

三维光显示技术研究进展

桑新柱, 于迅博, 陈 铎, 高 鑫, 王 鹏, 邢树军, 余重秀

北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876

摘要 为实现自然的三维光显示,需按照真实物体的呈现方式,且同时保证双目视差和平滑的运动视差。回顾国内外三维光显示的研究现状,重点介绍北京邮电大学在密集视点显示、集成成像显示、光场显示和全息显示方面的研究进展,认为全视差光场显示和全息显示是未来三维光显示发展的方向。

关键词 测量; 三维显示; 运动视差; 密集视点; 集成成像; 光场显示; 全息显示

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.050006

Research Progress on Three-Dimensional Optical Display Technology

Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Chen Duo, Gao Xin, Wang Peng, Xing Shujun, Yu Chongxiu

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract To realize the natural three-dimensional optical display, the presentation style of real objects should be followed, and both the binocular parallax and the smooth motion parallax are required. The research status of the three-dimensional optical display both at home and abroad is reviewed. Research progresses on the dense-viewpoint display, integral imaging display, light field display and holographic display in Beijing University of Posts and Telecommunications are mainly presented. The full-parallax light field display and the holographic display represent the future development direction of three-dimensional optical display.

Key words measurement; three-dimensional display; motion parallax; dense viewpoint; integral imaging; light field display; holographic display

OCIS codes 120.2040; 330.4595; 330.1400; 230.1980

1 引 言

人类视觉的一项重要功能是认知三维(3D)自然界中物体的3D空间布局,直观地分析和判断目标和场景状况。目前现代信息科技视觉表达主要利用二维方式进行采集、存储、编码、传输及显示,只能使人们了解到场景或物体的某个空间侧面,从而限制了人们的全面认识。符合人类认知习惯的3D光显示能够更真实地重现或模拟与客观世界相同的场景,增强表达图像的深度感、层次感和真实性。在医学成像、科学研究、外太空探索、重要远程会议和军事等应用领域中,3D信息的重构有助于直观精确地捕捉到有关信息,从而得到更精准的现场判断。在智能制造领域中,保持稳健的优化设计,实现3D结构的柔性智能加工、3D装配的模拟与控制、3D数据的高效处理和3D光显示,对于完善制造过程、提高先进智能制造的设计效率、加快生产过程并提高成品率、实现高效可靠的智能装配至关重要。在3D游戏行业、3D广告视频显示、3D影视等方面,高性能裸眼动态光显示技术的突破和发展会推动整个3D产业链的飞速发展,从而带动我国战略性新兴产业和现代服务业的发展,产生巨大的经济效益。

为实现高性能的动态裸眼3D显示,学者们进行了各种探索^[1],主要方案包括基于液晶阵列和光栅的自

收稿日期: 2016-12-06; **收到修改稿日期:** 2017-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61575025)、国家863计划(2015AA015902)、信息光子学与光通信国家重点实验室资助课题(IPOC2016zz02)

作者简介: 桑新柱(1977—),男,博士,教授,主要从事三维显示、光信息处理和新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: xzsang@bupt.edu.cn

由立体 3D 显示、多视点投影 3D 显示、集成成像 3D 显示、结合人眼跟踪的裸眼 3D 显示技术、体 3D 显示、全息 3D 显示等。但这些显示方法存在分辨率低、不符合人眼观看习惯、数据量大、显示尺寸受限、对器件或计算能力要求高等不足,尚未获得完全令人满意的结果。

人眼观看自然界、识别环境的 3D 空间分布除了利用两眼的双目视差和运动视差,还需要利用单目运动视差,而目前实现的 3D 显示仅主要考虑了双目视差^[2-3]。要实现符合人眼观看习惯的高性能裸眼 3D 显示,除了需要保证高分辨率,还需要具有辐辏和人眼调节一致功能以及平滑运动视差、显示深度可调节和可控双目视差等。准确地以 3D 方式实现符合人眼观看习惯的大尺寸、真彩色、高分辨率和动态显示,表达更有真实感的 3D 场景,给人以身临其境的感受,是 3D 显示的研究目标。本文结合国内外的研究进展及北京邮电大学近年来的研究成果,讨论了 3D 光显示技术的研究进展。

2 国内外 3D 光显示的研究现状

美国阿拉巴马大学、日本夏普公司、荷兰飞利浦公司、台湾交通大学、四川大学等对基于液晶阵列和柱镜光栅的 3D 显示进行了研究和开发^[4-7],但其受液晶显示阵列分辨率和视区大小限制,分布率低,存在视区跳跃,容易产生眼睛疲劳并难以实现高分辨率连续运动视差的 3D 显示。韩国首尔国立大学、汉阳大学、日本东京农工大学、台湾交通大学、比利时布鲁塞尔自由大学等开展了基于投影的多视点 3D 显示技术^[8-12],提高了分辨率,但仍未解决视区跳跃和串扰问题。美国康涅狄格大学、韩国首尔大学、大邱大学、日本放送协会(NHK)、四川大学、东南大学、西安电子科技大学等对集成成像进行了大量的研究工作^[13-16],实现了真彩色、全视差和实时动态显示,但横向分辨率低、难以实现大景深和大视角显示。韩国汉阳大学、电子通信研究院、台湾工业技术研究院等采用人眼跟踪技术改进了裸眼立体显示^[17-19],但只能获得有限视场范围,并且难以解决众人观看的问题。惠普实验室利用多向衍射光栅定向背光方式实现了集成式的多视点 3D 显示^[20],未来有可能将其用于移动终端,但目前其分辨率还比较低。

全息是基于参考光(或其共轭光)衍射/反射,利用光学干涉或计算机生成全息条纹实现逼近现实存在物体或场景的 3D 显示,一直被认为是理想的 3D 显示技术。全息技术在静态 3D 显示领域得到了广泛的应用和发展。美国 Zebra 公司在 1999 年底特律北美汽车展上展出了 $4.8\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 的数字合成概念汽车全息图,并为美国军方制作了数万幅全息军事地图。记录在全息干版上的静态全息图能够实现高分辨率和全视差,然而动态数字全息视频显示远没有达到令人满意的结果。实现动态数字全息显示有两个主要途径:一是动态可更新全息记录材料,二是空间光调制器。对于第一个实现途径,2008 年 2 月,美国亚利桑那大学研究小组在 *nature* 期刊上发表了关于可更新全息显示的论文^[20],从记录材料角度对 3D 全息动态可更新显示的机理进行了探索。该小组在光折边聚合物这种新型全息记录材料上,利用数码全息打印手段,在几分钟内就记录了一张 $4\text{ inch} \times 4\text{ inch}$ ($1\text{ inch} = 2.54\text{ cm}$) 的显示用数码全息图。其自由保持时间为数小时,一旦写入新的图像,原来的图像则完全被擦除。2010 年,该团队又在 *nature* 上发表了论文,记录时间为 2 s,实现了 16 个视角 3D 信息的远距离数据传送和 10 inch 全息立体显示^[21]。但目前实验条件还比较苛刻,大面积记录材料的制作还比较困难,记录材料的感光灵敏度有待提高,离全息动态视频显示还有一段距离。此外,世界各国科学家对基于空间光调制的数字全息动态显示进行了大量研究,采用的空间调制器类型主要有液晶、硅上液晶、数字微镜(DMD)和声光调制器等^[22]。麻省理工学院采用基于泄露耦合的集成式声光调制实现了全息立体显示^[23],视角约为 20° ,尺寸为 5 cm,刷新帧率为 5 frame/s,单视点分辨率为 $296\text{ pixel} \times 156\text{ pixel}$ 。国内北京理工大学、上海大学、安徽大学、清华大学、北京邮电大学等对数字全息显示开展了大量的研究工作,受限于空间光调制器的分辨率、周期以及生成全息条纹图的巨大计算量,大尺寸、大视角、高分辨率、真彩色的视频显示仍然没有得到实现。

麻省理工学院彩虹全息发明人 Benton^[24]为 3D 显示研究提供了很多启发,近年来发展的光场 3D 显示就是启发之一。

光场 3D 显示方法是近似模拟 3D 场景真正光场的重建方式,具有较好的发展前景。光场 3D 显示方法包括基于投影阵列和全息功能屏的 3D 光场显示方法^[25-27]、集成光场显示技术、基于高速投影的扫描光场显示技术^[28]、基于模拟场景发光位置的体光场显示技术^[29]及模拟场景发光的张量显示技术^[30]。其中,基于投

影阵列的 3D 光场显示结构不够紧凑,占用空间较大;体光场显示采用有限的固定显示层数,经常被限制在非常小的深度场景条件下;张量 3D 光场显示通常要结合特定背光。

为了实现平滑运动视差的 3D 显示,日本东京农业与科技大学研究了基于遮挡玻璃和多视点的密集视点 3D 显示^[31],在水平方向上实现了 36 个视点,视点间隔为 3.61 mm,在同一视区具有平滑运动视差,但存在视区跳跃。中山大学采用平面排列有机发光二极管(OLED)微显示结合空间谱时间复用,实现了 60 个子视区的 3D 显示^[32],子视区间隔为 1.6 mm,单视点分辨率比较低。北京邮电大学采用全息功能屏、动态部分子像素蒙版和数字断层三种不同方式实现了具有平滑运动视差的 3D 显示^[33-34],没有视区跳跃。

目前,已经实现的 3D 光显示技术还不能满足大型复杂场景高质量 3D 光显示的需求,迫切需要在理论和实现方法上开展进一步研究。光电子器件、光学器件精密加工和计算机处理技术的不断发展,为 3D 光显示技术的发展注入了新的活力。

3 北京邮电大学在 3D 光显示方面的研究工作

3.1 密集视点 3D 光显示技术

传统柱透镜光栅 3D 显示的视点数目与光栅截距成正比,提高视点密度会增大光栅截距,导致显示质量降低。为此本课题组提出了利用小截距柱透镜光栅实现密集视点的 3D 显示方法^[35]。利用截距为子像素宽度 5.333 倍的光栅与新型像素排布方式可以实现 32 视点的 3D 效果。图 1 给出了利用传统的柱透镜光栅 3D 显示和利用设计的小截距密集视点 3D 显示呈现同一场景的效果图,该场景的最大出屏距离为 15 cm。从图 1(a)可以看出,用圆标记的建筑物边缘位置存在明显的模糊现象。从图 1(b)可以看出,利用 32 视点系统显示同样场景可以有效地消除重影现象,大大提高了成像质量。

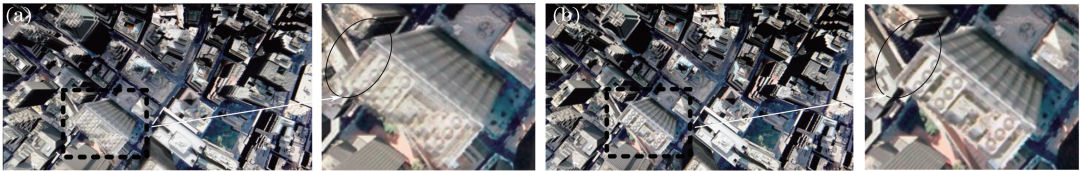


图 1 观看区域拍摄的 3D 图^[35]。(a)传统 6 视点 3D 显示;(b)小截距 32 视点 3D 显示

Fig. 1 3D images taken at observing zone^[35]. (a) Conventional 3D display with 6 viewpoints;

(b) 3D display with small pitch and 32 viewpoints

传统的柱透镜光栅 3D 显示会在其正面形成循环的观看视区,不同视区间会出现立体跳变的现象。本课题组设计了部分子像素蒙版用于控制像素排布和选择 3D 图像对^[33],在满足观看者双目视差的同时为其提供平滑的运动视差。在正面 56° 的观看区域内实现了 500 视点(真实拍摄图片)与 1200 视点(计算机模型获取)的 3D 显示,显示景深超过 40 cm,观看区域内光强的波动范围小于 0.9%。从不同角度拍摄自由立体设备的效果图如图 2 所示,在 56° 视角范围内具有连贯的运动视差。



图 2 不同位置拍摄的效果图^[33]

Fig. 2 Effect pictures taken at different positions^[33]

为了提高 3D 显示的分辨率,本课题组设计了密集视点正面投影 3D 显示系统^[27,36],将投影机阵列作为信息的输入源,将漫反射屏与柱透镜光栅组成 3D 显示屏幕,尺寸为 $1.9 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ 。该系统中单视点的分辨率与投影机的有效分辨率相同,视点数目等于投影机数目。通过调整投影机的摆放方式,可以突破投影机物理尺寸的限制,有效提高视点密度,达到密集视点 3D 显示的目的,从而增大显示带宽与景深。显示投影机阵列和 3D 显示图像如图 3 所示,3D 图像清晰成像的深度超过 1.2 m。

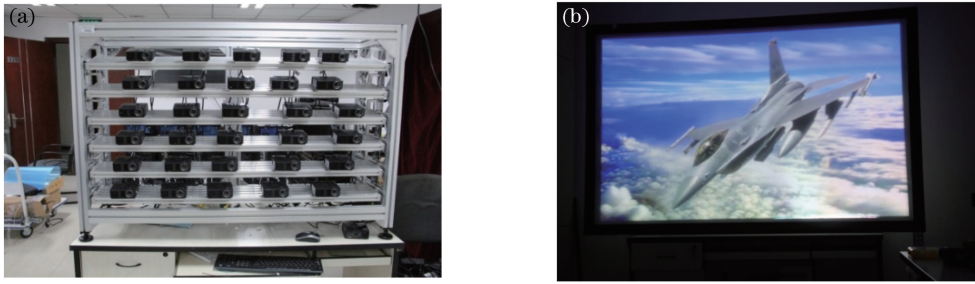


图3 正面投影 3D 显示系统的(a)投影机阵列分布和(b)显示的 3D 图像

Fig. 3 (a) Projector array distribution and (b) displayed 3D image of frontal projection 3D display system

3.2 集成成像 3D 光显示技术

集成成像是利用一组透镜阵列和普通的二维显示器来实现 3D 效果,在集成成像的实现过程中,利用子图像与透镜阵列可以控制光线的方向与强度信息。显示器上的编码子图像阵列可以通过透镜阵列合成 3D 图像。集成成像 3D 显示技术还可以为观看者同时提供水平与竖直方向的视差和连续平滑的视点信息,但其仍存在大量技术难题,限制了其应用与发展。近几年,国内外学者为了解决传统集成成像 3D 显示技术中的难题,进行了大量的研究,如提高显示分辨率、扩大显示景深、消除图像畸变以及扩大显示视角。近年来,本课题组利用微透镜阵列配合具有 3840 pixel \times 2160 pixel 分辨率的液晶显示面板设计了一套具有平滑运动视差、60°视角的 3D 集成成像显示系统^[37]。在具体构建 3D 场景编码的过程中,选择深度结构图像确定场景形状,然后选择子图像作为 3D 内容表面的纹理,最后通过改变子图像排布的方式进行编码。利用多组深度结构信息与子图像纹理可以构建复杂的 3D 内容,实现的观看结果如图 4 所示。

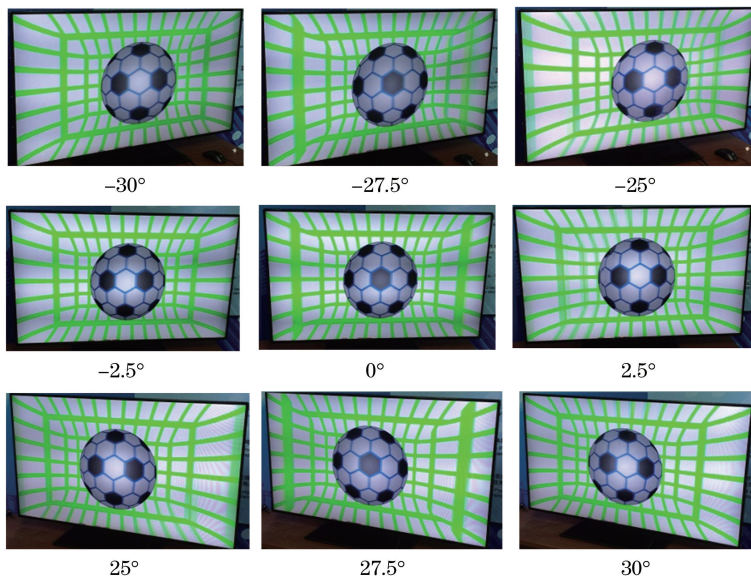


图4 从不同角度拍摄的 3D 图^[37]

Fig. 4 3D pictures taken at different angles^[37]

集成成像显示的深度不仅取决于显示过程,还受采集过程的影响。本课题组系统地分析了采集过程对显示深度的影响,并进行了相应的实验,实验结果与理论分析一致^[38]。图 5 给出了中心视点和不同视角集成成像显示的结果。利用反向光线跟踪技术,可以实现 3D 体数据和网格 3D 数据的集成成像交互实时生成^[39],如图 6 所示。

3.3 基于全息功能屏的 3D 光场显示

全息功能屏的实现原理如图 7 所示^[26,40],其中 P_{mn} 为投影机阵列, H_{ij} 为投影屏上一点, ω_{mn} 为出射光线空间角度。全息功能屏是散斑全息元件,通过控制制作散斑全息图的光束可以自由调整出射光线方向,使其空间角度为 ω_{mn} 。为了准确还原空间 3D 信息,需要利用全息功能屏使投影机投射过来的光按照正确的空间

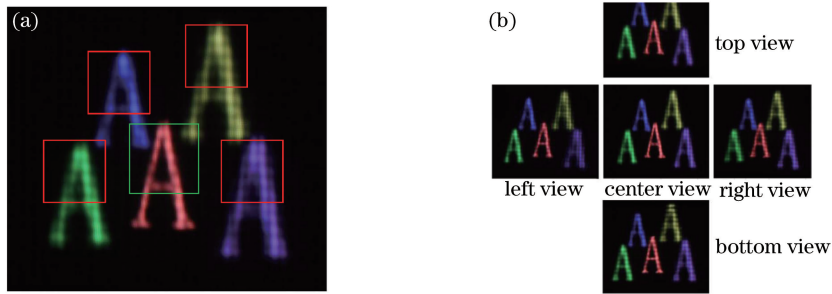


图 5 集集成像显示实验结果^[38]。(a)中心视角;(b)不同视角拍摄图

Fig. 5 Experimental results of integral imaging display^[38]. (a) Center view; (b) pictures taken at different view angles

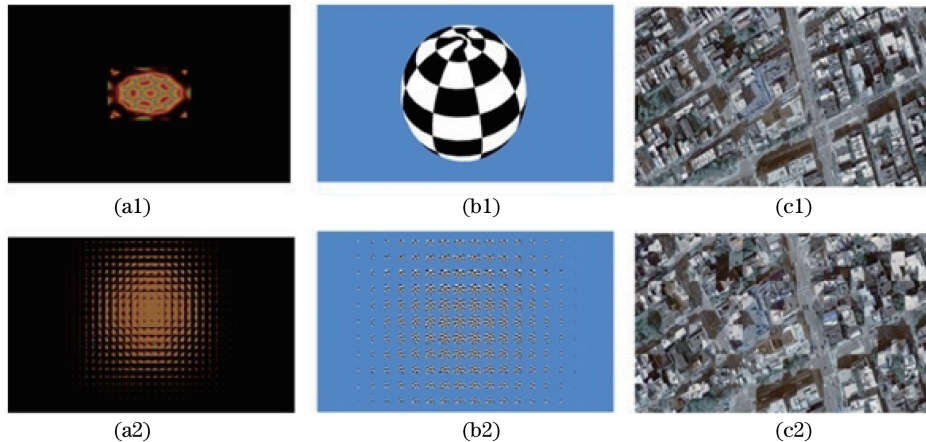


图 6 编码图像的实时生成^[39]。(a1)细胞体原始图像及(a2)其编码图像(帧率为 75 frame/s);(b1) 200 个三角网格 3D 模型原始图像及(b2)其编码图像(帧率为 40 frame/s);(c1) 150 万个三角场景 3D 模型原始图像及(c2)其编码图像(帧率为 30 frame/s)

Fig. 6 Real-time generation of coded images^[39]. (a1) Original image of cell body and (a2) its coded image with a frame rate of 75 frame/s; (b1) original image of 3D model with 200 triangular meshes and (b2) its coded image with a frame rate of 40 frame/s; (c1) original image of 3D model with 1.5 million triangular scenes and (c2) its coded image with a frame rate of 30 frame/s

角度 ω_{mn} 出射。由 H_{ij} 出射的光束集合 Ω_{ij} 可以表示为^[26]

$$\Omega_{ij} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \omega_{mn} \quad (1)$$

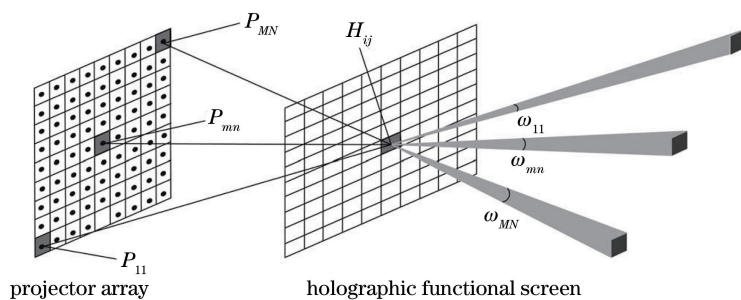


图 7 全息功能屏控制光束输出示意图^[26]

Fig. 7 Schematic diagram of manipulating light beams with holographic functional screen^[26]

为了减少摄影机与投影机的数量,使摄影机与投影机仅在水平方向上排列,可实现水平视差的 3D 光场显示。3D 场景采集设备由 64 路摄影机组成,3D 场景再现设备由 64 路投影机以及全息功能显示屏组成。显示效果如图 8 所示,全息功能屏获得的立体效果在水平方向上有 64 幅视差图,由 64 个不同方向的视点图像实现连续的运动视差。



图 8 基于全息功能屏的不同角度 3D 显示照片

Fig. 8 3D displayed images from different angles based on holographic functional screen

全视差光场显示系统包括全息功能屏、透镜阵列和液晶显示屏。利用全息功能屏调制离散空间的波前，同时保证不同角度的光之间没有串扰，并在液晶显示屏上进行光场图像编码。经过透镜阵列导向和全息功能屏的波前调制，光场编码图像均匀地分布于整个观看视角范围，相当于对真实 3D 光场进行了拟合，如图 9 所示。利用 3840 pixel×2160 pixel 分辨率的液晶显示面板实现了全视差 40° 范围的光场显示，不同位置拍摄的结果如图 10 所示。

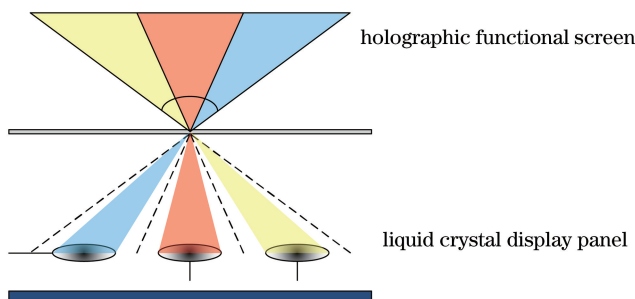


图 9 全视差 3D 光场显示示意图

Fig. 9 Schematic diagram of full parallax 3D light field display

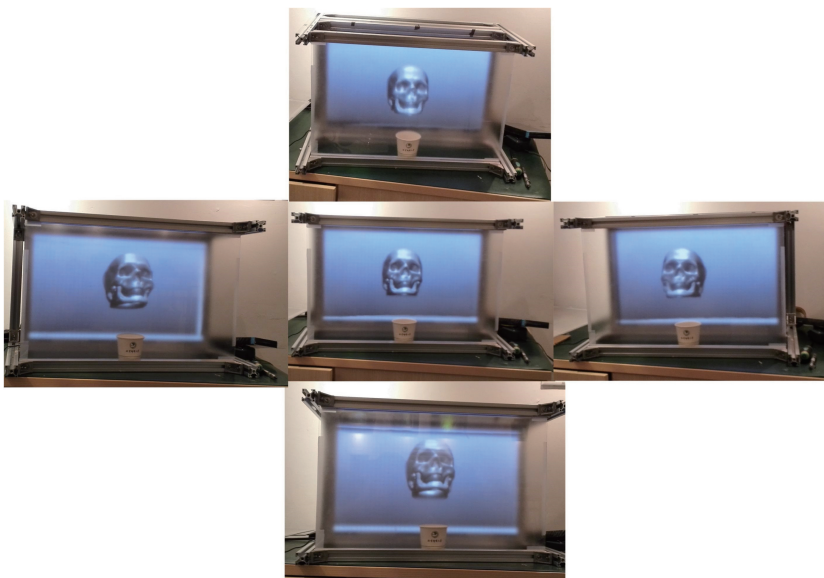


图 10 不同角度拍摄的全视差 3D 光场显示图

Fig. 10 Images from full parallax 3D light field display taken at different view angles

3.4 基于多层液晶的权重压缩光场显示

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。根据观看者位置，可以对 3D 图像进行优化编码，提高 3D 图像的显示质量，且支持 4 人同时观看^[41]。图 11 所示为实验装置，图 12 给出

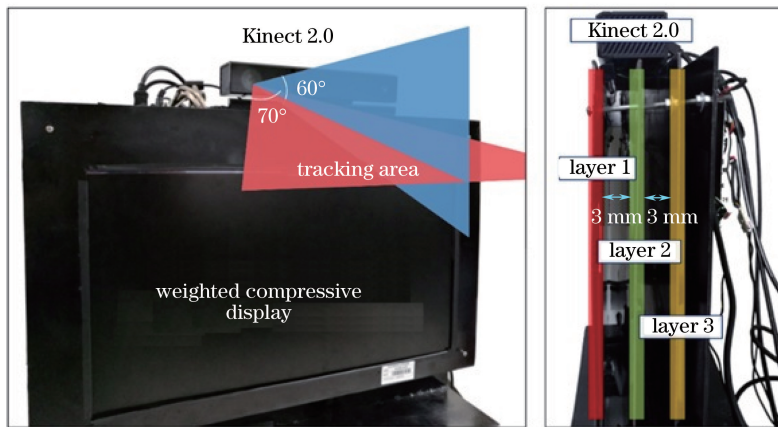


图 11 权重压缩光场显示的实验装置^[41]

Fig. 11 Experimental setup of weighted compressive light field display^[41]

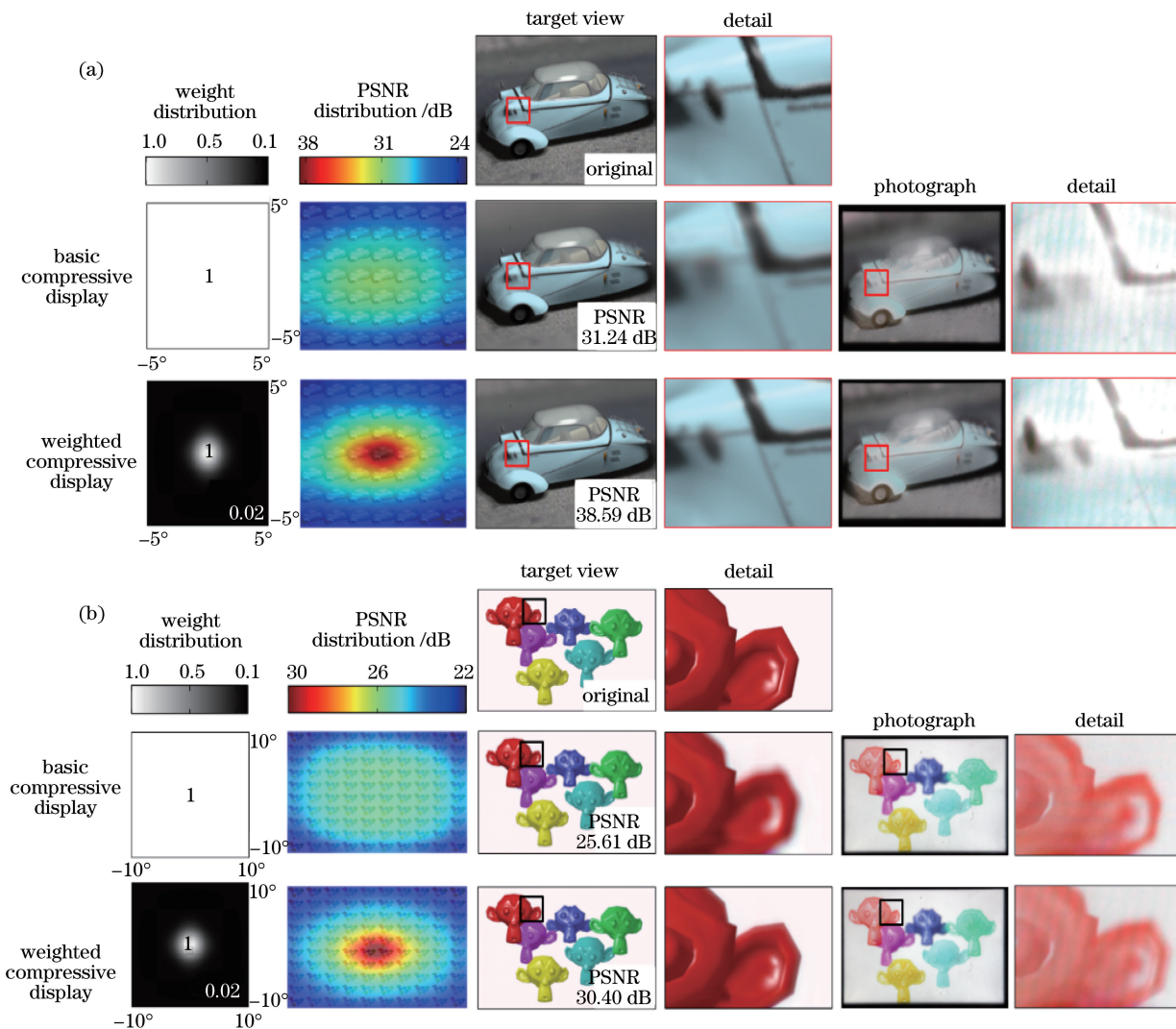


图 12 权重压缩光场显示的实验结果^[41]。(a) 汽车的 3D 图像；(b) 猴子的 3D 图像

Fig. 12 Experimental results of weighted compressive light field display^[41]. (a) 3D image of car; (b) 3D image of monkey

了权重压缩光场的实验结果,其中 PSNR 为峰值信噪比。

3.5 数字全息显示

数字全息显示是实现动态全息显示的基本手段,但是存在计算量大和视角小的问题。本课题组在降低

计算量和增大观看视角方面进行了探索。采用适于人眼的有效衍射区域和离散观看窗口(VW),只计算离散的波前全息图,可以降低计算量而不影响观看效果。当观看窗口间隔 w 为 2 mm、窗口大小为 0.8 mm 时^[42],计算量可以降低到连续窗口条件下的 1.5%,增强现实的全息实验结果如图 13 所示。

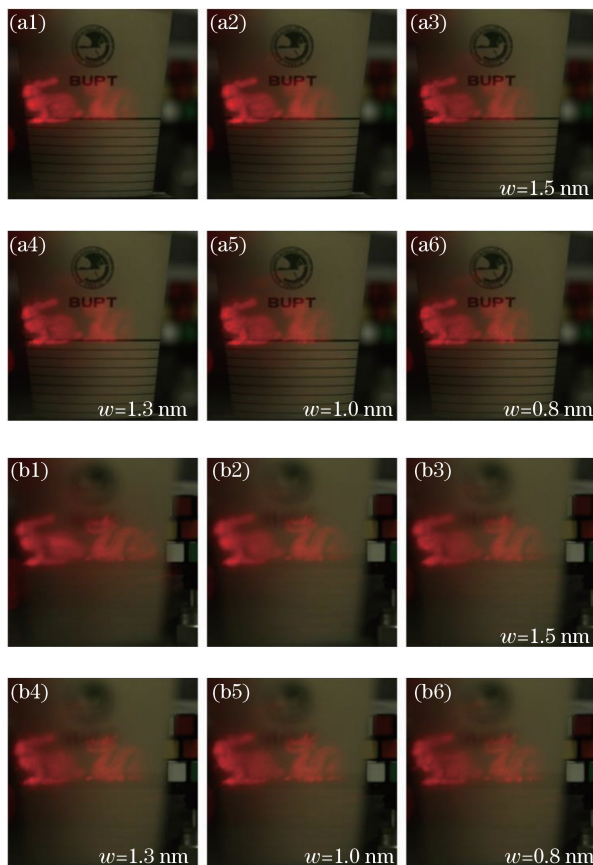


图 13 实验结果^[42]。(a1)聚焦到较近物体,常规方法;(a2)聚焦到较近物体,连续观看窗口;(a3)(a4)(a5)(a6)聚焦到较近物体,离散观看窗口;(b1)聚焦到较远物体,常规方法;(b2)聚焦到较远物体,连续观看窗口;(b3)(b4)(b5)(b6)聚焦到较远物体,离散观看窗口

Fig. 13 Experimental results^[42]. (a1) Focused on nearer objects, conventional method; (a2) focused on nearer objects, continuous VW; (a3) (a4) (a5) (a6) focused on nearer objects, discrete VW; (b1) focused on farther objects, conventional method; (b2) focused on farther objects, continuous VW; (b3) (b4) (b5) (b6) focused on farther objects, discrete VW

为了增大观看视角,利用发散光照明数字全息图,在离显示器件较近处实现了大尺寸 3D 物体成像,再采用大数值孔径的投影透镜将 3D 像投影到大尺寸实际物体的位置,实现了视角达到 60° 的增强现实的全息显示,设计的系统示意图和实验结果如图 14、15 所示^[43],其中 SLM 为空间光调制器,LED 为发光二极管,PF 为偏振滤波器, θ_i 为发散照明参考光的发散角, d 为全息三维重建像与调制器之间的距离, S_{SLM} 和 S_r 分别为空间光调制器和像面的大小。

为了实现大尺寸数字全息显示,利用一块大小为 10.1 inch、分辨率为 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$ 的液晶屏(LCD)进行实验研究。实验装置如图 16 所示,其中 LED 为发光二极管,物体 A(魔方)离 LCD 的距离为 40 cm,物体 B(透镜)离 LCD 的距离为 40 cm。全息图中的兔子和物体 A 在同一深度,位于出屏 40 cm 处;全息图中的龙和物体 B 在同一深度,位于入屏 40 cm 处。在距离 LCD 2 m 处观看,可以清晰看到大景深全息图的显示。单反相机聚焦到物体 A 处时,兔子和物体 A 清楚,龙和物体 B 模糊;聚焦到物理 B 处时,龙和物体 B 清楚,如图 17 所示。

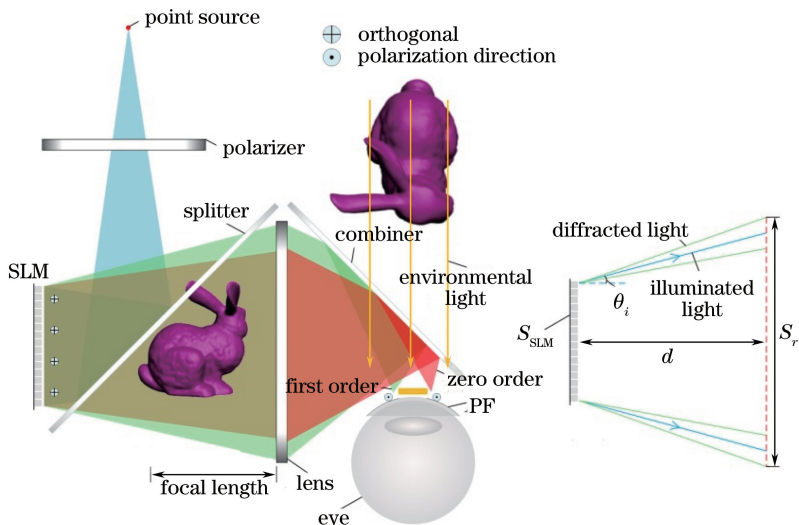


图 14 大视角穿透式全息显示结构示意图

Fig. 14 Structural diagram of see-through holographic display system with a large view angle

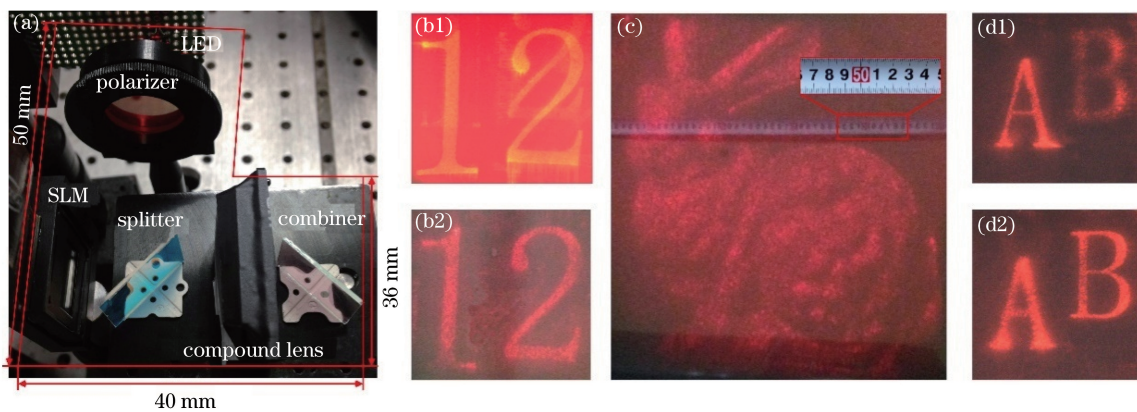


图 15 大视角穿透式全息显示实验^[43]。(a)实验装置；(b1)无和(b2)有偏振滤波器的数字全息图；(c)观看到的增强现实场景；聚焦到字母(d1) A 和(d2) B 的全息显示

Fig. 15 Experiment of see-through holographic display with a large view angle^[43]. (a) Experimental setup; digital holograms (b1) without and (b2) with polarization filter; (c) observed augmented reality scene; holographic displays with letter (d1) A and (d2) B focused

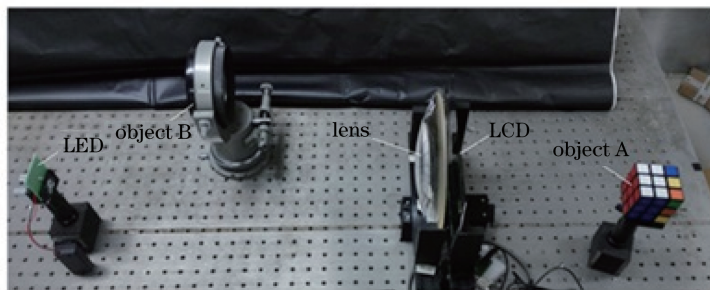


图 16 10.1-inch LCD 全息实验装置

Fig. 16 Holographic experimental setup with 10.1-inch LCD

4 结 论

回顾了国内外 3D 光显示的研究现状,重点介绍了北京邮电大学在密集视点显示、集成成像显示、光场显示和全息显示方面的研究进展。基于传统柱透镜或狭缝光栅的裸眼 3D 光显示存在视点数目与显示精细

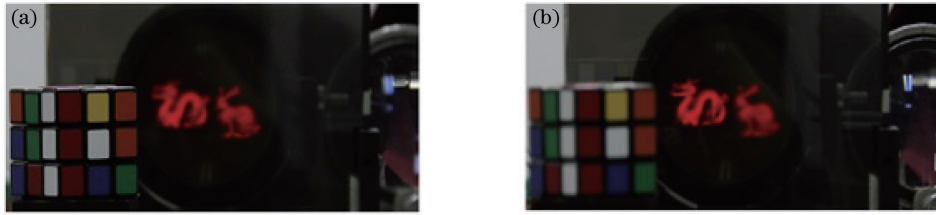


图 17 相机聚焦到(a)魔方和(b)透镜时的全息图

Fig. 17 Holographic images with camera focused on (a) magic cube and (b) lens

度之间的矛盾以及视区跳跃。传统的集成成像显示一般横向分辨率低、无跳跃视区小、显示深度小。结合光学和图像编码结构来实现小截距密集视点的 3D 显示,在较大观看范围内无视区跳跃,具有平滑的运动视差。动态全息显示一般计算量大、显示尺寸小、视角小且难以实现真彩色。基于投影阵列的 3D 光显示设备尺寸较大、调节复杂。此外,目前实现的 3D 光显示一般只具有水平视差,还不完全符合人们的观看习惯。近年来,随着显示器件的发展和处理能力的进步,光场显示和数字全息显示技术取得了一定的进展,但还有许多问题需要解决。全视差光场显示和全息显示符合 3D 光显示未来的发展方向,具有较大的发展空间。

参 考 文 献

- [1] Son J, Javidi B, Yano S, *et al.* Recent developments in 3D imaging technologies[J]. J Display Technol, 2010, 6(10): 394-403.
- [2] Nawrot M, Stroyan K. The motion/pursuit law for visual depth perception from motion parallax[J]. Vision Research, 2009, 49(15): 1969-1978.
- [3] McIntire J P, Havig P R, Geiselman E E. Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review [J]. Displays, 2014, 35(1): 18-26.
- [4] Hill L, Jacobs A. 3-D liquid crystal displays and their applications[C]. Proceedings of IEEE, 2006, 94(3): 575-590.
- [5] Nordin G P, Kulick J H, Lindquist R G, *et al.* Liquid crystal-on-silicon implementation of the partial pixel three-dimensional display architecture[J]. Appl Opt, 1995, 34(19): 3756-3763.
- [6] Chien K W, Shieh H P. Time-multiplexed three-dimensional displays based on directional backlights with fast-switching liquid-crystal displays[J]. Appl Opt, 2006, 45(13): 3106-3110.
- [7] Li X, Wang Q, Tao Y, *et al.* Crosstalk reduction in multi-view autostereoscopic three-dimensional display based on lenticular sheet[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(2): 021001.
- [8] Son J Y, Saveljev V V, Kim J S, *et al.* Multiview image acquisition and projection[J]. J Display Technol, 2006, 2(4): 359-363.
- [9] Hong J, Kim Y, Park S, *et al.* 3D/2D convertible-type integral imaging using concave half mirror array [J]. Opt Express, 2010, 18(20): 20628-20637.
- [10] Takaki Y, Nago N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display[J]. Opt Express, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [11] Mphepo W, Huang Y P, Rudquist P, *et al.* An autostereoscopic 3D display system based on prism patterned projection screen[J]. J Display Technol, 2010, 6(3): 94-97.
- [12] Bogaert L, Meuret Y, Roelandt S, *et al.* Demonstration of a multiview projection display using decentered microlens arrays[J]. Opt Express, 2010, 18(25): 26092-26106.
- [13] Cho M, Daneshpanh M, Moon I, *et al.* Three-dimensional optical sensing and visualization using integral imaging[C]. Proceedings of IEEE, 2011, 99(4): 556-575.
- [14] Kim J, Park G, Kim Y, *et al.* Elimination of image discontinuity in integral floating display by using adaptive image mapping[J]. Appl Opt, 2009, 48(34): 176-185.
- [15] Xu Y, Wang X, Sun Y, *et al.* Homogeneous light field model for interactive control of viewing parameters of integral imaging displays[J]. Opt Express, 2012, 20(13): 14137-14151.
- [16] Okano F, Arai J, Kawakita M. Wave optical analysis of integral method for three-dimensional images[J]. Opt Lett, 2007, 32(4): 364-366.

- [17] Son J Y, Javidi B. Three-dimensional imaging methods based on multiview images[J]. J Display Technol, 2005, 1(1): 125-140.
- [18] Yi S Y, Chae H B, Lee S H. Moving parallax barrier design for eye-tracing autostereoscopic displays[C]. Proceedings of 3DTV Conference, 2008: 165-168.
- [19] Liou J C, Lee K, Huang J F. Low crosstalk multi-view tracking 3-D display of synchro-signal LED scanning backlight system[J]. J Display Technol, 2011, 7(8): 411-419.
- [20] 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.
- [21] Blanche P A, Bablumian A, Voorakaranam R, *et al.* Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer[J]. Nature, 2010, 468(7320): 80-83.
- [22] Yaras F, Kang H, Onural L. State of the art in holographic displays: A survey[J]. J Display Technol, 2010, 6(10): 443-454.
- [23] Smalley D E, Smithwick Q Y J, Bove V M Jr, *et al.* Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays [J]. Nature, 2013, 498(7454): 313-318.
- [24] Benton S A. Holography reinvented[C]. SPIE, 2002, 4738: 23-26.
- [25] Chen B, Zhong Q, Li H, *et al.* Automatic geometrical calibration for multiprojector-type light field three-dimensional display[J]. Opt Eng, 2014, 53(7): 073107.
- [26] 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.
- [27] Gao X, Sang X Z, Yu X, *et al.* Aberration analyses for improving the frontal projection three-dimensional display[J]. Opt Express, 2014, 22(19): 23496-23511.
- [28] Liu Xu, Li Haifeng. Spatial three-dimensional display based on the light-field reconstruction[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900121.
刘旭, 李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900121.
- [29] Akeley K, Watt S J, Girshick A R. A stereo display prototype with multiple focal distances[J]. ACM Trans Graph, 2004, 23(3): 804-813.
- [30] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, *et al.* Compressive light field synthesis using multilayer displays with directional backlighting[J]. ACM Trans Graph, 2012, 31(4): 13-15.
- [31] Takaki Y, Urano Y, Kashiwada S, *et al.* Super multi-view windshield display for long-distance image information presentation[J]. Opt Express, 2011, 19(2): 704-116.
- [32] Teng D, Liu L, Wang B. Super multi-view three-dimensional display through spatial-spectrum time-multiplexing of planar aligned OLED microdisplays[J]. Opt Express, 2014, 22(25): 31448-31457.
- [33] Yu X, Sang X, Xing S, *et al.* Natural three-dimensional display with smooth motion parallax using active partially pixelated masks[J]. Opt Commun, 2014, 313(4): 146-151.
- [34] Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Zhao Tianqi, *et al.* Three-dimensional display with smooth motion parallax[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209011.
桑新柱, 于迅博, 赵天奇, 等. 具有平滑运动视差的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209011.
- [35] Yu X, Sang X, Chen D, *et al.* Autostereoscopic three-dimensional display with high dense views and the narrow structure pitch[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 12(6): 060008.
- [36] Wang P, Xie S, Sang X, *et al.* A large depth of field frontal multi-projection three-dimensional display with uniform light field distribution[J]. Opt Commun, 2015, 354: 321-329.
- [37] Yu X, Sang X, Gao X, *et al.* Large viewing angle three-dimensional display with smooth motion parallax and accurate depth cues[J]. Opt Express, 2015, 23(20): 25950-25958.
- [38] Yang S, Sang X, Gao X, *et al.* Influences of the pickup process on the depth of field of integral imaging display[J]. Opt Commun, 2017, 386: 22-26.
- [39] Xing S, Sang X, Yu X, *et al.* High-efficient computer-generated integral imaging based on the backward ray-tracing technique and optical reconstruction[J]. Opt Express, 2017, 25(1): 330-338.
- [40] Sang X, Fan F, Choi S, *et al.* Three-dimensional display based on the holographic functional screen[J]. Opt Eng,

2011, 50(9): 091303.

- [41] Chen D, Sang X, Yu X, *et al.* Performance improvement of compressive light field display with the viewing-position-dependent weight distribution[J]. *Opt Express*, 2016, 24(26): 29781-29793.
- [42] Chen Z, Sang X, Lin Q, *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.
- [43] Chen Z, Sang X, Lin Q, *et al.* A see-through holographic head-mounted display with the large viewing angle[J]. *Opt Commun*, 2017, 384: 125-129.