

基于全色全息透镜的增强现实系统*

杨雨桦¹⁾²⁾³⁾ 何龙¹⁾²⁾³⁾ 邓林宵¹⁾²⁾³⁾ 朱立全¹⁾²⁾³⁾顾春¹⁾²⁾³⁾ 许立新^{1)2)3)†}

1) (中国科学技术大学, 核探测与核电子学国家重点实验室, 合肥 230026)

2) (中国科学技术大学光学与光学工程系, 合肥 230026)

3) (安徽省先进激光技术实验室, 合肥 230026)

(2022 年 12 月 14 日收到; 2023 年 3 月 15 日收到修改稿)

全息透镜是一种通过全息波前记录制作的成像元件. 由于其形状因子小、波长和角度选择性等优势, 在增强现实 (augmented reality, AR) 领域有着很好的应用前景. 全色全息透镜的制作与成像过程分析是当前的难点. 通过标量衍射理论推导了离轴全息透镜的共轭成像方程, 分析了现有成像系统中的畸变和像散问题. 此外, 通过 k 矢量圆和光线追迹相结合的几何光学方法模拟了一个视场角为 18° , 眼盒为 10 mm 的 AR 系统, 通过干涉曝光实验制作了全色全息透镜, 其平均峰值衍射效率为 56.7%, 达到国际较高水平. 将激光微投与全息透镜相结合, 搭建了 AR 系统原型, 得到了系统的畸变和像散效果实验效果, 与模拟的情况相一致. 并测量了系统的 MTF 参数, 其清晰度基本满足人眼的分辨率需求. 对于单色成像, 提出了添加柱面透镜的方式, 保证子午面和弧矢面的光焦度一致以消除像散; 提出了设计自由形式的波前记录方式以消除畸变. 对于全色成像, 提出了记录过程中预先补偿的方法, 以解决 3 个颜色通道之间图像不重合的问题.

关键词: 全息光学元件, 激光显示, 近眼显示, 增强现实**PACS:** 42.15.Dp, 42.40.Eq, 42.40.My, 42.40.Pa**DOI:** 10.7498/aps.72.20222388

1 引言

显示是一个智能化的人机交互平台, 现已进入各个产业. 随着显示设备的小型化和微型化, 光学透视型增强现实 (augmented reality, AR) 系统逐渐进入大众的视野中. 其将虚拟图像与真实场景的光同时成像到人眼的视网膜上, 从而实现对真实世界理解的“增强”, 其应用方向主要是近眼显示和抬头显示^[1-3]. AR 系统同时允许来自真实场景的光和微显示器虚拟图像的光传输到人眼中, 实现更为真实的人机交互界面. 由于微显示器不能遮挡人眼, 系统需要在人眼之前放一个透明的光学合束元件, 该元件还要产生额外的光焦度实现图像的放

大, 现多采用光波导^[4-6]或者自由空间合束^[7,8]的结构, 每种技术路线都需要对系统参数进行权衡^[9]. 目前研究较多的技术路线是基于光波导的近眼显示系统, 其将光限制在一个厚度为数毫米的平板玻璃内传输到人眼中, 更容易做成眼镜的形状, 其原理如图 1 所示^[10,11].

然而, 这个结构限制了其视场角和眼盒范围, 通常通过出瞳扩展的方式扩大眼盒范围, 但是这种方法建立在牺牲图像效率的前提下, 还会导致图像不均匀^[4,5]. 另一种技术路线是直接通过自由空间中直接成像到人眼中, 这种方式可以在保证均匀度和高效率的同时, 得到足够的视场角和眼盒的图像^[7,8], 如图 2 所示^[12].

* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFF0307804) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xulixin@ustc.edu.cn

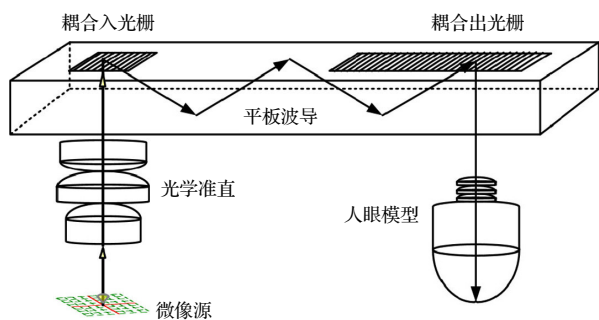


图1 光波导AR显示系统原理示意图

Fig. 1. Schematic diagram of optical waveguide AR display system principle.

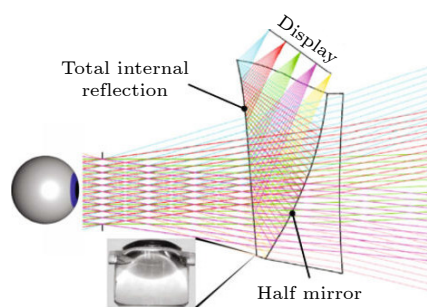


图2 自由空间光学组合器AR显示系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of free-space optical combiner AR display system.

自由空间光学组合器构成的是一个离轴的成像系统, 包括自由曲面折反光学元件^[12,13]和全息光学元件 (holographic optical element, HOE)^[14]等. 其中, 全息光学元件 (holographic optical element, HOE) 拥有体积小、重量轻和能够任意波前记录的优势, 成为极具潜力的一种透明成像元件^[15]. 通过干涉, 将物光的波前以亚波长量级的相位光栅形式记录在光致聚合物中, 再现过程的本质是对入射光的波前进行调制, 以重建出需要的波前, 即使聚合物表面不弯曲也可以产生光焦度, 从而实现更为紧凑的光学结构. 此外, 传统光学元件的反射率和透过率之和是一个定值, 因此虚拟图像的反射效率和真实场景光的透过率存在权衡关系. 而 HOE 是基于衍射原理的光学元件, 它的波长和角度选择性保证了真实场景的高透过率以及微显示器的虚拟图像的高衍射效率传输, 同时杂散光也直接透过不发生衍射, 在获得高图像对比度的同时保证较高的真实场景透过率^[16].

目前文献中已有使用离轴 HOE 透镜作为近眼显示的自由空间光合束元件. 韩国首尔大学的 Jang 等^[17,18]利用全息透镜 (holographic optical element

lens, HOE lens) 在 AR 系统中生成三维图像. 之后同组的 Lee 等^[19]优化了基于全息透镜的自由空间成像系统, 并提出了像散的补偿方法. 但是这些研究主要针对单色全息透镜成像系统, 对于全色全息透镜成像系统, 在工艺和光学系统中存在更多的挑战^[20,21]. 现有的全色 HOE 的研究主要是基于全息光波导结构. 中国的东南大学研究组^[22–24]通过严格耦合波理论对全息光栅的衍射响应进行了系统性的理论研究, 并制作了全色全息光波导的原型. 韩国忠北大学的 Piao 等^[25–27]通过序列曝光的方式制作了光波导结构的全色全息耦合光栅并优化了衍射效率. 上述基于全息光波导结构的全色 HOE 为全息光栅, 起到类反射镜的耦合出功能, 不提供额外的光焦度, 需要额外的透镜进行成像. 而全色全息透镜可以直接提供光焦度, 进一步压缩系统占据的空间. 同时, 系统能够保证虚拟图像的均匀度、效率、视场角和眼盒范围. 然而, 其对全色 HOE 记录过程的设计和工艺要求更高, 并且需要搭配窄带宽的显示器使用, 因此对该技术路线的研究工作较少.

本文提出了一种全色全息透镜与激光微显示器相结合的 AR 显示系统. 在第 2 节中, 推导了三维全息透镜成像方程, 得到了全息透镜的设计结构, 并通过光线追迹的方式模拟了全息透镜的成像过程. 在第 3 节中, 搭建了全色全息透镜的实验记录平台, 通过序列曝光的方式制作了较高平均峰值衍射效率的全色全息透镜, 并搭建了激光 AR 系统的原型, 对显示效果和成像质量进行分析. 在第 4 节中, 针对系统中的单色像差, 提出了添加柱面透镜的方式, 保证子午和弧矢面的光焦度一致以消除像散; 提出了设计自由形式的波前记录方式以消除畸变. 此外, 提出了记录过程中预先补偿的方法, 以解决 3 个颜色通道之间图像不重合的问题.

2 全息透镜成像过程

首先通过成像方程来阐述全息透镜的成像性质, 再通过 k 矢量图和光线追迹模拟的方式预测像点的位置, 对成像过程进行分析.

2.1 全息透镜的成像方程

全息透镜是一种通过 2 个球面波前干涉得到的 HOE, 这种记录方式可以实现透镜成像的功能.

物面可以被看作是一个二维的球面波的集合, 全息透镜改变这些球面波的曲率, 将这些球面波重构就得到了像面.

离轴记录的全息透镜存在 2 个光轴, 物和像的光轴不在一条直线上, 因此其高斯成像过程与传统的同轴光学元件不同.

考虑一个以 HOE 中心为原点的离轴成像系统, 球面波的位置可以通过极坐标来定义. 球面波中心距离原点的距离为其曲率半径 R , 其中平面波为曲率半径为无穷的特殊情况. 倾斜角被定义为点光源中心光线和坐标轴之间的夹角, 分别为 θ_x , θ_y , θ_z . 考虑一个二维的记录波前形式, 如图 3 所示, 全息透镜由 2 个点光源的波前记录, 参考光和信号光分别由下标 r 和 s 确定, 其中, θ_{sx} 和 θ_{sz} 分别为信号光关于 x 和 z 方向的夹角; θ_{rx} 和 θ_{rz} 分别为参考光关于 x 和 z 方向的夹角.

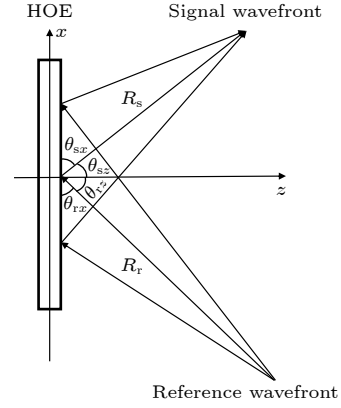


图 3 全息透镜记录波前示意图

Fig. 3. Schematic diagram of the recording wavefront of an HOE lens.

根据标量衍射理论的推导, 全息透镜的记录过程决定它的透过率函数 $t(x, y)$. 2 个点光源记录的透过率函数的表达式如下:

$$t(x, y) = \exp \left\{ jk_1 \left[x(\cos\theta_{sx} - \cos\theta_{rx}) + (\cos\theta_{sy} - \cos\theta_{ry}) + \left(\frac{\sin^2\theta_{sx}}{R_{sx}} - \frac{\sin^2\theta_{rx}}{R_{rx}} \right) x^2 + \left(\frac{\sin^2\theta_{sy}}{R_{sy}} - \frac{\sin^2\theta_{ry}}{R_{ry}} \right) y^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

再现过程是一个物像的共轭过程, 理想高斯成像的物点和像点一一对应, 因此需要计算全息透镜的点扩散函数:

$$\begin{aligned} h(\xi, \eta; u, v) = & \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) \exp \left\{ \frac{j}{2} \left[k_1 \left(\frac{\sin^2\theta_{sx}}{R_{sx}} - \frac{\sin^2\theta_{rx}}{R_{rx}} \right) + k_2 \left(\frac{\sin^2\theta_{ox}}{R_{ox}} - \frac{\sin^2\theta_{ix}}{R_{ix}} \right) \right] x^2 \right\} \\ & \times \exp \left\{ \frac{j}{2} \left[k_1 \left(\frac{\sin^2\theta_{sy}}{R_{sy}} - \frac{\sin^2\theta_{ry}}{R_{ry}} \right) + k_2 \left(\frac{\sin^2\theta_{oy}}{R_{oy}} - \frac{\sin^2\theta_{iy}}{R_{iy}} \right) \right] y^2 \right\} \\ & \times \exp \{ j [k_1(\cos\theta_{sx} - \cos\theta_{rx}) + k_2(\cos\theta_{ox} - \cos\theta_{ix})] x \} \\ & \times \exp \{ j [k_1(\cos\theta_{sy} - \cos\theta_{ry}) + k_2(\cos\theta_{oy} - \cos\theta_{iy})] y \} \\ & \times \exp \left[-jk_2 \left(\frac{\sin\theta_{ox}}{R_{ox}} \xi - \frac{\sin\theta_{ix}}{R_{ix}} u \right) x \right] \exp \left[-jk_2 \left(\frac{\sin\theta_{oy}}{R_{oy}} \eta - \frac{\sin\theta_{iy}}{R_{iy}} v \right) y \right] dx dy, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, k_1 和 k_2 分别为记录过程和再现过程中的波数; R_s 和 R_r 分别为记录过程中的信号光和参考光的曲率半径; R_o 和 R_i 分别为物点与像点的曲率半径; θ_s 和 θ_r 分别为记录过程中的信号光和参考光的倾斜角; θ_o 与 θ_i 分别是物点与像点的倾斜角; $p(x, y)$ 为成像系统的光瞳函数. 近轴高斯成像的理想情况下, 脉冲响应函数为 δ 函数, 因此可以得到全息透镜的高斯成像方程, 可以看出 x 方向和 y 方向的形式是一致的:

$$k_1(\cos\theta_{sx} - \cos\theta_{rx}) + k_2(\cos\theta_{ox} - \cos\theta_{ix}) = 0, \quad (3)$$

$$k_1 \left(\frac{\sin^2\theta_{sx}}{R_{sx}} - \frac{\sin^2\theta_{rx}}{R_{rx}} \right) + k_2 \left(\frac{\sin^2\theta_{ox}}{R_{ox}} - \frac{\sin^2\theta_{ix}}{R_{ix}} \right) = 0, \quad (4)$$

$$k_1(\cos\theta_{sy} - \cos\theta_{ry}) + k_2(\cos\theta_{oy} - \cos\theta_{iy}) = 0, \quad (5)$$

$$k_1 \left(\frac{\sin^2\theta_{sy}}{R_{sy}} - \frac{\sin^2\theta_{ry}}{R_{ry}} \right) + k_2 \left(\frac{\sin^2\theta_{oy}}{R_{oy}} - \frac{\sin^2\theta_{iy}}{R_{iy}} \right) = 0. \quad (6)$$

首先通过方程 (3) 计算出物像主光轴的倾斜角方向, 再通过方程 (4) 得到物像的曲率共轭关系. 可以从物像的结构与光学参数中反推出离轴全息透镜的初始记录结构, 从而指导全息透镜的光学设

计过程.

实际的全息透镜成像中, 只在一个平面 (xz) 内存在倾斜, 会导致子午 (xz) 面与弧矢 (yz) 平面的倾斜角不同, 2 个成像面的像距不同而产生像散.

根据 (2) 式还可以得到子午和弧矢面的垂轴放大率的计算公式分别为

$$M_x = \frac{\cos\theta_{0x}R_{ix}}{\cos\theta_{ix}R_{0x}}, \quad (7)$$

$$M_y = \frac{\cos\theta_{0y}R_{iy}}{\cos\theta_{iy}R_{0y}}. \quad (8)$$

与传统的同轴成像元件不同的是, 全息透镜的垂轴放大率是角度敏感的, 放大率与再现物点的角度有关. 在视场角较大的情况下, 会产生较大的畸变, 引起图像的失真.

2.2 全色全息透镜成像系统的光学参数

根据全息透镜的成像性质, 成像系统的物像关系图如图 4 所示. 其中信号光方向垂直于全息透镜的表面, 参考光与表面之间存在一定的倾斜角.

图 4 中物面是一个微显示器, 其中心在物方光轴上, 对应的像面中心也在光轴上. 当物距近似等于一倍焦距, 可以得到无穷远处的虚像. 根据图 4 中的系统, 其视场角 (FOV) 可以通过 (7) 式计算:

$$\text{FOV} = 2\arctan\left(\frac{h}{2f\cos\theta}\right), \quad (9)$$

其中 h 为物面的大小; f 为信号光位置的曲率, θ 为光轴的倾斜角. 为了提升图像的视场角, 在固定物面大小不变的前提下, 可以增大参考光的倾斜角或者减小 HOE 的焦距, 其改变量需要考虑放置微显示器对大视场角光路的遮挡. 观看的眼盒范围由微显示器的发光角度和全息透镜的角带宽共同决定.

为了保证足够大的视场角和眼盒范围, 需要足够的光学扩展量, 这对微显示器的尺寸和发光角度等参数提出了要求.

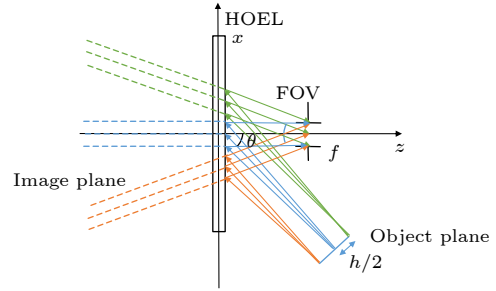


图 4 单片全息透镜的成像原理图, 红、绿和蓝线分别为不同视场的物光线 (图中 FOV 为视场角; HOEL 为全息透镜)

Fig. 4. Principle diagram of the imaging process of a single HOE lens and the red, green and blue rays are the object rays with different fields of view. (FOV represents the field of view and HOEL represents the holographic optical element lens).

2.3 全息透镜成像过程模拟

透镜成像通过光线追迹的方式进行模拟. 首先需要通过 \mathbf{k} 矢量图确定全息透镜的每一个局部光栅对光线的作用. \mathbf{k} 矢量圆的本质是局部的光栅对入射光方向的改变, 它由方程 (3) 式和 (5) 式所确定, \mathbf{k} 矢量图的记录和再现的原理如图 5 所示, 为简化数学表达形式, 这里主要讨论二维记录的情况.

记录过程通过物光和参考光的干涉形成光栅矢量分布, 每个局部光栅区域都可以用光栅矢量 \mathbf{k}_g 来定义, 其表达式为

$$\mathbf{k}_g = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_r, \quad (10)$$

其中 \mathbf{k}_s 和 \mathbf{k}_r 分别为信号光和参考光的波前矢量. 当再现光与参考光一致的时候, 此时满足布拉格匹配条件 $\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_r$, 此时衍射光的波前矢量为:

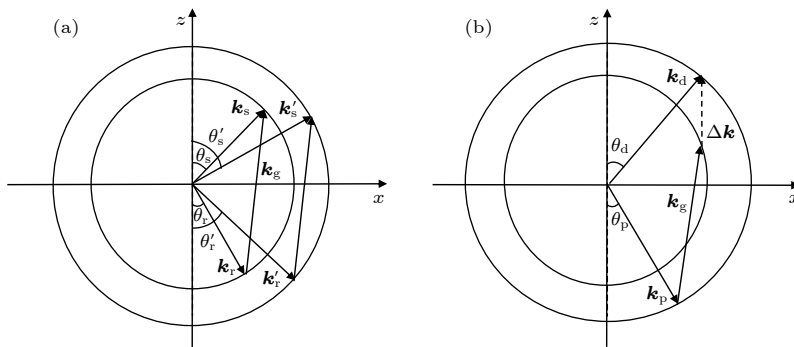


图 5 HOE 的波前 \mathbf{k} 矢量图 (a) 记录过程; (b) 再现过程

Fig. 5. \mathbf{k} -vector diagram of an HOE: (a) Recording process; (b) reconstruction process.

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_g + \mathbf{k}_p, \quad (11)$$

其中, \mathbf{k}_d 和 \mathbf{k}_p 分别为衍射光和再现光的波前矢量. 全息透镜成像的过程中, 再现光与记录光波矢量往往不一致, 此时称为布拉格不匹配波前重建, 如图 5(b) 所示. 光栅的波前重建满足方程 (3) 式, 再现波前方程为:

$$\sin\theta_d = \sin\theta_p + \frac{k_s}{k_p}\sin\theta_s - \frac{k_r}{k_p}\sin\theta_r. \quad (12)$$

因此可以得到局部的光栅矢量任意波长、任意方向的光的作用. 从而通过光线追迹的方式对成像过程进行模拟. 系统的光学参数如表 1 所示.

表 1 全息透镜成像系统的光学参数
Table 1. Optical parameters of HOE lens imaging system.

参数	数值
眼盒大小/mm	10
视场角/(°)	18
全息透镜焦距/mm	65
红、绿、蓝光栅角带宽/(°)	12

全色全息透镜由红、绿和蓝 3 个子光栅组成, 分别对应着每一种基色的光源. 考虑记录波长和再现波长一致的情况, 一种波长的成像模拟结果如图 6 所示.

图 6 中浅蓝线为不同视场的物点发出的光线, 红、绿和深蓝线分别为不同视场像的光线, 黑线为 HOE 的表面. 可以通过成像模拟过程设计全息透镜成像的重要参数. 眼盒是能够看到完整图像的范围大小, 在图 6 中定义成不同视场角像点的重叠区域. 根据不同视场角的物点的成像位置可以看出图像存在畸变, 比较图 6(a) 中 xz 平面和图 6(b) 中

yz 平面的成像距离, 可以看出系统存在像散, 与理论预测的结果完全一致.

由于全息透镜以衍射光学为原理成像, 存在较大的色差, 因此微显示器需要使用窄带宽的激光作为光源, 激光作为显示光源有较高的亮度和饱和度, 能够获得更大的显示色域.

3 全色全息透镜的 AR 系统

全色全息透镜的 AR 系统的光路示意图如图 7 所示. 其中, 满足 HOE 衍射条件的窄光谱激光光源通过匀光器件匀光照射到空间光调制器 DMD 上, 再通过准直成像透镜组中继成像到屏幕上, 最后通过 HOE 在后方成虚像, 来自真实场景的宽谱光不发生衍射直接透过 HOE. 人眼在眼盒区域可以同时看到虚拟图像和真实场景, 从而通过脑中信息融合得到增强现实效果. 根据光路示意图, 搭建了基于 HOE 的激光 AR 系统.

3.1 全色全息透镜的制作

根据第 2 节的模拟过程计算得到了全息透镜的口径和记录的波前, 搭建了如图 8 所示的全息记录装置.

为了保证相干长度, 红、绿和蓝光源使用的是高相干性的单纵模激光器, 记录波长分别是 639 nm (长春新产业光电技术有限公司), 532 nm (北京研邦科技有限公司) 和 473 nm (长春新产业光电技术有限公司). 3 束激光器通过 2 个二向色镜进行合束, 产生白光, 通过一个偏振分束器实现分振幅干涉, 并保证相同的线偏振态. 在 3 个激光器前方

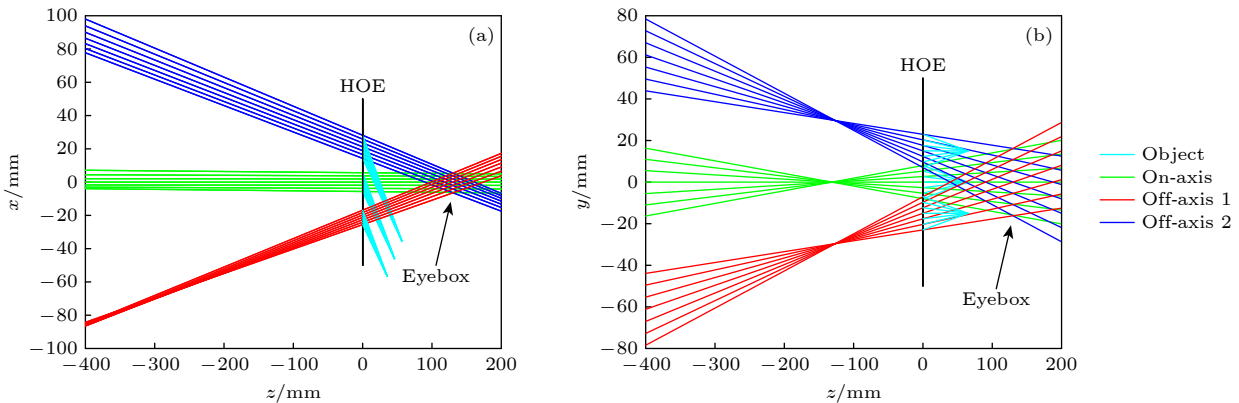


图 6 光线追迹的方式模拟成像效果 (a) 子午面 xz ; (b) 弧矢面 yz

Fig. 6. Simulation of the imaging process through ray-tracing: (a) Meridian plane xz ; (b) sagittal plane yz .

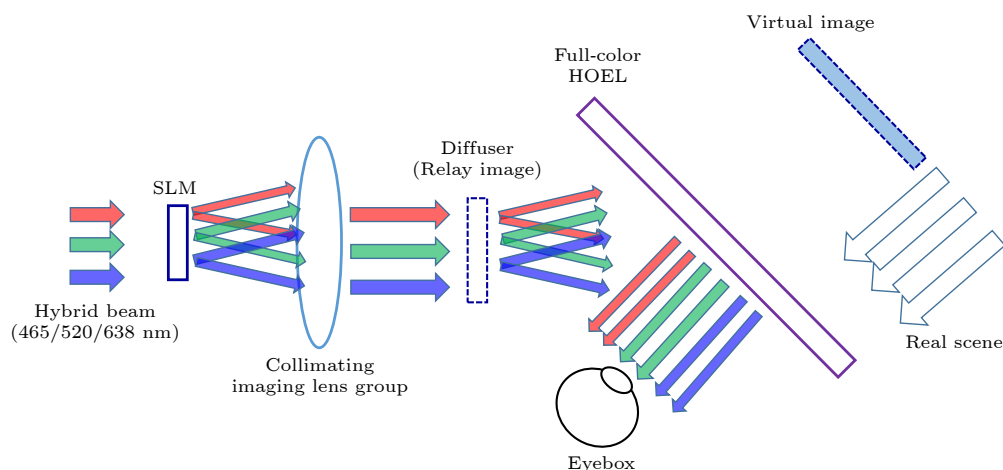


图 7 全色全息透镜 AR 系统示意图 (SLM, 空间光调制器; HOEL, 全息透镜)

Fig. 7. Schematic diagram of full-color AR system based on an HOE lens (SLM, a spatial light modulator; HOEL, holographic optical element lens).

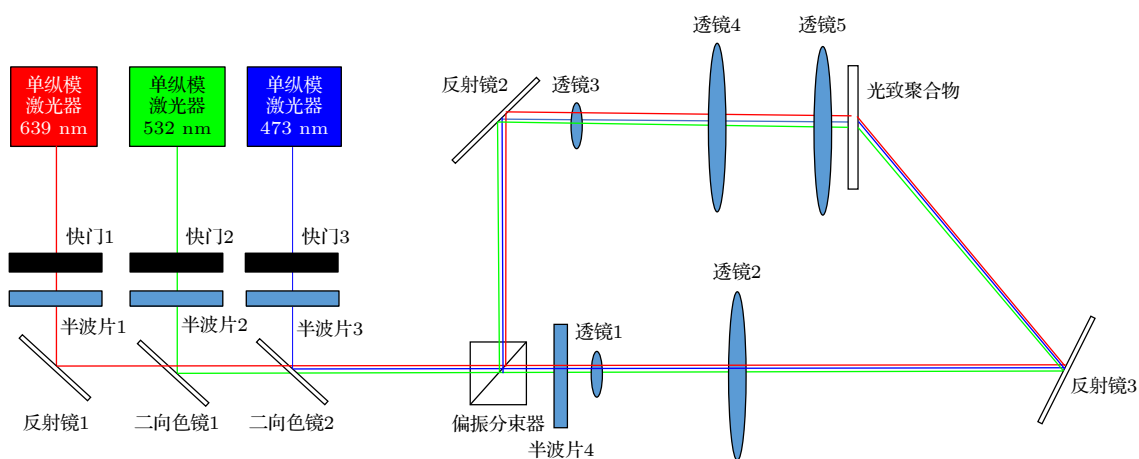


图 8 全色全息透镜的制作示意图

Fig. 8. Schematic diagram for fabricating a full-color HOE lens.

分别放置一个快门控制每一路的曝光时间. 使用每个激光器分路上的半波片调整激光器的偏振方向, 从而连续调整两路的分束比, 当照射在 HOE 上的功率密度相同时, 干涉最强, 得到最高的衍射效率. 两干涉臂分别通过一个望远镜系统进行扩束, 提升全息透镜的有效孔径. 信号光通过一个球面透镜 5 调制为球面波, 实现全息透镜的记录.

3.2 激光 AR 原型显示效果与光学性质

根据 3.1 节的示意图, 搭建了激光微投影与全色全息透镜相结合的激光 AR 系统的原型, 如图 9 所示, CCD 为电荷耦合相机.

使用的光源是高功率的半导体激光器, 红、绿和蓝波长分别为 638, 520, 465 nm, 通过光纤耦合到光棒中进行匀光, 照明到微投影机的空间光调制

器上, 由投影镜头输出图像, 通过准直投影透镜中继成像到屏幕上, 再通过 HOE 成像到 HOE 后方, 通过一个 CCD 模拟人眼进行拍摄. 可以通过水平

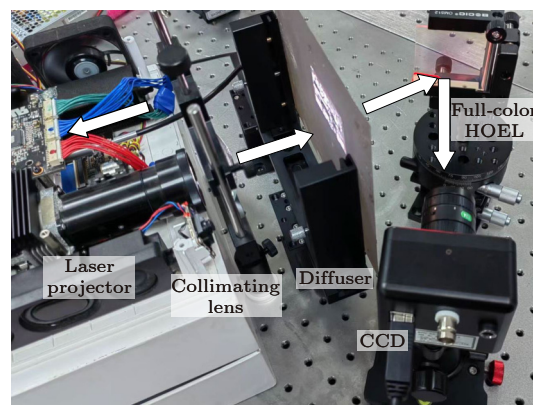


图 9 投影型 AR 系统的原型

Fig. 9. Prototype of projection-type AR system.

方向平移 CCD 的方式得到显示系统的眼盒大小, 再通过测量图像的大小得到系统的视场角. 通过 CCD 拍摄到的红、绿和蓝 3 色的图像如图 10 所示.

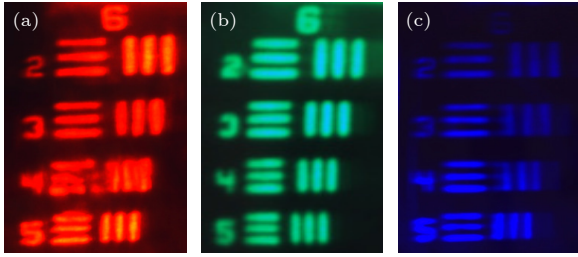


图 10 全色全息透镜成像的图像效果 (a) 红光; (b) 绿光; (c) 蓝光

Fig. 10. Image effect of full-color HOE lens: (a) Red light; (b) green light; (c) blue light..

通过序列曝光的方式记录了高衍射效率的单片全色 HOE, RGB 的子光栅的角度选择性曲线如图 11 所示.

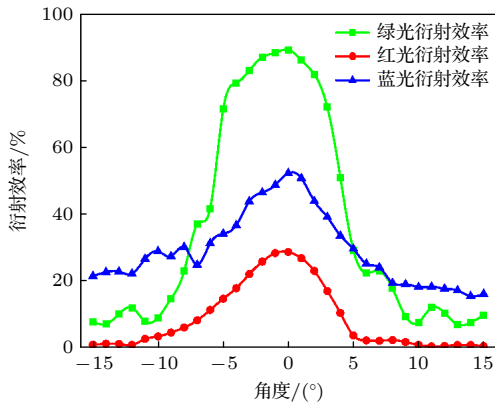


图 11 RGB 子光栅的角度选择性

Fig. 11. Angular selectivity of the RGB sub-gratings.

如图 11 所示, 绿光的峰值衍射效率为 89.0%, 蓝光为 52.0%, 红光为 28.0%, 得到平均峰值衍射效率为 56.7% 的全色 HOE, 已达到国际最高水平. 理想的情况下, RGB 3 个通道的峰值衍射效率应保持一致, 可以通过调整曝光时间来实现这一目的, 这将在下一步的工作进行优化. 其角度带宽为 12° , 足够保证系统的眼盒大小.

接下来对全息透镜成像的清晰度进行了评估, 使用对比度法分别对子午和弧矢方向的调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 进行测量, 使用 MATLAB 生成不同空间频率的余弦光栅图片, 由于红光的记录光和再现光的记录波长一致, 实验采用红光作为入射光进行测量, MTF 的测量结果如图 12 所示.

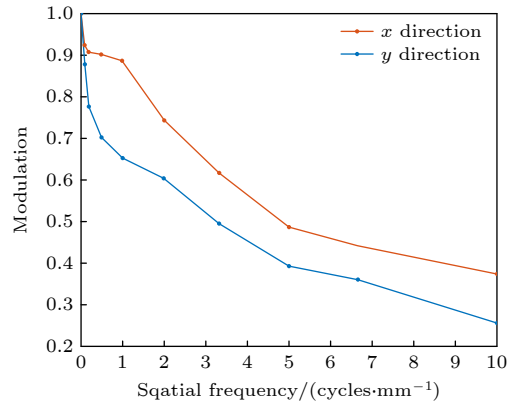


图 12 全息透镜成像系统的 MTF 曲线测量

Fig. 12. MTF curves measurement of HOE lens imaging system.

受限于测量投影仪的分辨率 (1080 p), 显示系统的最大空间频率不能超过 10 cycles/mm, 可以看出该系统 y 方向的成像效果优于 x 方向, 这是由于子午面离轴记录, 弧矢面同轴记录, 导致子午面轴外像差大于弧矢面. 以人眼能够分辨 30% 对比度的 MTF 为标准, 可以看出弧矢面的 MTF 值在空间频率为 10 cycles/mm 处仍大于 30%, 子午面的 MTF 值在 8 cycles/mm 处的值大于 30%, 显示系统基本满足人眼的分辨率需求.

激光有高光亮的特性, 与高衍射效率的全色 HOE 相结合可能会导致入射到人眼的亮度较高. 超过 3500 cd/m^2 的亮度会造成人眼接收光线感到吃力^[1], 因此在实际光学成像系统中需要考虑到总亮度的限制.

4 分析与讨论

本节主要对全色全息透镜成像系统的显示效果进行分析, 并分别提出优化方法.

4.1 单色成像畸变和像散的效果与优化方法

实验中, 全息透镜的像散效果如图 13 所示. 由图 13 可以看出, 子午面和弧矢面的像距不同, 这是因为全息透镜成像系统子午和弧矢面的等效焦距分别为 $f_x / \cos^2 \theta_x$ 和 $f_y / \cos^2 \theta_y$, 记录光束在子午面和弧矢面的倾斜角不同导致了像散. 像散的优化方法是通过在记录光路里使用柱面透镜, 通过改变信号光的位置参数, 使 x 和 y 方向拥有相同的等效焦距, 如图 14 所示.

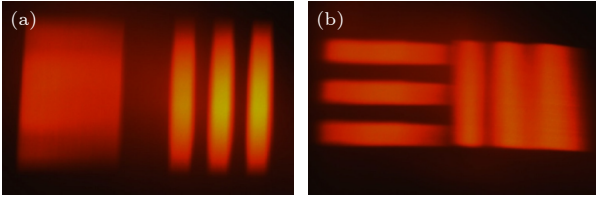


图 13 全息透镜的像散效果, 透镜聚焦于 (a) 子午像处和 (b) 弧矢像处

Fig. 13. Astigmatic of the HOE lens, focusing on (a) meridian image and (b) sagittal image.

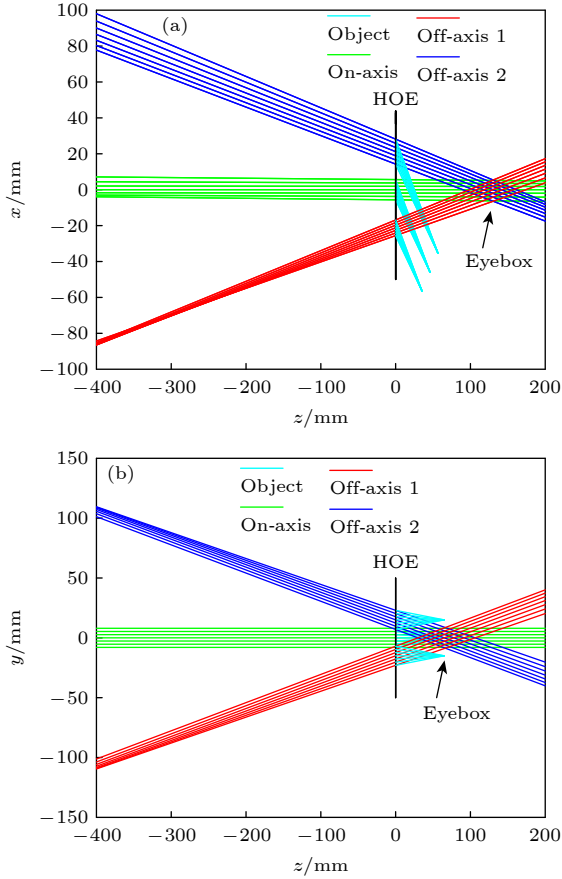


图 14 子午面和弧矢面的成像示意图 (a) 子午面 xz ; (b) 弧矢面 yz

Fig. 14. Imaging diagram of meridian plane and sagittal plane: (a) Meridian plane xz ; (b) sagittal plane yz .

通过 x 和 y 方向波前曲率的优化, x 和 y 方向的主光线成像位置相同, 均为无穷远处, 从而消除系统的像散.

实验中畸变的测量效果如图 15 所示, 可以看出系统存在一定的畸变, 但是总体效果可以接受, 这是因为系统的视场角较小. 针对于视场角较大的全息透镜成像而言, 需要对畸变进行消除.

这里提出一种基于自由曲面 HOE 的几何构造法来消除畸变, 如图 16 所示. 整体设计的思路如

下: 将整个 HOE 根据其视场分成 N 块, 在已知每一个视场物像的中心光线和边缘光线方向的几何关系下, 反推出对应的 HOE 表面位置的离散光栅矢量方向 $\mathbf{k}_g(k_{gx}, k_{gy}, k_{gz})$, 光栅矢量确定了局部光栅的方向和空间频率. 自由曲面的要求是将这些离散光栅矢量的分量通过光滑曲面的形式连接, 从而获得物像之间的连续共轭, 从而避免物像离散的情况, 具体的设计方法与单片式自由曲面设计的思路一致 [28]. 与传统的折反自由曲面不同的是, 自由曲面 HOE 的设计过程中需要考虑衍射效率, 否则会导致系统效率降低. 因此在曲面设计完毕后, 需要对光栅的布拉格条件进行优化, 实现高衍射效率的光栅分布. 每一个局部区域的记录波前可以通过方程 (3)—(6) 式进行反推, 指导自由曲面 HOE 的制作过程.

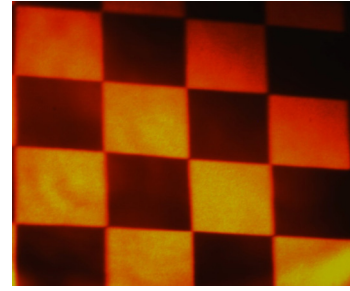


图 15 全息透镜的畸变效果

Fig. 15. Distortion effect of HOE lens.

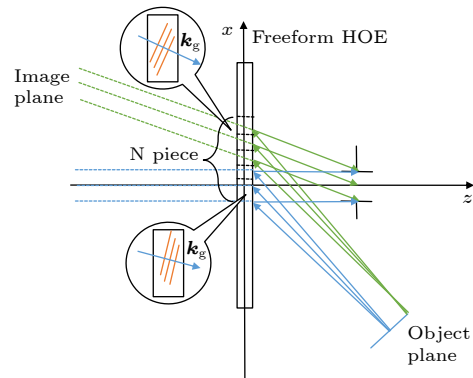


图 16 自由曲面 HOE 的几何构造设计方法示意图

Fig. 16. Schematic diagram of geometric construction design method of freeform HOE.

4.2 全色全息透镜的成像分析

除了存在上述单色成像问题之外, 实际的成像过程中还存在红、绿和蓝 3 个颜色图像的角度分离问题. 理论上全色全息透镜的 RGB 3 个子光栅成像的波前和衍射效率的分布也是一致的, 这样才能

保证每个观察区域内看到重合的 RGB 三通道图像从而合成不同的颜色. 然而, 实际系统中的记录光和激光微显示器的再现波长往往是不一致的, 工艺中的全息光致聚合物材料存在体缩效应, 这 2 个因素会导致进入人眼的 RGB 波前在空间中分离到不同的角度. 如图 17 所示, 红线是 R 通道图像, 绿线是 G 通道图像, 记录-再现的波长偏移量不同, 会引起 2 个图像的角度分离, 在空间中没有重合.

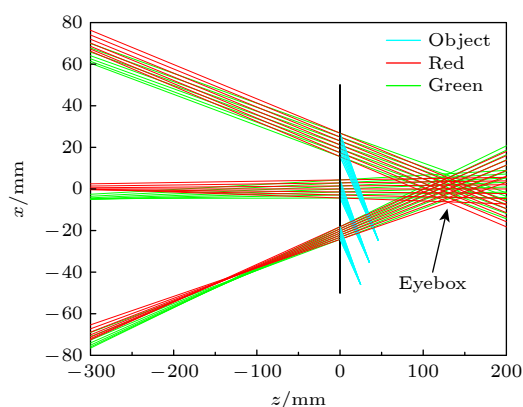


图 17 不同子光栅的成像过程 (其中红线、绿线分别为红光、绿光的成像过程, 青色线为物方光线)

Fig. 17. Imaging process of different sub-grating (red line represents red light, green line represents green light and cyan line represents light from the object).

为了解决这个问题, 需要对 RGB 三通道的记录过程中分别进行波前补偿, 将三通道的成像光束调整到一个方向上, 从而实现颜色、角度均匀的虚拟图像显示.

5 结 论

本文通过标量衍射理论得到了离轴全息透镜的共轭成像方程, 分析了全息透镜的离轴像差性质. 通过 k 矢量圆和光线追迹相结合的几何光学方法模拟了一个视场角为 18° , 眼盒为 10 mm 的 AR 系统. 制作了单片的全色全息透镜, 其平均峰值衍射效率为 56.7%, 达到国际最高水平. 将激光微投与全息透镜相结合, 搭建了 AR 系统原型, 得到了系统的畸变和像散效果实验效果, 与模拟的情况相一致. 并测量了系统的 MTF 参数, 其清晰度基本满足人眼的分辨率需求. 并提出了添加柱面透镜的方式保证子午面和弧矢面的光焦度一致以消除像散; 提出了设计自由形式的波前记录方式以消除畸变. 对于 3 个颜色通道之间图像不重合的问题, 提

出了记录过程中预先补偿的方法进行解决. 如果上述的问题能够一一得到解决, 由于其较好的图像均匀度和足够的视场角和视区范围, 全色全息透镜的技术路线将在近眼显示与车载抬头显示的应用中有更好的发展前景.

参考文献

- [1] Xiong J, Hsiang E L, He Z, Zhan T, Wu S T 2021 *Light: Sci. Appl.* **10** 216
- [2] Zhan T, Yin K, Xiong J, He Z, Wu S T 2020 *iScience* **23** 101397
- [3] Shi X G, Xue Z H, Li H H, Wang B J, Li S L 2021 *Chin. Opt.* **14** 1146 (in Chinese) [史晓刚, 薛正辉, 李会会, 王丙杰, 李双龙 2021 *中国光学* **14** 1146]
- [4] Yu C, Peng Y F, Zhao Q, Li H F, Liu X 2017 *Appl. Opt.* **56** 9390
- [5] Han J, Liu J, Yao X C, Wang Y T 2015 *Opt. Express* **23** 3534
- [6] Jin W J 2020 *M. S. Dissertation* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [金闻嘉 2020 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [7] Peng H C, Cheng D W, Han J, Xu C, Song W T, Ha L Z, Yang J, Hu Q X, Wang Y T 2014 *Appl. Opt.* **53** H177
- [8] Li G, Lee D, Jeong Y, Cho J, Lee B 2016 *Opt. Lett.* **41** 2486
- [9] Chang C, Bang K, Wetzstein G, Lee B, Gao L 2020 *Optica* **7** 1563
- [10] Liu A 2019 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Dongnan University) (in Chinese) [刘昇 2019 博士学位论文 (南京: 东南大学)]
- [11] Wu R, Sun M Y, Zhou S L, Qiao Z F, Hua N 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 234209 (in Chinese) [郭融, 孙明营, 周申蕾, 乔战峰, 华能 2020 *物理学报* **69** 234209]
- [12] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, Talha M M 2009 *Appl. Opt.* **48** 2655
- [13] Pulli K 2017 *Sid Symposium Digest of Technical Papers* **48** 132
- [14] Li G, Jeong J, Lee D, Yeom J, Jang C, Lee S, Lee B 2015 *Opt. Express* **23** 33170
- [15] Jang C G, Mercier O, Bang K, Li G, Zhao Y, Lanman D 2020 *ACM Trans. Graph.* **39** 184
- [16] Maimone A, Wang J 2020 *ACM Trans. Graph.* **39** 67
- [17] Jang C, Hong K, Yeom J, Lee B 2014 *Opt. Express* **22** 27958
- [18] Jang C, Lee C K, Jeong J, Li G, Lee S, Yeom J, Hong K, Lee B 2016 *Appl. Opt.* **55** A71
- [19] Lee S, Lee B, Cho J, Jang C, Kim J, Lee B 2017 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **29** 82
- [20] Li Y N Q, Yang Q, Xiong J H, Yin K, Wu S T 2021 *Opt. Express* **29** 42696
- [21] Xiong J, Yin K, Li K, Wu S T 2021 *Adv. Photonics Res.* **2** 2000049
- [22] Xie Y, Kang M W, Wang B P 2014 *Appl. Opt.* **53** 4206
- [23] Zhang Y N, Zhu X L, Liu A, Weng Y S, Shen Z W, Wang B P 2019 *Appl. Opt.* **58** G84
- [24] Shen Z W, Zhang Y N, Weng Y S, Li X H 2017 *IEEE Photonics J* **9** 7000911
- [25] Piao J A, Li G, Piao M L, Kim N 2013 *J. Opt. Soc. Korea.* **17** 242
- [26] Piao M L, Kim N 2014 *Appl. Opt.* **53** 2180
- [27] Piao M L, Kwon K C, Kang H J, Lee K Y, Kim N 2015 *Appl. Opt.* **54** 5252
- [28] Zhu J, Yang T, Jin G F 2013 *Opt. Express* **21** 26080

Augmented reality system based on full-color holographic optical elements lens*

Yang Yu-Hua¹⁾²⁾³⁾ He Long¹⁾²⁾³⁾ Deng Lin-Xiao¹⁾²⁾³⁾
 Zhu Li-Quan¹⁾²⁾³⁾ Gu Chun¹⁾²⁾³⁾ Xu Li-Xin¹⁾²⁾³⁾†

1) (*State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Department of Optics and Optical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

3) (*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230026, China*)

(Received 14 December 2022; revised manuscript received 15 March 2023)

Abstract

Holographic optical element (HOE) lens is an imaging element fabricated through recording wavefront by interference. Because of its advantages of small form factor and wavelength, angle selectivity and arbitrary wavefront formation, it has a good application prospect in augmented reality display. To make the system more compact, the HOE lens is adopted as an off-axis optical element. At the same time, according to diffraction principle, its wavelength response is more sensitive than those of traditional refractive and reflective optical elements. Thus the fabrication and design of a full-color HOE lens is a challenge to optimizing the free-space head-up display system. To systematically analyze the HOE imaging system, the conjugate relation between the object and image is derived by scalar diffraction theory. Then the Gaussian conjugate imaging equation is obtained and the off-axis aberration of distortion and astigmatism in the HOE imaging system are analyzed. In addition, A head-up display with field of view (FOV) of 18° and eyebox of 10 mm is simulated and its imaging process is visualized through the geometric optics method of k -vector diagram and ray-tracing. A full-color HOE lens with high diffraction efficiency is fabricated by interference. Its average peak diffraction efficiency is 56.7%, reaching a high level in the world. A prototype of augmented reality system is established by integrating laser pico-projector with HOE lens. The experimental results of distortion effect and astigmatism effect of the system are obtained, which are consistent with the simulation results. The modulation transfer function (MTF) parameter of the system is measured, and its definition basically meets the requirements of the human eyes for resolution. The aberration of the system is analyzed and the optimization method is proposed. To optimize the monochromatic image quality, an extra cylindrical lens is added to ensure the same optical power of meridian and sagittal plane to eliminate the astigmatism. Besides, a freeform wavefront is designed by the geometric construction method and forms a freeform HOE to deal with the distortion problem. The local recording freeform wavefront can be calculated by the imaging equation. When full-color HOE is applied to the display system, the images of three channels may separate in the space because of their different reconstruction wavelengths and angles. We propose a pre-compensation method of recording process to solve this problem. If these above-mentioned problems can be solved, due to its good image uniformity, sufficient field angle and eyebox area, the head-up display based on HOE lens with extra optical power will have a better application in augmented reality technology.

Keywords: holographic optical element, laser display, near-eye display, augmented reality

PACS: 42.15.Dp, 42.40.Eq, 42.40.My, 42.40.Pa

DOI: 10.7498/aps.72.20222388

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFF0307804).

† Corresponding author. E-mail: xulixin@ustc.edu.cn



基于全色全息透镜的增强现实系统

杨雨桦 何龙 邓林宵 朱立全 顾春 许立新

Augmented reality system based on full-color holographic optical elements lens

Yang Yu-Hua He Long Deng Lin-Xiao Zhu Li-Quan Gu Chun Xu Li-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 114201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20222388

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222388>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新材料器件为全息显示带来的新机遇

Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display

物理学报. 2018, 67(2): 024213 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172026>

简单结构超表面实现波长和偏振态同时复用全息显示新方法

A new method of implementing simultaneous multiplexing holographic display of wavelength and polarization state with simple structure metasurface

物理学报. 2021, 70(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201047>

面向显示应用的微米发光二极管外延和芯片关键技术综述

A review of key technologies for epitaxy and chip process of micro light-emitting diodes in display application

物理学报. 2020, 69(19): 198501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200742>

显示设备防蓝光模式和色域的关系

Relationship between anti-blue hazard mode and color gamut of display devices

物理学报. 2022, 71(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212356>

基于增强型视觉密码的光学信息隐藏系统

Enhanced-visual-cryptography-based optical information hiding system

物理学报. 2020, 69(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200496>

基于时间透镜系统的冲击脉冲产生与特性研究

Generation and characteristics of shock optical pulses based on a fiber-loop time-lens system

物理学报. 2019, 68(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190246>