

文章编号:1007-2780(2022)05-0647-07

基于时序-偏光特性条状近眼孔径的 超多视图三维显示

范海震¹, 叶 秋², 黄海坤², 刘立林², 滕东东^{3*}

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510275;

3. 中山大学 物理学院, 广东 广州 510275)

摘要:通过沿排列方向间距小于观察者瞳孔直径的 4 个近眼条状液晶光阀, 时序投射各两个视图分别至观察者不同瞳孔, 可以基于超多视图实现无聚焦-辐辏冲突的三维显示。但是, 一方面, 显示频率仅 30 Hz, 带来闪烁效应; 另一方面, 条状孔径沿排列方向的小尺寸, 严重限制通过该孔径所能观察到场景的视角。本文设计了同时具有时序和偏光特性的近眼条状液晶光阀, 并排列各眼对应条状液晶光阀沿观察者双目连线的垂直方向, 利用相邻多个液晶光阀所观察到拼图图像相对于仅通过一个液晶光阀所观察场景的视角扩展, 基于时序复用和偏光复用的结合进行显示视角的扩展。实验中, 将该时序-偏光特性液晶光阀构建为双目眼镜, 利用偏振分束器将两台 240 Hz 电脑显示屏构建形成一个等效正交偏振特性显示屏, 两者对应同步刷新显示, 实现了对角线视角达 70° 的超多视图三维显示, 离焦模糊效应验证了显示场景的自然聚焦能力。

关键词:3D; 聚焦-辐辏冲突; 超多视图

中图分类号: TN27; TN141 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/CJLCD. 2022-0045

Super multi-view three-dimensional display based on near-eye timing-polarization-characteristics apertures

FAN Hai-zhen¹, YE Qiu², HUANG Hai-kun², LIU Li-lin², TENG Dong-dong^{3*}

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

3. School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Through sequentially presenting four perspective views to two eyes of the viewer respectively, Super multi-view three-dimensional (3D) display which is free from vergence-accommodation conflict (VAC) gets demonstrated in our previous work by four near-eye liquid crystal light valves. However, on one hand, the display frequency is only 30 Hz, which brings in obvious flicker. On the other hand, the small aperture size restricted the observed field of view. In this paper, combining with polarization-multi-

收稿日期: 2022-01-30; **修订日期:** 2022-02-22.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 11772359); 广东省重点领域研发计划(No. 2019B010154002)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11772359); Guangdong Province Key R&D projects (No. 2019B010154002)

*通信联系人, E-mail: tengdd@mail.sysu.edu.cn

plexing, a spliced image constructed by partial perspective views for different near-eye liquid crystal light valves is generated for a large field of view (FOV). Experimentally, based on an equivalent polarization-characteristic display screen which is constructed by two 240 Hz computer display screens through a polarization beam splitter, flicker-free 60 Hz super multi-view display with a diagonal field of view 70° gets demonstrated.

Key words: 3D; vergence-accommodation conflict; super multi-view

1 引言

现有三维(3D)显示系统主要是基于传统的体视技术,通过向观察者各眼分别投射待显示场景的各个对应视图,利用观察者双眼视向于出屏场景出的交叉会聚,触发观察者的三维感知。在该过程中,为了清楚地观察各自对应视图,观察者各眼需要聚焦于出射锥状发散光束的显示面上。由此,会产生观察者双目会聚距离和单目聚焦距离之间的不同,即聚焦-辐辏冲突(VAC)。在VAC的作用下,观察者眼睛的焦点在双目会聚的出屏场景和单目聚焦的显示面之间反复切换,无所适从,从而导致睫状肌过劳而引发观察者的视觉疲劳^[1-5]。

为了解决聚焦-辐辏冲突这一问题,研究人员提出了各种显示技术,其中主要包括基于衍射光学的全息显示、基于几何光学的Maxwellian View和取样技术。其中,通过衍射进行3D场景呈现的全息显示被认为是理想的三维显示技术,其生成的各显示光点像真实物点一样,各自出射锥状光束。但受制于现有显示器件的空间带宽积,全息显示所能实现的视角、场景尺寸、分辨率等还远不能同时达到推广应用的要求^[6]。过各显示物点,Maxwellian View向观察者各眼分别投射一束以几何光线为理想状态的光束,各光束沿深度方向小的光强梯度降低了出射该光束的像素对观察者眼睛焦点的吸引力,从而在双目会聚的耦合驱动下,牵引各眼聚焦至双眼会聚点^[7]。但同时,对应任一显示光点,各眼仅对应一束小发散角光束的显示原理也导致离焦模糊效应的丢失。取样技术分为两种,一种是以体素为取样单元的空间取样技术,另一种是以几何光线为理想取样单元的角取样技术。前者通过空间重现大量出射锥状光束的真实物点作为体素,来重建空间三维光点分布,常称之为体三维技术^[8]。为了

缓解体三维对空间体素数量的过高要求,多投影面技术通过仅于深度方向上离散分布的若干面上体素的重建,将聚焦-辐辏冲突限制于无明显视觉疲劳的深度范围内^[9]。角取样技术路径中,过各显示物点,多于一条的小角间距的取样光束经观察者同一瞳孔的不同区域入射;它们于显示物点处的叠加光分布对观察者眼睛焦点牵引力足够时,牵引观察者各眼焦点一致于双目会聚点,从而克服聚焦-辐辏冲突。虽然获取取样光束的光学方法不同,集成成像^[10-11]、压缩光场^[12]、超多视图^[13]都是基于角取样实现各目焦点对双目会聚深度的跟随一致。

通过在观察者的每只眼睛前分别放置两个条状液晶光阀,我们证明了可自然聚焦的超多视图3D显示^[14]。其4个液晶光阀依次打开,显示屏同步刷新显示待显示场景关于打开液晶光阀的视图,并通过各眼睛接收到的两个视图进行显示。但仅基于时序复用向观察者进行视图投射,在观察者双眼所需最少4幅视图情况下,120 Hz显示屏仅能提供的30 Hz显示频率导致明显的闪烁效应;且仅两个孔径也极大限制了观察者各眼所对应观察视角。本文在前述工作^[14]基础上,结合偏振复用和时序复用,通过各投射视图分辨率减半设计,基于240 Hz显示器实现了更大视角的无闪烁超多视图(SMV)显示。

2 技术原理

2.1 基于时分复用的SMV显示

图1为参考文献[14]所实现SMV显示系统的光学结构。沿水平 x 方向,点E和F为显示屏的边点。两个长向沿 y 向的条状液晶光阀沿 x 向排列为一个目镜,对应观察者双眼的两个目镜构建为一副SMV眼镜。具体来说,液晶光阀L1和L2成组,对应左眼置放;液晶光阀R1和R2成组,

对应右眼置放。设计该两个液晶光阀组以观察者双目距离为间距排列。所有这四个液晶光阀以时间间隔 $\Delta t/4$ 依次开启。同组液晶光阀沿 x 向间距 $\Delta\delta \leq D_p$, 其中 D_p 为观察者瞳孔直径。设置各液晶光阀沿 x 向的通光孔径尺寸也为 $\Delta\delta$ 。各液晶光阀沿 x 向的中心分别以 C_{L1} 、 C_{L2} 、 C_{R1} 、 C_{R2} 表示,如图1所示。显示屏的大小为 $d_x \times d_y$, 液晶光阀与电脑屏之间的距离为 D 。连接点E和F与每个液晶光阀水平边缘点的连线相交于液晶光阀右侧的某一点,形成4个分别对应不同液晶光阀的视点 VP_{L1} 、 VP_{L2} 、 VP_{R1} 和 VP_{R2} 。对应同一眼睛的相邻两个视点距离用 ΔP 表示, L 是视点到液晶光阀的距离,也是设定的观察者眼睛距离液晶光阀的距离。根据图1所示几何关系有

$$\frac{D}{D+L} = \frac{\Delta\delta}{\Delta P} \Rightarrow \Delta P = \frac{(D+L)}{D} \Delta\delta, \quad (1)$$

$$\beta = 2\arctan\left(\frac{\Delta\delta}{2L}\right). \quad (2)$$

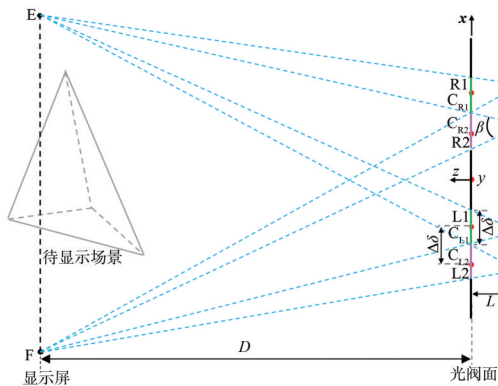


图1 基于时分复用的SMV显示系统光学示意图

Fig. 1 Schematic optical diagram of the SMV display system based on time-multiplexing.

在一个时间点,一个液晶光阀开启,同时其他液晶光阀关闭;在各时间周期内,所有液晶光阀被依次打开,显示屏同步刷新显示待显示场景关于打开液晶光阀所对应视点的视图。以时间周期 $t \sim t + \Delta t$ 和待显示场景点P为例,如图2所示。图2所示时间点 t , 仅液晶光阀R1开启,显示屏同步显示点P关于视点 VP_{R1} 的视图,即图1所示 P_{R1} 点。也就是说,来自显示屏 P_{R1} 点并过待显示场景P点的光束被打开的液晶光阀R1引导至视点 VP_{R1} 。同理,在该时间周期的其他3个时间点,过点P的其他3条光束被各自对应液晶光阀依次引导至其他3个对应视点。在各时间周期内,循环

重复此过程。当各液晶光阀组对应的视点分别为对应观察者瞳孔覆盖时,基于视觉滞留效应,过待显示点P的两条不同方向入射光束重叠为观察者眼睛可以自然聚焦的显示光点。对于由点组成的3D场景,上述过程适用于所有点。则各时间点,显示屏同步显示待显示场景关于打开液晶光阀所对应视点的视图,即可基于视觉滞留实现克服聚焦-辐辏冲突的超多视图显示。

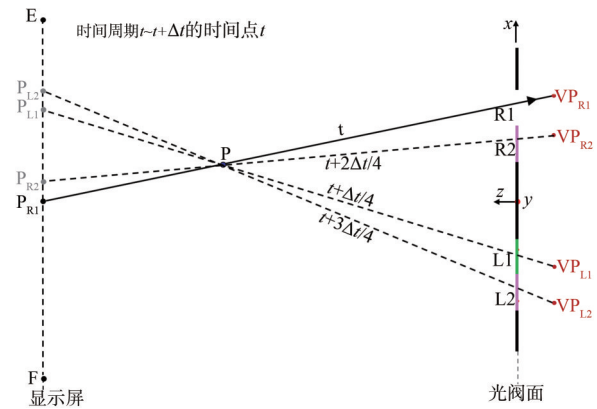


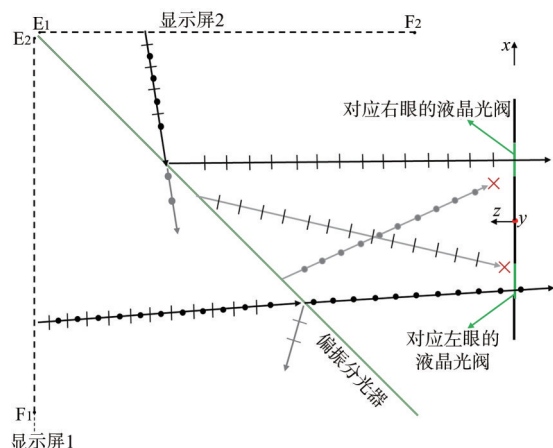
图2 SMV实现原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of SMV

2.2 引入偏光特性的SMV显示系统

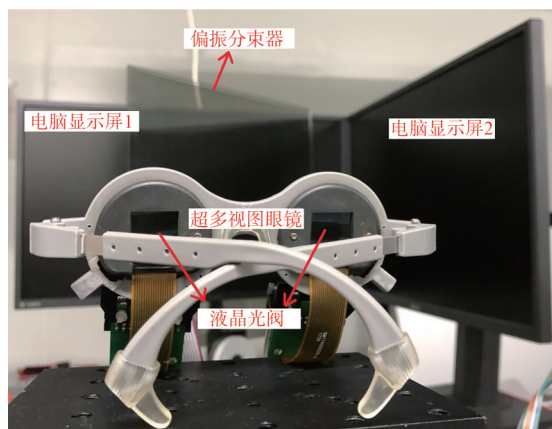
图1所示显示系统仅基于时序复用向观察者两只眼睛投射视图,对显示屏刷新频率的要求较高。参考文献[14]采用120 Hz显示屏所实现的30 Hz场景,存在明显的闪烁效应。本文通过引入偏振复用,实现无闪烁的60 Hz显示;且考虑观察者视角沿水平方向和垂直方向的固有差异,即观察者沿双眼连线方向的视角大于沿其垂直方向视角的特性,设计观察者各眼对应液晶光阀的排列方向沿观察者双目连线的垂向,将受小尺寸条状液晶光阀约束的视角置于人眼视角较小的垂向,以便实现更大的对角线视角。

如图3所示,采用具有偏振特性的显示屏,该偏振特性显示屏的相邻像素列(或相邻像素行)分别出射偏振方向相互垂直的偏振光,分别用“·”和“-”表示。对应左眼的液晶光阀,如图3中沿 y 向排列的光阀L1和L2在打开状态下仅允许“·”光通过;对应右眼的液晶光阀,如图3中沿 y 向排列的光阀R1和R2在打开状态下仅允许“-”光通过。此处 y 向为观察者双眼连线方向的垂向。设置各液晶光阀沿 y 向的通光孔径尺寸一致于 y 向液晶光阀间距 $\Delta\delta$, 沿 x 向对应不同眼睛的



(a) 实验光路结构

(a) Optical structure of the experimental display system



(b) 实验光学显示系统

(b) Experimental display system

图5 实验光路结构及显示系统示意图

Fig. 5 Optical diagram and experimental setup of the display system

性显示屏,经偏振分束器向液晶光阀投射光信息。对应观察者左眼的 $M=4$ 个液晶光阀L1、L2、L3、L4沿 y 向排列,被设计为在打开状态时仅允许来自电脑显示屏1的透射“·”光通过;对应观察者右眼的 $M=4$ 个液晶光阀R1、R2、R3、R4沿 y 向排列,被设计为在打开状态时仅允许来自电脑显示屏2的反射“-”光通过。各电脑显示屏的物理帧频为240 Hz,对应 $M=4$ 液晶光阀的时序复用,可以实现 $M=4$ 个视图的60 Hz无闪烁投射。每个电脑显示屏的显示区域为 $d_x \times d_y = 595 \text{ mm} \times 335 \text{ mm}$ (27 in),受定制偏振分束器的尺寸限制,每个显示屏仅 $400 \text{ mm} \times 335 \text{ mm}$ 作为显示视图的有效区域。偏振分束器的设计,令电

脑显示屏1的透射“·”光和电脑显示屏2的反射“-”光在相同显示内容的情况下具有相同光强。对应左右眼的液晶光阀具有240 Hz的开关频率,分别作为左右眼睛的对应目镜,并构建成一个眼镜装置,如图5(b)所示。两个目镜的各一个液晶光阀在一个时间点同步开关,8个液晶光阀以 $4 \times 1/240 = 1/60 \text{ s}$ 的时间间隔循环选通。FPGA控制结构用于控制液晶光阀的时序开关及对应视图的同步加载。各电脑显示屏在任一时间点加载的信息,是待显示场景关于此时间点所选通液晶光阀在该显示器上的对应视图。

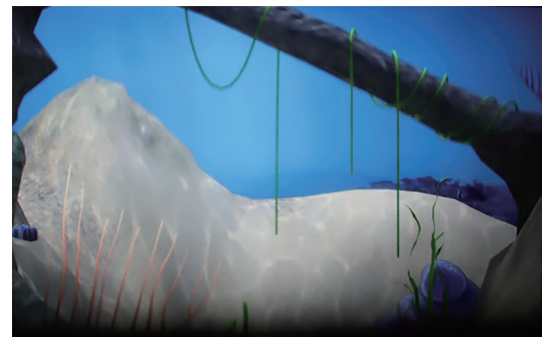
实验中,取 $L=10 \text{ mm}$, $\Delta\delta=2.7 \text{ mm}$,根据式(3),沿 y 向的观察视角 $\beta'=46.2^\circ$ 。采用常规的显示屏长宽比4:3,沿对角线的视角约为 70° 。对所采用的显示屏,在 y 向视角下,距离显示屏 $D=383 \text{ mm}$ 处的眼睛即可接收到显示屏显示全部信息。实际情形下,观察者眼睛和显示屏的距离 $D+L$ 一般都在500 mm以上。实验进一步取 $D+L=500 \text{ mm}$,根据式(1), $\Delta P=2.75 \text{ mm}$ 。对于瞳孔直径平均值为5 mm的眼睛,每只眼睛可以接收到对应的两个拼合图像。

将相机放置于 L 处,以模拟观看者的右眼来拍摄显示的内容,相机透镜孔径等效地设为5 mm。在实验中,取于该等效正交偏振特性显示屏上投影尺寸为 $595 \text{ mm} \times 335 \text{ mm}$ 的场景进行显示,如图6(a)所示海底场景。图6(a)是在系统工作过程中,遮挡液晶光阀R4,通过液晶光阀R1、R2、R3拍摄待显示场景的一幅满屏拼合图像。当液晶光阀

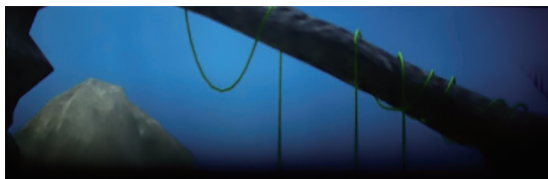


(a) 通过液晶光阀R1、R2、R3拍摄

(a) Captured when light valves R1, R2 and R3 are turned on



(b) 通过液晶光阀 R1、R2 拍摄
(b) Captured when light valves R1 and R2 are turned on

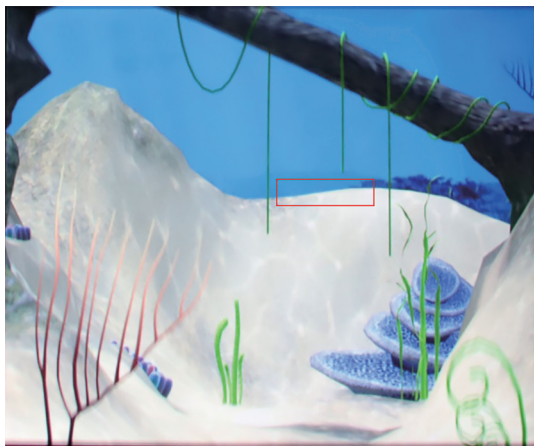


(c) 通过液晶光阀 R1 拍摄
(c) Captured when only light valves R1 are turned on

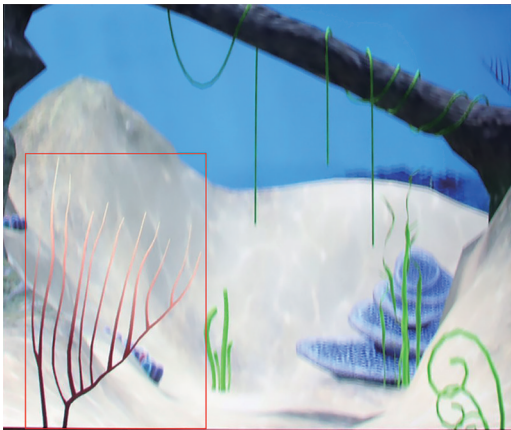
图 6 开启不同数量液晶光阀所拍摄到图像
Fig. 6 Captured photos by camera when different numbers of light valves play function

R3 和 R4 同时被遮挡时,拍摄的部分拼合图像如图 6(b)所示。图 6(c)为仅液晶光阀 R1 未被遮挡时所拍摄。明显地,沿 y 向,通过 $M-1=3$ 个液晶光阀所获取拼合图像,相对于仅通过一个液晶光阀所拍摄场景,视角得到有效扩展。

基于 SMV 技术显示的场景,应具有明显的离焦模糊效果。实验中,调整相机焦距,使之对焦于不同景深,如图 7 所示。其中,海底物体到显示屏



(a) 聚焦于 +1 000 mm 处拍摄
(a) Focusing at +1 000 mm



(b) 聚焦于 +500 mm 处拍摄
(b) Focusing at +500 mm



(c) 聚焦于 +350 mm 处拍摄
(c) Focusing at +350 mm

图 7 调焦至不同景深所拍摄图像
Fig. 7 Captured photos with camera focusing on different depths

的距离分别被设置为:远处山脊在 +1 000 mm 处,红色珊瑚在 +500 mm 处(即等效偏光特性显示屏上),以及绿色海草在 +350 mm 图 7(a)~(c)分别显示了相机聚焦不同深度时拍摄的照片,红色方框中即为当前聚焦物体。明显地,相机聚焦位置处的场景清晰显示,离焦场景出现模糊。

5 结 论

本文基于构建的具有偏光特性的等效显示屏和定制的具有对应时序-偏光特性的液晶光阀,通过液晶光阀的时序开关和显示屏对应视图信息的同步刷新显示,利用 8 个液晶光阀、于各时间周期的 4 个时间点,向观察者各眼分别进行 4 个

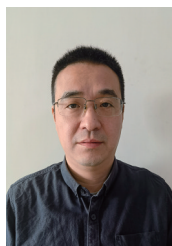
不同视图的投射,实现对角线视角约为 70° 的无闪烁SMV显示。虽然相邻行或列分别出射相互正交偏振态光的显示屏目前市场上没有,但其曾于消费市场上流行一时,技术工艺的实现性毋庸

置疑^[15]。所以,如果电脑显示屏被设计生产为具有正交偏振特性的形态,本文所提出并验证的显示技术可以广泛应用于电脑显示屏,以实现无聚焦-辐辏冲突的舒适三维显示界面。

参 考 文 献:

- [1] HOFFMAN D M, GIRSHICK A R, AKELEY K, *et al.* Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue [J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(3): 33.
- [2] EMOTO M, NIIDA T, OKANO F. Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 328-340.
- [3] YANO S, EMOTO M, MITSUHASHI T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images [J]. *Displays*, 2004, 25(4): 141-150.
- [4] KOOIF L, TOET A. Visual comfort of binocular and 3D displays [J]. *Displays*, 2004, 25(2/3): 99-108.
- [5] LAMBOOIJ M, FORTUIN M, HEYNDERICKX I, *et al.* Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3): 30201.
- [6] BLANCHE P A. Holography, and the future of 3D display [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(4): 1-14.
- [7] YUUKI A, ITOGA K, SATAKE T. A new Maxwellian view display for trouble-free accommodation [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 20(10): 581-588.
- [8] FAVALORA G E. Volumetric 3D displays and application infrastructure [J]. *Computer*, 2005, 38(8): 37-44.
- [9] HU X D, HUA H. Design and assessment of a depth-fused multi-focal-plane display prototype [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(4): 308-316.
- [10] 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.
- [11] 王琼华, 邓欢. 集成成像3D拍摄与显示方法[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(2): 153-158.
WANG Q H, DENG H. 3D pickup and display method of integral imaging [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(2): 153-158. (in Chinese)
- [12] WETZSTEIN G, LANMAN D, HIRSCH M, *et al.* Compressive light field displays [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2012, 32(5): 6-11.
- [13] TAKAKI Y, NAGO N. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display [J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 8824-8835.
- [14] SUN D E, WANG C X, TENG D D, *et al.* Three-dimensional display on computer screen free from accommodation-convergence conflict [J]. *Optics Communications*, 2017, 390: 36-40.
- [15] XIONG J H, WU S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications [J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.

作者简介:



范海震(1977—),男,河南项城人,硕士,研究员,1999年于华中科技大学获得硕士学位,主要从事光电导航、图像识别、三维光场显示等方面的研究。
E-mail: 389509156@qq.com



滕东东(1977—),男,河南项城人,博士,副教授,2007年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光场三维显示方面的研究。
E-mail: tengdd@mail.sysu.edu.cn