

文章编号:1007-2780(XXXX)XX-0001-09

# 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术

郑义微, 王迪, 李移隆, 储繁, 王琼华  
(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京, 100191)

**摘要:**全息显示技术可以完整记录和再现物体的波前信息,被认为是3D显示的终极目标。其中大视角全息再现是全息显示的关键技术之一。本文从基于液晶空间光调制器的全息显示原理出发,介绍了近年来所出现的多种大视角全息显示方法,并对其实现技术做了探究分析,论证了现有大视角全息显示技术的实现原理及优劣。随着液晶空间光调制器像素间隔的减小、刷新率的提升以及新器件新材料的结合,大视角全息显示必将迎来新的发展。

**关键词:**全息显示;3D显示;空间光调制器

**中图分类号:**0438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.3-CJLCD-2021-0028 郑义微E(彩)

## Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator

ZHENG Yi-wei, WANG Di, LI Yi-long, CHU Fan, WANG Qiong-hua

(School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing, China)

**Abstract:** Holographic display technology can record and reconstruct the wavefront information of the original objects completely, which is considered as the ultimate goal of 3D display. Holographic reconstruction with large viewing angle is one of the key technologies in holographic display. In this paper, several technologies of holographic display with wide viewing angle have been introduced and the technical routes have been discussed by analyzing the principle of the holographic display based on the liquid crystal spatial light modulator. The realization principles, merits and demerits of these existing methods have been analyzed. With the reduction of size of the pixel pitch of liquid crystal spatial light modulators, the improvement of the refresh rate, and the combination of new devices and materials, the wide-viewing-angle holographic display will have new development.

**Key words:** holographic display; 3D display; spatial light modulator

### 1 引言

人类生活在3D世界中,对3D信息的接收与显示是满足人类视觉感知的重要途径。3D显示

自上世纪80年代以来先后出现了助视3D显示和裸视3D显示,裸视显示又称为裸眼显示,它包括多视点光栅3D显示、体显示、集成成像3D显示和全息3D显示等多种方式<sup>[1-5]</sup>。其中全息3D显

收稿日期:2020-01-27;修订日期:2020-02-21.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62020106010, No. 62011540406)

Supported by Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 62020106010, No. 62011540406)

示因为能够完整记录和再现3D物体的波前,提供人眼视觉系统所需要的全部深度信息,被广泛地认为是3D显示的终极目标。1898年,美国麻省理工学院(MIT)多媒体实验室基于声光调制器(AOM)提出了第一代全息投影显示系统。随后,他们基于不同类型的AOM和光机系统先后开发了三代(Mark I、II、III)全息显示系统,其中第三代的显示尺寸为80mm×80mm×80mm,视角为24°<sup>[6]</sup>。此后,众多利用不同空间光调制器(SLM)装置实现全息显示系统的研究成果被陆续报道。2003年,美国西南大学医学中心采用数字微镜器件(DMD)搭建了全息显示系统,实现了二维图像的分层投影<sup>[7]</sup>。为了提高全息显示的分辨率,日本千叶大学的Shimobaba团队和日本兵库大学的Sato团队分别用液晶显示器(LCD)实现了三维全息显示<sup>[8-9]</sup>。2004年,基于电寻址液晶SLM和光寻址液晶SLM的数字全息显示系统也被提出,该系统的全息图像面积可以达到136 mm×34 mm<sup>[10]</sup>。2005年,波兰和美国的研究学者提出了使用硅基液晶(LCoS)的全息显示方法<sup>[11]</sup>,由于LCoS具有较高的衍射效率,全息显示的质量得到了较好的提升。2008年和2010年,美国亚利桑那大学的研究小组先后在Nature上发表文章<sup>[12-13]</sup>,该研究团队利用一种可擦写的聚合物光折变材料,制作出了4英寸×4英寸全息显示屏。然而,其刷新时间仅为2 s,离视频显示还有很大的差距。2013年,美国中佛罗里达大学的研究者基于蓝相液晶提出了具有亚毫秒响应速度的相位型LCoS,并很好地抑制了边缘场效应。该LCoS快速的响应速度使其在时序方法扩大视角及彩色显示中有着很大的潜力<sup>[14]</sup>。2016年,日本东北大学在LCoS器件上实现了突破,并利用1μm像素间距的LCoS实现较大视角的全息显示<sup>[15]</sup>。此外,也有学者利用波导调制器在大视角再现方面实现了突破<sup>[16]</sup>。2019年,韩国科学技术院的研究者提出了一种透射式的平板波前调制器,并借助该调制器实现了大视角高对比度的动态全息显示<sup>[17]</sup>。2020年,韩国的研究学者通过在SLM前方设置转向背光单元,将全息显示视角扩大了近30倍<sup>[18]</sup>。如今,随着光电子技术的发展,液晶SLM得到了大力的发展,基于液晶SLM的全息显示研究也越来越成为科学家们

关注的热点。

国内众多高校及科研单位也开展了全息显示方面的研究工作,并取得了一定的进展。北京理工大学是我国较早开始研究全息3D显示的学校之一,在提高再现像质量和视角扩大等方面进行了深入细致的研究并取得了一定的成果<sup>[19-20]</sup>。清华大学在速度提升、全息图的编码等方面取得了诸多成果<sup>[21]</sup>。东南大学近些年在基于高分辨率LCoS方面的全息显示研究上取得了较好的成果<sup>[22]</sup>。上海交通大学针对动态全息3D显示的掺杂液晶光折变材料和聚合物稳定蓝相液晶器件开展了相关研究<sup>[23]</sup>。苏州大学利用全息衍射调控技术,研制了全视差的彩色3D显示器<sup>[24]</sup>。此外,北京邮电大学<sup>[25]</sup>、浙江大学<sup>[26]</sup>、上海大学<sup>[27]</sup>、安徽大学<sup>[28]</sup>、西北工业大学<sup>[29]</sup>、北京航空航天大学<sup>[30]</sup>、四川大学<sup>[31-32]</sup>等都针对全息显示技术进行了深入研究,并取得了诸多成果。

计算全息显示发展至今,已在多方面取得了很大的进展,但仍然面临着一些挑战。受目前SLM器件的限制,全息再现像的观看视角很小。例如显示大小为300 mm×300 mm×300 mm,视角为30°的全视差3D图像,所需要空间光调制器的像素数至少为10<sup>12</sup>,现阶段很难实现。本文将从基于液晶SLM的全息显示原理出发,分析影响全息显示的再现像视角的因素,总结增大视角的方法,并对这些方法进行分析和讨论,最后展望未来的研究趋势。

## 2 全息显示视角增大的原理

全息显示中,3D再现像的大小与视角主要由目前液晶SLM阵列的尺寸、像素大小以及再现光路决定。如图1所示液晶SLM的最大衍射角 $\theta_{\max}$ 可用下式表示:

$$\theta_{\max} = \arcsin \frac{\lambda}{2p} \quad (1)$$

其中 $\lambda$ 为再现光的波长, $p$ 为SLM的像素间距。当使用的SLM像素间距为8μm,用人眼最敏感的绿光( $\lambda=532\text{nm}$ )照射时,再现像的最大视角仅为3.8°,而这无法满足观看者的需求。由于SLM自身结构的限制,在观看距离 $R$ 处,只有在特定的位置才能观看到物体的完整再现像,如图1中区域 $V$ 所示。根据公式(1)以及图1的几何关系

可得出再现像的最大视角为:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{H/2 - D/2}{L}\right) \quad (2)$$

由公式(2)可知再现像的最大观看视角与 $H$ 有关,当SLM一维方向上像素个数为 $N$ ,即 $H = Np$ ,那么公式(2)可以写为:

$$\theta = 2\arctan\left(\frac{Np/2 - D/2}{L}\right) \quad (3)$$

由于再现像大小与 $p$ 成反比,减小SLM的像素间距可以得到更大尺寸的再现像。而采用多

个SLM拼接的方式则可以同时增大再现像尺寸和视角。平面拼接SLM的方式虽然可以增大全息显示的观看视区,但SLM之间的间隙会导致视区不连续。相比之下,采用圆弧形排列的SLM阵列可以很好地解决这一问题<sup>[33]</sup>。如图2所示, $d$ 是再现像的大小, $f$ 是再现像与SLM之间的距离,如果有 $n$ 个位于圆弧上且彼此之间倾斜角度为 $\gamma$ 的SLM,理论上再现像视角可以增加到 $\theta'$ :

$$\theta' = \theta + (n - 1)\gamma \quad (4)$$

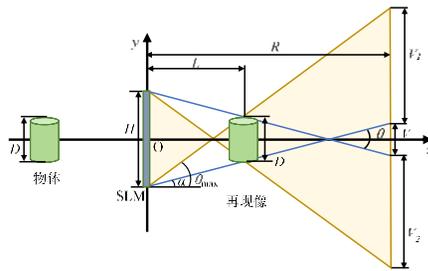


图1 再现像视角与SLM之间的关系

Fig. 1 Relationship between the viewing angle of the reconstructed image and the SLM

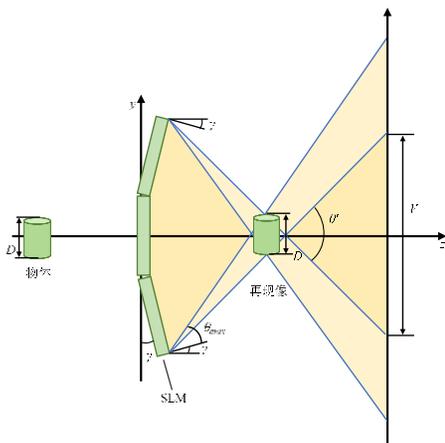


图2 圆弧排列SLM增大视角的原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multiple SLMs in circular configuration for large viewing angle

### 3 计算全息显示视角增大的方法

计算全息再现像视角增大的方法有很多种,根据使用SLM的个数,可以分为单个SLM视角增大的方法和多个SLM拼接视角增大的方法。

#### 3.1 单个SLM视角增大方法

在全息显示系统中,使用较少光学器件的简洁光学系统不仅易于操作,还可以降低成本,因此很多学者针对单个SLM进行了视角增大的研究。

##### (1) 高级衍射光增大视角法

全息显示中再现像视角与SLM的像素间距成反比,但是,受限于当前的生产工艺,商业化SLM的像素间距很难做到波长量级。一些学者提出一种不依赖SLM的像素间距,利用由SLM像素结构而产生的高级衍射光来增大全息再现视角的方法<sup>[30]</sup>,其原理如图3所示。

在此方法中,图3(a)代表某一时刻产生的0级衍射像,图3(b)代表另一不同时刻产生高级衍射像,通过时间复用,观看者可以得到如图3(c)所示的0级衍射像和高级衍射像相结合的大视角全息再现效果。但是,由衍射原理可知,衍射光强会随着衍射级次的升高而降低,因此,要想利用此方法得到光强分布均匀的大视角再现像,除了结合不同级次的衍射像,还需进一步对再现光进行处理<sup>[34]</sup>。

##### (2) 横向竖向分辨率重新分布法

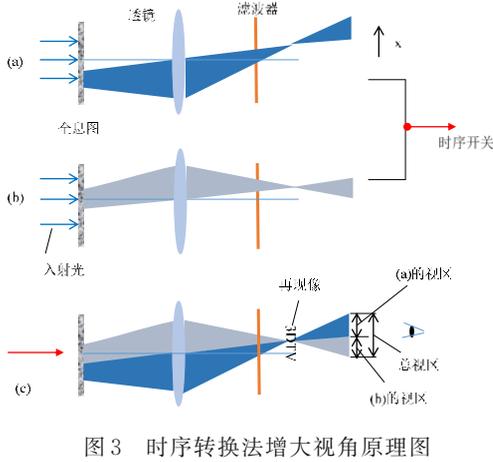


图3 时序转换法增大视角原理图

Fig. 3 Principle of the method for enlarging the viewing angle. (a) 0-order reconstructed image; (b) 1-order reconstructed image; (c) viewing angle enlargement by switching (a) and (b)

(a)生成0级衍射像;(b)生成1级衍射像;(c)通过切换(a)和(b)来增大观看视角

根据人眼立体视觉原理可知,图像之间的水平视差是观看者产生立体感的主要原因。因此,在3D显示技术中,水平视角的大小是评价再现系统优劣的重要因素。针对一个横向和竖向分辨率固定的SLM,一些学者利用 $4f$ 光学系统,实现横向和竖向的分辨率重新分布,通过牺牲竖向分辨率达到增大横向分辨率进而增大水平再现视角的目的<sup>[35-36]</sup>,其再现原理如图4所示。该系统中,水平视角的增大倍数由傅里叶透镜的 $f$ 数决定, $f$ 数越小,水平视角越大。

### (3) 线性相位因子添加法

除了上述两种方法以外,中山大学的<sup>[33]</sup>研究者提出一种在计算全息图上添加线性相位因子的方法来增大再现像视角<sup>[33]</sup>,其显示效果等同于多个SLM的曲面排布。其原理如图5所示,在此技术中,当使用倾斜再现光照射SLM时,相对于再现光垂直入射SLM的方法,再现角 $\theta_{out}$ 明显增大,且效果等同于SLM之间彼此按照倾斜角 $\theta_{in}$ 进行曲面排布。另外,再现光倾斜入射SLM相当于在SLM上添加一个线性相位因子,为了避免SLM阵列弧形排列的繁琐设置,该方法通过在计算全息图上添加线性相位因子 $\theta_{in}$ 实现再现视角的扩大。该方法简单易行,通过时间复用叠加不同的相位因子,可以进一步实现视角的扩

大。最终,该方法仅利用一个SLM就实现了 $13.6^\circ$ 的视角。

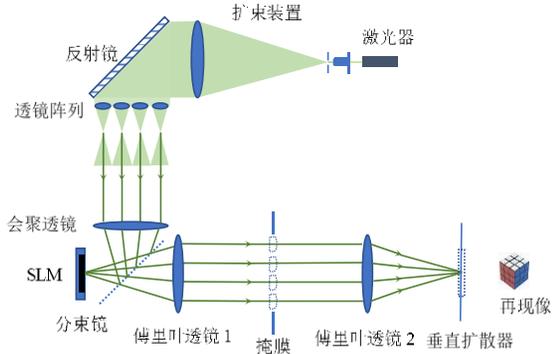


图4 利用 $4f$ 系统增大视角的实验装置图

Fig. 4 Experimental setup diagram of the large viewing angle system by using  $4f$  system

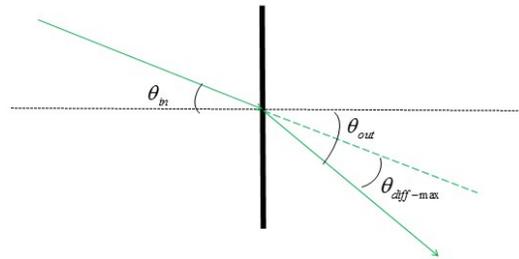


图5 倾斜光照射时的光栅衍射

Fig. 5 Grating diffraction with inclined illumination

### (4) 特殊光学元件扩大视角法

在全息显示系统中,利用诸如全息光学元件(HOE)等特殊器件来扩大视角是近些年的一个研究热点。北京邮电大学的研究者通过使用特殊设计的透镜组和偏振滤光片,将全息显示系统的视角扩大到了 $60^\circ$ <sup>[37]</sup>。SandoYusuke等研究者基于圆柱形HOE搭建了全息显示系统,并实现了大视角的全息AR显示效果<sup>[38]</sup>。在该系统中,经过SLM调制的光波以 $45^\circ$ 的倾斜角入射到圆柱形HOE上。圆柱形HOE将入射平面波转换为发散的球面波,即进入圆柱形HOE的波前以大的发散角被径向反射。因此,观看者可以在非常宽的观看区域内看到全息再现像。此外,北京理工大学的研究团队提出了基于双层衍射结构HOE的全息近眼显示系统,并通过红、绿、蓝三束光路实现了彩色全息显示<sup>[39]</sup>。该系统的显示视角达到了 $80^\circ$ 。

### 3.2 多个SLM拼接视角增大方法

根据公式(3)可知,全息显示的视角大小与SLM的像素个数成正比。目前有很多技术通过使用多个SLM的拼接来增大SLM的总像素个数,从而增大全息再现像的视角。

#### (1) 多SLM平面排布法

Naoki Fukaya等学者提出了使用多个LCD作为SLM进行平面排布来扩大全息再现视角的方法。由于SLM本身存在外部紧固框及外延电路,所以当SLM并列排布时,很难实现它们之间的无缝拼接,因此导致再现像的跳变,严重影响观看体验。为了解决此问题,该团队提出了通过使用半透半反镜来实现SLM的无缝拼接<sup>[40]</sup>,其系统光路示意图如图6所示。3个LCD的拼接实现了全息水平方向再现像视角的扩大,而柱透镜和透镜片的使用则能在垂直方向分别对再现像的尺寸和视角进行扩大。但是,由于拼接方式的限制,该系统仅有水平方向的视差。

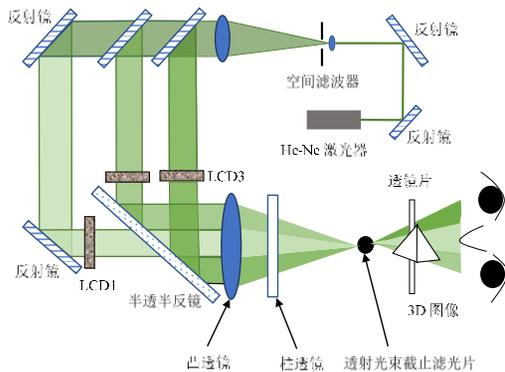


图6 基于三个LCD的显示系统

Fig. 6 Configuration of the whole display system based on three LCDs

此外,Takanori Senoh等学者利用9个SLM的平面拼接开发了全视差彩色全息显示系统<sup>[41-42]</sup>。该系统利用滤波器组和多个透镜组的结合同时实现了9个SLM的无缝拼接和再现像大小的变换。观看者能够在 $5.6^\circ$ 的角度范围内观看到完整的3D物体再现像。然而,利用多个SLM的直线排布来扩大再现视角时,需要改变物体的记录距离。所以当SLM的个数发生变化时,全息图必须重新记录<sup>[43]</sup>。

#### (2) 多SLM曲面排布法

为了克服平面排布的多个SLM扩大视角方法中所存在的问题,不少学者提出通过SLM曲面排布来扩大全息再现视角的方法。

在多个SLM的曲面排布的方法中,目前已有学者通过分束器实现9个呈圆弧排布的SLM无缝拼接<sup>[44]</sup>,最终实现了 $24^\circ$ 再现视角的彩色全息显示,如图7所示。Tomasz Kozacki等将Wigner分布函数应用到曲面排布SLM全息显示技术中,使6个SLM呈最优化曲面排布<sup>[45]</sup>。随后,为了进一步改善全息再现像的观看效果,他们将6个SLM按照图8(a)所示的结构进行曲面排布<sup>[46]</sup>,并应用了时空复用的方法实现了 $35^\circ$ 水平再现视角、 $3.3^\circ$ 垂直再现视角的全视差全息显示。该系统从不同视角观察到的再现像如图8(b)所示。

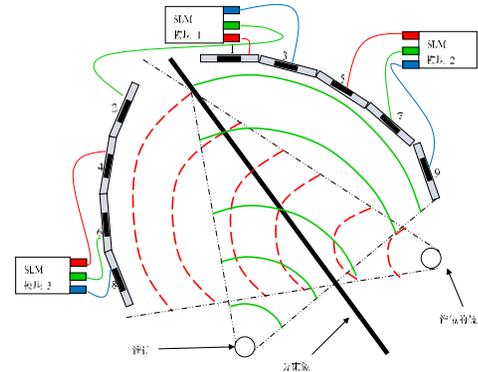


图7 弧形全息视频显示系统

Fig. 7 Circular holographic video display system

此外,上海大学的研究团队将 $4f$ 系统与SLM的曲面拼接相结合,搭建了彩色全息显示系统<sup>[47]</sup>。该系统中,两个像素间距为 $8\mu\text{m}$ 的SLM以 $3^\circ$ 的倾斜角度进行曲面拼接,透镜焦距比为 $2:1$ 的 $4f$ 系统进一步扩大了再现像的视角,最终使系统达到了 $12.8^\circ$ 的视场角。该系统基于时空复用同步控制方法实现了彩色显示,并利用特殊设计的同步模块消除了色彩串扰。北京航空航天大学的研究者提出的基于复合曲面全息图的全息显示方法为大视角全息显示提供了另一种思路<sup>[48]</sup>。该方法通过生成多个物体的曲面全息图,从而生成复合曲面全息图。当改变全息图的弯曲角度时,能看到不同物体的全息再现像。

综上所述,目前国内外的研究者对全息显示

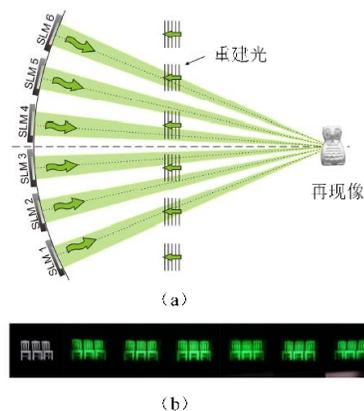


图8 基于时空复用的全视差曲面全息显示系统 (a) 6个SLM的曲面拼接结构图; (b) 3D模型及不同视角观察到的再现像

Fig. 8 Full-parallax circular holographic display system based on spatiotemporal multiplexing (a) Alignment of 6 SLMs in a circle (b) 3D model and reconstructed images with different viewing angles

的视角较小这一问题做了大量的研究,报道的方法都能在一定程度上增大全息再现像的视角。与国外相比,国内的研究起步虽相对较晚,但近些年呈现出蓬勃的发展态势。研究者们倾向于使用较少的空间光调制器来扩大全息显示的视角,以减小系统的复杂程度。与此同时,国内的研究者们还注重再现像质量的提升,经常将视角扩大与散斑抑制方法相结合。此外,将新材料与

特殊光学器件运用到全息显示中以扩大系统的视角在近两年里也成为了研究者的一个研究热点。但是,国内对于超高性能液晶空间光调制器这类关键器件的研究与国外仍有一定的距离。

## 4 结论

本文对提高再现像视角的方法进行了归纳总结,目前的方法中多以硬件拼接方式或者多成分衍射光束拼接为主,各种方法的提出为大视角全息显示提供了一定的参考思路,但从液晶显示器件的衍射能力来看,新型的高性能衍射调控装置的研制也是全息技术走向实用化的关键路线。我们期望SLM器件的像素尺寸能达到或者接近可见光波长,且具有高衍射效率、高刷新率、高信噪比以及实现 $2\pi$ 的相位调制。对于这种类型的小像素化器件开发,其核心包括器件结构的设计和材料的突破。此外,全息显示与全息光学元件、超表面等新型光学器件的结合,必将为大视角全息显示提供新的思路与发展机遇。同时,结构更加紧凑的大视角动态全息显示也必将随着AR/VR/XR的发展具有更大的市场潜力。

这些问题有待于我们进一步的研究和探索。随着器件和技术的发展,相信不久的将来全息3D显示技术会有前所未有的突破与光明前景。



郑义微(1998—),女,四川宜宾人,硕士研究生,2020年于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事3D显示方向的研究。

Email: zhengyiwei@buaa.edu.cn



王琼华(1969—),女,四川巴中人,博士,教授,2001年于电子科技大学获得博士学位,主要从事3D显示,液晶和液体光子器件与成像方向的研究。

Email: qionghua@buaa.edu.cn

## 参考文献:

- [1] MATSUSHIMA K. *Introduction to Computer Holography: Creating Computer-Generated Holograms as the Ultimate 3D Image* [M]. Cham: Springer Nature, 2020.
- [2] 王琼华. 3D显示技术与器件[M]. 北京:科学出版社,2011.  
WANG Q H. 3D Display Technology and Devices [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [3] GENG J. Three-dimensional display technologies [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.

- 
- [4] SLINGER C, CAMERON C, STANLEY M. Computer-generated holography as a generic display technology [J]. *Computer*, 2005, 38(8): 46-53.
- [5] 尹业超,赵悟翔,王琼华. 单摄像机无人机获取裸眼3D视频的方法[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(4): 315-320.  
YIN Y C, ZHAO W X, WANG Q H. Naked-eye 3 D videos acquired by single-camera unmanned aerial vehicle [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(4): 315-320. (in Chinese)
- [6] SMALLEY D E, SMITHWICK Q Y J, BOVE JR V M. Holographic video display based on guided-wave acousto-optic devices [C]//Proceedings of SPIE 6488, Practical Holography XXI: Materials and Applications. San Jose, California, United States: SPIE, 2007: 64880L.
- [7] HUEBSCHMAN M L, MUNJULURI B, GARNER H R. Dynamic holographic 3-D image projection [J]. *Optics Express*, 2003, 11(5): 437-445.
- [8] SHIMOBABA T, ITO T. A color holographic reconstruction system by time division multiplexing with reference lights of laser [J]. *Optical Review*, 2003, 10(5): 339-341.
- [9] SATO K, SUGITA A, MORIMOTO M, *et al.* Reconstruction of full-color images with a RGB time-sharing holographic display system [C]//Proceedings of SPIE 6030, ICO20: Display Devices and Systems. Changchun, China: SPIE, 2006: 603004.
- [10] STANLEY M, SMITH M A G, SMITH A P, *et al.* 3D electronic holography display system using a 100-megapixel spatial light modulator [C]//Proceedings of SPIE 5249, Optical Design and Engineering. St. Etienne, France: SPIE, 2004: 297-308.
- [11] MICHALKIEWICZ A, KUJAWINSKA M, KREZEL J, *et al.* Phase manipulation and optoelectronic reconstruction of digital holograms by means of LCOS spatial light modulator [C]//Proceedings of SPIE 5776, Eighth International Symposium on Laser Metrology. Merida, Mexico: SPIE, 2005: 144-152.
- [12] TAY S, BLANCHE P A, VOORAKARANAM R, *et al.* An updatable holographic three-dimensional display [J]. *Nature*, 2008, 451(7179): 694-698.
- [13] 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.
- [14] CHEN Y, PENG F L, WU S T. Submillisecond-response vertical-aligned liquid crystal for color sequential projection displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2013, 9(2): 78-81.
- [15] ISOMAE Y, SHIBATA Y, ISHINABE T, *et al.* P-199L: Late-News Poster: optical phase modulation properties of 1  $\mu\text{m}$ -pitch LCOS with dielectric walls for wide-viewing-angle holographic displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1670-1673.
- [16] QADERI K, SMALLEY D E. Leaky-mode waveguide modulators with high deflection angle for use in holographic video displays [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20831-20841.
- [17] PARK J, LEE K R, PARK Y K. Ultrathin wide-angle large-area digital 3D holographic display using a non-periodic photon sieve [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1304.
- [18] AN J M, WON K, KIM Y, *et al.* Slim-panel holographic video display [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5568.
- [19] ZHANG H, XIE J H, LIU J, *et al.* Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(30): 5834-5841.
- [20] WU A A, KANG G G, ZANG J L, *et al.* Null reconstruction of orthogonal circular polarization hologram with large recording angle [J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8880-8887.
- [21] QU W D, GU H R, ZHANG H, *et al.* Image magnification in lensless holographic projection using double-sampling Fresnel diffraction [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10018-10021.
- [22] CHANG C L, XIA J, LEI W. One step hologram calculation for multi-plane objects based on nonuniform sampling (Invited Paper) [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(6): 060020.
- [23] LI X, LI Y, XIANG Y, *et al.* Highly photorefractive hybrid liquid crystal device for a video-rate holographic display [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8824-8831.
- [24] WAN W Q, QIAO W, HUANG W B, *et al.* Efficient fabrication method of nano-grating for 3D holographic dis-

- play with full parallax views [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6203-6212.
- [25] ZHAO L M, SANG X Z, CHEN Z D, *et al.* Real-time rendering of computer-generated hologram with the view volume transformation based layered method [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 68-73.
- [26] SUN P, CHANG S Q, LIU S Q, *et al.* Holographic near-eye display system based on double-convergence light Gerchberg-Saxton algorithm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10140-10151.
- [27] 曾震湘, 郑华东, 卢小仟, 等. 空间光调制器曲面拼接实现全息三维显示视角拓展[J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 227-233.
- ZENG Z X, ZHENG H D, LU X Q, *et al.* Viewing angle enlargement in holographic 3D display by spatial light modulators tiling in curved configuration [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2): 227-233. (in Chinese)
- [28] 沈川, 刘凯峰, 张成, 等. 可编程菲涅耳相位透镜应用于多平面全息投影[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 0509002.
- SHEN C, LIU K F, ZHANG C, *et al.* Multi-plane holographic projection using programmable Fresnel phase lenses [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0509002. (in Chinese)
- [29] ZHANG J W, DAI S Q, ZHONG J Z, *et al.* Wavelength-multiplexing surface plasmon holographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13549-13560.
- [30] WANG D, LIU C, SHEN C, *et al.* Holographic capture and projection system of real object based on tunable zoom lens [J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 6.
- [31] WANG D, XIAO D, LI N N, *et al.* Holographic display system based on effective area expansion of SLM [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 7001312.
- [32] 侯文义, 储繁, 田莉兰, 等. 一种采用介电突起消除边缘场效应的LCoS[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(1): 12-18.
- HOU W Y, CHU F, TIAN L L, *et al.* Eliminating fringe field effect using dielectric protrusions in LCoS [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(1): 12-18. (in Chinese)
- [33] LIU Y Z, PANG X N, JIANG S J, *et al.* Viewing-angle enlargement in holographic augmented reality using time division and spatial tiling [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12068-12076.
- [34] MISHINA T, OKUI M, OKANO F. Viewing-zone enlargement method for sampled hologram that uses high-order diffraction [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(8): 1489-1499.
- [35] TAKAKI Y, HAYASHI Y. Increased horizontal viewing zone angle of a hologram by resolution redistribution of a spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D6-D11.
- [36] TAKAKI Y, OKADA N. Hologram generation by horizontal scanning of a high-speed spatial light modulator [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(17): 3255-3260.
- [37] CHEN Z D, SANG X Z, LIN Q J, *et al.* A see-through holographic head-mounted display with the large viewing angle [J]. *Optics Communications*, 2017, 384: 125-129.
- [38] SANDO Y, SATOH K, BARADA D, *et al.* Holographic AR display based on the cylindrical holographic optical element for wide viewing zone [C]//Proceedings of SPIE 11310, Optical Architectures for Displays and Sensing in Augmented, Virtual, and Mixed Reality (AR, VR, MR). San Francisco, California, USA: SPIE, 2020: 113101E.
- [39] DUAN X H, LIU J, SHI X L, *et al.* Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [40] FUKAYA N, MAENO K, NISHIKAWA O, *et al.* Expansion of the image size and viewing zone in holographic display using liquid crystal devices [C]//Proceedings of SPIE 2406, Practical Holography IX. San Jose, CA, United States: SPIE, 1995: 283-289.
- [41] SENOH T, WAKUNAMI K, ICHIHASHI Y, *et al.* Viewing-zone-angle expansion of tiled color electronic holography reconstruction system [C]//Proceedings of SPIE 9006, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications. San Francisco, California, USA: SPIE, 2014: 90060Z.
- [42] SASAKI H, YAMAMOTO K, ICHIHASHI Y, *et al.* Image size scalable full-parallax coloured three-dimensional video by electronic holography [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4000.
- [43] YARAŞ F, KANG H, ONURAL L. Multi-SLM holographic display system with planar configuration [C]Proceedings of 2010 3DTV-Conference: the True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video. Tampere, Fin-

- land: IEEE, 2010: 1-4.
- [44] YARAŞ F, KANG H, ONURAL L. Circular holographic video display system [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9147-9156.
- [45] KOZACKI T, KUJAWINSKA M, FINKE G, *et al.* Extended viewing angle holographic display system with tilted SLMs in a circular configuration [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1771-1780.
- [46] KOZACKI T, FINKE G, GARBAT P, *et al.* Wide angle holographic display system with spatiotemporal multiplexing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27473-27481.
- [47] ZENG Z X, ZHENG H D, YU Y J, *et al.* Full-color holographic display with increased-viewing-angle [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(13): F112-F120.
- [48] LIN N, WANG D, LI Y L, *et al.* Method of curved composite hologram generation with suppressed speckle noise [J]. *Optics Express*, 2020, 28(23): 34378-34389.