

## 基于光波导的扩展眼盒全息近眼显示系统

于超<sup>1,2</sup>, 孟翔宇<sup>2</sup>, 江丽<sup>1</sup>, 蔡宏<sup>1</sup>, 毛慧<sup>1</sup>, 王锐<sup>2</sup>, 浦世亮<sup>1\*</sup><sup>1</sup>杭州海康威视数字技术股份有限公司海康威视研究院, 浙江 杭州 310051;<sup>2</sup>浙江大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310058

**摘要** 全息近眼显示系统受到空间光调制器(SLM)空间带宽积的限制,光学扩展量一般较小,在保持适当视场(FOV)时容易出现眼盒较小的情况,使得用户观察到的图像容易出现缺失。基于二维表面浮雕光栅(SRG)和光波导的扩瞳作用,在适当FOV下,实现了眼盒的二维连续扩展。基于随机梯度下降算法,利用计算全息显示系统生成目标图像,利用目镜将之准直,再利用耦合光栅将其耦合进光波导内。利用光线在光波导内传播时遇到耦合光栅后部分光会被耦合出射、部分光继续传播的特性,系统在两个维度上对光束宽度进行了拓展,实现了扩展的眼盒。该系统与RGB彩色激光照明和SLM时分复用结合时可以实现彩色显示。实验证实,该方案实现了在 $38.6^\circ$  FOV和20 mm的出瞳距下,大小为 $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 的扩展眼盒,可有效解决用户观察到的图像易缺失的问题。

**关键词** 全息; 计算全息; 近眼显示; 光波导; 扩展眼盒; 光瞳扩展

**中图分类号** O438.1

**文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221740

## 1 引言

增强现实(AR)技术在近几年获得了广泛的关注,作为其主要的硬件载体,近眼显示技术在近几年获得了较大的发展,主要的技术路线包括Birdbath、几何阵列波导、全息光波导<sup>[1-2]</sup>和表面浮雕光栅(SRG)波导等。计算全息显示是近年来学术界显示方向研究的热点之一。通过空间光调制器(SLM)对入射光束进行波前调制,计算全息显示可以实现一些常规显示无法实现的功能,如对显示图像深度的控制和对像差的动态校正等<sup>[3]</sup>。将计算全息用于近眼显示的技术路线一般被称为全息近眼显示,虽然还没有相关产品发布,但是由于计算全息显示的优良特性,故很多的公司和研究机构都在进行该方向的研究<sup>[4-9]</sup>。

目前计算全息显示存在的一个重要问题是,受限于SLM的空间带宽积,整个系统的光学扩展量较小,故其视场(FOV)和眼盒之间存在取舍<sup>[10]</sup>,即在维持一个合理的视场时,难以获得满足用户需求大小的眼盒,如微软公司在2017年的计算机图形图像特别兴趣小组(SIGGRAPH)会议上,报道了他们实现了 $80^\circ$ 的视场,但眼盒很小<sup>[3]</sup>。为了对眼盒进行扩展,研究人员主要提出了两类方案。第一类是通过主动器件,如二维振镜<sup>[11]</sup>、微机电系统(MEMS)<sup>[12]</sup>等,实现系统眼盒的偏移,再配合眼球追踪系统,确保用户的眼睛始终处于

一个较小的眼盒之内。第二类是通过被动器件实现系统出射光瞳的复制<sup>[12-13]</sup>,从而实现一个较大的眼盒,使得用户的眼睛在一定范围内移动时能够一直处于眼盒之内。

两类方案均有自己的优势。用主动器件的系统会有较高的能量利用率,有利于降低系统的功耗,从而实现较长的续航和更简单的热设计。为了达到较强的沉浸感,AR技术需要较低<sup>[14]</sup>的运动到显示延迟,而加入了眼球追踪后,这更加难以达成。使用被动器件则没有延迟方面的问题,其主要压力在于系统的光能利用率较低,故需要更高亮度的图像源,这就会带来功耗大和发热的问题。在To B业务中,尤其是在头盔形态下,近眼显示设备对于功耗和热设计方面的要求并不是十分苛刻的,但对延迟有较高的要求,故使用被动器件是较好的选择,这也是本文中使用的眼盒扩展方案。

国内外针对被动方案展开了一系列研究。Jang等<sup>[12]</sup>提出了一种名为光瞳移动全息光学器件的被动器件,当被不同角度的激光照明时,可形成不同位置和角度的照明光,从而形成不同位置的离散眼盒点,最终在约 $45^\circ$  (horizontal)  $\times$   $40^\circ$  (vertical)的视场下实现了大小为 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 的眼盒。Duan等<sup>[13]</sup>将两片非均匀体全息离轴透镜贴在透明基底正反面,使得每条光线被衍射两次,形成了两个独立的眼盒点,从而在 $80^\circ$ 视场下实现了大小为 $7.5\text{ mm} \times 5.0\text{ mm}$ 眼盒的全彩显

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2022-11-07; 录用日期: 2022-12-03; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 浙江省博士后科研项目择优资助(zj2019052)

通信作者: \*pushiliang.hri@hikvision.com

示。然而,这些方案实现的均为多个离散的眼盒,可能会出现人眼在某个位置时同时有两个或没有眼盒点进入瞳孔的情况<sup>[15]</sup>,造成亮度均匀度低、重影和视场丢失等问题。

为了解决该问题,本文研究了一种基于光波导的扩展眼盒全息近眼显示系统,利用SRG光波导的光瞳扩展特性,扩展了从SLM出射的显示光束的宽度,从而形成了较大且连续的光瞳,解决了适合视场下眼盒较小从而导致用户观察到的图像易缺失的问题,有利于提升用户体验,助力AR技术的广泛应用。

## 2 理论与设计

### 2.1 计算全息基础理论

计算全息显示系统中一般采用相干光作为光源,其发出的光波前可以表示为 $u_0(x, y)$ 。图像源一般采用基于液晶的反射型纯相位SLM,其上可以加载计算全息算法得到的相位分布 $\phi(x, y)$ ,逐像素地调制 $u_0(x, y)$ 的相位。相比于振幅型SLM,反射型纯相位SLM的优点在于能量利用率较高。经过SLM后的波前为 $u_0(x, y) \cdot \exp[i\phi(x, y)]$ ,经过一段距离的非涅耳衍射,在距离SLM面为 $z$ 的像面上生成分布为 $u_1(x, y)$ 的实像。光从SLM面到像面的传播过程,在小角度情况下,可以使用傍轴近似的菲涅耳衍射公式,而在大角度的情况下,则一般采用角谱理论。此外,在基础角谱理论中,SLM面和像面的采样距离相等,故非常适合两个面大小相等的情况,其公式描述为

$$u_1(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \left\{ u_0(x, y) \cdot \exp[i\phi(x, y)] \right\} H(f_x, f_y) \right\}, \quad (1)$$

$$H(f_x, f_y) = \begin{cases} \exp \left[ z \cdot \frac{i2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} \right], & \sqrt{f_x^2 + f_y^2} < \frac{1}{\lambda}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathcal{F}(\cdot)$ 为傅里叶变换; $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 为傅里叶逆变换; $H(f_x, f_y)$ 为波传播的传递函数; $\lambda$ 为入射光的波长; $f_x$ 和 $f_y$ 为空间频率。在本文研究的系统中,设置像面与SLM的采样大小相同,故在计算全息图时采用角谱理论。

### 2.2 全息图生成算法

目前计算全息图生成算法有多个类别,主要包括迭代式相位恢复算法、传统直接法、基于深度学习推衍的方法和数值优化算法等。

迭代式相位恢复类算法是最早应用于计算全息图的算法,典型的算法有Gerchberg-Saxton(GS)算法<sup>[16]</sup>及其各种变种、Yang-Gu算法<sup>[17]</sup>等。该类方法通过在

SLM面和像面之间反复进行基于傅里叶正反变换的迭代来获得目标图像对应的相位分布。由于难以直接构建初始相位分布,故该类算法一般会采用随机相位,但这往往会导致最终图像的随机噪声相对严重。

传统直接法的典型代表是DPAC(Double Phase-Amplitude Coding)<sup>[3]</sup>,该方法直接从目标图像计算SLM上的复振幅,并将每一个复振幅值拆分为两个纯相位值的和,再通过硬件或者特殊的额外相位分布将两者加起来<sup>[3]</sup>。该方法计算速度较快,但图像质量相对较低<sup>[7]</sup>。

目前研究的一个热点是基于深度学习推衍的算法<sup>[10,18-20]</sup>。该类方案通过全息图-显示图像对的数据集来训练神经网络,完成后可以直接从目标显示图像获得全息图。该类方案的推衍速度较快,可以实现实时显示,图像质量和推衍普适性也在逐步提高,但该方法对数据集的要求较高,且目前泛化性还存在一些问题。

本文采用的是随机梯度下降(SGD)算法,该方法是数值优化类算法中的典型算法。该类全息图生成算法将全息图的计算问题转化为一个数值优化问题,以相位分布为自变量,将全息图经过传播后得到的图像与目标图像的差异定义为损失函数,并通过数值优化算法来求解。Peng等<sup>[7]</sup>指出,相比于迭代式相位恢复算法(GS算法等),基于SGD的算法可以提供更好的图像质量,且该算法还可以与CITL(Camera in the Loop)框架结合,用于补偿实际系统与理想模型之间的偏差,使得实际显示的图像质量更高。

假设SLM的分辨率为 $M \times N$ ,则其上的离散化相位分布为 $\phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。令式(1)代表的从SLM面到像面的正向传播过程为 $\hat{f}$ ,目标图像振幅为 $a_{\text{target}}$ ,则优化问题可以描述为

$$\text{minimize}_{\phi} \mathcal{L}(s \cdot \hat{f}(\phi), a_{\text{target}}), \quad (3)$$

式中: $\mathcal{L}(\cdot)$ 为损失函数,这里使用的是均方根误差(RMSE),其定义为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_m \sum_n [a_{\text{target}}(m, n) - s \cdot a(m, n)]^2}{M \cdot N}}, \quad (4)$$

式中: $m$ 和 $n$ 为像素坐标索引; $a(m, n)$ 为通过正向传播过程计算得到的像面上 $(m, n)$ 位置的振幅; $s$ 为缩放系数。求解该问题,则可以获得所需的全息图。

为了更好地表征图像的质量,还引入了峰值信噪比(PSNR),其定义为

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \left[ \frac{(2^w - 1)^2}{E_{\text{MS}}} \right], \quad (5)$$

式中: $w$ 为信号的位宽,所提系统中为8; $E_{\text{MS}}$ 为均方误差(MSE),其值是式(4)中RMSE的平方。

分别用SGD和GS两种算法计算了城堡和USAF分辨率板两种图案的全息图,仿真结果和两种算法

PSNR 的对比如图 1 所示。其中,SGD 算法的学习率为 0.064。

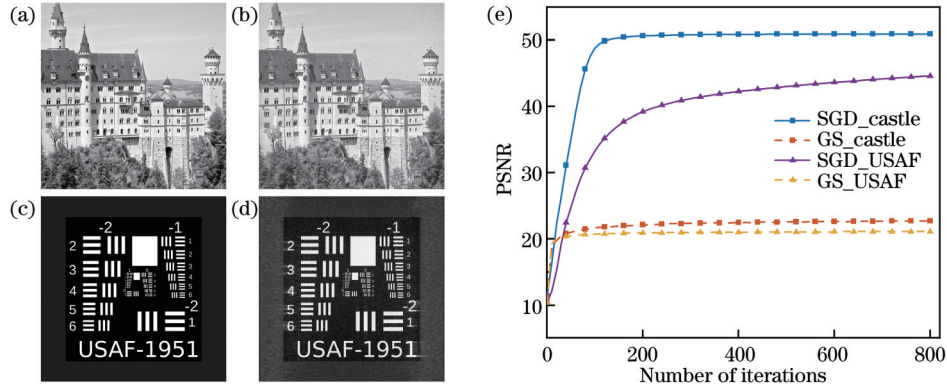


图 1 SGD和GS算法的仿真结果与PSNR对比。(a) SGD算法得到的城堡图仿真结果;(b) GS算法得到的城堡图仿真结果;(c) SGD算法得到的USAF分辨率板图仿真结果;(d) GS算法得到的USAF分辨率板图仿真结果;(e)两种算法PSNR对比  
Fig. 1 Simulation results and PSNR comparison of SGD and GS algorithms. (a) Simulation result of castle image using SGD algorithm; (b) simulation result of castle image using GS algorithm; (c) simulation result of USAF resolution chart image using SGD algorithm; (d) simulation result of USAF resolution chart image using GS algorithm; (e) comparison of PSNR between two algorithms

从图 1(a)与图 1(b)和图 1(c)与图 1(d)的对比可知,GS算法得到的结果中有较明显的随机噪声,SGD算法得到结果则比较平滑。从图 1(e)可知,SGD算法与GS算法的收敛速度接近,但可以获得远高于GS算法的图像质量。因此,SGD算法是较好的选择。

### 2.3 光学扩展量

显示系统的光学扩展量是能通过该系统的光束的面积和其所占立体角的积分,相应的表达式为

$$E_{\text{tendue}} = n_0^2 \iint \cos \theta dA d\Omega, \quad (6)$$

式中: $n_0$ 为周围环境的折射率,空气中其值约为1; $A$ 为光束的面积; $\Omega$ 为光束占据的立体角; $\theta$ 为面法线与立体角的夹角。

在近眼显示系统中,光学扩展量主要与图像源芯片的大小和发光孔径角有关。常规的显示系统一般拥有较大的发光孔径角,如在常规的AR光学引擎中,图像源上每个像点的发光孔径角一般在 $20^\circ$ 以上。然而,在计算全息显示系统中,一般入射到SLM上的激光是准直的,像面上像点的发光半角最大为SLM能产生的一级衍射光的角度。若SLM的像素大小为 $p$ ,则一级最大衍射角 $\theta_m$ 为

$$\theta_m = \arcsin(\lambda/2p), \quad (7)$$

目前常用的SLM像素大小一般在几个微米,以 $8 \mu\text{m}$ 为例,当入射光波长为 $532 \text{ nm}$ 时,像点的发光孔径角 $2\theta_m$ 为 $3.81^\circ$ ,远小于常规显示系统。

为描述简便,这里考虑二维情况,计算全息显示系统的光学扩展量为

$$E_{\text{tendue}} = n_0 M p \int_{-\theta_m}^{\theta_m} \cos \theta d\theta = 2n_0 M p \sin \theta_m, \quad (8)$$

式中: $M$ 为SLM的像素个数,也为SLM的空间带宽积<sup>[21]</sup>。

将式(7)代入式(8)中可得

$$E_{\text{tendue}} = \frac{2n_0 M p \lambda}{2p} = n_0 M \lambda, \quad (9)$$

由此可知,计算全息显示系统可以提供的光学扩展量主要与SLM的像素数有关,在不希望系统体积较大的情况下,主要的提升手段为缩小像素大小,目前已经有厂家推出像素大小为 $3.74 \mu\text{m}$ 的SLM,分辨率由原本的 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 上升到 $4160 \text{ pixel} \times 2464 \text{ pixel}$ <sup>[12]</sup>,已经逼近目前工艺的极限,但光学扩展量仍然偏小。

因此,进一步拓展计算全息显示系统光学扩展量的主要方法为扩大光束直径。文献[13]通过增加一片体全息光栅使得光束数量变为原来的二倍,从而使光束的宽度翻倍。然而,这种方案形成的是两个不连续的分立光束,并且受到全息器件透过率的限制,故较难堆叠多片形成多个光束。

本研究采用基于SRG光波导的方案对光束宽度进行扩展,实现了系统光学扩展量的扩大。相比于文献[13]中的方案,主要的优点为:1)由于光波导厚度较小,其扩展的光束可以是连续的,故可以消除用户眼睛正好处于光束间隔内视场丢失的风险;2)扩展出的光束数量可以较多,获得了更宽的光束,从而可以形成更大的眼盒;3)具备同时实现两个维度光束展宽的能力,从而使得眼盒在 $x$ 方向和 $y$ 方向两个维度上均有扩展。

### 2.4 二维光瞳扩展

基于SRG光波导进行扩瞳的主要原理如图2所示。图像源的光被耦入光栅耦合进入光波导,并以全反射的形式向前传播,每当光线入射到耦出光栅上时,光栅会将一部分光耦合出射,由于光栅的衍射效率较

低(一般不超过 10%),故剩下的一部分光会继续以全反射的形式在波导中传播,当光线再次入射到光栅上时,会重复以上过程,从而光束的宽度得到了扩展。耦合出射的光束间的间距与光波导的厚度有关,当光波导的厚度较小时,可以实现连续的出射光束。

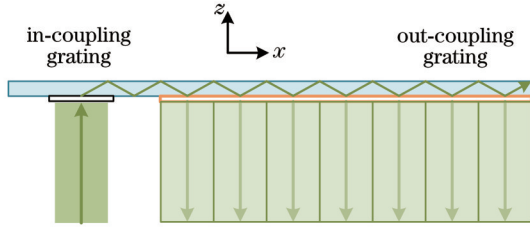


图 2 光波导扩瞳原理

Fig. 2 Principle of pupil expansion of waveguide

配合不同的光机,扩瞳技术可以分为一维扩瞳和二维扩瞳两种<sup>[22]</sup>,目前为了尽量降低投影光机的体积,一般采用二维扩瞳技术。所设计的系统采用基于二维 SRG 和光波导的二维扩瞳方案,其原理如图 3 所示。光波导只包含耦合光栅和耦出光栅两个光栅,其中耦合光栅一般为高衍射效率的一维非对称光栅(如闪耀光栅、倾斜光栅等),耦出光栅为二维光栅。图像源输入的图像光被耦合光栅耦合进波导后,以全反射的形式向前传播,在入射到耦出光栅上时,由于其在两个维度上均具有周期性,因此入射光会在两个维度上产生多个衍射级次,如  $R_{-1,+1}$ 、 $R_{-1,-1}$ 、 $T_{-2,0}$  等,其中  $R$  和  $T$  代表反射和透射,下角标中的两个数字分别代表在  $x$  方向和  $y$  方向的衍射级次。这些级次中有些可以离开波导,进入用户的视野,有些则使得光线向两侧转折,剩下的则继续向前传播。由于  $R_{-1,+1}$ 、 $R_{-1,-1}$  和  $R_{0,0}$  三个级次一般是衍射效率最高的,因此光传播的主要能量会在  $xy$  平面内形成类似于鱼骨的路径,并在路径上被耦出光栅耦合出射。

二维光栅的微结构可以是任意形状,此处以矩形为例,二维光栅的微观形貌如图 3 右侧图所示。微结构单元(这里为矩形)一般为六方格子分布,每个微结构单元和其周围的 4 个单元的 1/4 可以视为一个重复周期,如每个虚线框所示,其在两个方向的周期分别为  $T_x$  和  $T_y$ 。

一般来说,在二维光栅中,如果耦合光栅的周期为  $T_{in}$ ,则耦出光栅在两个方向的周期为

$$\begin{cases} T_x = 2T_{in} \\ T_y = 2T_{in}/\sqrt{3} \end{cases} \quad (10)$$

耦合光栅的周期需要根据入射光的波长、需要耦合入图像的角度范围、光波导厚度和衍射效率等因素来确认,一般先通过矢量图<sup>[22]</sup>进行分析。

对于  $40^\circ$  视场的光波导,若采用 1.8 及以上折射率的波导,则一般采用两层可以实现,一层传输蓝光视场和部分绿光视场,另一层传输红光视场和另一部分绿

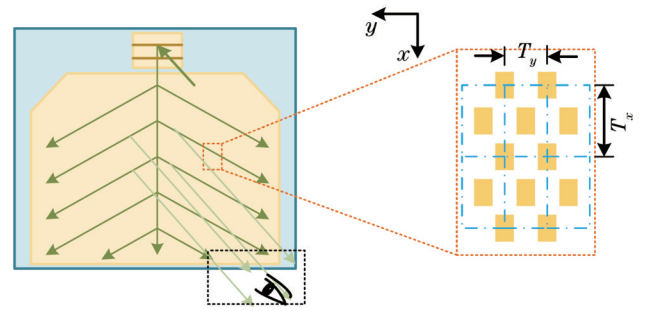


图 3 基于二维表面浮雕光栅和光波导的二维扩瞳原理示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional pupil expansion based on two-dimensional surface relief grating and waveguide

光视场,最终组合成完整的全彩视场。

对于蓝绿色光波导,主要考虑完整传播蓝光视场,并尽量传播绿光视场。经过矢量图分析可知,当耦合周期大于 331 nm 时,蓝光的边角视场会因为无法满足全反射条件而缺失。另一方面,光栅周期越大,光波导能够传播的绿光视场越大,因此蓝绿层周期选择 331 nm。

对于红绿色光波导,主要考虑完整传播红光视场,并且要尽量保证可以传播在蓝绿层波导中全反射角过大的绿色视场。此处,全反射角过大指全反射步长过大,会使得出射光瞳不连续。例如,当光瞳直径  $D$  为 4 mm、波导厚度  $d$  为 1 mm 时,最大反射角  $\theta_{TIRmax} = \arctan(D/2d)$  为  $63.4^\circ$ ,而绿光  $x$  方向角度为  $0^\circ$ 、 $y$  方向角度为  $17.5^\circ$  的视场在蓝绿层中的全反射角为  $63.5^\circ$ ,此时全反射角过大,因此需要红绿层尽量保证该视场可以传播。经过矢量图分析以后发现,若想保证这一点,则需要红色层的周期小于 420 nm,但此时红光的部分视场的全反射角过大。若要保证红光所有视场的全反射角在目标范围内,则周期需要大于 450 nm。因此,两者无法同时满足。考虑到人眼的孔径一般有 3 mm,故可以对光瞳的连续性要求有一定的放宽,两者妥协,则取红绿层耦合光栅的周期为 435 nm。

此时红绿层中,红光和绿光中心视场的全反射角分别为  $54.6^\circ$  和  $42.0^\circ$ ,以耦合光栅和耦出光栅中心距离为 25 mm 为例,其全反射次数约为 9 和 14。此时蓝绿层中,蓝光和绿光中心视场的全反射角分别为  $48.2^\circ$  和  $61.6^\circ$ ,相应的全反射次数约为 11 和 7。

耦合光栅的大小和图像源出瞳的大小有关,系统中只需要图像源出瞳大于 1 mm。耦出光栅的大小与视场角大小、眼盒大小和出瞳距都有关系,相应的关系可以表示为

$$\begin{cases} S_x = l_{eyerelief} \cdot \tan(\theta_{FOV,x}/2) \cdot 2 + a_{EB,x} \\ S_y = l_{eyerelief} \cdot \tan(\theta_{FOV,y}/2) \cdot 2 + a_{EB,y} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:  $S_x$  和  $S_y$  为耦出光栅在两个方向上的长度;  $l_{eyerelief}$  为出瞳距的大小;  $\theta_{FOV,x}$  和  $\theta_{FOV,y}$  为两个方向的视场;  $a_{EB,x}$  和  $a_{EB,y}$  为眼盒在两个维度上的大小。对于  $40^\circ$  视

场角的系统,在 16:9 下,两个方向的视场约为  $35^\circ(y) \times 20^\circ(x)$ 。此时,在  $8\text{ mm}(y) \times 6\text{ mm}(x)$  眼盒、 $20\text{ mm}$  出瞳距下,  $S_x$  和  $S_y$  分别为  $13.05\text{ mm}$  和  $20.61\text{ mm}$ 。

通过扩瞳,不同视场的光线在出瞳距处会形成共同区域,从而形成眼盒,如图 4 所示。假设 A、B、C 三点为像面上三个不同视场对应的像点,由于三点发出的光的孔径角较小,被透镜准直后,光束的口径也相对较小,故用户在 P1~P3 三个位置进行观察时,只能分别看到 A、B、C 三点,而不能同时看到三个点,进而看到的画面不完整,眼盒大小为 0,如图 4(a) 所示。当利用光波导进行扩瞳时,情况则不同,如图 4(b) 所示。三个不同的像点对应的光束宽度都较大,在用户眼睛处形成了较大的公共区域(眼盒),用户在该区域内 P1~P3 位置均可以观察到完整的 A、B、C 三点,即可以看到完整的显示图像。

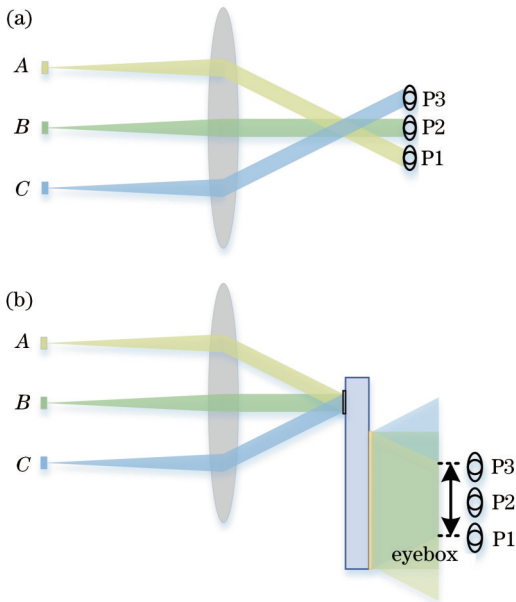


图 4 使用光波导扩展眼盒原理图。(a)没有波导的情况;  
(b)有光波导的情况

Fig. 4 Schematic diagram of expanding eyebox using waveguide. (a) Case without waveguide; (b) case with waveguide

### 2.5 光路设计

所设计扩展眼盒全息近眼显示系统的原理图如图 5 所示。

在光源方面,由于相干性太强的激光容易导致显示图像中出现明显的激光散斑,从而降低了显示图像的质量,使得用户体验变差,故系统中选择了相干性稍低的半导体激光器。同时,为了实现彩色显示,这里选用 RGB 光纤激光器。激光器出射的光被准直镜准直,并通过一个消偏振分光棱镜(BS)入射到纯相位 SLM 上。经过相位调制后的光波通过 BS 的反射在像面上形成实像。该实像中每个点的发光角很小,在没有漫射体(如漫反射屏)的情况下,用户难以看到完整的图

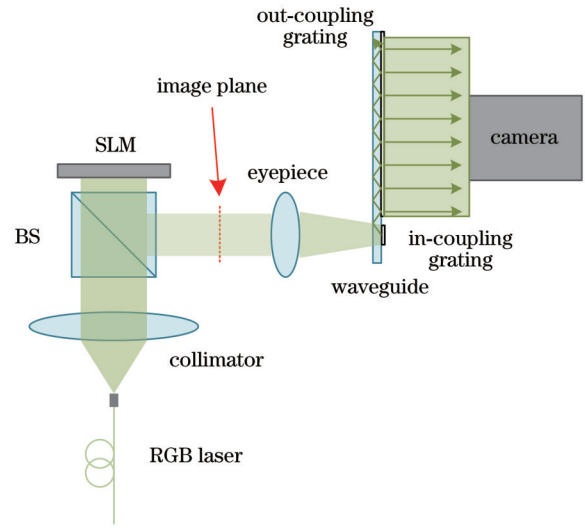


图 5 系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of designed system

像。此外,这里的实像尺寸一般也较小,难以直接提供给用户观看。因此,本系统通过使用一个短焦目镜将该实像成像到无穷远处,将位置信息转化为角度信息,并使像的空间尺度减小,从而可以更方便地将像由耦合入光栅耦合进入光波导中。

由于计算全息显示系统可以提供的图像在  $x$  维度和  $y$  维度的光学扩展量均较小,且人眼的瞳孔直径也比较小,故需要选择可以实现二维扩瞳的光波导。同时,为了实现  $40^\circ$  视场角的彩色显示,也需要该光波导支持彩色显示,并且视场角不小于  $40^\circ$ 。最后,要求该光波导的出瞳距不小于  $20\text{ mm}$ ,眼盒大小不小于  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 。

携带图像信息的光线在波导中传播,在二维耦合光栅的扩瞳作用下,每个视场的光线以降低能量为代价较大地扩展了光束的宽度,使得各个视场有较大的共同区域,从而形成眼盒。最后,用相机模拟人眼,拍摄用户可以观察到的强度图像。

### 2.6 二维扩瞳对计算全息显示的影响分析

扩瞳时同一个光束会被光波导和耦出光栅逐渐分为多个光束,在耦出光波导时,这些光束的角度均一致,相邻两个光束的侧向移动距离与光波导的厚度和该视场的光线在光波导内传播的角度有关。当光束本身较宽、光波导较薄并且光波导内光线传播的角度较小时,就可能发生相邻光束产生重合的情况。对于常规的以 LED 为光源的显示系统来说,相邻光束重合不会造成问题,但若光源为激光光源,由于其具有相对较高的相干性,可能发生干涉从而影响光强分布,故需要进一步分析。

从角谱理论的观点来看,计算全息显示系统中传播的图像可以被拆解为沿着不同方向传播的平面波前的叠加,而像面上的像点则是各个方向传播波前叠加的结果。在图 5 所示的系统中,像面与相机的传感

器是共轭面,若将短焦目镜和相机的镜头视为理想透镜,因为光波导是一个光焦度为0的系统,则经过像面上某一点的不同平面波之间的相位差在传播到相机的传感器时将保持不变,故原本相互加强的亮点仍然加强,原本相消的暗点也将保持相消。

当相邻的两个耦出光束相互叠加时,可以看到,在到达相机的传感器时,后耦出的光束将比前面耦出的光束的光程多一个全反射的长度。假设视场全反射角为 $\theta_{\text{TIR}}$ ,光波导厚度为 $d$ ,波导折射率为 $n_1$ ,则两相邻光束的光程差为

$$l = \frac{2dn_1}{\cos \theta_{\text{TIR}}}, \quad (12)$$

对两边求导可得,

$$\Delta l = l \cdot \tan \Delta \theta_{\text{TIR}}, \quad (13)$$

故因全反射角不同而形成的干涉条纹的角度周期 $\theta_{\text{T}}$ 满足

$$\lambda = l \cdot \tan \theta_{\text{T}}, \quad (14)$$

以中心视场为例,在常规设计下,一般其全反射角在 $53^\circ$ 附近,当光波导折射率为1.8,厚度 $d$ 为1 mm,波长 $\lambda$ 为524 nm时, $\theta_{\text{T}}$ 为 $0.83'$ ,对应的视场角周期也大体与此值接近。如此小的角度,人眼是无法分辨的,因此不会对图像质量产生较大影响。当全反射角增大时,全反射步长增加,相邻的两个耦出光束将逐渐没有重合的部分,进而也不需要考虑该问题。因此,当虚像在无穷远时,二维扩瞳不会对计算全息显示的图像质量产生较大的影响。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验系统搭建

搭建的实验系统如图6所示,其中插图光波导附近的局部放大图。

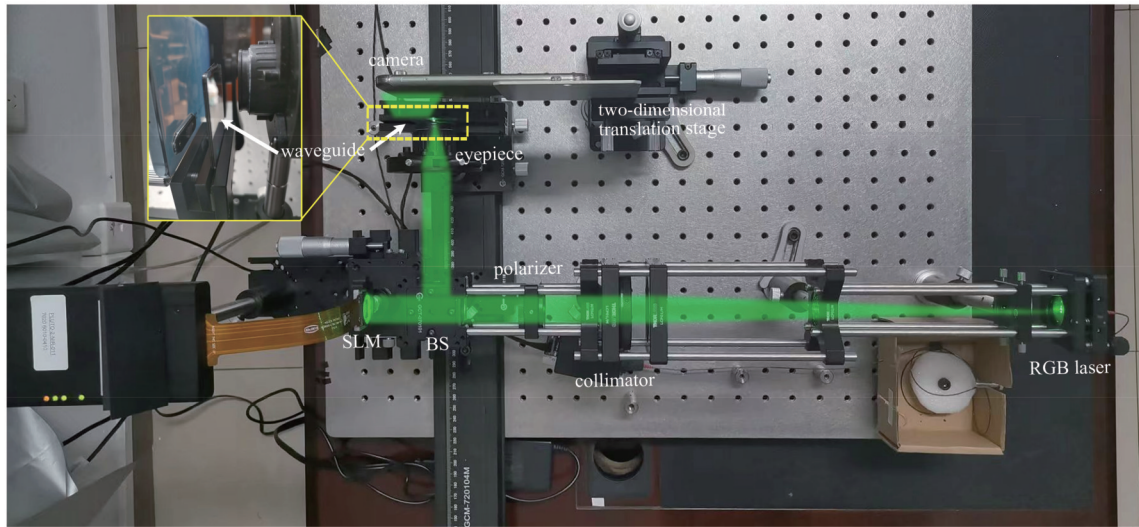


图 6 实验系统图

Fig. 6 Experimental setup of designed system

这里激光器采用的是 FISBA READYBeam RGB 光纤激光器,其体积非常小,且功耗较低,以后有望整合到穿戴式设备中,其中三个激光器的主波长实测值为 638、524、444 nm。为了保证入射 SLM 光斑的均匀性和对三色都有较好的准直效果,选择口径为 200 mm 的双胶合透镜作为准直透镜,取中间的一部分作为入射光,以提高入射光与理想平面波的近似程度。当然也可以选择较小口径的准直透镜,但需要加上 CITL 优化框架,以获得较好的图像质量。为了提高 SLM 输出图像的对比度,在 BS 前方放置了一片线性偏振片,以提高入射光的偏振性。

系统选用的 SLM 是 HOLOEYE 公司生产的 PLUTO SLM,像素大小为  $8 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ ,像面尺寸为  $15.36 \text{ mm} \times 8.64 \text{ mm}$ 。短焦目镜选择的是焦距为 11.5 mm 的目镜,

设置像面与 SLM 采样相等,为实现对角为  $40^\circ$  左右的视场,采用分辨率大小为  $700 \text{ pixel} \times 700 \text{ pixel}$  的图案。

根据第 2 章理论分析得到的光波导参数需要满足的条件,本系统中的光波导采用的是上海鲲游光电科技有限公司的扶摇系列彩色光波导,其支持二维扩瞳,视场角为  $40^\circ$ ,并且支持全彩色显示。同时,该光波导的眼盒大小为  $18 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ,出瞳距为  $15 \sim 25 \text{ mm}$ ,耦出光栅的尺寸为  $26.3 \text{ mm} \times 24.5 \text{ mm}$ ,这几项核心参数均能满足所设计的系统的需求。

考虑到用户的瞳孔大小一般约为 3 mm,这里选择的相机焦距为 5.69 mm,  $F$  数为 1.8,入瞳孔径为 3.16 mm。此外,为了模拟用户较为舒适的使用距离,这里相机与波导片间的距离(出瞳距)设置为 20 mm。

#### 3.2 显示效果验证

基于图6所示的实验系统,先对显示绿色图像进

行了验证,测试图像采用的是常用的 USAF-1951 分辨率测试板,实验结果如图 7 所示。



图 7 绿色分辨率板显示结果

Fig. 7 Displaying result of resolution chart in green

可以看出,整体显示效果较好,尤其是图像的细节还原得较好,中心最密的水平和垂直条纹都可以区分。此外,通过相机视场标定,测得分辨率板对相机的张角,即系统的对角视场为  $38.6^\circ$ 。

随后,又验证了该系统的彩色显示效果,分别用红绿蓝三色显示了“Z、J、U”三个字母。由于本系统显示彩色图像的原理为时分复用,因此分别独立采集了红绿蓝三色的图片,合成后实际的显示结果如图 8 所示。与图 7 类似,系统较好地显示了三个字母,边缘细节也较为锐利。

### 3.3 光波导二维扩瞳结果

为了确认光波导二维扩瞳对眼盒的影响,对是否



图 8 彩色显示效果

Fig. 8 Displaying result of color image

有光波导的两种系统的眼盒进行了测试。首先,测试了没有光波导的情况,即在图 6 所示的光路中去除了光波导,并将相机的光轴与短焦目镜的光轴对齐,两者之间的距离保持为 20 mm。利用精密二维平移台,在  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的范围内均匀地采样了 9 个点,横向和纵向采样点均为  $0, \pm 2\text{ mm}$ ,实验结果如图 9 所示。

可以看到,与图 4(a)所示的理论预测结果一致,在没有波导的情况下,用户在不同的位置只能看到不同视场范围内的图像,且没有任何位置可以看到完整的图像。出现该现象的原因是各个视场对应的光线在目镜出瞳处空间上是重合的,但离开出瞳后,各个视场的光线因角度不同而在空间上各自分开。人眼的瞳孔直径较小,当人眼与目镜的出瞳在沿着光轴方向( $z$ 方向)有一定距离时,就难以接受到全部视场的光线,故

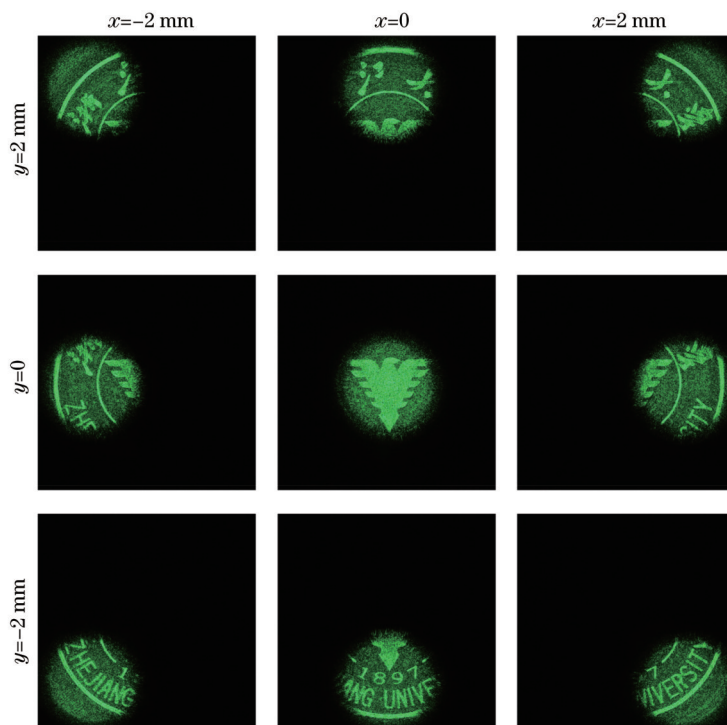


图 9 没有波导时在不同位置拍摄的结果

Fig. 9 Results captured at different positions without waveguide

看到的视场会有所缺失。若减小该距离,则视场会变大,当人眼到达目镜的出瞳位置附近时,则可以看到全部的视场。另一方面,由于每个像点的发光角度较小,故在目镜出瞳位置处实像对应的出瞳大小只有不到 1 mm。因此,即使人眼沿着光轴移动到了出瞳位置,只要在  $xy$  平面偏离光轴超过人眼半径的距离(约

2 mm),就会出现明显的视场缺失。

随后,继续验证了有波导存在的情况。在  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  范围内连续且均匀地采样了 15 个点,横向采样点为  $0, \pm 2, \pm 4\text{ mm}$ ,纵向采样点为  $0, \pm 3\text{ mm}$ ,在出瞳距为 20 mm 处,拍摄的结果如图 10 所示。

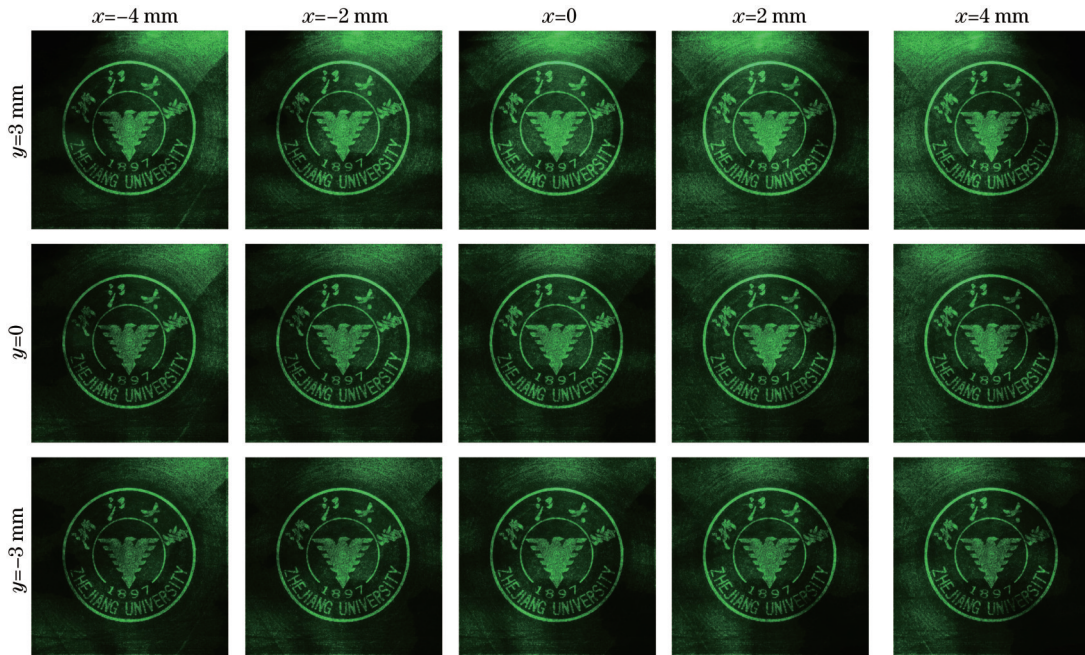


图 10 有波导时不同位置拍摄的结果

Fig. 10 Results captured at different positions with waveguide

基于以上实验结果的对比可以确定,采用基于光波导的方案可以有效提升全息近眼显示系统的眼盒大小。

### 3.4 AR 效果验证

本系统最终希望可以应用于 AR 显示场景中,故

对其虚拟和现实结合显示的效果进行了验证。由于图 6 系统中短焦目镜的机械支撑结构会遮挡部分视野,故在短焦目镜后使用一个三角棱镜将光路转折  $90^\circ$ ,以获得一个无遮挡的视野,AR 显示实验系统和显示结果如图 11 所示。

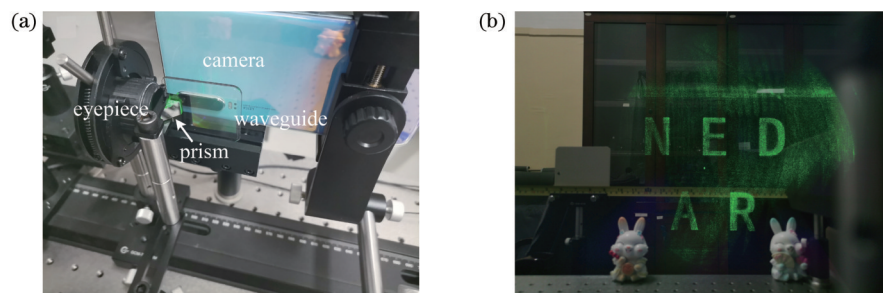


图 11 AR 显示实验系统及显示结果。(a) AR 显示实验系统光波导附近局部放大图;(b)虚拟和现实结合的 AR 显示结果图

Fig. 11 Experimental setup and display result of AR display test. (a) Enlarged view around waveguide in experimental setup of AR display test system; (b) result of AR display combining virtual and real scenes

可以看出,本系统可以使得波导后方的真实场景透过波导被用户看见,也同时显示了虚拟场景,并将之叠加在真实场景上。

此外,通过该实验也可以从另外一个角度获得系统实际显示的虚拟场景的视场角。在图 11 中,两只兔子玩偶分别置于虚拟显示场景的左右两侧边缘,两者

的距离约为 254 mm,相机到玩偶的距离为 520 mm,视场比例为 1:1,由此计算可得,对角视场为  $38.8^\circ$ ,与通过相机视场标定得到的结果基本一致。

### 3.5 杂散光分析

从图 7 可以看出,图像上方有较为明显的亮点杂散光,这是由波导造成的。由图 5 可知,计算全息显示



系统输出的实像被目镜聚焦后入射到耦入光栅上,并被其耦合入波导中,再向着耦出光栅的方向传播。在传播的过程中,一些光会逐渐耦出波导,故在波导内传播的能量是逐渐递减的,越远离耦入光栅能量越低。因此,在耦出光栅接近耦入光栅处,光线的能量是最强的。如果此处的光波导上有一些缺陷,如光波导上有指纹等污渍,或者是波导的玻璃不均匀,又或是此处光栅存在一定的缺陷,则都会导致较为严重的散射,相应的表现就是这里容易产生较多的背景杂散光。

图 10 中也可以观察到类似的现象。当观察点靠左时,由于图像源的光线从右方传过来,因此右上方会有较强的杂散光,而当观察点在右侧时,则正好相反,可以看到左上方有较强的杂散光。同时,随着观察点向下移动,能观察到的杂散光的能量也在逐渐降低。

图 7 和图 8 中较为均匀的背景噪声的主要来源为零级光。由于 SLM 的衍射效率有限,故整个 SLM 面上都有部分入射光没有被调制,而直接反射。在经过目镜后,同一角度不同位置的零级光会变成各个角度的零级光,并被耦合进入波导中,随后在耦出光栅上出射,形成各个视场都有的均匀背景。该问题一般可以通过加入 4f 系统,并使用离轴光路或者滤波来解决。

### 3.6 均匀度分析

显示图像的亮度均匀度也是显示性能中比较重要的一个指标。考虑到计算全息显示与传统显示不同,它是通过 SLM 调制波前进行干涉形成图像的,若要与传统显示测试均匀度时类似,只是显示一幅均匀无图案的画面,则只需要将 SLM 的所有相位置为 0 即可,但这与全息显示正常工作状态有较大的差异。因此,为了更好地测试计算全息显示正常工作时的均匀度,参考传统显示的均匀度测量方法,在整个显示范围内,均匀地采样了 9 个点<sup>[23]</sup>,并在每个点的位置上放置了字符“AR”。随后,计算了全息图,并进行了显示结果的测试,结果如图 12 所示。

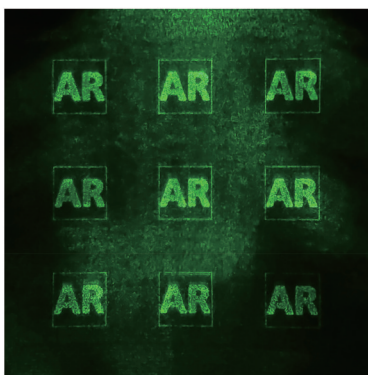


图 12 均匀度测试结果

Fig. 12 Result of the uniformity test

随后,将 9 个点处,字符“AR”附近框内的像素取出,并计算出其平均灰度  $G_{\text{average},1-9}$ 。均匀度的表达

式为

$$U_{\text{uniformity}} = \min(G_{\text{average},1-9}) / G_{\text{average},5}, \quad (14)$$

式中:  $G_5$  为中心附近的框内的平均灰度。计算得到的均匀度为 39.47%。分析数据,均匀度较低的主要原因是右下角区域的显示亮度较低。产生该现象的主要原因与杂散光产生的原因有一定的类似:在传播过程中,能量逐渐衰减,传播到下面的视场时本身的能量就比较低,该现象可以通过对光波导的耦出光栅进行设计进而提高耦出光栅下方区域的衍射效率的方法进行改善;受到零级光的影响,从图 12 可以看出,右下角处零级光较弱,而其他区域的零级光相对较强,进而平均灰度会较低。

### 3.7 三维场景显示讨论

对于传统的波导类型的近眼显示系统,从图像源出射的虚拟图像的聚焦位置需要在无穷远处,否则多个扩展光瞳内出射的光会因光程的不同,而导致对应的像的聚焦位置略有区别,当这些光同时进入人眼时,就会产生重影和模糊的问题。因此,如果希望虚像距离不在无穷远,一般需要通过在光波导外增加额外的透镜等方案来解决<sup>[22]</sup>。然而,对于图像源为计算全息显示系统的情况则不同,因为系统中的 SLM 不仅可以调制入射光的振幅,还可以调制入射光的相位,形成一个复杂的波前,可以实现同一个图像在多个深度均可以聚焦,如通过多深度的计算全息算法计算得到的相位分布即可实现多深度聚焦<sup>[24-25]</sup>,故理论上可以用计算全息算法补偿不同光瞳对应的光程差造成的相位差,使多个光瞳内出射的光都对应于同一聚焦位置,从而解决重影和模糊的问题。然后,通过计算全息算法设置不同的图像深度即可实现三维场景显示。不同视场的全反射角不同会导致不同光瞳之间的聚焦距离差有区别,这对全息图生成算法提出了较高的要求。

## 4 结 论

针对受限于 SLM 空间带宽积较小,全息近眼显示无法在保证适当视场下获得较大眼盒的问题,研究了基于光波导的扩展眼盒全息近眼显示系统,利用二维 SRG 和光波导的扩瞳作用,扩大了光束宽度,从而扩展了眼盒大小。实验证实:在不使用光波导、相机口径较小和出瞳距为 20 mm 的情况下,在所有区域中均无法获得完整的视场;在使用了光波导扩瞳的情况下,可以在 38.6° 视场下获得大小为 8 mm × 6 mm 的眼盒,有效解决了眼盒较小导致的视场容易缺失的问题。相比于基于其他被动元件的扩瞳方案,所提方案的眼盒连续且可较为容易地进行二维扩瞳。本工作只对虚像距离在无穷远的二维场景情况进行了研究,后续的工作中将继续开展对三维场景情况的研究,并结合深度学习算法,使得输入波导的图像有一定的预补偿,从而实现高质量的三维场景显示。全息显示可以通过对波前

的调制实现像差补偿,从而降低对光学系统成像质量、装配等方面的要求,有利于系统的集成化,相信在解决了眼盒较小的问题后,全息近眼显示可以有更广泛的应用。

**致谢** 感谢浙江大学李海峰教授和徐良工程师在搭建光路与 SLM 使用方面给予的指导,并感谢御光揽数(杭州)智能科技有限公司在实验光波导器件和项目技术讨论方面给予的支持。

#### 参 考 文 献

- [1] 王闯,沈忠文,翁一士,等.基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究[J].光学学报,2022,42(7):0723001.  
Wang C, Shen Z W, Weng Y S, et al. Field-of-view expansion of waveguide display system with double-layer volume grating [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0723001.
- [2] 谢豪,霍富荣,薛常喜.用于头戴显示的新型耦合光栅结构优化设计与分析[J].光学学报,2022,42(14):1405001.  
Xie H, Huo F R, Xue C X. Optimal design and analysis of new coupled grating structure for head-mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1405001.
- [3] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 85.
- [4] He Z H, Sui X M, Jin G F, et al. Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display[J]. Applied Optics, 2019, 58(5): A74-A81.
- [5] Li G, Lee D, Jeong Y, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [6] Zhang Z Q, Liu J, Duan X H, et al. Enlarging field of view by a two-step method in a near-eye 3D holographic display[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32709-32720.
- [7] Peng Y F, Choi S, Padmanaban N, et al. Neural holography with camera-in-the-loop training[J]. ACM Transactions on Graphics, 2020, 39(6): 185.
- [8] 常琛亮,戴博,夏军,等.面向视觉舒适度的全息近眼显示研究综述[J].激光与光电子学进展,2022,59(20):2011001.  
Chang C L, Dai B, Xia J, et al. Review of holographic near-eye displays for visual comfort[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011001.
- [9] 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.
- [10] Choi S, Gopakumar M, Peng Y F, et al. Neural 3D holography: learning accurate wave propagation models for 3D holographic virtual and augmented reality displays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2021, 40(6): 240.
- [11] Xia X X, Wang W S, Guan Y Q, et al. Holographic near-eye display with expanded eyebox based on exit pupil scanning[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2022, 53(1): 628-631.
- [12] Jang C, Bang K, Li G, et al. Holographic near-eye display with expanded eye-box[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 195.
- [13] 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.
- [14] Mangiante S, Klas G, Navon A, et al. VR is on the edge: how to deliver 360° videos in mobile networks[C]//VR/AR Network'17: Proceedings of the Workshop on Virtual Reality and Augmented Reality Network, August 25, 2017, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM Press, 2017: 30-35.
- [15] Zou J Y, Li L S, Wu S T. Gaze-matched pupil steering Maxwellian-view augmented reality display[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2022, 53(1): 624-627.
- [16] Gerchberg R W. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. Optik, 1972, 35: 237-246.
- [17] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison[J]. Applied Optics, 1994, 33(2): 209-218.
- [18] Wu J C, Liu K X, Sui X M, et al. High-speed computer-generated holography using an autoencoder-based deep neural network[J]. Optics Letters, 2021, 46(12): 2908-2911.
- [19] Shi L, Li B C, Kim C, et al. Towards real-time photorealistic 3D holography with deep neural networks[J]. Nature, 2021, 591(7849): 234-239.
- [20] Zeng T J, Zhu Y M, Lam E Y. Deep learning for digital holography: a review[J]. Optics Express, 2021, 29(24): 40572-40593.
- [21] Lohmann A W, Dorsch R G, Mendlovic D, et al. Space-bandwidth product of optical signals and systems[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(3): 470-473.
- [22] Kress B C, Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective[J]. Nanophotonics, 2020, 10(1): 41-74.
- [23] Nakamura T, Takashima Y. Design of discretely depth-varying holographic grating for image guide based see-through and near-to-eye displays[J]. Optics Express, 2018, 26(20): 26520-26533.
- [24] Zhou P C, Li Y, Chen C P, et al. Multi-plane holographic display with a uniform 3D Gerchberg-Saxton algorithm[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2015, 46(1): 442-445.
- [25] Zhou P C, Li Y, Liu S X, et al. Dynamic compensatory Gerchberg-Saxton algorithm for multiple-plane reconstruction in holographic displays[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 8958-8967.

# Holographic Near-Eye Display System with Expanded Eyebox Based on Waveguide

Yu Chao<sup>1,2</sup>, Meng Xiangyu<sup>2</sup>, Jiang Li<sup>1</sup>, Cai Hong<sup>1</sup>, Mao Hui<sup>1</sup>, Wang Rui<sup>2</sup>, Pu Shiliang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*Hikvision Research Institute, Hangzhou Hikvision Digital Technology Co. Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China;*

<sup>2</sup>*College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China*

## Abstract

**Objective** Holographic near-eye displays (NEDs) have attracted ever-increasing attention in recent years. Through wavefront modulation of the incident beam by the spatial light modulator (SLM), a holographic NED can achieve multiple functions that are not within the reach of conventional two-dimensional (2D) displays, such as controlling the depth of the displayed image and dynamically correcting the aberration. However, due to the limited space-bandwidth product of the SLM, the etendue of the entire system is small, leading to a long-standing trade-off between the field of view (FOV) and the eyebox. For example, Microsoft reported at the SIGGRAPH conference in 2017 that they had achieved a FOV of 80°, but the eyebox was small. Two main types of methods have been proposed to expand the eyebox, i. e., active methods and passive methods. The active methods utilize a pupil-tracking system and move the eyebox subject to the position of the user's eye. Their energy efficiency can be high, contributing to lower power consumption of the system, longer battery life, and simpler thermal design. However, the main challenge for achieving high immersion in augmented reality (AR) use cases is low motion-to-photon latency, which is more difficult to obtain when the process of eye-tracking is incorporated. The passive solutions generally provide multiple discrete eyebox points simultaneously to expand the entire eyebox. However, they are exposed to the risk that no or two eyebox points may enter the pupil at a certain position as the user's eye moves. In such a case, missing of fields, low brightness uniformity, or ghost artifact occurs. In this paper, a holographic NED system with an expanded eyebox based on a surface relief grating (SRG) waveguide is investigated, showcasing a continuously and two-dimensionally expanded eyebox.

**Methods** In the calculation of holograms, the angular spectrum method (ASM) and the stochastic gradient descent (SGD) algorithm are adopted because they can provide much better image quality than that offered by the traditional Gerchberg-Saxton (GS) algorithm. This advantage is confirmed by the comparison result of the peak signal-to-noise ratio (PSNR). To increase the etendue of the holographic NED, this paper utilizes a waveguide incorporating an in-coupling grating and a 2D surface relief out-coupling grating. The beam width corresponding to each image point in the holographic image is expanded two-dimensionally and continuously, and a two-dimensionally expanded eyebox is thereby obtained. Furthermore, the influence of pupil expansion on holographic display is assessed. By calculating the optical path difference between adjacent out-coupling beams, the paper finds that the angular period of the interference pattern is too small to be observed, and its impact on image quality is thus negligible.

**Results and discussions** An experimental prototype (Fig. 6) is built to verify the effectiveness of the investigated system. Firstly, the display performance of the system on a monochromatic image verifies that the fine details of the resolution pattern can be reconstructed (Fig. 7). Then, the system's capability of displaying color images is demonstrated. Since the principle of the system's display of color images is time-division multiplexing, the monochromatic images of three colors are acquired independently and then synthesized (Fig. 8). The color image looks reasonably well despite a certain amount of stray light. Next, the paper verifies the aim of the 2D expansion of the eyebox. The baseline case without the waveguide is assessed first. The results (Fig. 9) reveal that when the eye relief is 20 mm, only a small part of the target image can be captured at each position within the range of 4 mm × 4 mm. In contrast, when the waveguide is added to the system, the entire image can be observed across an eyebox range of 8 mm × 6 mm (Fig. 10). In this range, 15 points are sampled continuously and uniformly, with the horizontal sampling points located at 0, ±2 mm, ±4 mm and the vertical sampling points at 0, ±3 mm, respectively. Furthermore, an AR display test (Fig. 11) is conducted, and the results demonstrate that the user can observe virtual and real scenes simultaneously. After that, the stray light and uniformity of the system are discussed. The stray light in the upper part of the displayed image is mainly due to the scattering at the defects on the waveguide and the higher energy of the beam transmitting in the waveguide in the upper part. A uniformity of 39.47% is obtained by evaluating the average grayscale of nine points uniformly sampled in the display area. Finally, the possibility of displaying 3D scenes is discussed.

**Conclusions** To mitigate the challenge of obtaining a sufficiently large eyebox under a proper FOV for holographic NEDs, this paper investigates a holographic NED system with an expanded eyebox. A waveguide incorporating a 2D surface relief out-coupling grating is utilized to expand the beam width of the holographic image two-dimensionally and continuously. Experiments confirm that when the eye relief is 20 mm and the FOV is  $38.6^\circ$ , an eyebox of  $8\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  can be obtained. The problem of the incompetence of the FOV is thereby effectively mitigated. In the follow-up work, research will be conducted on deep learning-based computer-generated holography (CGH) algorithms, which can provide suitable pre-compensation of phase for the image coupled into the waveguide, to achieve the high-quality reconstruction of 2D and three-dimensional (3D) scenes.

**Key words** holography; computer-generated holography; near-eye display; waveguide; expanded eyebox; pupil expansion