

文章编号:1007-2780(2020)07-0725-08

基于液晶散射膜的多平面增强现实显示

刘澍鑫, 李 燕*, 苏翼凯
(上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘要:为实现自然、舒适的增强现实显示,需要解决传统增强现实显示中调焦和辐辏冲突的问题。多平面显示通过在空间中构建二维切片画面来实现三维显示,由于每层画面都显示在不同深度,因此可以准确地表达三维显示的深度信息,有效地缓解调焦和辐辏冲突的问题。本文主要介绍基于液晶散射膜的多平面增强现实显示系统,包括基于正型聚合物稳定向列相液晶、反型聚合物稳定向列相液晶、聚合物稳定胆甾相液晶的多平面增强现实显示。聚合物稳定向列相液晶的响应速度可以达到 0.65 ms,聚合物稳定胆甾相液晶的响应速度也在 3 ms 以内,因此可以通过时分复用的方式实现多平面增强现实显示。最后讨论了基于液晶散射膜多平面增强现实显示有待解决的问题以及未来的发展趋势。

关键词:多平面显示;液晶器件;增强现实;聚合物稳定液晶

中图分类号:O753⁺.2;TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0725

Review on multi-plane augmented reality display based on liquid crystal scattering films

LIU Shu-xin, LI Yan*, SU Yi-kai

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to achieve a natural and comfortable augmented reality display, it is necessary to solve the accommodation-vergence conflict problem in the conventional augmented reality displays. Multi-plane display realizes 3D display by constructing 2D slice pictures in space. Since each slice picture is displayed at a different depth, it can accurately display the depth information and effectively alleviate the accommodation-vergence conflict problem. This paper mainly introduces multi-plane augmented reality displays based on liquid crystal scattering devices, including normal-mode polymer stabilized liquid crystal (PSLC), reverse-mode PSLC and polymer stabilized cholesteric liquid crystal. The response time of the PSLC can reach 0.65 ms, and the response time of the polymer stabilized cholesteric liquid crystal is also within 3 ms, so multi-plane augmented reality displays can be realized based on time multiplexing method. Finally, the difficulties and future trends of multi-plane augmented reality displays based on liquid crystal scattering films are discussed.

Key words: multi-plane display; liquid crystal devices; augmented reality; PSLC

收稿日期:2020-04-12;修订日期:2020-04-26.

基金项目:国家自然科学基金重大项目(No.61727808)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.61727808)

* 通信联系人, E-mail: yan.li@sjtu.edu.cn

1 引言

显示技术已融入人们生活的各个方面,如手机、电脑、电视、广告板、车载显示等。随着二维显示在大尺寸、高分辨率、高对比度、高色彩饱和度、广视角等方面渐趋成熟,人们也在不断地追求更接近于真实世界的三维显示^[1-2]。尤其是近几年随着增强现实技术的飞速发展,进一步推动了三维显示的研究及创新。显示技术作为增强现实系统的关键组成部分,对虚实融合和人机交互效果具有重要影响^[3-4]。目前大多数头戴式增强现实设备,如爱普生的 MOVERIO、微软 HoloLens、Lumus DK-40、ODG 智能眼镜、Meta、Digilens 眼镜等都采用基于双目视差的三维显示方式提供虚拟画面。该方法通过对左右眼分别提供两幅具有水平视差的图像,使人脑产生三维感知。但该方法本质上存在缺陷,即调焦-辐辏之间的矛盾^[5-6]。用户在观看时,每只眼球需要调焦在微显示屏像的位置以清晰观察到显示画面,而渲染的虚拟三维物体可能是偏离屏幕拥有一定纵深的,此时双眼的辐辏距离也会相应地偏离屏幕像造成调焦距离和辐辏距离的不一致,长期观看后会感到疲惫甚至产生头晕、恶心等不适症状。因此,为从根本上解决上述问题需要将真三维技术应用于增强现实显示中。目前学界被公认的真三维技术有集成成像显示^[7-9]、全息显示^[10-14]、超多视角显示^[15-17]以及体三维显示^[18-19]。

集成成像技术通过微透镜阵列再现三维图像,虽然能够提供水平和垂直视差图像以及连续的视差信息,但其微透镜阵列的使用使整个三维画面的分辨率降低。全息技术一般则是通过生成计算全息图加载到电光调制器件上再现物光波相位和振幅的全部信息,由于庞大的计算量以及受限于当前调制器件大像素尺寸和低分辨率,使全息显示很难应用在商业领域。超多视角显示则是将至少两个视角的图像同时投影到单只眼睛的瞳孔,因此需要构建较多视角图像才能完美地覆盖整个眼球移动位置,这势必增加了整个系统的复杂度和计算量。体三维显示通过构建体像素来构建三维图像,是最简单直接的三维显示方式。

其中多平面显示技术是体三维技术的一种,它通过显示处于不同深度的二维画面切片来重现

三维场景。这种显示方法具有以下优点:(1)可以利用成熟的二维显示技术,得到具有高画质的三维显示效果;(2)由于人眼在深度感知上的分辨率有限,仅需 6 层深度图像就可以表现出一幅连续的三维画面,从而大幅降低了计算量以及对外部硬件的要求;(3)能够准确地表达深度信息,有效地解决了调焦-辐辏的矛盾。

本文将介绍基于液晶散射膜的多平面增强现实显示工作原理、液晶散射膜工作原理。包括基于正型聚合物稳定向列相液晶、反型聚合物稳定向列相液晶、聚合物稳定胆甾相液晶的多平面增强现实显示。最后讨论了基于液晶散射膜多平面增强现实显示有待解决的问题以及未来的发展趋势。

2 多平面增强现实显示工作原理

图 1 为多平面增强现实显示的工作原理简化示意图,通过在空间构建二维画面切片再现一幅三维画面。根据其具体实现方式可以分为以下两类:

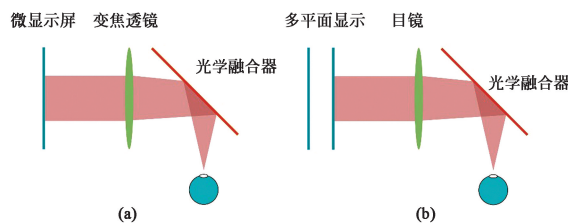


图 1 多平面增强现实显示原理图。(a) 基于变焦透镜的多平面增强现实显示;(b) 基于固定焦距透镜的多平面增强现实显示。

Fig.1 Working principle of multi-plane augmented reality display. (a) Multi-plane augmented reality display system based on vary-focus lenses; (b) Multi-plane augmented reality display system based on a fixed lens.

第一种多平面增强现实显示包含的主要光学元器件有变焦透镜、微显示屏和光学融合器,如图 1(a)所示。通过时分复用的方式快速改变变焦透镜的焦距,将微显示屏成像在不同位置,由于人眼视觉暂留特性,人就好像同时观看到存在于不同深度的多个平面图像。而光学融合器实现对图像光的反射和对真实世界的透射,使人看到虚拟 3D 场景叠加于真实世界之上。如亚利桑那大学

Hua 教授通过施加不同电压改变液体透镜的焦距来实现多平面显示^[20],但由于液体透镜响应速度较慢,该系统所能实现的深度平面个数有限。2014年,他们课题组又提出用具有快速响应速度的可变焦反射镜来实现具有6个深度的多平面增强现实显示^[21-22]。中佛罗里达大学等分别用液晶变焦透镜成功地将虚拟图像成像在不同距离^[23-26]。

第二种多平面增强现实显示,如图1(b)所示,用具有固定焦距的透镜,将处于不同深度的图像源(或中间像)成像于不同深度,从而使人眼可进行正确调焦。此系统的关键点在于如何构建位于不同空间位置的图像源(或中间像)。可以用多块透明的显示屏实现多平面显示,也可以简单地通过偏振分光棱镜将一束光一分为二,经过不同的光程最终成像在不同深度位置。液晶器件如液晶散射膜^[27-32]、具有偏振选择特性的液晶反射膜^[33-34]、液晶偏振旋转器^[35-36]等都可以作为关键器件应用在此系统中来构建多平面画面。

下面将针对几种基于液晶散射膜的增强现实显示做具体的介绍。包括基于正型聚合物稳定向列相液晶、反型聚合物稳定向列相液晶、聚合物稳定胆甾相液晶的多平面增强现实显示。

3 基于聚合物稳定液晶的增强现实显示

3.1 聚合物稳定液晶

聚合物稳定液晶(PSLC)(主要指聚合物稳定向列相液晶)体系中,聚合物网络成类似海绵状结构分布在液晶盒中^[37]。向列相液晶分子被聚合物网络分割为一个个小的畴区,若畴区大小接近可见光波长,则光会发生散射。PSLC可以分为两类:正型PSLC和反型PSLC。正型PSLC在未施加电压的情况下为散射状态,施加电压变为透明状态,如图2(a)、(b)所示。反型PSLC在未施加电压时表现为透明状态,而在施加电压的情况下变现为散射状态,如图2(c)、(d)所示。由于聚合物网络的加入使液晶响应速度得到大幅度提高,从而可以作为快速可切换散射屏幕接收来自投影设备的图像,应用于增强现实显示系统中。

向列相液晶器件在施加电压和撤去电压的响应时间为:

$$\tau_{\text{电压开}} = \frac{\tau_0}{(V/V_{\text{th}})^2 - 1}, \quad (1)$$

$$\tau_{\text{电压关}} = \tau_0 = \frac{\gamma_1 d^2}{\pi^2 K_{11}}, \quad (2)$$

其中: K_{11} 为液晶弹性常数, γ_1 液晶的粘滞系数, V 为施加的电压, V_{th} 为阈值电压, τ_0 为液晶的自由回复时间, d 为液晶盒厚^[38-39]。若把PSLC看作向列相液晶器件,由于聚合物网络的引入,液晶分子和聚合物网络间的相互作用使其需要更高的电压才能让液晶分子发生转动,因此弹性常数 K_{11} 是普通向列相液晶的500~1000倍。由于液晶的粘滞系数在单体固化前后基本保持不变,根据式(2),PSLC的自由回复时间减小,相应的上升和下降时间也都得到了改进。

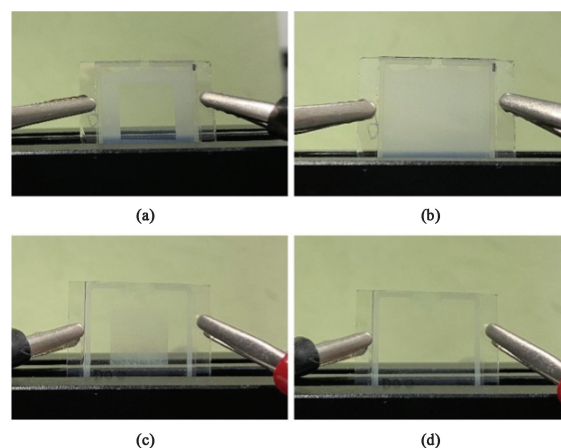


图2 正型和反型聚合物稳定液晶。(a)正型PSLC施加电压;(b)正型PSLC未施加电压;(c)反型PSLC施加电压;(d)反型PSLC未施加电压。

Fig.2 Normal-mode and reverse-mode polymer stabilized liquid crystals. (a) Normal-mode PS LC with applied voltage on; (b) Normal-mode PS LC with applied voltage off; (c) Reverse-mode PS LC with applied voltage on; (d) Reverse-mode PS LC with applied voltage off.

3.2 系统原理

如图3所示,基于PSLC的多平面增强现实显示光学系统主要由投影设备、多个PSLC散射屏、目镜、光学融合器组成。通过控制每一片PSLC的状态使它们在散射态和透明态之间切换,使任一时刻仅有一片PSLC处于散射态,其他PSLC处于透明状态。通过同步投影画面时序以

及每个 PSLC 的开关状态,由于人眼的视觉暂留效应,可产生多个深度平面同时存在的感觉。进而在目镜的放大作用和光学融合器的虚实融合功能下,使用户同时看到虚拟的多层三维图像和真实的环境。

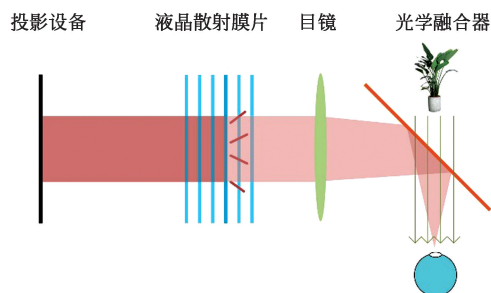


图 3 基于 PSLC 的多平面增强现实显示系统原理图

Fig.3 Schematics of a multi-plane augmented reality display system based on PSLC

3.3 基于正型 PSLC 增强现实显示实验与结果

对于正型 PSLC 散射片,一般由正性向列相液晶和聚合物组成。在实验中我们采用的正型 PSLC 由单体三羟甲基丙烷三丙烯酸酯(TMPTA)和向列相液晶 5CB 以 10 : 90 的重量比混合均匀。并在室温下用 15 mW/cm^2 紫外光均匀曝光 20 min 固化。其工作原理如图 4 所示。在未施加电压的情况下,液晶分子由于聚合物网络的束缚杂乱地分布,导致样品内部不同畴区液晶指向矢方向也不尽相同,因此入射光被散射开来,液晶膜片在宏观上表现为散射态;在施加电压的情况下,正性液晶分子在电场的作用下最终向平行于电场的方向排列,此时液晶分子折射率 n_o 与聚合物折射率相匹配,因此入射光大部分透过,液晶膜片在宏观上表现为透明态^[27]。

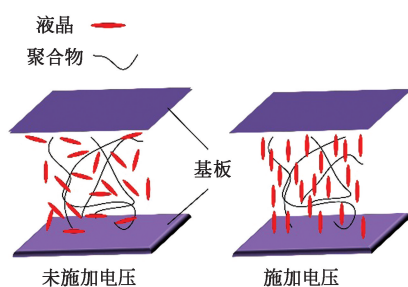


图 4 正型 PSLC 工作原理

Fig.4 Working principle of the normal-mode PSLC

通过实验测量,正型 PSLC 的上升时间为 0.3 ms,下降时间为 0.35 ms,总的响应时间为 0.65 ms。在可见光 400~700 nm 的波段范围内正型 PSLC 散射态透过率为 4% 左右,透明态透过率约为 80% 左右。配合高速投影数字微镜器件(DMD),实现的 60 Hz 多平面增强现实显示如图 5 所示。当照相机分别聚焦在 30,50,80,500 cm 时,可以分别清楚地观察到具有正确深度信息 A、B、C、D 的 4 个英文字母,从而从根本上解决了调焦和辐辏冲突的问题。

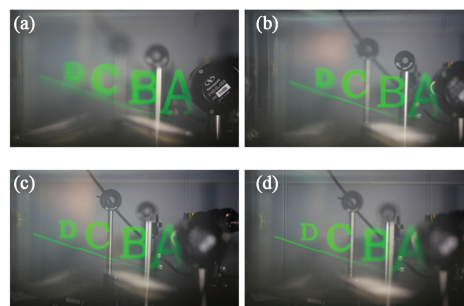


图 5 基于正型 PSLC 的四平面增强现实显示^[28],相机分别聚焦在 30 cm(a),50 cm(b),80 cm(c),500 cm(d)。

Fig.5 Four-plane augmented display based on normal-mode PSLC scattering shutters, the camera is focused at 30 cm(a),50 cm(b),80 cm(c),500 cm(d), respectively.

由于 PSLC 在整个可见光波段都具有较好的散射和透过特性。用 RGB LED 对 DMD 进行时序照明则可以实现彩色显示。由于 DMD 的衍射特性,在设计中通过小孔只保留 RGB 三色中能量较高的一级衍射级次而滤除其他高阶级次,以保证光束的准直特性,从而使处于不同深度的 PSLC 都能接收到清晰的图像。图 6 所示为基于正型 PSLC 的彩色双平面双目增强现实显示效果图。图中为左右眼图像分别显示在距离人眼 0.3 m 和 5 m 远的地方^[29]。

3.4 基于反型 PSLC 增强现实显示实验与结果

反型 PSLC 一般由负性向列相液晶和聚合物组成。在我们实验中采用的反型 PSLC 由单体 RM257 和负性液晶 HNG715611-000 以 6 : 94 的重量比混合均匀并固化实现。其工作原理如图 7 所示,在未施加电压的情况下,液晶分子垂直分布于垂直配相的液晶盒中。对于垂直入射光来说,

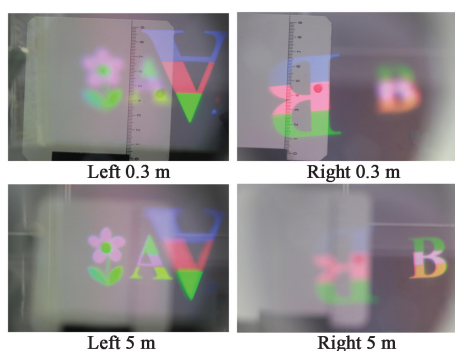


图 6 基于正型 PSLC 的双平面彩色增强现实显示^[29]

Fig.6 Dual-plane full-color augmented display based on normal-mode PSLC scattering shutters

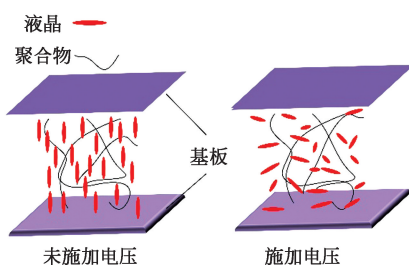


图 7 反型 PSLC 工作原理

Fig.7 Working principle of the reverse-mode PSLC

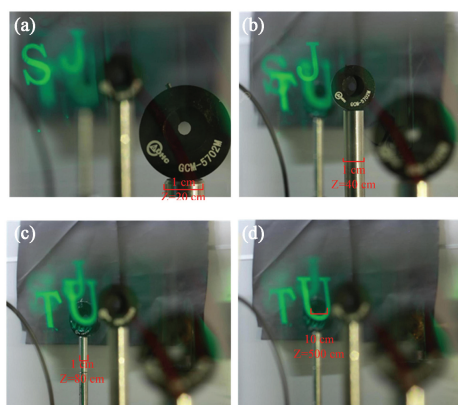


图 8 基于反型 PSLC 的四平面增强现实显示^[30],相机分别聚焦在 20 cm(a),40 cm(b),80 cm(c),500 cm(d)。

Fig.8 Four-plane augmented display based on reverse-mode PSLC scattering shutters, the camera is focused at 20 cm(a),40 cm(b),80 cm(c),500 cm(d), respectively.

此时液晶折射率为 n_o 。且与聚合物折射率相匹配,液晶膜片在宏观上表现为透明态。在施加电压的情况下,负性液晶分子在电场的作用下向电场垂

直的方向转动,使不同畴区的液晶指向矢呈不同角度分布,液晶膜片在宏观上表现为散射态^[30]。

反型 PSLC 的上升时间为 1.1 ms,下降时间为 0.8 ms,总的响应时间为 1.9 ms。在可见光 400~700 nm 的波段范围内,反型 PSLC 在未施加电压的情况下,透过率为 90%左右;在施加电压的情况下,随着波长的增加透过率从 2%增加到 15%左右。图 8 为基于反型 PSLC 的多平面增强现实显示结果。S、J、T、U 4 个字母分别成像在 20,40,80,500 cm 的深度。

由于此系统中每一时刻仅有一片 PSLC 处于散射状态。对于基于正型 PSLC 的显示系统,仅有一片不需要施加电压,其他所有 PSLC 膜片均需施加较高的电压。而对于基于反型 PSLC 的显示系统,仅有一片需要施加电压。所以相比于基于正型 PSLC 的多平面显示系统,反型 PSLC 的系统更加节能,尤其在显示较多平面深度时优势更加明显。

4 基于聚合物稳定胆甾相液晶的增强现实显示

胆甾相液晶(CLC)每层分子的指向矢以螺旋方式周期分布,并对中心波长附近的光线有明显的偏振选择反射特性^[40-41]。聚合物稳定胆甾相液晶(PSCT)则是在胆甾相液晶中掺入聚合物网络,从而加速器件的响应时间。PSCT 按照工作方式分为正型 PSCT 和反型 PSCT。如图 9(a)所示,正型 PSCT 在未施加电压的情况下,液晶呈现角锥织构态,不同畴区的液晶螺旋轴随机排列。当液晶微畴的大小与可见光波长接近时,入射光就被散射开来,器件处于散射状态。当施加电压时,液晶分子在电场作用下垂直于基板均匀排列,因此器件处于透明状态。对于反型 PSCT,如图 9(b)所示,同样由正性液晶制作而成,在未施加电压时在基板取向层的作用下,液晶处于平面织构状态。若将 CLC 液晶的反射带宽调至红外波段,则器件在可见光照射下处于透明状态;当施加电压时,在聚合物和电场的共同作用下,液晶分子呈现角锥织构态,不同畴区的随机排列使器件处于散射状态。

由于 PSCT 快速响应特性,使其可应用于时分复用的多平面显示中。其显示原理结构与基于

PSLC 的多平面显示类似。通过时序投影并控制每个 PSCT 的状态,从而构建多平面的三维显示画面,最终通过目镜和光学融合器使人眼观看到放大的虚拟画面。

中佛罗里达大学在向列相液晶 E7(质量分数 92.7%)中加入手性剂 R811(质量分数 2.8%)、聚合物 RM257(质量分数 4%)以及少量光敏引发剂,经过紫外光曝光制作的反型 PSCT 的透明态透过率和散射态的透过率分别为 98.2%和 7.6%。上升和下降过程也实现了快速的响应特性,分别为 1.1 ms 和 1.5 ms。他们利用这种 PSCT 成功实现了具有正确调焦信息的双平面虚拟现实显示^[31]。2019 年,肯特大学制作的反型 PSCT 透明

态透过率为 85%,散射态透过率为 15%,上升和下降时间分别为 1.1 ms 和 1.8 ms,也实现了多平面的体三维显示^[32]。

5 结 论

本文主要回顾了基于聚合物稳定向列相液晶、聚合物稳定胆甾相液晶散射膜片的多平面增强现实显示。多平面显示能够提供正确的调焦和辐辏信息,是一种真三维显示。通过将聚合物网络加入液晶体系中,一方面可使其实现透明状态和散射状态的切换,另一方面显著加快了液晶的响应速度。因此,多层液晶散射膜作为可切换屏幕,承接来自高速投影设备的图像,以时分复用的方式实现多平面画面显示。其中聚合物稳定液晶的响应时间可以达到 0.65 ms,聚合物稳定胆甾相液晶的响应时间也可以达到 3 ms 以内。虽然响应时间得到提高,但聚合物的加入也增大了驱动电压,因此未来需要在保证良好光学特性的同时,尽可能降低驱动电压,如引入稀释剂等方法优化材料体系。为实现更多的深度平面数,除了时分复用方法,也可以考虑利用液晶器件的偏振选择性和波长选择特性,用偏振复用或波长复用的方法实现更多平面的画面显示。基于时分复用的多平面显示对于投影设备的帧频也提出很高的要求,未来也可考虑利用全息的方法同时显示出多平面画面,以降低对投影器件帧频的要求。多平面显示相比于其他真三维显示,可以更好地利用成熟的二维显示技术,相信随着显示技术、微电子技术、计算机技术的发展,会在未来的增强现实显示设备中得到更广泛的应用。

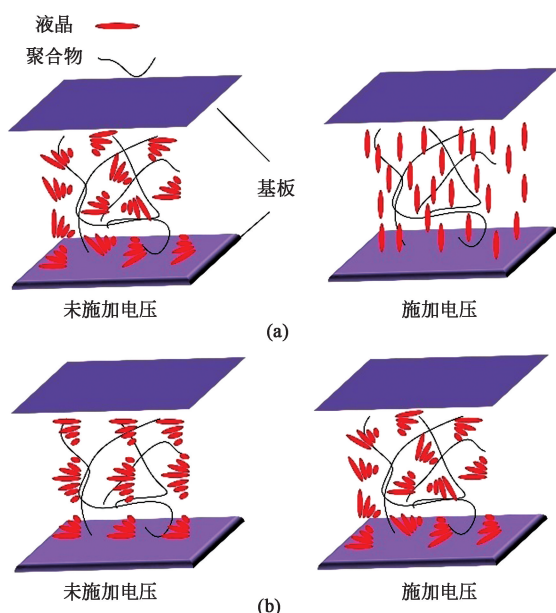


图 9 聚合物稳定胆甾相液晶工作原理。(a) 正型 PSCT; (b) 反型 PSCT。

Fig.9 Working principles of PSCTs. (a) Normal-mode PSCT; (b) reverse-mode PSCT.

参 考 文 献:

- [1] GENG J. Three-dimensional display technologies [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [2] JAVIDI B, OKANO F. *Three-dimensional Television, Video, and Display Technologies* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2002.
- [3] CARMIGNIANI J, FURHT B, ANISETTI M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications [J]. *Multimed. Tools Appl.*, 2011, 51(1): 341-377.
- [4] CAKMAKCI O, ROLLAND J. Head-worn displays: a review [J]. *J. Disp. Technol.*, 2006, 2(3): 199-216.
- [5] ZOU B C, LIU Y, GUO M, et al. EEG-based assessment of stereoscopic 3D visual fatigue caused by vergence-accommodation conflict [J]. *J. Disp. Technol.*, 2015, 11(12): 1076-1083.
- [6] SHIBATA T, KIM J, HOFFMAN D M, et al. Visual discomfort with stereo displays: effects of viewing distance

- and direction of vergence-accommodation conflict [C]//*Proceedings of SPIE Stereoscopic Displays and Applications XXII*. San Francisco Airport, California, United States; SPIE, 2011: 78630P.
- [7] HUA H, JAVIDI B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [8] PARK J H, HONG K, LEE B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(34): H77-H94.
- [9] SONG W T, CHENG Q J, LIU Y, *et al.* Three-dimensional image authentication using binarized images in double random phase integral imaging [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2019, 17(5): 051002.
- [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]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(1): 127-130.
- [11] LI G, LEE D, JEONG Y, *et al.* Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [12] WAKUNAMI K, HSIEH P Y, OI R, *et al.* Projection-type see-through holographic three-dimensional display [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12954.
- [13] LI X, CHEN C P, GAO H Y, *et al.* Video-rate holographic display using azo-dye-doped liquid crystal [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(6): 438-443.
- [14] LI X, CHEN C P, LI Y, *et al.* Real-time holographic display using quantum dot doped liquid crystal [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2014, 45(1): 736-738.
- [15] UENO T, TAKAKI Y. Super multi-view near-eye display using time-multiplexing technique [C]//*Proceedings of 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications*. Orlando, Florida, the United States; OSA, 2018: 3Tu2G.4.
- [16] TENG D D, XIONG Y, LIU L L, *et al.* Multiview three-dimensional display with continuous motion parallax through planar aligned OLED microdisplays [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(5): 6007-6019.
- [17] TENG D D, WANG B, GENG T, *et al.* Super-parallel holographic correlator with optical fixing [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2007, 39(6): 1125-1129.
- [18] AKELEY K, WATT S J, GIRSHICK A R, *et al.* A stereo display prototype with multiple focal distances [J]. *ACM Trans. Graphics*, 2004, 23(3): 804-813.
- [19] SMALLEY D E, NYGAARD E, SQUIRE K, *et al.* A photophoretic-trap volumetric display [J]. *Nature*, 2018, 553(7689): 486-490.
- [20] LIU S, HUA H, CHENG D W. A novel prototype for an optical see-through head-mounted display with addressable focus cues [J]. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics*, 2010, 16(3): 381-393.
- [21] HU X D, HUA H. Design and assessment of a depth-fused multi-focal-plane display prototype [J]. *J. Disp. Technol.*, 2014, 10(4): 308-316.
- [22] HU X D, HUA H. Design and tolerance of a free-form optical system for an optical see-through multi-focal-plane display [J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(33): 9990-9999.
- [23] CHEN H S, WANG Y J, CHEN P J, *et al.* Electrically adjustable location of a projected image in augmented reality via a liquid-crystal lens [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(22): 28154-28162.
- [24] TAN G J, ZHAN T, LEE Y H, *et al.* Polarization-multiplexed multiplane display [J]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(22): 5651-5654.
- [25] LEE Y H, TAN G J, YIN K, *et al.* Compact see-through near-eye display with depth adaption [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2018, 26(2): 64-70.
- [26] LEE Y H, TAN G J, ZHAN T, *et al.* Recent progress in Pancharatnam-Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities [J]. *Opt. Data Process. Storage*, 2017, 3(1): 79-88.
- [27] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* A multi-plane optical see-through head mounted display design for augmented reality applications [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2016, 24(4): 246-251.
- [28] LIU S X, LI Y, SU Y K. Multiplane displays based on liquid crystals for AR applications [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2020, 28(3): 224-240.

- [29] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* Full-color multi-plane optical see-through head-mounted display for augmented reality applications [J]. *J. Soc. Inf. Disp.*, 2018, 26(12): 687-693.
- [30] LIU S X, LI Y, ZHOU P C, *et al.* Reverse-mode PSLC multi-plane optical see-through display for AR applications [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(3): 3394-3403.
- [31] LEE Y H, CHEN H W, MARTINEZ R, *et al.* Multi-image plane display based on polymer-stabilized cholesteric texture [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2017, 48(1): 760-762.
- [32] JOSHI V, GROOM M, CHIEN L C. Glasses-free 3-D visualization with multi-layered transparent cholesteric films [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(12): 16847-16854.
- [33] CHEN Q M, PENG Z H, LI Y, *et al.* Multi-plane augmented reality display based on cholesteric liquid crystal reflective films [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(9): 12039-12047.
- [34] CHEN Q M, PENG Z H, LI Y, *et al.* Multi-plane display based on cholesteric liquid crystal films [J]. *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, 2019, 50(S1): 358-360.
- [35] LEE Y H, PENG F L, WU S T. Fast-response switchable lens for 3D and wearable displays [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(2): 1668-1675.
- [36] LEE C K, MOON S, LEE S, *et al.* Compact three-dimensional head-mounted display system with Savart plate [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(17): 19531-19544.
- [37] YANG D K, WU S T. *Fundamentals of Liquid Crystal Devices* [M]. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2015.
- [38] SUN J, WU S T. Recent advances in polymer network liquid crystal spatial light modulators [J]. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2014, 52(3): 183-192.
- [39] SUN J, XIANYU H Q, CHEN Y, *et al.* Submillisecond-response polymer network liquid crystal phase modulators at 1.06- μm wavelength [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(2): 021106.
- [40] RYABCHUN A, BOBROVSKY A. Cholesteric liquid crystal materials for tunable diffractive optics [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, 6(15): 1800335.
- [41] MITOV M. Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(47): 6260-6276.

作者简介:



刘澍鑫(1990—),男,山东莱芜人,博士研究生,2014 年于电子科技大学获得学士学位,主要从事增强现实显示和液晶器件方面的研究。E-mail: liushuxin@sjtu.edu.cn



李 燕(1982—),女,浙江绍兴人,博士,副教授,2012 年于中佛罗里达大学获得博士学位,主要从事增强现实显示和液晶器件方面的研究。E-mail: yan.li@sjtu.edu.cn