。



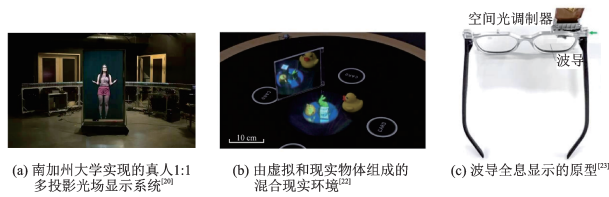


图4 国外对于光场显示研究的成果

Fig.4 Foreign research on light field displays

日本的国家通信技术研究所提出一种可以交互的3D桌面显示系统<sup>[22]</sup>,虚拟图像可以漂浮在桌面上,适合小组讨论和电话会议。由于该桌面显示存在水平视差,虚拟图像和真实物体都可以被镜子反射,如图4(b)。韩国首尔国立大学提出了由波导组合器、空间光调制器和激光光源组成的一种近眼显示概念,如图4(c),这种组合可以将全息显示器与

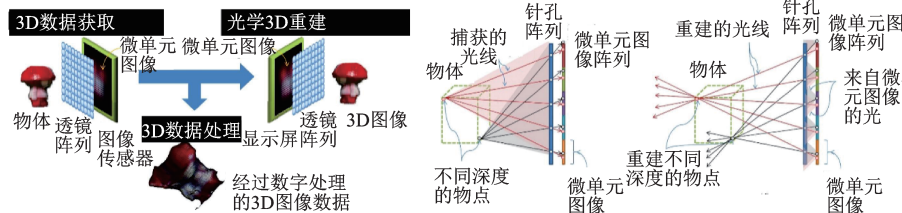
图5 集成成像的概念和使用针孔阵列对光线进行采集和重建的原理图<sup>[24]</sup>

Fig.5 Concept of integral imaging and optical reproduction of the sampled light rays using a pinhole array

2005年,韩国首尔国立大学ByoungHo Lee利用图像分辨率、视角和图像深度等观测参数对三维集成成像系统进行了分析<sup>[27]</sup>,新的分析方法可以以更高的精度预测集成成像系统的视角,有助于实现最佳的3D显示系统。2008年,又提出利用对每个微单元图像选定位置处的像素进行视差估计,根据估计的结果针对集成成像生成任意透视和正交视点的方法<sup>[28]</sup>。2009年,提出利用电致发光薄膜背光实现2D/3D切换的集成成像显示系统,证明了使用可弯曲的电致发光薄膜的光转换层制作柔性集成成像系统的可行性<sup>[29]</sup>。2013年,提出基于集成成像的实时采集与显示系统<sup>[30]</sup>。2015年,提出基于全息光学元件的2D/3D可切换投影屏<sup>[31]</sup>。2016年,利用全息光学元件的布拉格不匹配特性,将集成成像的显示视角从 $15^\circ$ 提高到了 $30^\circ$ <sup>[32]</sup>。2021年,将集成成像与断层扫描显示器相结合,克服了集成成像中与像素数量相关的性能限制<sup>[33]</sup>。

国内的北京航空航天大学 and 四川大学研制了127 cm的壁挂式可交互集成成像显示器以及大尺寸 $360^\circ$ 桌面集成成像显示器<sup>[16]</sup>,如图6(a)、(b)。清华大学搭建了金字塔式悬浮集成成像光场显示装置<sup>[34]</sup>。福州大学在用于集成成像3D显示的微透镜

波导技术相结合,从而实现全息增强显示眼镜<sup>[23]</sup>。

## 2.1 集成成像光场显示

集成成像光场显示是利用微透镜阵列对空间中的物体或者三维场景进行记录以及后期的还原重构,一般使用在显示器前方添加一组微透镜阵列的方式实现。每个微透镜单元会记录下来来自不同视角的微单元图像,微单元图像阵列被微透镜阵列投射,在三维空间中还原出不同视角的光线,由此重现物体或三维场景,如图5所示。集成成像可以为观看者提供水平与竖直方向的视差和连续平滑的视点信息,实现较真实的三维光场显示效果;但是受限于显示平面的分辨率、透镜阵列的制作及其内在几个重要显示性能指标的制约,显示的视角小、深度小、分辨率低,显示的细腻程度不高<sup>[24-26]</sup>。

阵列制备方面取得较大进展。2016年,提出一种基于丝网印刷的大面积、高性能微透镜阵列的制备方法<sup>[35]</sup>,如图6(c)。图6(d)是58 cm集成成像3D显示样机的显示效果。之后在柔性PMMA衬底上制作了大规模微透镜阵列,与2D显示屏结合,实现了宽视角的集成成像显示器<sup>[36]</sup>,图6(e)是该显示器的柔性屏幕,并且通过电调谐焦距改善复合微透镜阵列的景深<sup>[6]</sup>,如图6(f)。2019年,该团队又采用高阻抗层圆孔驱动电极的液晶微透镜阵列实现2D/3D可切换的14 cm集成成像3D显示样机。

## 2.2 扫描光场显示

扫描光场显示的系统配置一般由高速电机、旋转的散射屏及高速投影仪组成,如图7所示,高帧率投影仪将图像投射到旋转的屏幕上,在空间中构建 $360^\circ$ 三维图像,利用人眼视觉暂留特性,实现光场显示的效果。高速投影单元相对屏幕进行移动扫描可以构建连续的光场分布,通常采用屏幕转动而投影机静止的方式,为了保证观看质量,屏幕的旋转速度需超过25转/秒。扫描光场三维显示设备可以提供较好的图像质量,和投影阵列相比结构简单,成本低廉,不需要对系统进行校



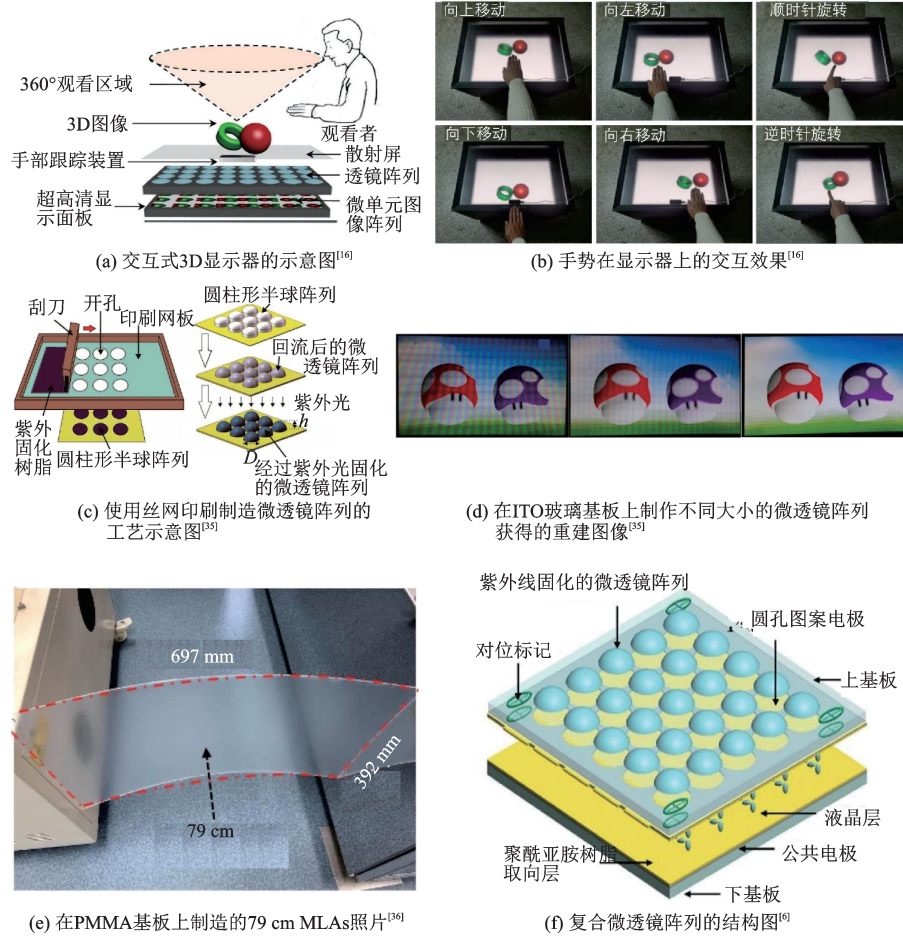


图 6 国内各高校对于集成成像的研究

Fig.6 Research on integral imaging light field display at domestic universities

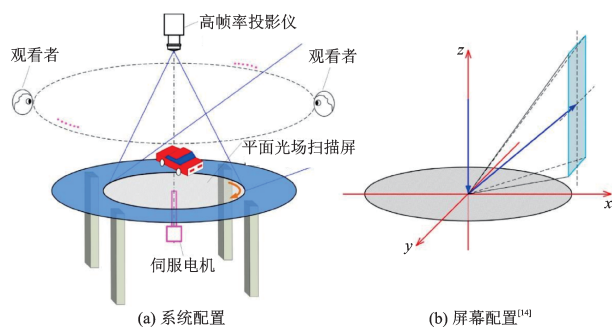


图 7 一种扫描光场

Fig.7 Flat light field scanning screen

准。但目前由于存在机械扫描结构和运动部件,显示屏尺寸不能太大,因此比较适合中等尺寸的光场显示。

2007年,南加州大学采用了一台高速数字光处理(Digital Light Processing, DLP)投影单元将图像投射到高速旋转的光场屏上,当屏幕转到不同位置时,投影仪投射出对应视点的图像,实现了360°的水平光场显示,系统有288个水平光场图像,刷新频率达到20 Hz<sup>[37]</sup>,如图8(a)。2009年,南加州大学的学

者们进一步将人脸实时重建技术引入扫描光场显示系统,但此系统只能显示单色图像<sup>[38]</sup>。为了实现便于交互的彩色扫描光场显示,日本 Takaki 等在2014年提出用视角扫描的方式构建桌面显示装置,由于每个投影机仅显示一种颜色,因此需要用多个投影机合成彩色<sup>[39]</sup>,如图8(b)。

2013年,浙江大学使用高速DLP投影单元和水

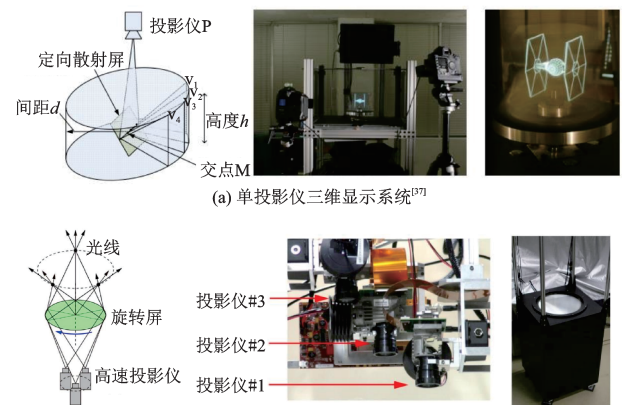


图 8 早期的扫描光场显示系统

Fig.8 Early flat light field scanning screen system

平旋转的反射屏,采用背投影方式,实现了可探入式的悬浮式彩色光场扫描桌面显示<sup>[44]</sup>,但是只能显示半色调3D图像。2014年在上述系统的基础上,将反射屏改为投射屏,减少了环境光的影响,并且改进了手势交互方法<sup>[15]</sup>,如图9(a)、(b)。2015年实现了计算机到显示系统的实时海量光场数据的生成和传输,系统具有600个水平光场图像,每个光场图像分

辨率1 024×768,传输速率为20 fps<sup>[40]</sup>。2016年,将几种最新的半色调方法应用于扫描光场显示的灰度增强,提高了图像细节<sup>[41]</sup>。2019年,使用两台360°全景摄像机获取显示器周围观察者面部的准确位置,用于绘制具有垂直视差的图像,使观看者可以在不同位置观察到没有任何串扰的3D图像<sup>[42]</sup>,图9(c)和(d)是有无面部追踪装置,观众看到的图像。

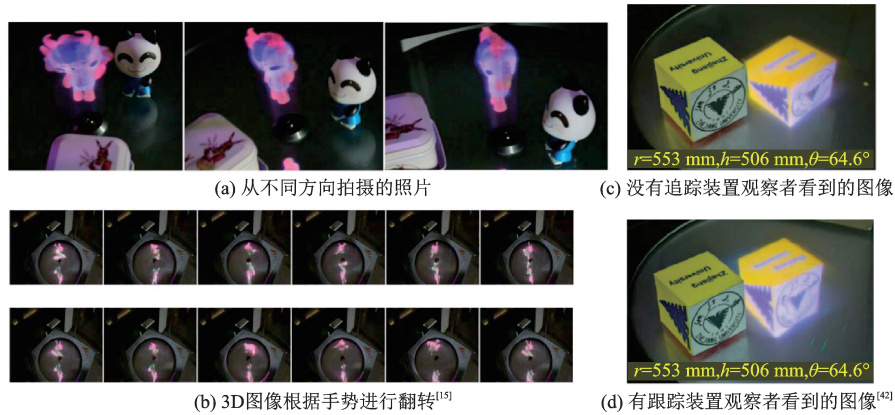


图9 浙江大学构建的光场扫描装置

Fig.9 Research on the scanning light field display by Zhejiang University

### 2.3 投影阵列光场显示

投影阵列光场显示由多台投影机组成的投影阵列和散射屏构成,屏上的每一个像素点有多个方向的发光光线,每根光线由后面的对应的投影单元单独控制<sup>[43-44]</sup>。投影阵列在空间上高密度叠加二维图像信息,是现有技术条件下提高显示信息量的一个技术手段。投影阵列本身体积较大,比较适合于构建大型的光场显示设备,满足众人同时观看,具有较强的沉浸感和强烈的视觉冲击力<sup>[45]</sup>。

图10(a)是匈牙利Holografika公司在2005年提出的由96台投影机组成的HoloVizio三维显示的原型机,次年将三维分辨率提升到50 M(平面分辨率乘以角度分辨率),之后不断提升系统的性能,目前的显示分辨率为平面分辨率1 280×768,三维分辨率73 M像素数,显示屏幕183 cm<sup>[43,46-49]</sup>。2013年,韩国三星公司构建了254 cm的光场投影显示系统,探究了投影机阵列的排布对画面的影响<sup>[50]</sup>。同年,美国南加州大学将投影机换成超薄投影机以减小间距,在一个反射式屏幕上构建了一个视角达到

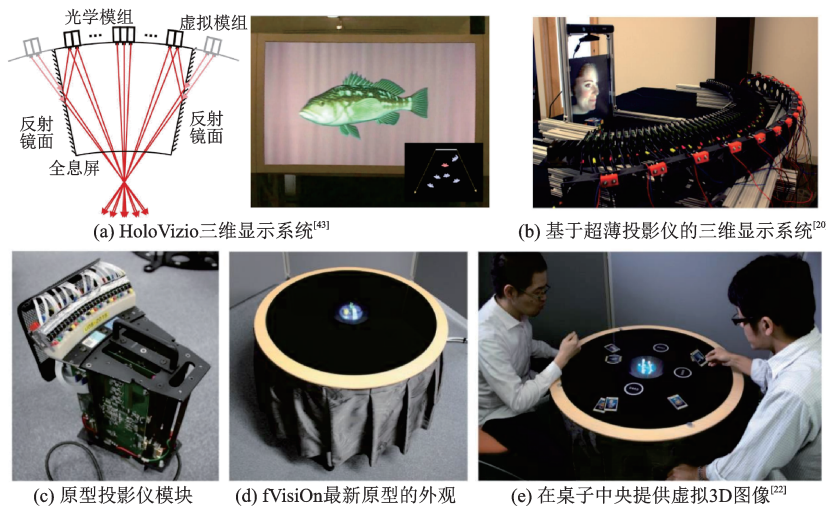


图10 国外对于投影阵列光场显示的研究

Fig.10 Foreign research on multi-projector-type light field displays



110°的光场显示装置<sup>[20]</sup>,如图 10(b)。为了实现更具真实感的三维效果,2016年Yoshida使用锥型背投影散射屏和环形排列的投影机阵列组合出名“fVisiOn”的桌面式360°三维显示系统,可以显示5 cm高的3D彩色图像<sup>[22]</sup>,如图 10(c)。2020年,Yoshida为了解决因提高清晰度和连续性而增加的投影机数量导致的装置体积过大的问题,将柱面镜引入到系统中,提高了近10倍的图像密度<sup>[51]</sup>。

2009年,北京邮电大学、深圳泛彩溢和国防科技大学合作,利用投影机阵列和全息光场屏幕,提出了光场图像实时拍摄和显示的方案,构建了1.8 m×1.3 m,视角为45°的光场显示装置<sup>[52]</sup>,并在2009年深圳国际全息显示会议上进行了展示。2013年,浙江大学提出了环形分布的投影阵列和柱形光场屏幕的光场显示装置,利用多个投影机 and 定向漫散射器实现大尺寸三维光场显示系统,如图

11(a),系统采用了一百个投影单元和直径接近2 m的圆柱形散射屏,实现了竖直和水平方向上的运动视差<sup>[53]</sup>,并且讨论了产生360°光场的特定图像的合成算法,有利于在投影机数量有限的情况下获得更好的总体性能<sup>[54]</sup>,图 11(b)是该装置的示意图。2018年,浙江大学在之前的基础上,将系统全面升级,屏幕的直径扩大到6米,高为1.8米,采用了360台投影单元和4台高性能计算机。因为屏幕巨大,所以设计了一个透镜来扩大投影机图像在屏幕上的尺寸,提出了一种校准方法来解决透镜带来的非线性失真,实现360°视角的光场显示,分辨率从640×480提升到800×600<sup>[55]</sup>,图 11(c)是该装置的显示效果。2021年,使用9个投影机和全息功能屏组成空间复用立体像素屏幕系统,如图 11(d),并且用于桌面3D显示器,观看视角达到96°×96°,视点密度达到44 100个<sup>[56]</sup>,满足了宽视角和高视点密度的要求。

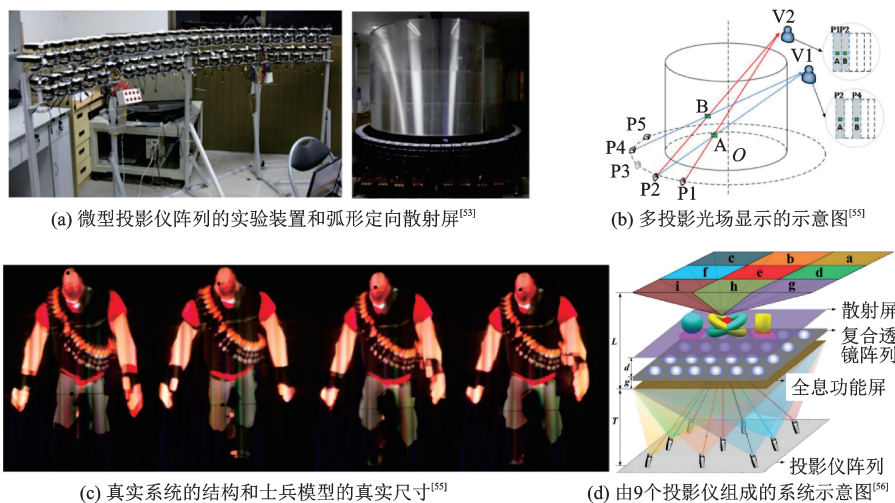


图 11 国内对于投影阵列光场显示的研究

Fig.11 Domestic research on light field display

## 2.4 层叠光场显示

层叠光场显示基于像素复用的原理通过堆叠多层液晶屏幕进行空间光调制,三维数据经过处理被送到各个面板上,光源产生的光经过各层面板的调制,最终以特定规律形成空间光场分布,模拟目标连续的光场,达成三维显示效果。层叠光场显示可以实现中小尺寸的光场三维设备,具有更好的便携性,适合单人观看,在移动或个人便携式设备上具有广阔的应用前景。但是,层叠光场显示需要在平板显示器上集成光线方向控制器,这要求现有平板显示具有更高的集成度或分辨率。

2011年麻省理工学院的Gordon等人提出基于

多层平面显示器的光场显示概念<sup>[57-58]</sup>,如图 12(a)、(b)。该方法根据三维物体在各个方向上的光场投影数据,优化计算得到相对应的每层平面显示器上的图像,从而构建光场三维图像,图 12(c)是优化前后的图像对比。为了提高显示效果,一般以一定的间距堆叠半透明显示介质,然后使用背光源照明。虽然不同光线会经过某一层介质的相同像素,但是在下一层介质必定经过不同的像素,通过多层信息的叠加获得最终的信息。该团队将图案打印在丙烯酸片上,打印分辨率为300每英寸点数(Dots Per Inch, DPI),然后按一定间隔叠放,实现了在水平和垂直方向均为±5°视角的光场显示。之后团队又提出了压缩光场显示的方法<sup>[59]</sup>。



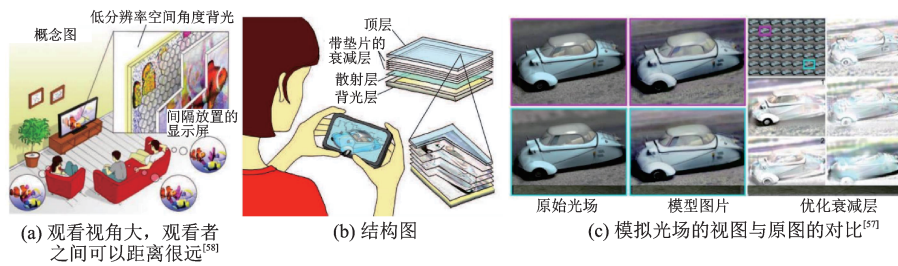


图12 利用层叠光场制造的显示器  
Fig.12 Display made of multilayer light field

### 2.5 矢量光场显示

矢量光场显示用光波导来控制像素的发光方向和发散角度,利用带有方向的光束来重构空间三维物体。矢量光场显示的像素小,显著提高了显示分辨率,并且可视角度大、体积小、能耗低。

2013年美国惠普实验室利用光波导和微结构实现了不同方向的光发射,利用光波导作为背光源放在液晶显示面板下方,每个波导微结构和每个液晶面板中的像素对应,实现了像素发光角度的控制,从而实现光场三维显示,该显示装置分辨率为127 DPI,光线方向为200个,视角 $90^\circ$ <sup>[60]</sup>。2016年,苏州大学提出了一种使用光刻高效制作相位板的方法,利用纳米光栅曝光设备,在液晶显示面板上制作微纳光栅来控制每个像素的发光方向,实现了

没有串扰和重影的光场三维显示,图13(a)是该系统的原理图,(b)是其结构示意图。对于只有水平视差的9视点3D图像,分辨率为400 DPI,视角大小为 $40^\circ$ ;对于具有全视差的64视点3D图像,分辨率为160 DPI,视角大小为 $50^\circ$ <sup>[61]</sup>。2021年,将多级闪耀光栅覆盖在屏幕上,与4K投影仪组合,提出一种新的矢量光场显示器<sup>[62]</sup>,如图13(c)。同年,为了解决视角和分辨率的矛盾,利用二维超构光栅调制入射光线,使中心视场分配较多的视点数量,实现了 $160^\circ$ 水平视角的全彩3D显示器<sup>[63]</sup>。2022年,在之前的基础上,通过将交错式灰度衍射透镜与液晶显示器结合,研究了其光学性能,提高了景深,有着更远的观看距离<sup>[64]</sup>,图13(d)是其观看效果。

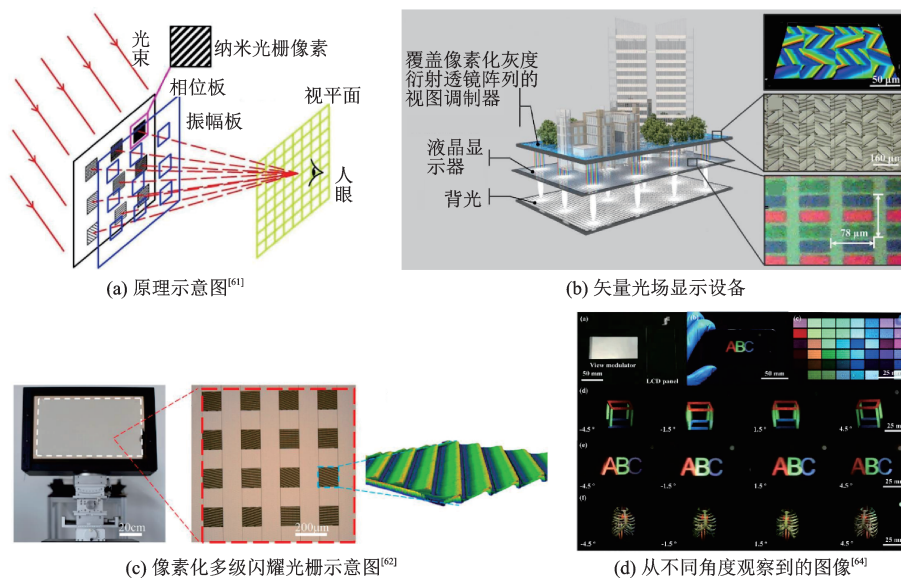


图13 苏州大学制作的多视点3D显示器

Fig.13 Display made by Suzhou University based on vector light field display

### 2.6 近眼光场显示

近眼光场显示是利用近眼设备实现光场显示的效果,需要对近眼显示原理、近眼光学显示结构、光学器件、内容算法等多方面进行研究。

视网膜投影技术是一种通过光束扫描的方式

直接向用户视网膜投射图像的新型光场显示技术。视网膜投影技术无需实体显示面,且只产生和调制所需的像素点,通常与近眼显示设备,如眼镜或头盔等结合,将图像投射到用户的眼睛内,非常适合增强现实(AR)、混合现实(MR)、虚拟现实(VR)等

近眼显示场景。2009年, Magic Leap 公司基于视网膜投影技术实现增强现实效果, 利用 1 mm 宽 9 mm 长的光纤投射得到的高清图像。为了显示分辨率更高的图像, 同时保持帧率和像素密度, Magic Leap 使用了光纤阵列拼接的形式, 将多个光纤装配到二维阵列中, 由扫描光纤显示模块产生无缝拼接的组合图像。

国内北京理工大学的王涌天团队在相关领域做了很多有代表性的工作<sup>[65-78]</sup>。2014年, 针对近眼光场显示系统。提出了利用微结构阵列实现近眼光场显示的方法, 能够提供正确的聚焦线索<sup>[65]</sup>, 并且缓解了传统方法中辐辏与调节的矛盾<sup>[66]</sup>。2018年又提出离散微透镜阵列的方法, 实现透过式的近眼光场显示效果<sup>[67]</sup>。在2017年, 针对虚拟视网膜投影近眼光场显示技术提出利用 MEMS 投影仪和凹面反射镜的方法, 实现了双目视网膜近眼投影系统。另外, 对于近眼光场显示中的光学设计部分, 其团队利用自由曲面技术抑制了近眼显示系统中光波导的杂散光<sup>[68]</sup>, 如图 14(a), 采用同轴反射形式实现了对角线视角为 110°、厚度为 30 mm 的沉浸式近眼光

学显示系统, 利用镜片拼接的方式实现了大视角近眼光场显示系统<sup>[69-70]</sup>, 图 14(b) 是该系统的实验装置图。基于随机针孔构建近眼显示光场的方法, 打破元素图像的周期性, 消除了莫尔条纹<sup>[71-72]</sup>, 如图 14(c)。照明不均匀是造成基于几何波导的显示器图像性能降低的重要因素之一, 2019年, 为了解决照明不均匀的问题, 提出了一种包括双层照明补偿器的波导结构, 并且对不同部分反射镜的涂层进行优化, 将均匀性提高到了 70%<sup>[76]</sup>, 图 14(d) 是该结构的原型。2020年, 设计了一种具有宽视场角和大出射光瞳的双层波导显示器, 如图 14(e), 将两个不同参数的波导平行放置, 每个波导负责视野的不同部分, 在瞳孔扩展方向上的观看视角为 62°, 在眼间距为 18 mm 的情况下, 出射光瞳的直径为 10 mm<sup>[78]</sup>。

### 2.7 悬浮光场显示

悬浮光场显示是一种将显示内容悬浮呈现在空气中的光场显示技术。目前已经有多种利用薄膜和水雾投影等方法实现的空中成像技术, 但这些方法仍依靠其它介质作为承接屏进行成像, 无法将

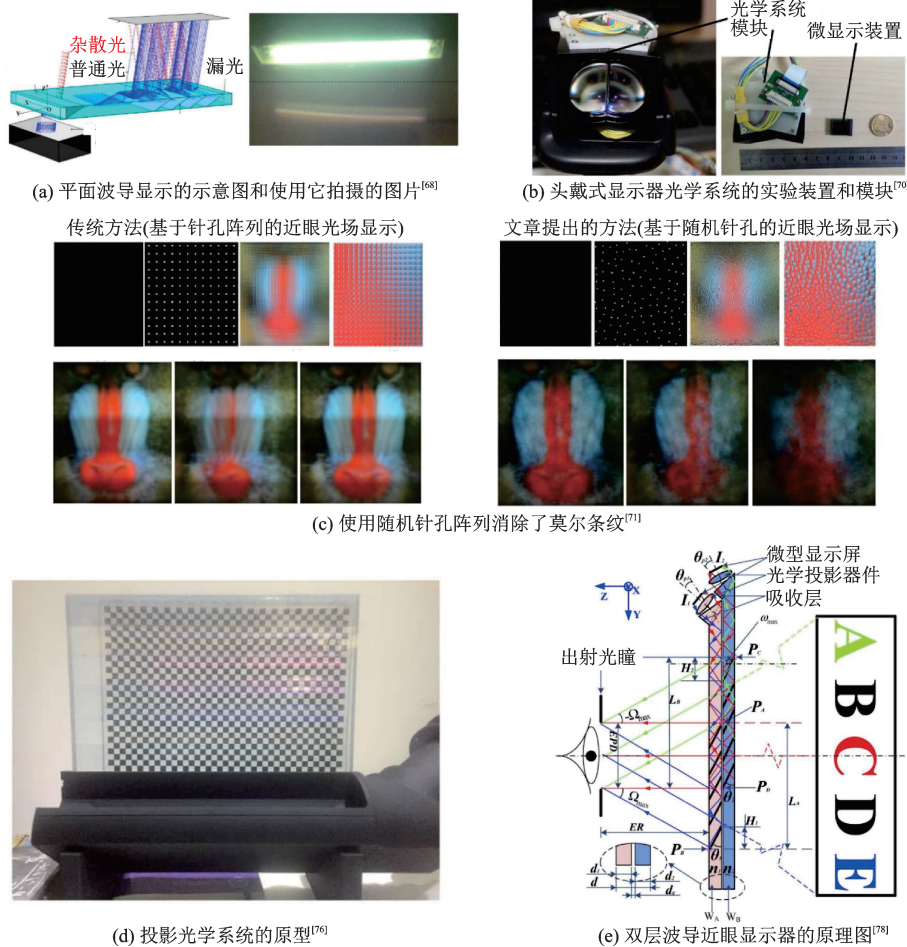


图 14 北京理工大学对于近眼显示的研究

Fig.14 Research on near-eye display in Beijing University of Technology

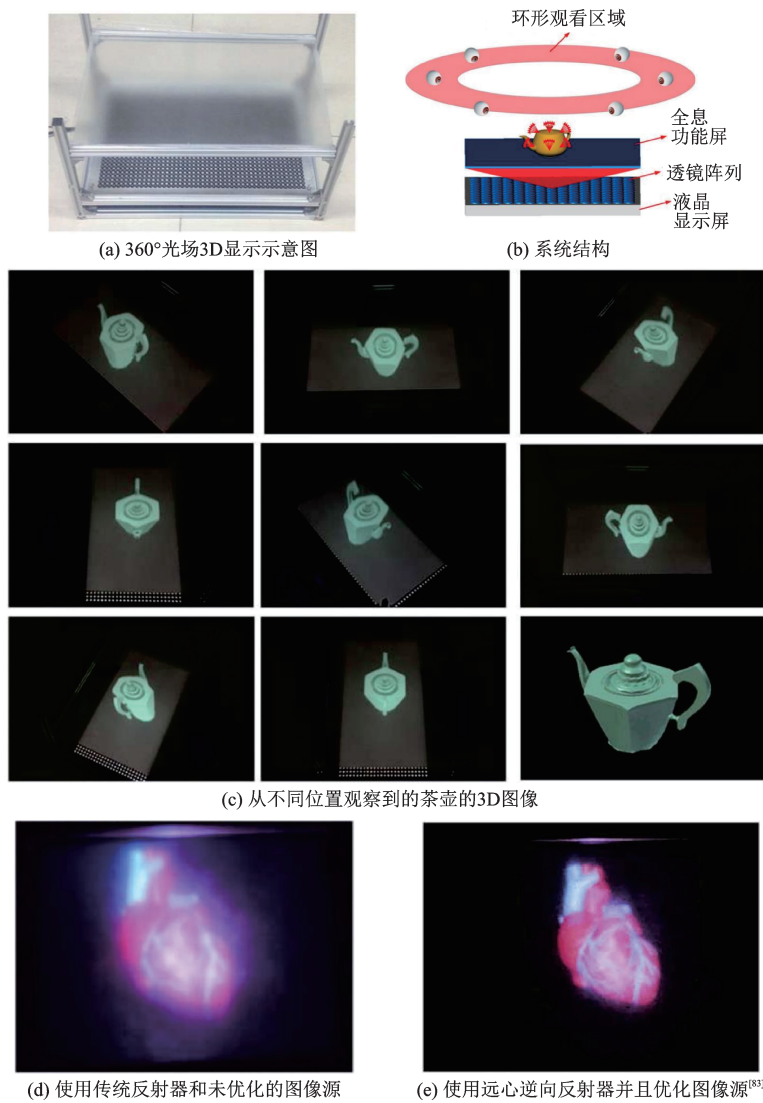


图 15 北京邮电大学对于悬浮光场显示的研究<sup>[80]</sup>

Fig.15 Research on the display of floating light field in Beijing University of Posts and Telecommunications<sup>[80]</sup>

显示内容直接投影在空气中。日本 Asukanet 公司提出了 ASKA3D-Plate 空气悬浮成像方案,该方案通过多镜面反射原理可以将空气中的光重新聚集,实现无介质的空气成像<sup>[79]</sup>。北京邮电大学的桑新柱团队根据人眼的视觉特性以及悬空成像距离,计算得到超精密光学微结构的面形分布,基于瞳孔光线积分原理实现的光场显示,可以让观看者感受到 3D 物体悬浮于空中<sup>[80-81]</sup>。该面形能够将二维显示器发出的光线以确定的方向汇聚到达人眼瞳孔处,积分为一张完整的连续图像,让观看者感受到空气成像的效果,图 15(c)是该显示器的示意图和显示效果图。2019 年,利用自由曲面反射镜减小了成像畸变,实现了高质量的空气成像显示效果。2020 年,为了同时实现高图像质量和宽视角,提出了一种由 3D 光场显示单元和浮动显示单元组成的基于空间数据重建算法的悬浮光场显示器,抑制了像差,实

现了 60°的观看视角<sup>[82]</sup>。2021 年,在不牺牲观看视角的前提下,使用远心逆向反射器,抑制逆向反射光,改善了 3D 图像源。图 15(d)和(e)是改善前后的对比图,实现了悬浮高度为 70 mm、观看视角为 50°的悬浮 3D 图像<sup>[83]</sup>。研究的显示装置参加了第四届和第五届军民融合高技术装备展览。

### 3 总结与展望

光场三维显示作为一种新兴三维显示技术,通过模拟三维物体表面的发光特性来重建三维场景各个视场的信息,它不仅可以真实再现三维场景的空间特性,还能够正确表现不同物体的相互遮挡关系,是一种更符合人们观看习惯的三维显示技术,已经成为近年来的研究热点。文章介绍了七种具有代表性的光场显示技术的原理及应用,分析了各



种技术的优点和可能存在的问题。

集成成像光场显示无需佩戴助视设备和相干光源,能为观看者提供水平与垂直方向的视差和连续平滑的视点信息,较真实地呈现三维光场显示效果,是当下最具有发展前景的 3D 显示技术之一;但集成成像光场显示的分辨率、视角、景深相互制约,无法同步提升,显示细腻程度较低。光场扫描显示采用高速电机和机械运动部件使屏幕进行旋转,结构相对简单,成本相对低廉,容易实现 360°环绕显示,可以提供较好的图像质量;由于光场扫描存在机械结构,显示屏尺寸不能太大,且要求图像源有较高的刷新率,只适合中等尺寸的光场显示。投影阵列光场显示与集成成像光场显示相似,用多台投影仪组成的阵列替代集成成像中的微透镜阵列,在空间上采集高密度叠加二维图像信息;此外,投影阵列光场显示通过增加投影仪数量来提高系统的性能参数,但是会导致系统体积过大,校准困难,且价格昂贵。层叠光场显示具有较好的视场连续性,在移动设备方面的应用有着广阔的前景,可以通过堆叠液晶屏来增加景深;但会造成系统的体积庞大不适合携带,而且视场角较小。矢量光场显示可视角度大、体积小、能耗低;由于制作精度为纳米级别,因此对工艺有很高的要求。近眼光场显示具有很强的沉浸感和良好的交互体验,有望成为下一代的移动通信平台;但目前快速生成计算全息图的技术不够成熟。悬浮光场显示与 AR 技术相比,不需要佩戴助视设备即可观看到悬浮在空中的 3D 图像;但存在离屏距离小,显示图像模糊等缺点。

近几年来,随着计算机科学技术等相关领域的发展,在国家的大力支持下,我国的光场显示技术已在裸眼多视点立体显示、集成成像三维显示、光场显示材料、结构、器件、显示设备和系统集成等方面取得了一定科研成果,研发的裸眼 3D 光场显示设备在尺寸、视角、景深等关键参数上有重大突破。国内在光场显示方面的起步稍晚,但近几年经过多家单位的大力发展,已具备了较好的成果积累,在国际上奠定了一定的地位,继续发展将有望达到国际先进水平。

#### 参 考 文 献

- [1] Treichler D G. Are you missing the boat in training aids?[J]. Film and Audio-Visual Communication, 1967, 48(1):14-16.
- [2] Danesh Panah M, Javidi B, Watson E A. Three dimensional imaging with randomly distributed sensors [J]. Opt. Express, 2008, 16(9): 6368-6377.
- [3] Yi F, Lee J, Moon I. Three-dimensional integral imaging by using unknown sensor array position calibration with a closed-form solution[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 023104.
- [4] Arai J, Kawakita M, Yamashita T, et al. Integral three-dimensional television with video system using pixel-offset method [J]. Opt. Express, 2013, 21(3): 3474-3485.
- [5] Levoy M, Zhang Z, McDowall I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays[J]. Journal of Microscopy, 2009, 235(2): 144-162.
- [6] Wang W, Li S, Liu P, et al. Improved depth of field of the composite micro-lens arrays by electrically tunable focal lengths in the light field imaging system[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 148: 107748.
- [7] Ives F E. Parallax stereogram and process of making same[P]. USA: US725567A 1903.
- [8] Lippmann G. La photographie intégrale[J]. Comptes-Rendus, Académie des Sciences, 1908, 146: 446-451.
- [9] Gershun A. The light field [J]. Journal of Mathematics and Physics, 1939, 18(1/2/3/4): 51-151.
- [10] Adelson E H. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 99-106.
- [11] Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, California, USA, 1996: 31-42.
- [12] Gortler S J, Grzeszczuk R, Szeliski R, et al. The lumigraph[C]. 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, Los Angeles, California, USA, 1996: 43-54.
- [13] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. Adv. Opt. Photon., 2013, 5(4): 456-535.
- [14] Xia X, Liu X, Li H, et al. A 360-degree floating 3D display based on light field regeneration[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11237-11247.
- [15] Su C, Xia X, Li H, et al. P-78: An interactive 360° floating 3D display based on gesture recognition [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2014, 45(1): 1278-1281.
- [16] Ma X M, Xing Y, Zheng J C, et al. A real-time interactive rendering method for 360° tabletop integral imaging 3D display[J]. Journal of the Society for Information Display, 2021, 29(9): 679-688.
- [17] Fan F C, Choi S, Jiang C C. Demonstration of full-parallax three-dimensional holographic display on commercial 4K flat-panel displayer [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(1): 010007.
- [18] Yang S, Sang X, Yu X, et al. 162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen [J]. Opt. Express, 2018, 26(25): 33013-33021.
- [19] Wang J, Suenaga H, Liao H, et al. Real-time computer-generated integral imaging and 3D image calibration for augmented reality surgical navigation [J]. Computerized Medical Imaging and Graphics, 2015, 40: 147-159.
- [20] Jones A V, Nagano K, Liu J, et al. Interpolating vertical parallax for an autostereoscopic three-dimensional projector array [J]. Journal of Electronic Imaging, 2014, 23(1): 011005.
- [21] Jones A, Unger J, Nagano K, et al. An automultiscopic projec-

- tor array for interactive digital humans[C]. ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, New York, USA, 2015: 1-1.
- [22] Yoshida S. fVisiOn: 360-degree viewable glasses-free tabletop 3D display composed of conical screen and modular projector arrays[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(12): 13194-13203.
- [23] Jang C, Bang K, Chae M, et al. Waveguide holography: Towards true 3D holographic glasses[J]. *arXiv preprint arXiv: 2211.02784*, 2022.
- [24] Park J H, Hong K, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): 77-94.
- [25] Chen C W, Cho M, Huang Y P, et al. Improved viewing zones for projection type integral imaging 3D display using adaptive liquid crystal prism array[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(3): 198-203.
- [26] Chen Y, Wang X, Zhang J, et al. Resolution improvement of integral imaging based on time multiplexing sub-pixel coding method on common display panel[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17897-17907.
- [27] Choi H, Kim Y, Park J H, et al. Improved analysis on the viewing angle of integral imaging[J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(12): 2311-2317.
- [28] Park J H, Baasantseren G, Kim N, et al. View image generation in perspective and orthographic projection geometry based on integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2008, 16(12): 8800-8813.
- [29] Jung J H, Kim Y, Kim Y, et al. Integral imaging system using an electroluminescent film backlight for three-dimensional-two-dimensional convertibility and a curved structure[J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(5): 998-1007.
- [30] Kim J, Jung J H, Jang C, et al. Real-time capturing and 3D visualization method based on integral imaging[J]. *Opt. Express*, 2013, 21(16): 18742-18753.
- [31] Yeom J, Jeong J, Jang C, et al. Three-dimensional/two-dimensional convertible projection screen using see-through integral imaging based on holographic optical element[J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(30): 8856-8862.
- [32] Lee S, Jang C, Cho J, et al. Viewing angle enhancement of an integral imaging display using Bragg mismatched reconstruction of holographic optical elements[J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(3): A95-A103.
- [33] Jo Y, Bang K, Yoo D, et al. Ultrahigh-definition volumetric light field projection[J]. *Opt. Lett.*, 2021, 46(17): 4212-4215.
- [34] Zhang N, Huang T, Meng Y, et al. 35.1: Tabletop three-dimensional floating autostereoscopic display system with 360-degree continuous visualization[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(S2): 462-467.
- [35] Zhou X, Peng Y, Peng R, et al. Fabrication of large-scale microlens arrays based on screen printing for integral imaging 3D display[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(36): 24248-24255.
- [36] Wang W, Chen G, Weng Y, 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.
- [37] Jones A, Mc Dowall I, Yamada H, et al. Rendering for an interactive 360° light field display[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2007, 26(3): 40-1-40-10.
- [38] Jones A, Lang M, Fyffe G, et al. Achieving eye contact in a one-to-many 3D video teleconferencing system[C]. *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. Los Angeles, California, USA, 2009.
- [39] Takaki Y, Nakamura J. Generation of 360-degree color three-dimensional images using a small array of high-speed projectors to provide multiple vertical viewpoints[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8779-8789.
- [40] Su C, Zhong Q, Xu L, et al. 24.2: Real-time rendering 360° floating light-field 3D display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, 46(1): 346-349.
- [41] Su C, Zhou X, Li H, et al. 19-2: Strategies of grayscale enhancement for scanning light field display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 223-226.
- [42] Tian M, Ni L, Xu L, et al. Multi-face real-time tracking based on dual panoramic camera for full-parallax light-field display[J]. *Optics Communications*, 2019, 442: 19-26.
- [43] Agocs T, Balogh T, Forgacs T, et al. A large scale interactive holographic display[C]. *IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006)*, Alexandria, VA, USA, 2006: 311-311.
- [44] Lee J H, Park J, Nam D, et al. Color and brightness uniformity compensation of a multi-projection 3D display[C]. *Novel Optical Systems Design & Optimization XVIII*, San Diego, California, USA, 2015.
- [45] Yu H, Yan X, Jiang X, et al. Research summary on light field display technology based on projection[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1682(1): 012033.
- [46] Balogh T, Forgács T, Agocs T, et al. A scalable hardware and software system for the holographic display of interactive graphics applications[C]. *Eurographics (Short Presentations)*. Los Angeles, California, USA, 2005: 109-112.
- [47] Balogh T. The HoloVizio system[J]. *SPIE-IS&T*, 2006, 6055: 60550U-60550U - 12.
- [48] Iglesias Guitián J A, Gobbetti E, Marton F. View-dependent exploration of massive volumetric models on large-scale light field displays[J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(6): 1037-1047.
- [49] Kovács P T, Boev A, Bregović R, et al. Quality measurements of 3D light-field displays[C]. *Proc. Eighth International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics (VPQM)*, Las Vegas, Nevada, USA, 2014: 1-6.
- [50] Lee J H, Park J, Nam D, et al. Optimal projector configuration design for 300-M pixel multi-projection 3D display[J]. *Opt. Express*, 2013, 21(22): 26820-26835.
- [51] Yoshida S. Virtual multiplication of light sources for a 360°-viewable tabletop 3D display[J]. *Opt. Express*, 2020, 28(22): 32517-32528.

- [52] Sang X, Fan F C, Jiang C C, et al. Demonstration of a large-size real-time full-color three-dimensional display [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(24): 3803-3805.
- [53] Peng Y Fan, Li H Feng, Zhong Q, et al. Large-sized light field three-dimensional display using multi-projectors and directional diffuser[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(1): 017402.
- [54] Zhong Q, Peng Y, Li H, et al. Multiview and light-field reconstruction algorithms for 360° multiple-projector-type 3D display [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52(19): 4419-4425.
- [55] Ni L, Li Z, Li H, et al. 7-3: A large-scale multi-projection light-field display based on multi-view sampling calibration[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2018, 49(1): 68-71.
- [56] Wang P, Sang X, Yu X, et al. A full-parallax tabletop three dimensional light-field display with high viewpoint density and large viewing angle based on space-multiplexed voxel screen [J]. *Optics Communications*, 2021, 488: 126757.
- [57] Lanman D, Wetzstein G, Hirsch M, et al. Polarization fields: Dynamic light field display using multi-layer LCDs[J]. *ACM Trans. Graph.*, 2011, 30(6): 1-10.
- [58] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Compressive light field displays [J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 2012, 32(5): 6-11.
- [59] Gordon, Wetzstein, Douglas, et al. Tensor displays: Compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - SIGGRAPH 2012 Conference Proceedings*, 2012, 31(4): 1-11.
- [60] Fattal D, Peng Z, Tran T, et al. A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display[J]. *Nature*, 2013, 495(7441): 348-351.
- [61] Wan W, Qiao W, Huang W, et al. Efficient fabrication method of nano-grating for 3D holographic display with full parallax views[J]. *Opt. Express*, 2016, 24(6): 6203-6212.
- [62] Shi J, Hua J, Zhou F, et al. Augmented reality vector light field display with large viewing distance based on pixelated multilevel blazed gratings[J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 1-8.
- [63] Hua J, Hua E, Zhou F, 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): 213.
- [64] Zhou F, 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.
- [65] Song W, Wang Y, Cheng D, et al. Light field head-mounted display with correct focus cue using micro structure array [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060010.
- [66] Xu C, Cheng D, Peng H, et al. Wearable optical see-through head-mounted display capable of adjusting virtual image depth [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060011.
- [67] Yao C, Cheng D, Yang T, et al. Design of an optical see-through light-field near-eye display using a discrete lenslet array [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(14): 18292-18301.
- [68] Cheng D, Wang Y, Xu C, et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(17): 20705-20719.
- [69] Cheng D, Wang Y, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling [J]. *Opt. Lett.*, 2011, 36(11): 2098-2100.
- [70] Song W, Cheng D, Deng Z, et al. Design and assessment of a wide FOV and high-resolution optical tiled head-mounted display[J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(28): E15-E22.
- [71] Song W, Cheng Q, Surman P, et al. Design of a light-field near-eye display using random pinholes [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(17): 23763-23774.
- [72] Han J, Song W, Liu Y, et al. 5.2: Design of simulation tools for light-field near-eye displays[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(S1): 50-51.
- [73] Yao C, Wang Y, Lin J, et al. Retinal projection head-mounted display [J]. *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2017, 10(1): 1-8.
- [74] Zhang Q, Piao Y, Ma S, et al. Design, analysis and optimization of a waveguide-type near-eye display using a pin-mirror array and a concaved reflector[J]. *Opt. Express*, 2022, 30(18): 33208-33221.
- [75] Zhang Q, Song W, Hu X, et al. Design of a near-eye display measurement system using an anthropomorphic vision imaging method[J]. *Opt. Express*, 2021, 29(9): 13204-13218.
- [76] Gu L, Cheng D, Wang Q, et al. Design of a uniform-illumination two-dimensional waveguide head-up display with thin plate compensator[J]. *Opt. Express*, 2019, 27(9): 12692-12709.
- [77] Zhang Z, Li Y, Guo J, et al. Task-driven latent active correction for physics-inspired input method in near-field mixed reality applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(7-9): 496-509.
- [78] Wang Q, Cheng D, Hou Q, et al. Design of an ultra-thin, wide-angle, stray-light-free near-eye display with a dual-layer geometrical waveguide [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(23): 35376-35394.
- [79] 邢树军, 曹良才, 桑新柱, 等. 面向超多视点光场的虚拟立体内容生成技术综述[J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1509001.
- [80] Gao X, Sang X, Yu X, et al. 360° light field 3D display system based on a triplet lenses array and holographic functional screen [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 121201.
- [81] Yu X, Sang X, Gao X, et al. Dynamic three-dimensional light-field display with large viewing angle based on compound lenticular lens array and multi-projectors[J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11): 16024-16031.
- [82] Du J, Sang X, Yu X, et al. Large viewing angle floating three-dimensional light field display based on the spatial data reconstruction (SDR) algorithm[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126229.
- [83] Gao X, Yu X, Sang X, et al. Improvement of a floating 3D light field display based on a telecentric retroreflector and an optimized 3D image source [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(24): 40125-40145.