

视角扩展的头戴式超多视图三维显示

叶秋¹, 刘立林¹, 赖诚亮¹, 黄海坤¹, 谢炎斌¹, 滕东东^{2*}

¹中山大学电子与信息工程学院光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275;

²中山大学物理学院, 广东 广州 510275

摘要 近眼小孔因对入射瞳孔光束光斑尺寸的有效约束而被用于基于时序复用的超多视图显示, 可以实现较大的景深, 但小的尺寸也导致一个近眼小孔所能实现视角的严重受限。设计多组近眼小孔时序选通, 通过同组不同近眼小孔各自对应显示区域的拼连, 可以有效解决各时间点仅通过一个近眼小孔观察时所面临的视角受限问题; 但各近眼小孔对应显示区域出射光通过非对应小孔出射, 又引入串扰噪声这一新问题。针对头戴式显示, 设计同组相邻近眼小孔具有相异正交特性的多组近眼小孔, 利用各显示区域所出射正交特性光被其对应小孔的相邻小孔屏蔽的特性, 解决同组相邻小孔间的串扰问题。搭建验证性头戴式超多视图显示系统, 在由 M 个一维条状小孔构建的一个近眼小孔组中, 设计相邻 2 个近眼小孔, 分别仅允许偏振方向相互垂直的光通过; 基于视觉滞留效应, 利用 T 个近眼小孔组的时序选通, 实现单眼 T 个视点的超多视图显示。相对于一个时间点仅一个近眼小孔选通的情况, 近眼小孔组使视角得到 M 倍的扩展。受制于所使用的常规投影透镜, 仅取 $M=3$ 进行验证时, 视角扩展为 19.7° 。

关键词 三维显示; 超多视图; 视角扩展; 条状小孔

中图分类号 TN27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011015

Head-Mounted Super Multi-View Three-Dimensional Display with Enlarged Field of View

Ye Qiu¹, Liu Lilin¹, Lai Chengliang¹, Huang Haikun¹, Xie Yanbin¹, Teng Dongdong^{2*}

¹State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, School of Electronics and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

²School of Physics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China

Abstract The near-eye aperture is used to realize the super multi-view display based on time multiplexing because it effectively limits the divergence angle of the light beam emitted from a display screen. Therefore, a large depth of field can be achieved. However, its small size also exerts a serious limitation on the field of view that can be obtained using only one near-eye aperture. This limitation can be successfully overcome by designing timing sequentially gated multiple groups of near-eye apertures and splicing up the display regions corresponding to different apertures in the same group. However, the light emanating from each display region may pass through non-corresponding apertures, thus creating a new problem of crosstalk noise. To address these problems, mutually orthogonal characteristics are endowed to the adjacent near-eye apertures in this work, which makes the light emitted from each display region with an orthogonal characteristic be blocked by the adjacent apertures of its corresponding aperture and forms a certain range of noise-free region in the observing plane. This foundation allows for the realization of a super multi-view display with a large field of view based on near-eye apertures. In this study, a proof-of-concept head-mounted super multi-view display system is constructed and M one-dimensional strip-type apertures are composed as a group, in which two adjacent apertures, respectively, only allow light with mutually perpendicular polarizations to pass through. Based on the persistence of the vision, T groups of timing sequentially gated near-eye apertures are used to realize the super multi-view display with T viewpoints for each eye and M times larger field of view compared with the case where only one aperture opens at each time point. This work only takes $M=3$ for verification and gets an expanded field of view of 19.7° due to the limitations by optical performances of the used convention projection lenses.

Key words three-dimensional display; super multi-view; enlarged field of view; strip-type aperture

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-12; 录用日期: 2022-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(11772359)、广东省重点领域研发计划(2019B010154002)、国家重点研发计划(2021YFB2802300)

通信作者: *tengdd@mail.sysu.edu.cn

1 引言

传统体视技术利用基于单眼单视图的技术路径进行三维信息呈现,其固有的聚焦-辐辏冲突(VAC)问题是制约增强现实(AR)和虚拟现实(VR)进一步推广的主要障碍之一。具体地,体视技术向观察者左右眼分别投影各自对应视差图像,通过观察者双眼会聚于不同深度场景,触发观察者大脑的深度感知。同时,为了看清各自对应视图,观察者各目需要聚焦于固定深度的显示屏上,由此导致双眼会聚深度和单目聚焦深度的不一致,即VAC问题。而人体自然进化的结果,要求观察者双目会聚深度和单目聚焦深度保持一致,VAC长时间作用将引发观察者的眼部疲劳^[1-3]。针对VAC问题,目前主要的应对路径有3类,包括基于衍射光学的全息技术^[4-7]、基于几何光学的Maxwellian view^[8-9]、基于取样的光场显示技术^[10-12]。

其中,基于角取样的多光束叠加是目前主流的光场显示技术,主要原理是:在对应真实物点所出射/散射的连续角分布锥状光束中,以小角度采样获得取样光束,并沿各自对应方向复现;过任一显示物点,沿不同方向投射至少两束取样光束入射观察者的同一瞳孔;在双眼会聚对单眼聚焦的耦合驱动下^[13],该至少两束取样光束于该显示物点处叠加分布,牵引观察者眼睛聚焦于该显示物点,从而实现单眼聚焦深度与双目会聚深度的跟随一致,克服VAC问题。目前光场显示领域热点,包括集成成像、压缩光场和超多视图,均基于该原理实现。其中,超多视图显示技术通过向观察者双眼分别投射视点间距小于人眼瞳孔直径的至少两幅视图,即对应密集视点的至少两幅视图进行显示。日本东京农业大学的Takaki课题组^[14-15]做了大量关于超多视图显示的建设性工作,主要关注的裸眼超多视图显示系统中,构建的密集视点往往需要覆盖包含观察者双目的连续区域,导致对显示系统空间带宽积有过高要求,造成系统光学结构的复杂臃肿。2018年,Ueno等^[16]利用时序背光,在头戴式显示结构中通过仅向目标瞳孔范围内投射视点,极大地降低了光学系统的空间带宽积要求。瑞士的Creal公司基于类似的时序背光源方法^[17],更早地搭建起头戴式显示样机。但背光源及其出射光的准直,导致该类显示系统中光学结构厚度过大。相对于上述以点光源的像点(虚孔)作为视点的方法,Aksit等^[18]在观察者各瞳孔前分别设置仅允许红光和蓝绿光通过的两个实物小孔,并将其作为视点,实现了基于不同波长取样光束叠加的超多视图显示,但各眼仅通过一个小孔来观看所显示场景的硬件结构,导致视角极为受限。

设计近眼放置的、时序选通的实物条状小孔阵列,本课题组^[19]利用不同小孔时序投射的视图,实现了视点沿一维方向分布的超多视图显示。其条状小孔的设计,在一定程度上可以避免二维分布视点对显

示系统时序复用度的过高要求;但由于观看时,瞳孔与实物条状小孔间有一定距离(eye-relief distance)以容纳眼睛附着物,如睫毛和眼睑,需要尽量多条状小孔的时序复用,才能实现合理视角的无闪烁显示,目前显示器件尚不能满足该要求。为了在现有条件下解决基于近眼小孔的头戴式超多视图显示的视角受限问题,本文于各时间点同时选通一组小孔,组内各小孔分别对应显示器件上不同的显示区域,利用同组不同小孔各自观察到对应显示区域的拼合,实现各时间点观察到图像视角的展宽;同时,通过赋予相邻近眼小孔及其对应显示区域不同的偏光特性,解决各显示区域投射光通过对应孔的相邻非对应小孔所导致的串扰噪声问题。

2 基本原理

2.1 偏振正交特性小孔组的视角扩展设计

视角(FoV)是评估三维显示系统优劣的重要性能指标之一,特别是在头戴式近眼显示当中,只有足够大的FoV才能给予观察者好的沉浸感体验。针对人眼以一定距离(eye-relief distance)通过条状小孔观察时的FoV受限问题,通过将相互正交的偏振特性赋予同组小孔中各相邻小孔及其对应显示区域的出射光,并结合多个小孔组的时序选通,实现无串扰噪声的、FoV扩展的头戴式超多视图显示。如图2(a)所示,人眼通过单个条状小孔能看到的视角范围有限,比如通过小孔组中的条状小孔 A_1 只能看到显示屏上的区域 F_1 ,通过小孔 A_2 看到显示屏上的区域 F_2 ,小孔 A_3 则对应区域 F_3 。图中 x 表示条状小孔组的排布方向,同时也是视差方向, y 沿条状小孔的长向即条形方向。显然,当人眼同时通过该组 $M=3$ 个小孔观看时,实现的总FoV沿 x 方向扩展为通过任意一个小孔观看时所获得的FoV约 $M=3$ 倍。然而,相邻很近的两个小孔所接收到的显示屏区域会发生交叠,如图2(a)中的区域 C_1 ,即为经小孔 A_1 于显示屏上观察到的对应区域 F_1 和经小孔 A_2 于显示屏上观察到的对应区域 F_2 的交叠区域,从该交叠区域出射的光同时通过小孔 A_1 和 A_2 进入瞳孔。若区域 C_1 所显示内容为关于小孔 A_1 的投影信息,出射光将作为串扰噪声通过小孔 A_2 ,反之亦然。同理,区域 C_2 的存在也导致同样的情况。所以,通过多小孔观察虽然可以克服单个小孔所面临FoV过小的问题,但又引入串扰噪声这一新问题。针对VAC问题,主要的3类应对路径如图1所示。

为了克服同时通过同组多个近眼小孔观察所导致的串扰噪声问题,设计如图2(b)所示的偏振正交特性小孔组。 x 方向的箭头表示沿水平 x 方向偏振特性; y 方向的箭头表示沿竖直 y 方向偏振特性,二者相互正交。 $M=3$ 个沿 x 方向排布的条状小孔 A_1 、 A_2 和 A_3 成组,分别被赋予 y 方向偏振特性偏振、 x 方向偏振特性偏振和 y 方向偏振特性偏振,即它们分别仅允许 y 方向

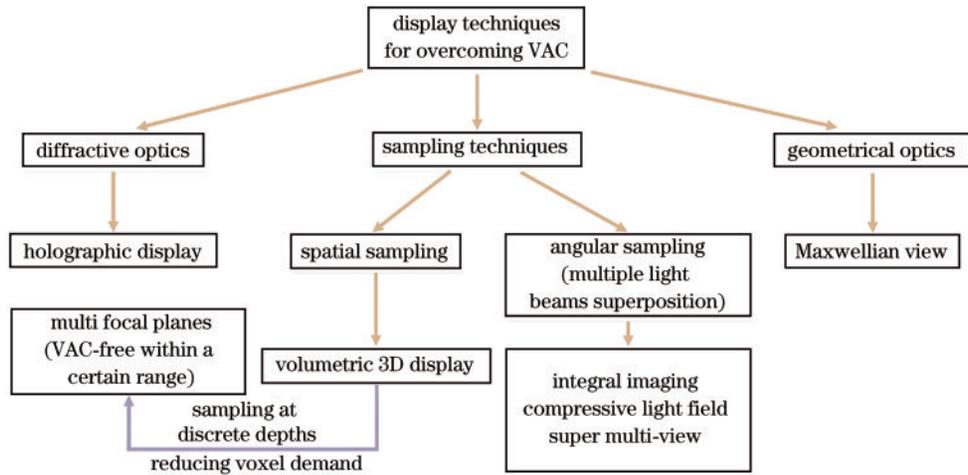


图 1 有效克服 VAC 问题的技术路径分类

Fig. 1 Classification of technical paths for effectively overcoming VAC problems

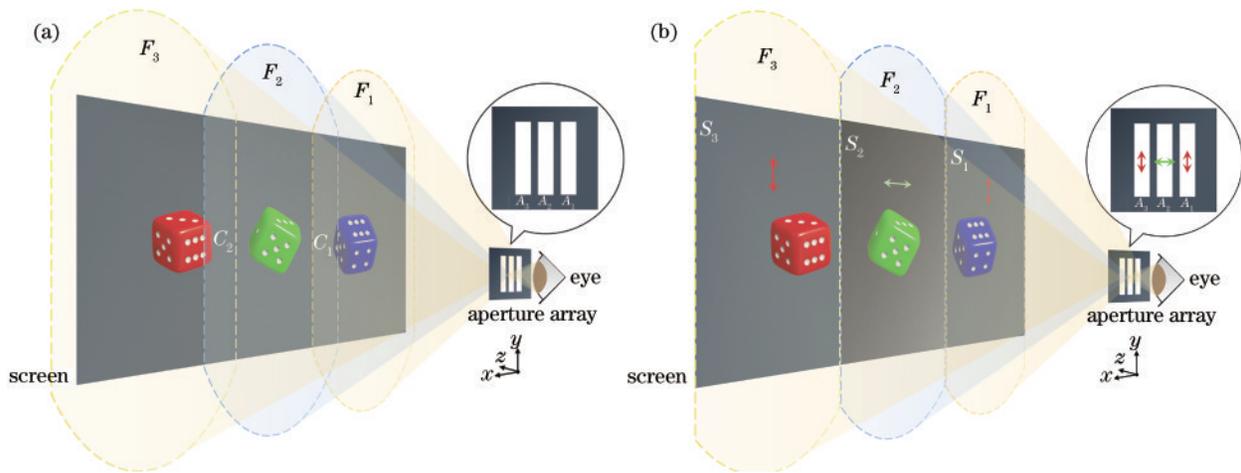


图 2 多个近眼小孔的 FoV 扩展: (a) 无偏光特性小孔; (b) 偏光特性小孔

Fig. 2 FoV expansion of multiple near-eye apertures. (a) Apertures without polarizing characteristics; (b) apertures with polarizing characteristics

偏振光、 x 方向偏振光和 y 方向偏振光通过, 同时分别阻挡 x 方向偏振光、 y 方向偏振光和 x 方向偏振光通过。依次对应条状小孔 A_1 、 A_2 和 A_3 , 显示屏上沿 x 方向等距划分为区域 S_1 、 S_2 和 S_3 , 称为子屏, 分别出射 y 方向偏振光、 x 方向偏振光和 y 方向偏振光。具体地, 子屏 S_1 出射的 y 偏振光通过具有相同偏振特性的对应小孔 A_1 出射, 但被小孔 A_2 阻挡; 子屏 S_2 出射的 x 偏振光通过具有相同偏振特性的对应小孔 A_2 出射, 但被小孔 A_1 和 A_3 阻挡; 子屏 S_3 出射的 y 偏振光通过具有相同偏振特性的对应小孔 A_3 出射, 但被小孔 A_2 阻挡。设计显示屏各子屏通过同一小孔组中各自对应小孔, 向该小孔组对应视区投射光信息, 在观察者瞳孔覆盖该视区时, 则可以接收到整个显示屏显示的光信息, 获得一幅视角扩展约 $M=3$ 倍的图像。其中各子屏以对应小孔上的一个点 (往往取该条状小孔的中心点) 为视点, 加载待显示场景的视图。观察者瞳孔于对应视区接收到该幅视角扩展图像, 即为 M 个子屏分别关于该视区对应小孔组中 M 个小孔的视图的拼连图像。

2.2 头戴式多视区显示系统

通过同组多个小孔, 可以向对应视区投射一幅视角扩展的图像。置投影透镜于显示屏和该小孔组之间, 三者可以作为目镜向对应观察者瞳孔投射一幅视角扩展的放大图像。其中显示屏的虚像, 作为等效显示屏进行显示。对应观察者双目分别置放一个该目镜, 搭建头戴式显示系统。为了实现无聚焦-会聚冲突的超多视图显示, 在各目镜中设计多于一个小孔组。

如图 3 所示, 以右眼对应目镜为例, 将沿 x 方向排列的 $T=3$ 组条状小孔组成小孔阵列, 该 $T=3$ 个条状小孔组在各时间周期的 $T=3$ 个时间点依次选通, 且一个时间点仅一个小孔组被选通。其中, 每组包含 $M=3$ 个沿 x 方向排列的条状小孔, 具体地, 小孔 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 成组, 小孔 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 成组, 小孔 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{33} 成组。组内相邻小孔的间距为 δd , 相邻小孔组依次错位 $\delta d/T$ 地交错排布。各小孔沿 y 向的尺寸大于观察者瞳孔直径, 沿 x 向的尺寸为 $\alpha \delta d$, 其中开口率 α 满足条件 $0 < \alpha \leq 1/T$ 。投影透镜与小孔阵列相距 D , 显示屏与投影

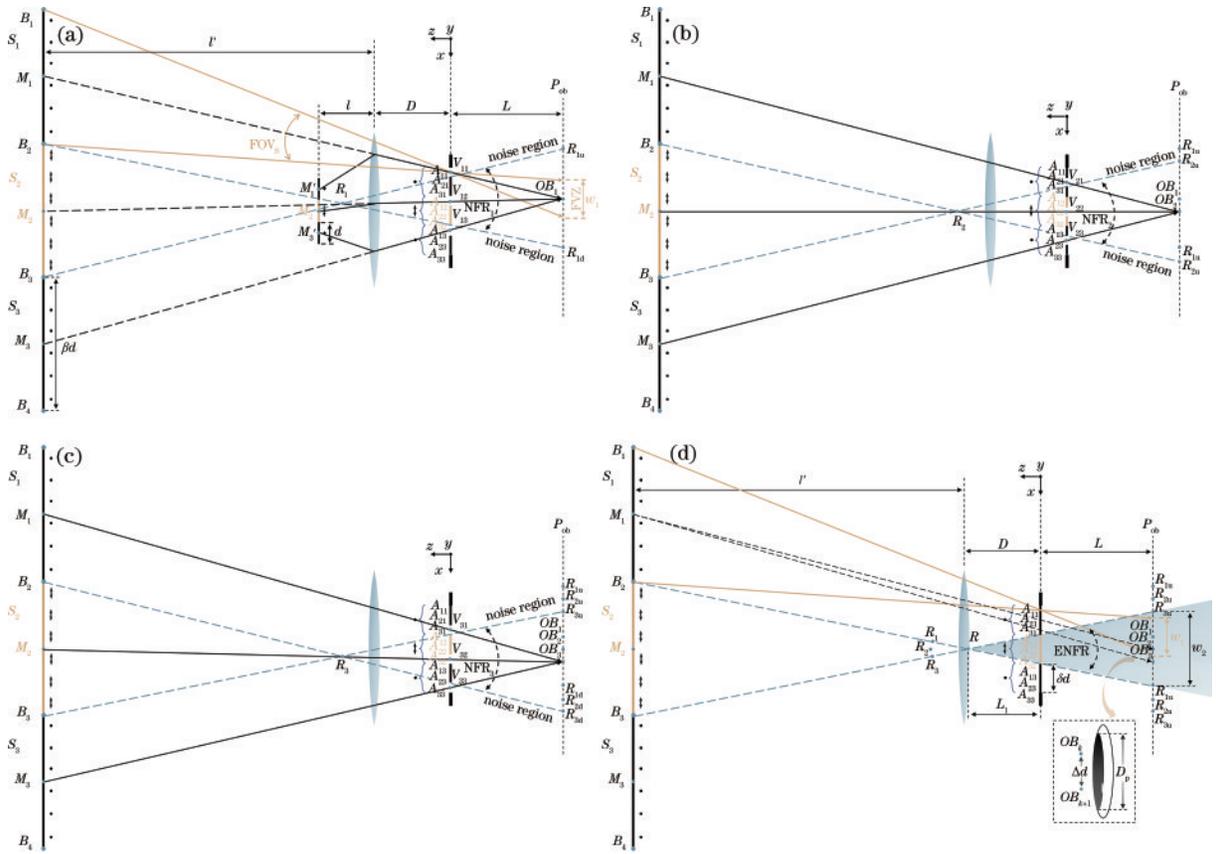


图 3 右眼单目显示系统沿 y 方向在每个时间周期 $t \sim t + \Delta t$ 内 4 个时间帧下的工作状态示意图。(a) 在第 1 个时间帧 $t \sim t + \Delta t/3$; (b) 在第 2 个时间帧 $t + \Delta t/3 \sim t + 2\Delta t/3$; (c) 在第 3 个时间帧 $t + 2\Delta t/3 \sim t + \Delta t$; (d) 每个时间周期 $t \sim t + \Delta t$ 内的 ENFR
 Fig. 3 Schematic of working states of the right eye monocular display system during four time-frames in each time period $t \sim t + \Delta t$ along the y direction. (a) During the first time-frame $t \sim t + \Delta t/3$; (b) during the second time-frame $t + \Delta t/3 \sim t + 2\Delta t/3$; (c) during the third time-frame $t + 2\Delta t/3 \sim t + \Delta t$; (d) ENFR during each time period $t \sim t + \Delta t$

透镜的距离设为 l , 则显示屏虚像与投影透镜的距离可表示为

$$l' = \frac{lf}{f-l}, \quad (1)$$

式中: f 是投影透镜焦距。小孔阵列与显示屏虚像的距离则为 $D + l'$ 。显示屏沿 x 向以间距 d 分为 $M=3$ 个区域, 其虚像分别对应显示屏虚像上的子屏 S_1 、 S_2 和 S_3 , 各子屏尺寸经投影透镜放大为 βd , 其中 $\beta = l'/l$ 为横向放大率。为了消除同时选通的同组相邻小孔间的串扰, 子屏 S_1 、 S_2 和 S_3 在显示屏上对应区域分别出射 y 方向偏振光、 x 方向偏振光和 y 方向偏振光。考虑子屏及其于显示屏上对应区域的物像关系, 直接描述为子屏 S_1 、 S_2 和 S_3 分别出射 y 方向偏振光、 x 方向偏振光和 y 方向偏振光。对于子屏 S_1 , 于不同时间点选通的、于各小孔组中分别对应的小孔 A_{11} 、 A_{21} 、 A_{31} 设计为允许 y 偏振光通过, 阻挡 x 偏振光; 对于子屏 S_2 , 于不同时间点选通的、于各小孔组中分别对应的小孔 A_{12} 、 A_{22} 、 A_{32} 设计为允许 x 偏振光通过, 阻挡 y 偏振光; 对于子屏 S_3 , 于不同时间点选通的、于各小孔组中分别对应的小孔 A_{13} 、 A_{23} 、 A_{33} 设计为允许 y 偏振光通过, 阻挡 x 偏振光。简言之, 小孔 A_{ij} 的下标 i 代表该小孔在一个时间周期 Δt 的第

i 个时间帧被选通, 下标 j 代表该小孔对应于子屏 S_j 。

图 3(a) 为任一时间周期 $t \sim t + \Delta t$ 的第 1 个时间帧 $t \sim t + \Delta t/3$ 内, 小孔 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} 所成小孔组被选通, 子屏 S_1 、 S_2 、 S_3 分别以各自对应的选通小孔中心点 V_{11} 、 V_{12} 、 V_{13} 为视点, 同步刷新加载待显示场景的视图。各子屏中心和对应视点连线会聚至观察点 OB_1 , 即直线 M_1V_{11} 、 M_2V_{12} 、 M_3V_{13} 与观察平面 P_{ob} 交于观察点 OB_1 。位于观察点 OB_1 处的观察者瞳孔能接收到一幅由子屏 S_1 、 S_2 、 S_3 在时间帧 $t \sim t + \Delta t/3$ 内所显示视图拼连而成的一幅拼合图像。相较于单个小孔所接收对应子屏上显示的视图, 该拼合图像的视角得到约 $M=3$ 倍扩展。观察者瞳孔接收到各子屏上各像素的像所等效出射的光束, 瞳孔需要覆盖由连线 B_1V_{11} 和 B_2V_{11} 所包含的角区域。该角区域在观察平面 P_{ob} 上所占据区域命名为完全观测区 (FVZ), 其沿 x 方向的宽度为 w_1 , 并以观察点 OB_1 为中心点。在图 3 中, B_1 、 B_2 、 B_3 和 B_4 是相邻子屏沿 x 方向的分割点。值得注意地, 由连线 M_1V_{11} 、 M_2V_{12} 、 M_3V_{13} 示意的光束主光线实际上来自显示屏上点 M'_1 、 M'_2 和 M'_3 对应的像素。基于显示屏像和显示屏之间的对应关系, 为了图示清晰, 图 3(b)~(d) 未示出显示屏, 等效为各光束均出射自显示屏虚像上的各

子屏。

上述正交偏振特性设计可以有效避免同组相邻小孔之间的串扰噪声。但仅 2 个正交偏振态的事实,使得 $M > 2$ 时,一个子屏出射光会经同组非对应的、具有和对应小孔相同偏振特性的条状小孔,引起串扰噪声。如图 3(a) 所示,子屏 S_1 出射的 y 向偏振特性光能够经非对应的、允许 y 向偏振特性光通过的小孔 A_{13} 而成为串扰噪声;而来自子屏 S_3 的 y 向偏振特性光也能通过非对应小孔 A_{11} 成为串扰噪声,即串扰存在于角范围 $\angle R_{1u}R_1R_{1d}$ 之外,这一角范围在观察平面 P_{ob} 上的覆盖区域,定义为无噪声区 1 (NFR₁)。其中, R_1 是点 B_2 和选通小孔 A_{13} 上端点连线与点 B_3 和选通小孔 A_{11} 下端点连线的交点。 R_{1u} 和 R_{1d} 则是这两条连线分别与观察平面 P_{ob} 的交点。在时间周期 $t \sim t + \Delta t$ 的第 2 个时间帧 $t + \Delta t/3 \sim t + 2\Delta t/3$ 和第 3 个时间帧 $t + 2\Delta t/3 \sim t + \Delta t$, 另外两个小孔组分别被选通;各子屏以选通的对应小孔中心点为视点,同步刷新,同理则向观察平面 P_{ob} 上的另外两个观察点 OB_2 和 OB_3 分别投射另外的两幅拼合图像。设计各观察点间距,在观察者瞳孔可以覆盖至少两个相邻观察点所对应 FVZs 时,该观察者瞳孔能接收到至少两幅拼合图像,实现超多视图显示。

在通过不同小孔组进行各自对应拼合图像投射时,也同样形成各自对应的无噪声区,如图 3(b) 和图 3(c) 中的无噪声区 NFR₂ 和 NFR₃ 所示。则 $T=3$ 个无噪声区的重叠区域决定了超多视图显示的有效无噪声区 (ENFR)。如图 3(d) 所示的 ENFR 为虚线 RR_{1d} 和 RR_{1u} 之间的夹角区域,其在观察平面 P_{ob} 上的 x 方向覆盖尺寸以 w_2 表示。点 R 是点 B_2 和小孔 A_{13} 上端点连线与点 B_3 和小孔 A_{31} 下端点连线的交点,其到小孔阵列的距离为 L_1 。以 L 表示小孔阵列到观察平面 P_{ob} 的距离, δd 、 Δd 分别表示小孔平面上同组相邻小孔的间距、观察平面 P_{ob} 上相邻观察点之间的距离。根据图 3 所示几何关系,有

$$\frac{L}{L+D+l'} = \frac{\delta d}{\beta d} \rightarrow L = \frac{(D+l')\delta d}{\beta d - \delta d}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta d}{D+l'+L} = \frac{\delta d/T}{D+l'} \xrightarrow{D+l' \gg L} \Delta d = \delta d/T, \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_1}{\beta d} = \frac{L}{D+l'} \\ \frac{\delta d}{\beta d} = \frac{L}{L+D+l'} \end{array} \right. \xrightarrow{D+l' \gg L} \delta d = w_1 = \frac{\beta d L}{D+l'}, \quad (4)$$

$$\frac{\delta d + (1/T - \alpha)\delta d}{\beta d} = \frac{L_1}{D+l' - L_1} \rightarrow L_1 = \frac{(D+l')(1 + 1/T - \alpha)\delta d}{\beta d + (1 + 1/T - \alpha)\delta d}. \quad (5)$$

其中,像距 l' 由式 (1) 确定。观察平面 P_{ob} 上, ENFR 沿 x 向大小为

$$\left. \begin{array}{l} \frac{(1 + 1/T - \alpha)\delta d}{w_2} = \frac{L_1}{L_1 + L} \\ \text{Equ. (2) and Equ. (5)} \end{array} \right\} \rightarrow w_2 =$$

$$(1 + 1/T - \alpha)\delta d + \frac{\beta d \delta d + (1 + 1/T - \alpha)\delta d^2}{\beta d - \delta d}. \quad (6)$$

如图 3(d) 中虚线框所示,为了使观察者瞳孔能同时接收到至少两幅完整的拼合图像,需满足如下条件:

$$\left. \begin{array}{l} 0.5w_1 + \Delta d + 0.5w_1 \leq D_p \\ \text{Equ. (3) and Equ. (4)} \end{array} \right\} \rightarrow (1 + 1/T)\delta d \leq D_p. \quad (7)$$

人眼瞳孔能在观察平面上活动的范围 w_{ob} 为

$$\left. \begin{array}{l} w_{ob} = D_p + (T - 2)\Delta d + (D_p - w_1 - \Delta d) \\ \text{Equ. (3) and Equ. (4)} \end{array} \right\} \rightarrow w_{ob} = 2D_p - 3\delta d/T. \quad (8)$$

FVZ 尺寸 w_1 和 L 决定了观察者通过单个条状小孔所获得的 x 向视角:

$$\theta_{Fovs} \cong 2 \arctan \frac{w_1}{2L}. \quad (9)$$

经 M 组偏振正交特性小孔的时序复用,扩展后的视角为

$$\theta_{Fov} \cong M \times \theta_{Fovs} \cong 2M \arctan \frac{w_1}{2L}. \quad (10)$$

2.3 实验

图 4(a) 为基于偏振正交特性小孔的验证性超多视图显示系统。虽然最终结构形态为头戴式显示结构,为了实验的便利,该验证性显示系统搭建在光学平台上。对应观察者双目的各目镜分别包括 1 个小孔阵列、1 个白光 OLED 微型显示器充当的显示屏、1 个双胶合消色差投影透镜,它们共用 1 个 FPGA 控制器和图像播放器。其中,小孔阵列由条状液晶光阀构成,其具体结构如图 4(b) 所示。一个小孔阵列包含 12 列条状液晶光阀,每列光阀均长 17 mm、宽 0.9 mm,且通过对 FPGA 外部施加电压独立控制开关状态。实验中,只使用 3~11 号光阀,按每组 $M=3$ 列划分成 $T=3$ 组,即同组相邻小孔间隔 $\delta d=2.7$ mm,开口率 $\alpha=1/3$ 。具体地,3、6、9 号光阀分为一组,记为 A_{11} 、 A_{12} 、 A_{13} ,并在每个时间周期的第 1 个时间帧同时选通,而在其他时间保持关闭状态;4、7、10 号光阀分为一组,记为 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} ,并在每个时间周期的第 2 个时间帧同时选通,在其他时间保持关闭状态;5、8、11 号光阀则分为另一组,记为 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{33} ,并在每个时间周期的第 3 个时间帧同时选通,在其他时间保持关闭状态。各光阀通过对应贴附的偏光片,被赋予的偏振特性由图 4(b) 中的双向箭头标出。

实验所用白光 OLED 微显示屏的有效显示面积为 $d_x \times d_y = 10.08 \text{ mm} \times 7.56 \text{ mm}$,显示分辨率为 800×600 。该 OLED 微显示屏被表面附加的偏振片

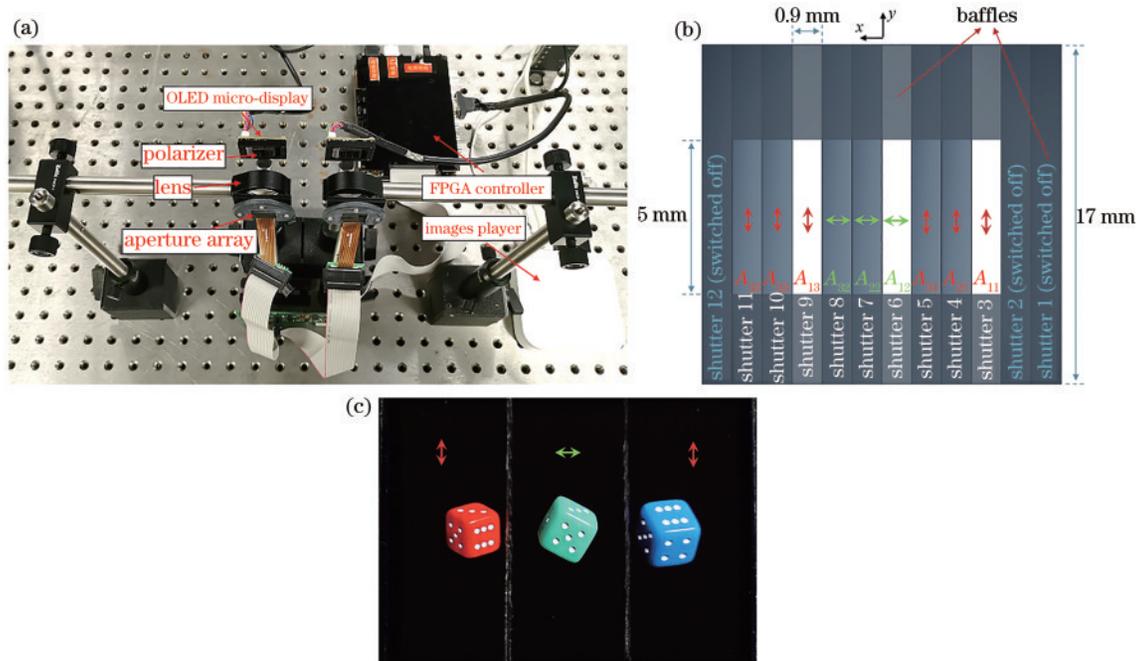


图 4 实验设计。(a)验证性双目实验系统;(b)小孔阵列设计图;(c)屏幕虚像直拍照片

Fig. 4 Experimental design. (a) Proof-of-concept binocular display system; (b) aperture array design; (c) photo of virtual image

沿 x 方向等距划分成 $M=3$ 个子屏幕,使得由各子屏 OLED 像素出射的光经表面的偏振片后获得与小孔阵列每一组中的小孔一一对应的偏振特性。在小孔阵列与 OLED 显示屏之间放置一个焦距 $f=30.6$ mm 的双胶合消色差投影透镜,使屏幕虚像呈现在像距 $l'=500$ mm 的位置处,由式(1)计算得物距 $l=29$ mm,并设计小孔阵列到投影透镜的距离 $D=5$ mm。因此,图 3(a)中的子屏尺寸 $d=d_x/M=3.36$ mm, $\beta=l'/l=17.3$ 。取明亮环境下人眼瞳孔直径 $D_p=5$ mm,根据式(2)~(10)计算各参数的理论值,汇总于表 1。

表 1 参数理论值

Table 1 Theoretical values of parameters

$L /$ mm	$\Delta d /$ mm	$w_1 /$ mm	$w_2 /$ mm	$w_{ob} /$ mm	$\theta_{FoVs} /$ ($^\circ$)	$\theta_{FoV} /$ ($^\circ$)
24.6	0.9	2.8	5.7	7.3	6.6	19.8

在所搭建验证性实验系统中,沿 y 方向的屏幕尺寸 $d_y=7.56$ mm,计算可得该方向的 FoV 为 14.8° 。实际上,此数值仅由屏幕尺寸计算得出,并不意味着 y 方向上的 FoV 受条状小孔的限制。图 4(c)为显示屏经投影透镜放大所成虚像的照片,可以清晰地看见人工粘贴偏振片不够精细导致的衔接缝。实验所用 OLED 微显示屏的最高刷新率为 120 Hz,在 FPGA 的控制下,验证性超多视图显示系统中每个视点的刷新频率为 $120 \text{ Hz}/T=40 \text{ Hz}$,时间周期 $\Delta t=1/120 \text{ s} \times T=0.025 \text{ s}$ 。在该条件下,人眼观看此超多视图显示系统无明显闪烁感。

3 分析与讨论

实验使用一台数值孔径 $NA=1.4$ 且光圈大小保持为 5 mm 的照相机进行拍摄记录,以便尽量还原人眼直接观测到的实验结果。为了演示 FoV 扩展效果,两幅视图分别在每个时间周期的第 2 和第 3 个时间帧刷新,观察平面上生成的对应两个观察点 OB_2 和 OB_3 。设置这两幅视图是分别铺满整个显示屏的大写字母“A”和“B”,以便更直观地表现出 FoV 的扩展。每个时间周期的第 1 个时间帧不加载光信息。设置照相机镜头的光圈范围,覆盖对应的两个观察点 OB_2 和 OB_3 。图 5(a)、图 5(b)和图 5(c)分别对应只有小孔 A_{33} 在各时间周期的对应时间点被打开、只有小孔 A_{32} 和 A_{33} 在各时间周期的各自对应时间点被打开、只有小孔 A_{31} 和 A_{32} 与 A_{33} 在各时间周期的各自对应时间点被打开情况下,照相机分别拍摄到的画面。明显地,随着小孔选通数量的增加,沿 x 方向的 FoV 从单小孔对应值逐步扩展至 $M=3$ 倍,得到如图 5(c)所示的拼合图像。同理,图 5(d)和图 5(e)分别是只选通对应观察点 OB_2 的小孔 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 时所看到的拼合图像,以及所有小孔于对应时间点打开时所拍摄图像。若照相机光圈在覆盖这两个观测点 OB_2 和 OB_3 的同时却超出了图 3(d)所示的 ENFR,则会接收到串扰光。图 5(f)为只选通小孔 A_{23} 和 A_{33} 时,光圈沿 x 方向超出 ENFR 时拍摄的实验结果,此时子屏 S_1 出射光中的部分通过小孔 A_{23} 后进入光圈成为串扰噪声。图 5 所展示的拍摄画面呈现明显的“断裂感”,在图 5(e)中用虚线框出,这是图 4(c)所示偏振片衔接缝导致的结果。如果 OLED 微显示器与偏振片在商业化生产线上制造并集成在一起,则此种光亮不均匀带来的画面“断裂感”将不会出现。

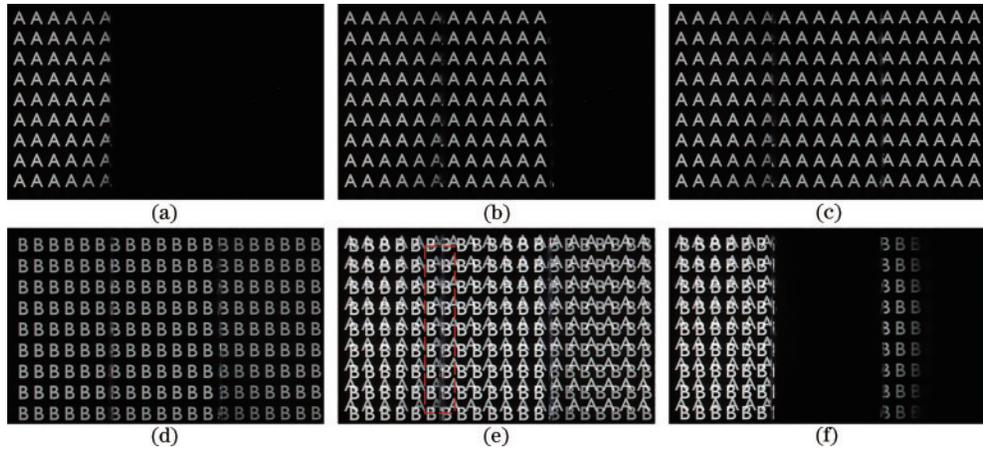


图 5 FoV 扩展验证性实验中拍摄的画面。(a) 仅小孔 A_{33} 于对应时间点被选通时; (b) 仅小孔 A_{32} 和 A_{33} 于各自对应时间点被选通时; (c) 仅小孔 A_{31} 、 A_{32} 、 A_{33} 于各自对应时间点被选通时; (d) 仅小孔 A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 于各自对应时间点被选通时; (e) 所有小孔于各自对应时间点被选通时; (f) 光圈范围超出 ENFR 时

Fig. 5 Experimentally captured photos for verifying the FoV enlargement. (a) Only aperture A_{33} being turned on; (b) only apertures A_{32} and A_{33} being turned on; (c) only apertures A_{31} , A_{32} , and A_{33} being turned on; (d) only apertures A_{21} , A_{22} , and A_{23} being turned on; (e) all the apertures being turned on; (f) camera's aperture being out of ENFR

离焦模糊效应是单目深度线索存在的重要标志, 为了实验验证所提头戴式超多视图显示系统能够实现离焦模糊, 将相机镜头分别聚焦于显示的 3D 场景的不同深度处。所显示 3D 场景为距离小孔阵列平面分别

为 450 mm 的蓝色骰子、500 mm 的绿色骰子及 550 mm 的红色骰子。图 6 (a) ~ (c) 分别是相机聚焦在 450 mm、500 mm 和 550 mm 时拍摄的照片, 每张照片中最清晰的骰子, 即多视图已经重合起来的 3D 场景部

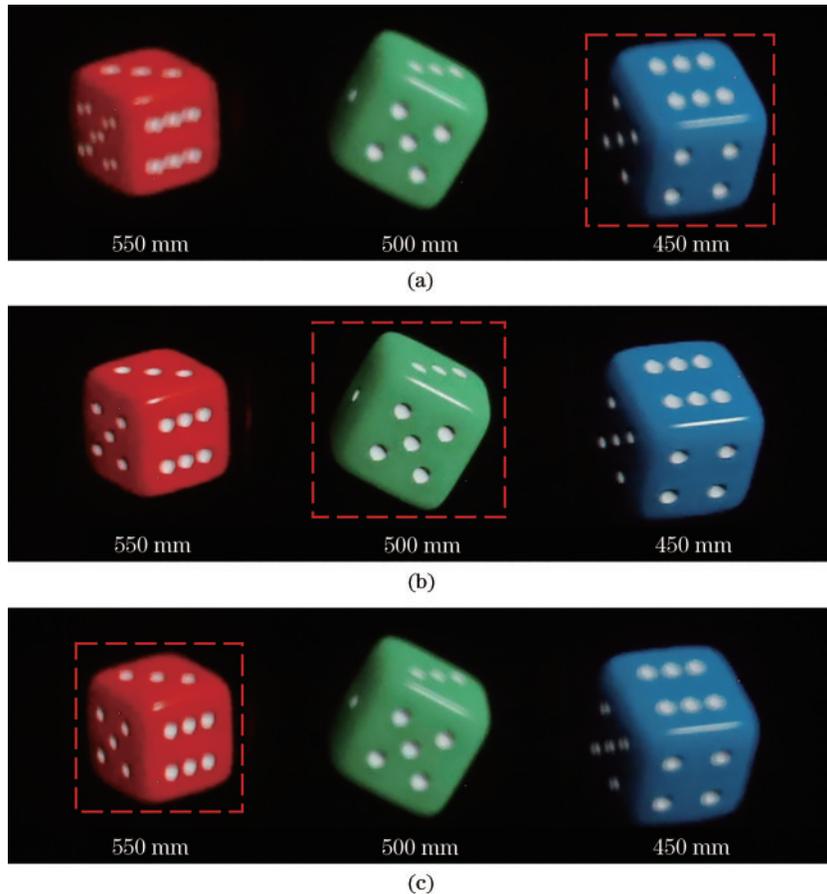


图 6 相机聚焦不同深度时的实验拍摄照片。(a) 聚焦于 450 mm 位置; (b) 聚焦于 500 mm 位置; (c) 聚焦于 550 mm 位置
Fig. 6 Experimentally captured photos when camera being focused at different depths. (a) Focusing at 450 mm; (b) focusing at 500 mm; (c) focusing at 550 mm

分,用虚线框出。实验结果表明:当相机聚焦在某个深度时,该深度处的场景是最清晰的,而其他深度处场景的视差图像则出现了不同程度的分离,即模拟了人眼单目观看不同深度场景时存在的离焦模糊效果。如图 6(a)所示,当相机聚焦在 450 mm 深度平面时,处于该深度处的蓝色骰子最为清晰,而离该聚焦深度最远的红色骰子则最模糊。

另外,图 6 实验结果表明,当相机不是聚焦在微显示屏虚像即显示的中心深度平面(CDP)上时(显示屏虚像实际在距小孔阵列 505 mm 处,但与实验设计场景 500 mm 之间的差距基本上可以忽略),除了不在此深度上的 3D 场景会出现视差图像分离导致的离焦模糊外,还出现了 y 方向上光束发散使光斑增大导致的所有场景模糊,正如图 6(a)和图 6(c)中的显示场景要比图 6(b)中的整体看起来更模糊。这归因于实验中所使用的条状小孔并未对 y 方向上的孔径尺寸($D=5$ mm)进行约束,在获得 y 方向不受限 FoV 的同时也牺牲了此方向的显示分辨率,导致该系统显示的 3D 场景景深范围受到约束。若采用方形或圆形小孔代替条状小孔生成视点,那么就能使分辨率在 x 和 y 两个方向上随聚焦平面与 CDP 距离的增大而均匀下降,从而获得更大的显示景深,但这也使 y 方向上的 FoV 同样受到孔径尺寸的限制。采取与 x 方向相同的策略可以扩展 y 方向 FoV 大小,但需要增加额外的时间复用次数以解决对角线方向相邻子屏带来的串扰噪声,从而增加了对硬件空间带宽积的要求。在景深需求和硬件空间带宽积需求间进行平衡以适配具体应用。

4 结 论

通过设计特殊的偏光结构,克服了基于近眼时序条状小孔实现的头戴式超多视图显示系统中 FoV 受限的问题,在验证性实验中使沿 x 方向的视角与使用单小孔得到的视角相比扩展了 $M=3$ 倍。在所搭建的验证性双目实验系统中,出瞳距离 $L=24.6$ mm 对头戴式显示系统而言并不是最理想的,该较大的出瞳距离也导致实验中所展示的沿 x 方向扩展后的 FoV 为 19.8° ,仍然较小。导致这一结果的主要原因在于实验中采用的常规双胶合消色差投影透镜,其 NA 较小,限制了 OLED 微显示屏的视角放大率。实际上,偏光特性小孔的设计是为了克服所引入近眼小孔对 FoV 的限制,以保证最终显示的 FoV 能达到光学系统的最大视角。后继实验中,需要采用较大 NA 的投影器件^[20],并于各组中设计更多的偏光特性小孔,以实现更大 FoV。实验中基于近眼小孔搭建的超多视图显示系统仍然存在较大的不足,主要体现在:观察平面 P_{ob} 上 ENFR 较小,超出此范围仍会受到串扰噪声的影响;人眼瞳孔覆盖一个观测点时,该瞳孔应该同时覆盖该观测点对应的完全观察区,以同时观察到来自所有子屏幕的光信息,由此导致观察区域(eye-box)受限。该两

点均导致人眼瞳孔的可活动范围受限。更大观察区域,需要在扩展 ENFR 的前提下,同时投射更多观测点来实现,该问题有望在后续的研究工作中得到进一步解决。

参 考 文 献

- [1] Lambooi M T M, IJsselsteijn W A, Heynderickx I. Visual discomfort in stereoscopic displays: a review[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6490: 64900I.
- [2] Kim J, Kane D, Banks M S. The rate of change of vergence-accommodation conflict affects visual discomfort [J]. Vision Research, 2014, 105: 159-165.
- [3] Zhou Y, Zhang J F, Fang F Z. Vergence-accommodation conflict in optical see-through display: review and prospect[J]. Results in Optics, 2021, 5: 100160.
- [4] Yang X, Zhang H B, Wang Q H. A fast computer-generated holographic method for VR and AR near-eye 3D display[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4164.
- [5] 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.
- [6] 许富洋, 杨鑫, 姚建云, 等. 高分辨率多视点动态全息 3D 显示[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0109001.
Xu F Y, Yang X, Yao J Y, et al. High-resolution multiview dynamic holographic 3D display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0109001.
- [7] 杨鑫, 焦述铭, 宋强, 等. 计算机相位彩虹全息近眼显示[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2209001.
Yang X, Jiao S M, Song Q, et al. Computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2209001.
- [8] Choi M H, Shin K S, Jang J, et al. Waveguide-type Maxwellian near-eye display using a pin-mirror holographic optical element array[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 405-408.
- [9] He Z Q, Yin K, Fan-Chiang K H, et al. Enlarging the eyebox of Maxwellian displays with a customized liquid crystal Dammann grating[J]. Crystals, 2021, 11(2): 195.
- [10] Wang X, Hua H. Depth-enhanced head-mounted light field displays based on integral imaging[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 985-988.
- [11] Huang F C, Luebke D, Wetzstein G. The light field stereoscope[J]. ACM Transactions on Graphic, 2015, 34(4): 1-12.
- [12] 董昊翔, 于迅博, 金秋, 等. 一种基于视点分段式体像素的具有 100° 正面观看视角的桌面式光场显示系统[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0409001.
Dong H X, Yu X B, Jin Q, et al. Tabletop 3D light-field display with 100° frontal viewing angle based on view-segmented voxels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0409001.
- [13] Lambooi 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): 030201.

- [14] 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.
- [15] Takaki Y, Tanaka K, Nakamura J. Super multi-view display with a lower resolution flat-panel display[J]. Optics Express, 2011, 19(5): 4129-4139.
- [16] Ueno T, Takaki Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [17] Sluka T. Near-eye sequential light-field projector with correct monocular depth cues: US20190293939[P]. 2019-09-26.
- [18] Akşit K, Niaki A H G, Ulusoy E, et al. Super stereoscopy technique for comfortable and realistic 3D displays[J]. Optics Letters, 2014, 39(24): 6903-6906.
- [19] Liu L L, Cai J F, Pang Z Y, et al. Super multi-view near-eye 3D display with enlarged field of view[J]. Optical Engineering, 2021, 60(8): 085103.
- [20] Hu X D, Hua H. High-resolution optical see-through multi-focal-plane head-mounted display using freeform optics[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13896-13903.