

文章编号:1007-2780(2023)06-0842-08

基于反射偏振膜的增强现实 2D/3D 兼容显示

饶凤斌, 冀清霖, 李 强, 邓 欢*
(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了将 2D/3D 兼容显示技术应用于增强现实设备中, 本文提出了一种基于透镜阵列全息光学元件和反射偏振膜的增强现实 2D/3D 兼容显示系统。该系统利用反射偏振膜将投影光源进行反射或透射。反射光束载有 2D 显示片源, 以此实现 2D 显示; 透射光束载有 3D 显示片源, 经透镜阵列全息光学元件调制后实现 3D 显示。反射偏振膜和透镜阵列全息光学元件对环境光均有较好的透过率, 从而保证系统具有增强现实的光学透过性能。实验结果表明, 所提增强现实 2D/3D 兼容显示系统能够在 2D 显示模式和 3D 显示模式之间进行自由切换, 并且其环境光对比度高于显示标准要求的标准值 3:1。

关键词: 2D/3D 兼容显示; 增强现实显示; 反射偏振膜; 全息光学元件; 环境光对比度
中图分类号: TN27 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0433

Augmented reality 2D/3D compatible display using reflective polarizer

RAO Feng-bin, JI Qing-lin, LI Qiang, DENG Huan*

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to apply two-dimensional (2D)/three-dimensional (3D) compatible display technology into augmented reality display devices, this paper proposed an augmented reality 2D/3D compatible display system based on lens array holographic optical element and reflective polarizer. By using reflective polarizer to reflect or transmit the projection light, the reflected light loaded with 2D image source is used to realize 2D display, and the transmitted light loaded with 3D image source is used to realize 3D display after being modulated by lens array holographic optical element. Both reflective polarizer and lens array holographic optical element have good ambient transmittance, which makes the display system own optical see-through property for augmented reality application. The experimental results indicate that the proposed augmented reality 2D/3D compatible display system can switch freely between 2D and 3D display modes, and the ambient contrast ratio of the system is higher than 3:1, which is the standard value of display.

Key words: 2D/3D compatible display; augmented reality; reflective polarizer; holographic optical element; ambient contrast ratio

收稿日期:2022-12-31;修订日期:2023-01-06.

基金项目:国家自然科学基金(No. 62275179, No. U21B2034);四川省科技计划项目(No. 2022YFG0326)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62275179, No. U21B2034); Sichuan Science and Technology Program (No. 2022YFG0326)

*通信联系人, E-mail: huandeng@scu.edu.cn

1 引言

3D显示能够将物体的深度和视差信息真实地再现出来,给观看者带来逼真的视觉体验,是最贴近人类视觉习惯的显示方式,在医疗、军事、教育、娱乐等领域有着重要的应用价值^[1]。2D/3D兼容显示可以根据不同的用户需求,在具有立体感的3D图像和高分辨率2D图像间自由切换,扩大了应用范围^[2]。增强现实显示技术能够将虚拟物体与真实世界联系在一起,使得用户在正常观看真实世界场景的同时还能够和虚拟物体进行交互^[3]。因此将2D/3D兼容显示应用于增强现实显示技术中,可以实现虚拟物体和真实场景的有效融合,进一步提升用户的观看体验,满足更多的视觉需求。

自从2D/3D兼容显示技术提出以来,许多研究人员开展了相关的研究。一部分研究通过改变显示器背光来实现2D/3D兼容显示。韩国首尔大学的Lee教授团队采用聚合物分散液晶,通过电压控制聚合物分散液晶的散射或透射状态,实现了2D和3D显示模式的切换^[2]。随后,该团队通过在准直透镜和聚合物分散液晶之间插入一个附加透镜阵列,形成更高密度的点光源阵列,提高了2D/3D切换时的3D图像分辨率^[4]。而为了进一步简化系统,该团队提出了利用两组交错排列的发光二极管阵列作为系统背光,与带有针孔阵列的漫射膜结合实现了2D/3D兼容显示^[5]。本研究团队将反射偏振片和针孔阵列有效结合,利用偏振复用技术实现高背光利用率的2D/3D兼容显示^[6]。合肥工业大学的王梓利用发光二极管改造背光模组的导光板,通过切换背光光源实现了2D/3D兼容显示^[7]。另一部分研究则通过改变透镜阵列来实现2D/3D兼容显示。韩国首尔大学的Lee教授团队提出使用凹面半反射镜阵列,将背投屏与凹面半反射镜阵列结合作为显示屏,利用不同投影仪投影不同的图像至背投屏或凹面半反射镜阵列上,对应实现2D或3D显示^[8]。台湾交通大学的黄乙白教授团队采用偏振依赖液晶透镜阵列,通过控制显示器背光的偏振态,利用偏振依赖液晶透镜阵列对于不同偏振态的光束进行会聚或透过,实现了2D和3D显示模式的切换^[9]。上述2D/3D兼容显示技术

方案均不能现实增强现实显示的功能,而目前只有少数研究人员开展了增强现实2D/3D兼容显示的研究工作。

在增强现实显示中,光学组合器是最核心的光学器件。全息光学元件(Holographic optical element, HOE)因其具有高衍射效率和环境光透过率且体积轻薄,受到了诸多研究者的青睐^[10-12]。韩国首尔大学的Lee教授团队采用HOE记录了透镜阵列和散射屏,利用角度复用技术和光学棱镜实现了2D/3D兼容透明屏显示。但其是通过将HOE一分为二来实现的,即一半HOE区域用于实现2D显示,另一半区域用于实现3D显示,导致光学透明窗口利用率低^[13]。之后该团队通过记录两种不同节距的透镜阵列,根据投影像素与透镜阵列节距大小的比值不同来实现2D/3D兼容透明屏显示,但该方案需要使用两个投影仪,导致系统体积增加^[14]。本研究团队在2019年采用透镜阵列全息光学元件(Lens array holographic optical element, LAHOE)与聚合物分散液晶相结合,通过切换施加在聚合物分散液晶上的电压,使聚合物分散液晶在透射和散射两种状态下切换,散射光线显示2D图像,而透过的光线经过LAHOE调制后重建出3D图像,从而实现2D和3D两种不同显示模式的切换。但该系统的2D显示模式不能够实现增强现实显示,且系统较为复杂,所使用的聚合物分散液晶需要施加较高电压才能实现光线调制状态的切换^[15]。随后,在2021年本团队记录了包含透镜阵列和散射屏功能的复合HOE并与液体透镜结合,通过角度复用的方式实现了增强现实2D/3D兼容显示。该系统通过泵入和抽出液体实现液体透镜曲率变化,导致系统的两种显示模式之间的实时切换存在挑战^[16]。

本文提出了基于反射偏振膜的增强现实2D/3D兼容显示系统。该系统将反射偏振膜与LAHOE结合在一起,利用反射偏振膜对水平或垂直偏振光分别呈现透射或反射的性质,反射光束用于2D显示,透射光束经LAHOE调制后实现3D显示,环境光则能透过反射偏振膜和LAHOE,保证系统的2D和3D显示模式均具有较好的光学透过特性。该系统结构简单,光学组合器利用率高,不需要复杂的机械运动和额外的附加电

源,可根据观看者的显示需求,实时调整投影光源和投影光束的偏振态来实现增强现实 2D 和 3D 显示模式之间的自由切换。

2 系统结构及 2D/3D 兼容显示原理

2.1 系统结构

本文提出了基于反射偏振膜的增强现实 2D/3D 兼容显示系统,系统结构如图 1 所示,主要由投影仪、偏振控制器、反射偏振膜以及 LAHOE 组成。偏振控制器位于投影仪前,用于控制投射光束的偏振状态。反射偏振膜和 LAHOE 两者紧密贴合,组成增强现实 2D/3D 兼容显示系统的主要部分,用于承接投影图像。反射偏振膜对于水平和垂直偏振态的光束具有不同的调制作用,从而对投影仪投射的光束进行透射或反射。在反射状态下,投影仪投射 2D 图像,在反射偏振膜上实现 2D 显示;而在透射状态下,投影仪投射 3D 片源,LAHOE 对 3D 片源进行调制,基于集成成像 3D 显示的光场重构方式重建出 3D 图像。由于反射偏振膜和 LAHOE 的光学透视特性,可以实现虚拟 2D 和 3D 图像与真实场景的融合。通过偏振控制器对投影光束偏振状态的实时控制并同步切换对应的 2D 或 3D 片源,可实现增强现实 2D 和 3D 显示模式的自由切换。

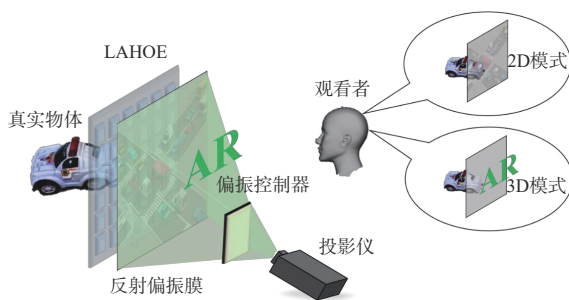


图 1 基于反射偏振膜的增强现实 2D/3D 兼容显示系统示意图

Fig. 1 Diagram of the proposed augmented reality 2D/3D compatible display system based on reflective polarizer

2.2 本系统的 2D/3D 兼容显示原理

本系统的偏振相关特性主要由反射偏振膜决定,其光学调制特性如图 2(a)和 2(b)所示,包含反射偏振态和透射偏振态。本文用垂直偏振

方向表示反射偏振态,水平偏振方向表示透射偏振态。反射偏振膜对于垂直偏振方向的偏振光,其反射率达到最大值;对于水平偏振方向的偏振光,入射光将直接透射穿过反射偏振膜^[17]。

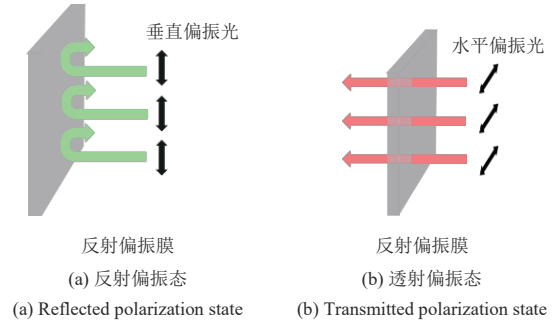


图 2 反射偏振膜对不同偏振光的调制作用

Fig. 2 Modulation of reflective polarizer on different polarized lights

该系统的 3D 显示模式主要由 LAHOE 来实现。HOE 本质是一种体积全息图,能够实现一个或多个光学元件对光线的调制功能并且具有高衍射效率和环境光透过率。该系统所用的 HOE 能够实现透镜阵列对光线的调制功能,即 LAHOE,其记录和再现过程如图 3 所示。图 3(a)为 LAHOE 的记录过程示意图,平行光经过透镜阵列后生成球面波阵列作为信号光入射至全息材料上,而参考光以球面波的形式从另一侧入射至全息材料上,两束光在全息材料内相遇并发生干涉,经过干涉曝光及后处理,即可得到 LAHOE。图 3(b)为 LAHOE 的再现过程示意图,满足布拉格条件的探照光入射到 LAHOE 上,LAHOE 就能够通过衍射再现出球面波阵列波前。如果探照光载有 3D 片源,即微图像阵列,那么微图像阵列

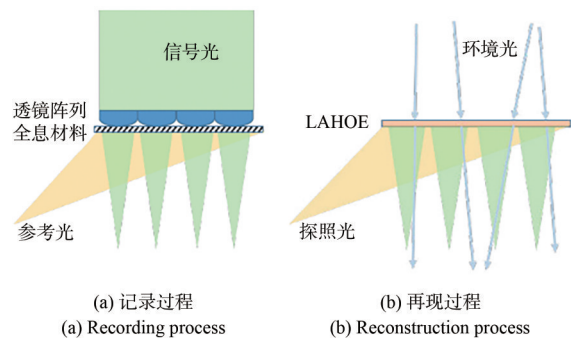


图 3 LAHOE 的记录和再现过程

Fig. 3 Recording and reconstruction processes of LAHOE

会受到球面波阵列调制,从而重构出3D图像。而对于不满足布拉格条件的环境光,将直接透过LAHOE而不会受到调制。在3D显示模式下,如图4(a)所示,投影机光线通过偏振控制器调制,投射出水平偏振态的投影图像光束并载有微图像阵列信息。满足LAHOE的布拉格衍射条件的投影光束在透射穿过反射偏振膜后,经LAHOE调制,衍射再现出透镜阵列波前,如图4(a)中的红色光线所示。此时LAHOE具有透镜阵列的光场调控功能,其中的每一块单元区域都可看成是一个透镜单元,与投影机投射的图像元一一对应并按照透镜对光线的调制方式将图像元光线进行会聚和发散,同名点像素的光线在空间中叠加并形成3D体像素,从而重建出3D图像。不满足布拉格衍射条件的环境光将直接透过LAHOE,环境光中的水平偏振光束则继续透射穿过反射偏振膜并进入观察者视野,如图4(a)中的蓝色光线所示,以此实现光学透视式集成成像3D显示。

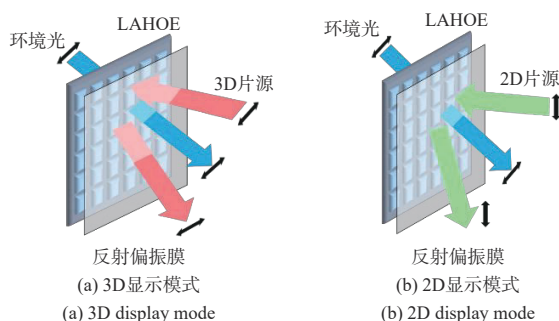


图4 增强现实2D/3D显示原理图

Fig.4 Schematic diagram of augmented reality 2D/3D display

在2D显示模式下,如图4(b)所示,偏振控制器使投影图像光束转换成垂直偏振态,满足2D显示模式下的偏振条件,在反射偏振膜上发生漫反射,如图4(b)中的绿色光线所示,从而在反射偏振膜上观察到2D图像。位于反射偏振膜后方的LAHOE不参与光线调制。环境光中水平偏振光束将直接透射穿过LAHOE和反射偏振膜,如图4(b)中的蓝色光线所示,从而在2D显示模式下实现透明显示。

2.3 显示系统的环境光对比度

光学透视式显示器作为一种透明设备,对显示亮度有着严格的要求。为此,我们对本系统在

2D和3D显示模式下的环境光对比度(Ambient contrast ratio, ACR)进行定量分析。一般显示系统的环境光对比度被定义为^[18-19]:

$$ACR = \frac{L_{on} + L_{ambient} \cdot T}{L_{off} + L_{ambient} \cdot T}, \quad (1)$$

其中: L_{on} (L_{off})原表示显示设备开(关)状态下的亮度,在本文所提出的光学透视式显示系统中表示投影设备开(关)状态下的亮度,即LAHOE发生(未发生)衍射下的亮度,单位为 cd/m^2 ; $L_{ambient}$ 为环境亮度; T 为反射偏振膜和LAHOE的组合透过率。

环境照明条件通常用照度(lx)来衡量,但为了进行比较,需将照度转换为亮度,即将式(1)中的 $L_{ambient}$ 除以一个因子 π 。例如,在一个普通的客厅里,照度约为100 lx,转换为亮度是 $30 cd/m^2$;而在一个普通的办公室里,亮度约为 $150 cd/m^2$ 。在户外,阴天亮度可达 $300 cd/m^2$,晴天可达 $3000 cd/m^2$ 。即使对于高对比度的显示器来说($L_{on}/L_{off} > 100$),环境光也会覆盖掉显示内容,使图像无法识别。

在增强现实显示中,显示标准要求可识别图像的最小ACR为3:1,具有足够可读性的ACR为5:1,而具有吸引人的显示质量的ACR要超过10:1^[3]。因此,对于透过率 $T > 90\%$ 的LAHOE来说,在办公室照明条件下,通过投影设备显示后显示的图像亮度应至少为 $550 cd/m^2$,以达到 $ACR=5:1$ 。目前,LAHOE的显示图像亮度为 $500 cd/m^2$,适合在室内使用。而要在一个阳光明媚的环境下实现 $ACR=10:1$ (约 $3000 cd/m^2$),若不考虑所有光学损耗,显示器需要提供至少 $30000 cd/m^2$ 的亮度,这给高亮度微显示器和低损耗光学组合器的设计带来了很大的挑战。

在3D显示模式下,有两部分光将进入人眼视区:环境光和系统设备发出的光。其中环境光在经过反射偏振膜和LAHOE后,发生多次反射和透射,这里只计算环境光发生两次反射的光线,即如图5(a)中黄色光线所示的 R_1 和 R_2 。系统设备的光线为投影设备发出的光 $L_{projector}$,经过反射偏振膜发生透射时会损失小部分的光,其余全部透射后到达LAHOE上,发生布拉格衍射后再次透过反射偏振膜,即图5(a)中红色光线所示的 L_1 和 $L_{diffraction}$ 。因此,最后进入人眼的光包含 R_1 、 R_2 、 L_1 和 $L_{diffraction}$ 。此时3D显示模式下的ACR可表示为:

$$ACR_{3D} = \frac{R_1 + R_2 + L_1 + L_{\text{diffraction}}}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

其中, R_1 、 R_2 、和 L_1 分别表示为:

$$R_1 = L_{\text{ambient}} \cdot (1 - R_{\text{rp}}) \cdot (1 - R_{\text{LAHOE}}), \quad (3)$$

$$R_2 = L_{\text{ambient}} \cdot R_{\text{rp}} \cdot R_{\text{LAHOE}}, \quad (4)$$

$$L_1 = L_{\text{projector}} \cdot R_{\text{drs}}, \quad (5)$$

其中: R_{rp} 表示反射偏振膜对环境光的反射率, R_{LAHOE} 表示 LAHOE 对环境光的反射率, R_{drs} 表示反射偏振膜对于水平偏振光发生漫反射的反射率。

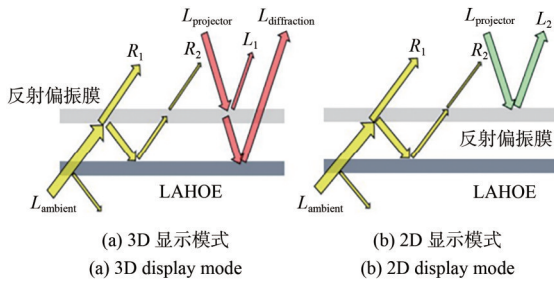


图 5 增强现实 2D/3D 兼容显示系统的 ACR 分析

Fig. 5 ACR analysis of augmented reality 2D/3D compatible display system

在 2D 显示模式下, 同样有两部分光进入人眼。环境光部分与 3D 显示模式下一致, 但是由于 2D 显示在反射偏振膜上进行, 投影设备发出的偏振光 $L_{\text{projector}}$ 将直接经过反射偏振膜并发生漫反射, 形成 L_2 , 如图 5(b) 中的绿色光线所示, 因此最后进入人眼视区的光由 R_1 、 R_2 和 L_2 构成。此时 2D 显示模式下的 ACR 可表示为:

$$ACR_{2D} = \frac{R_1 + R_2 + L_2}{R_1 + R_2}, \quad (6)$$

L_2 可表示为:

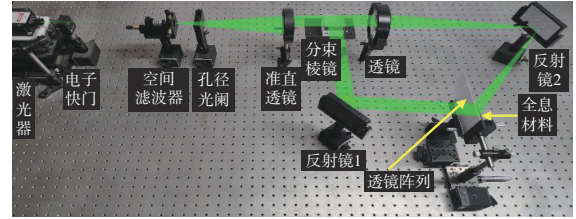
$$L_2 = L_{\text{projector}} \cdot R_{\text{drc}}, \quad (7)$$

其中 R_{drc} 表示反射偏振膜对于垂直偏振光发生漫反射的反射率。

3 实验验证

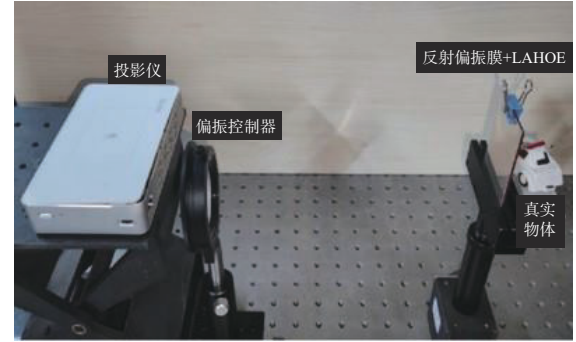
实验中采用 LitiHolo 的光敏聚合物作为全息材料, LAHOE 具体记录方式在 2.2 节中已提出, 实验光路如图 6(a) 所示。全息材料在曝光记录后只需通过紫外固化, 将曝光剩余的光敏聚合物单体消耗掉即可完成 LAHOE 的制备。全息材料在 532 nm 达到最佳衍射效率时对应的曝光能量

为 30 mJ/cm^2 , 利用该全息材料所制作的 LAHOE 具有 90% 以上的透射率和衍射效率。为验证方法可行性, 搭建了如图 6(b) 所示的增强现实 2D/3D 兼容显示系统。



(a) LAHOE 记录装置图

(a) Experimental setup of the recording process of LAHOE



(b) 增强现实 2D/3D 兼容显示系统实验装置图

(b) Experimental setup of the proposed augmented reality 2D/3D compatible display system

图 6 实验装置图

Fig. 6 Experimental setups

实验制作的 LAHOE 的有效曝光面积为 $46 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$, 参考光和信号光光强约为 1 mW/cm^2 , 曝光时间为 30 s, 所记录透镜阵列焦距为 3.3 mm, 节距为 1 mm。在 3D 显示模式下测得的衍射效率为 89%。

增强现实 2D/3D 兼容显示系统的显示效果如图 7 所示。图 7(a)~(c) 分别为 2D 和 3D 显示模式下使用的片源。当系统处于 2D 显示模式时, 在反射偏振膜上可以观察到“公路”的 2D 图片, 对应显示效果如图 7(b) 所示。图 7(d) 为 3D 显示模式下分别在“左上”、“右上”、“左下”和“右下”4 个不同方向的视图, 对比不同的视图可以清楚地看到字母“A”和“R”间的水平和垂直视差。可以发现当系统分别处于 2D 和 3D 显示模式时, 都能看见位于偏振反射膜和 LAHOE 后方的玩具小车, 验证了本系统的增强现实 2D/3D 兼容显示功能。

由于 HOE 具有独特的波长选择性, 在利用

LAHOE 实现 3D 显示时,其最大衍射效率对应的探照光波长只与记录时参考光和信号光的波长一致;对于其他波长的探照光,其衍射效率会降低至最低。实验中参考光和信号光的波长均为 532 nm,因此该系统在 3D 模式下只能实现单色显示。由于 HOE 体积轻薄,可通过将 RGB 三种颜色对应波长的信号光和参考光分别记录得到的 LAHOE 叠加在一起,实现彩色 3D 图像显示。



图 7 增强现实 2D/3D 兼容显示系统显示效果
Fig.7 Display results of the augmented reality 2D/3D compatible display system

在测试 ACR 时,由于采取的是投影方式来实现 2D 和 3D 显示,因此投影距离会影响显示亮度。随着投影距离增加,亮度会随之减弱,故固定投影距离为 160 mm,分别在 5 种不同的环境光条件下测试 ACR。图 8 是在不同环境光条件下投影白图时反射偏振膜反射率和透射率的变化曲线图。其中反射率为反射偏振膜发生漫反射后 150 mm 处的接收值,反射率越高,2D 显示图像对比度则越低。图 9 是显示系统在 2D 和 3D 显示模式下的 ACR。随着环境光亮度的增加,ACR 逐渐减小,但仍大于 3:1,说明该系统能够实现环境光对比度较好的增强现实 2D/3D 兼容显示。

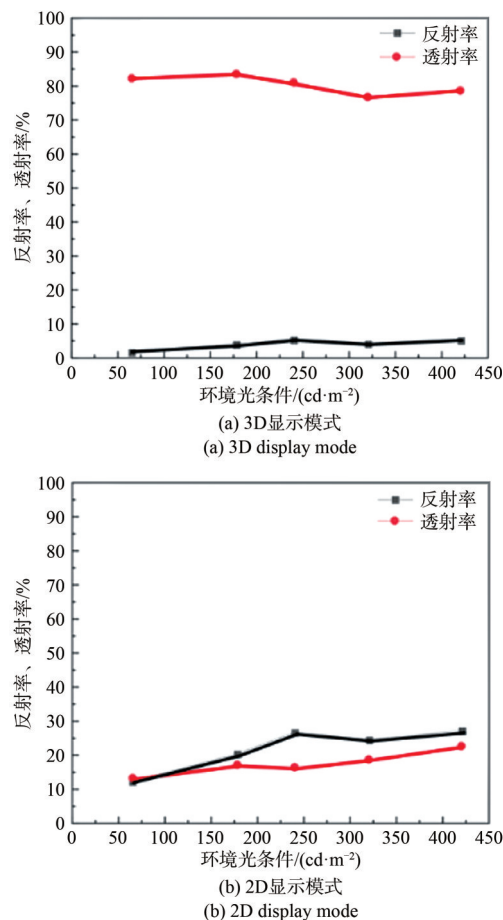


图 8 反射偏振膜在不同显示模式下的反射率和透过率
Fig.8 Reflectivity and transmittance of the reflective polarizer in different display modes

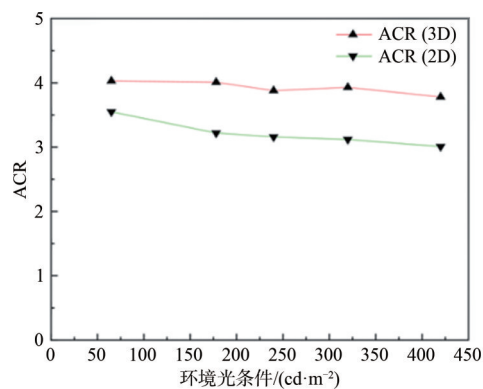


图 9 增强现实 2D/3D 兼容显示系统在不同显示模式下的 ACR 曲线
Fig.9 ACR curves of the augmented reality 2D/3D compatible display system in different display mode

4 结 论

本文提出了一种增强现实 2D/3D 兼容显示

系统,通过结合 LAHOE 和反射偏振膜,利用反射偏振膜对水平和垂直偏振方向的光束不同的光学调制特性,对应实现 2D 和 3D 显示功能,且通过偏振控制器对入射光偏振方向实时改变并同步切换显示片源,实现了 2D 和 3D 显示模式的自由切换。基于 LAHOE 和反射偏振膜对环境光的透射作用,在 2D 和 3D 显示模式下均能满足

增强现实的光学透视效果。实验结果表明,所提方法实现了增强现实 2D/3D 兼容显示,实验系统具有一定的光学透视特性,其 2D 和 3D 显示模式下的 ACR 值均大于显示规则要求的标准值 3:1。该系统体积小,既能实现 2D/3D 兼容显示又具有较好的光学透视特性和环境光对比度,为增强现实技术的发展开辟了更广阔的空间。

参 考 文 献:

- [1] 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)
- [2] PARK J H, KIM H R, KIM Y, *et al.* Depth-enhanced three-dimensional-two-dimensional convertible display based on modified integral imaging [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2734-2736.
- [3] XIONG J H, HSIANG E L, HE Z Q, *et al.* Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 216.
- [4] PARK J H, KIM J, KIM Y, *et al.* Resolution-enhanced three-dimension/two-dimension convertible display based on integral imaging [J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1875-1884.
- [5] CHO S W, PARK J H, KIM Y, *et al.* Convertible two-dimensional-three-dimensional display using an LED array based on modified integral imaging [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(19): 2852-2854.
- [6] DENG H, XIONG Z L, XING Y, *et al.* A high optical efficiency 3D/2D convertible integral imaging display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(2): 85-89.
- [7] WANG Z, WANG A T, WANG S L, *et al.* High optical efficiency lensless 2D-3D convertible integral imaging display using an edge-lit light guide plate [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(12): 1706-1709.
- [8] HONG J, KIM Y, PARK S G, *et al.* 3D/2D convertible projection-type integral imaging using concave half mirror array [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20628-20637.
- [9] CHOU P Y, WU J Y, HUANG S H, *et al.* Hybrid light field head-mounted display using time-multiplexed liquid crystal lens array for resolution enhancement [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1164-1177.
- [10] HONG K, YEOM J, JANG C, *et al.* Full-color lens-array holographic optical element for three-dimensional optical see-through augmented reality [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 127-130.
- [11] JANG C, HONG K, YEOM J, *et al.* See-through integral imaging display using a resolution and fill factor-enhanced lens-array holographic optical element [J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 27958-27967.
- [12] LEE S, JANG C, CHO J, *et al.* Viewing angle enhancement of an integral imaging display using Bragg mismatched reconstruction of holographic optical elements [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A95-A103.
- [13] YEOM J, JEONG J, JANG C, *et al.* Three-dimensional/two-dimensional convertible projection screen using see-through integral imaging based on holographic optical element [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 8856-8862.
- [14] HONG K, YEOM J, JANG C, *et al.* Two-dimensional and three-dimensional transparent screens based on lens-array holographic optical elements [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14363-14374.
- [15] 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.
- [16] JI Q L, DENG H, ZHANG H L, *et al.* Optical see-through 2D/3D compatible display using variable-focus lens and multiplexed holographic optical elements [J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 297.
- [17] LI Q, HE W, DENG H, *et al.* High-performance reflection-type augmented reality 3D display using a reflective polarizer [J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9446-9453.
- [18] SINGH R, UNNI K N N, SOLANKI A, *et al.* Improving the contrast ratio of OLED displays: an analysis of various

techniques [J]. *Optical Materials*, 2012, 34(4): 716-723.

- [19] CHEN H W, TAN G J, WU S T. Ambient contrast ratio of LCDs and OLED displays [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33643-33656.

作者简介:



饶凤斌(1998—),男,贵州安顺人,硕士研究生,2020年于四川大学获得学士学位,主要从事集成成像3D显示方面的研究。E-mail:raofengbin@stu.scu.edu.cn



邓欢(1985—),女,四川内江人,博士,教授,2012年于四川大学获得博士学位,主要从事集成成像3D显示、AR显示和光场显示方面的研究。E-mail:huandeng@scu.edu.cn