

# 光学学报

## 增强现实近眼显示中辐辏调节冲突研究进展

王书龙<sup>1</sup>, 林子健<sup>2</sup>, 徐世祥<sup>1\*</sup>, 王瑜<sup>3</sup>, 羊琨<sup>3</sup>, 黄一丹<sup>2</sup>, 陈恩果<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>深圳大学物理与光电工程学院, 广东 深圳 518060;

<sup>2</sup>福州大学物理与信息工程学院平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350108;

<sup>3</sup>南阳利达光电有限公司, 河南 南阳 473003

**摘要** 近眼显示光学系统是增强现实(AR)技术的核心基础,是接收虚拟画面信息和融合现实环境进行显示的直接载体。辐辏调节是人眼生理机能的辐辏距离和晶状体聚焦调节距离相匹配的基本生理反应。当前AR近眼显示方案仅提供具有左、右眼视差片源形成的3D显示效果,相对于正常环境的目视观察有极大差距,造成人眼辐辏调节冲突(VAC)。缓解或消除VAC是AR近眼显示系统发展和普及的必由之路,其主要解决方案包括:部分深度信息的光学显示系统,如两焦面或多焦面近眼显示光学方案;完整深度信息的光学方案,如集成成像光场显示技术和计算全息波前重建的近眼显示方案;无深度信息的光学显示方案,如基于Maxwellian显示技术的近眼显示光学系统。本文综述了当前技术发展过程中缓解或消除VAC的近眼显示光学方案,分析了各技术的特点、实现方式,以及优缺点,最后总结了当前AR近眼显示中解决VAC问题面临的挑战,并对未来技术和显示方案的发展前景进行了展望。

**关键词** 近眼显示; 增强现实; 辐辏调节冲突; 增强现实; 深度信息

中图分类号 TN873;O43

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231074

### 1 引言

增强现实<sup>[1-4]</sup>(AR)作为元宇宙的入口技术<sup>[5]</sup>,极有可能成为下一代计算平台<sup>[6-8]</sup>。主流AR光学结构有光波导<sup>[9-18]</sup>、自由曲面棱镜<sup>[19]</sup>、Birdbath等,其中光波导形态酷似普通眼镜片,同时兼具现实目标物的显示增强功能,有望成为改变人类生活方式的一种颠覆性革新技术<sup>[20]</sup>。近眼显示光学系统作为AR的核心组成部分,显示模组的成熟化是AR技术普及的重要一环。其中,解决近眼显示系统视觉辐辏调节冲突(VAC)<sup>[21-24]</sup>问题是AR及平视显示器(HUD)<sup>[25]</sup>大规模应用的一个关键门槛及痛点之一<sup>[26-27]</sup>。

人类获取外界信息时,80%都是通过人眼视觉获取的<sup>[28]</sup>。当人们观看生活中真实场景时,人眼辐辏距离和调节距离相互匹配<sup>[21,29]</sup>,根据物体远近距离不同,人眼需要调节晶状体的曲率和薄厚,从而改变其屈光度使光线聚焦在视网膜上被感知。此时,通过改变晶状体不同的屈光能力,使物体光线能清晰聚焦在视网膜上成像的距离称为调节距离。如图1(a)所示,不同距离物体的光线进入人眼经过晶状体屈光成像到视网膜上,可以看到远处物体的光线角度小,经过晶状体微弱的屈光后成像到视网膜上,相比于远处的物体,近处

的物体光线需要晶状体有更强的屈光能力,才能成像到视网膜上。另一方面,在真实环境中,由于人们看到的物体处于不同距离,左右眼观看近处物体时,两眼视轴相交角度大,观看远处物体时两眼视轴相交角度小。此时,观看不同距离物体时两眼视轴夹角的变化称为辐辏变化。视轴交点与人眼的距离,称为辐辏距离,可以简单理解为观看不同距离物体时,大脑感知物体的距离。在真实场景中,观看不同场景物体辐辏距离和调节距离是相互匹配的<sup>[30]</sup>,两者的变化同步发生<sup>[31]</sup>,这时候人眼处于正常舒适的状态。

然而,近眼显示光学系统为了获得3D显示效果,会将左、右眼显示画面模拟真实场景,显示有一定视差的左、右眼独立画面,使得大脑感知3D显示效果<sup>[32]</sup>。眼睛晶状体调节的距离始终聚焦在近眼显示光学系统微显示器像源的虚像平面处,即眼睛调节距离是固定值。另一方面由于设置了具有视差的左、右眼画面,大脑会感觉3D画面物体的远近,导致人眼辐辏距离随着内置片源画面内容变化。这造成观看3D影片时人眼焦点调节与屏幕信息纵深感不匹配,即眼睛调节距离始终固定在微显示器的虚像平面处,而感知的3D物体却有远近变化,这就造成VAC问题,这在裸眼3D显示<sup>[33-36]</sup>中也有同样的困扰<sup>[37]</sup>。当用户长时间处于这种

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-07-03; 录用日期: 2023-08-02; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(12004261,12174264,61775142,62075138,92050203)、福建省区域发展项目(2023H41010008)

通信作者: \*shxxu@szu.edu.cn; \*\*ceg@fzu.edu.cn

状态时,会造成人眼视觉疲劳、头晕呕吐等现象<sup>[26-27, 38]</sup>。图 1(b)所示为左、右眼观看有视差的片源的 3D 画面,这时人眼的调节距离为人眼到聚焦面(微显示器面)的距离,可以看到其与辐辏距离并不匹配。为了更好地理解 VAC 效应,图 1(c1)~(c4)<sup>[21]</sup>以相交的栅格网来示意,其中图 1(c1)辐辏距离和调节距离

相匹配,图 1(c2)为相应的视觉效果,相交处栅格网聚焦清晰,往边缘的成像逐渐离焦模糊化;然而,图 1(c3)中辐辏距离和调节距离不匹配,图 1(c4)为使用近眼显示器观看到的 3D 效果,辐辏调节距离失配,观看到的 3D 效果栅格的全局均为清晰。图 1(d)~(f)为再以皮球、魔方示意,以便进一步理解 VAC。

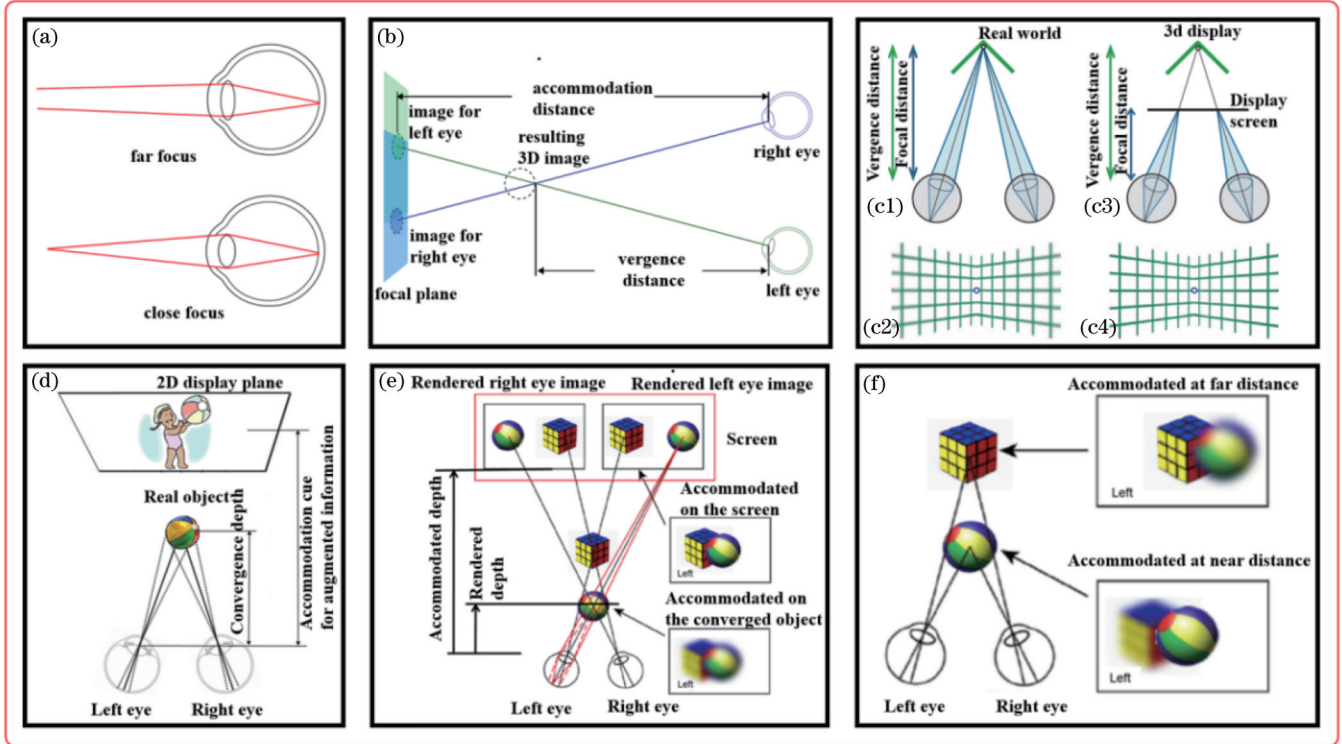


图 1 人眼 VAC 原理示意图。(a)不同距离物体的光线进入人眼经过晶状体屈光成像到视网膜上<sup>[29]</sup>; (b)左、右眼观看有视差的片源的 3D 画面<sup>[39]</sup>; (c1)~(c4)以相交的栅格网示意 VAC<sup>[20]</sup>; (d)、(e)、(f)以皮球、魔方示意 VAC<sup>[40]</sup>

Fig. 1 Principle schematic of human eye VAC. (a) Light from objects at different distances enters eyes and is refracted by lens and imaged on retina<sup>[29]</sup>; (b) left and right eyes watch 3D images of film sources with parallax<sup>[39]</sup>; (c1)~(c4) schematic of VAC with an intersecting raster grid<sup>[20]</sup>; (d), (e), (f) VAC is illustrated by a ball and a Rubik's cube<sup>[40]</sup>

近眼显示光学系统中 VAC 导致显示画面背离人们真实世界中的感知,带来诸多不良用户体验<sup>[41-43]</sup>,是 AR 系统长时间使用和普及化进程中亟待解决的痛点。VAC 的根本原因在于近眼显示光学设计方案的深度信息不完整,使眼睛晶状体调节距离固定。对深度信息调控,是解决近眼显示光学系统 VAC 的关键所在。

AR 近眼显示光学设计方案直接关乎 VAC 的缓解和消除,本文总结了近年研究中为了克服或缓解 VAC 提出的近眼显示光学系统,包括无深度信息的近眼显示方案、有多个焦面深度信息的近眼显示方案,以及具有完整深度信息的近眼显示方案。最后,对解决 AR 技术中 VAC 的近眼显示方案的研究现状进行了总结,并展望了其未来发展前景。

## 2 VAC 解决方案总述

VAC 是 AR 光学显示技术发展一个不可逾越的技术难题<sup>[29, 44-45]</sup>,本文对其解决方案进行分类,为甄

选适合不同技术发展需求的 VAC 解决方案提供参考。

近眼显示系统和真实环境均会给人们带来 3D 感知体验,并且匹配场景产生对应的辐辏反馈。不同点在于通常的近眼显示系统没有提供晶状体调节的深度信息,用户只能将眼球聚焦于微显示器像面。如果能解除晶状体必须强制聚焦的限制,即人眼晶状体在不同屈光度的状态下,均可以清晰看到画面信息,即可以克服 VAC。

作为 VAC 解决方案之一的 Maxwellian 显示<sup>[46]</sup>符合此种特性,实现人眼晶状体在任何状态下均可以在视网膜上清晰成像。Maxwellian 显示技术<sup>[46]</sup>将画面信息以单点光束的形式通过晶状体,随后直接成像到视网膜上,其实现方式有三种:准直照明、图像滤波和激光扫描投影方式,根据加载图像的方式又可分为使用空间光调制器(SLM)和机电系统(MEMS)电磁微镜扫描激光<sup>[47]</sup>。

准直照明的实现方式是通过一束准直光作为照明



光束作用在空间光调制器上,随后通过透镜聚焦成单点光束通过眼睛晶状体光心成像到视网膜上,如图 2(a1)所示。图像滤波的实现方式是通过点光源照射在 SLM 上,随后经过 4f 系统微孔滤波形成聚焦单点光束进入眼睛晶状体,如图 2(a2)所示。激光扫描投

影方式是以单束发散度较小的细光束激光作为光源,通过半导体 MEMS 电磁微镜<sup>[48-49]</sup>对激光束做 2D 方向的扫描偏转,同时对激光束的强度进行同步调制,高速振荡扫描形成图像信息,并聚焦形成单点光束成像在视网膜上,如图 2(a3)所示。

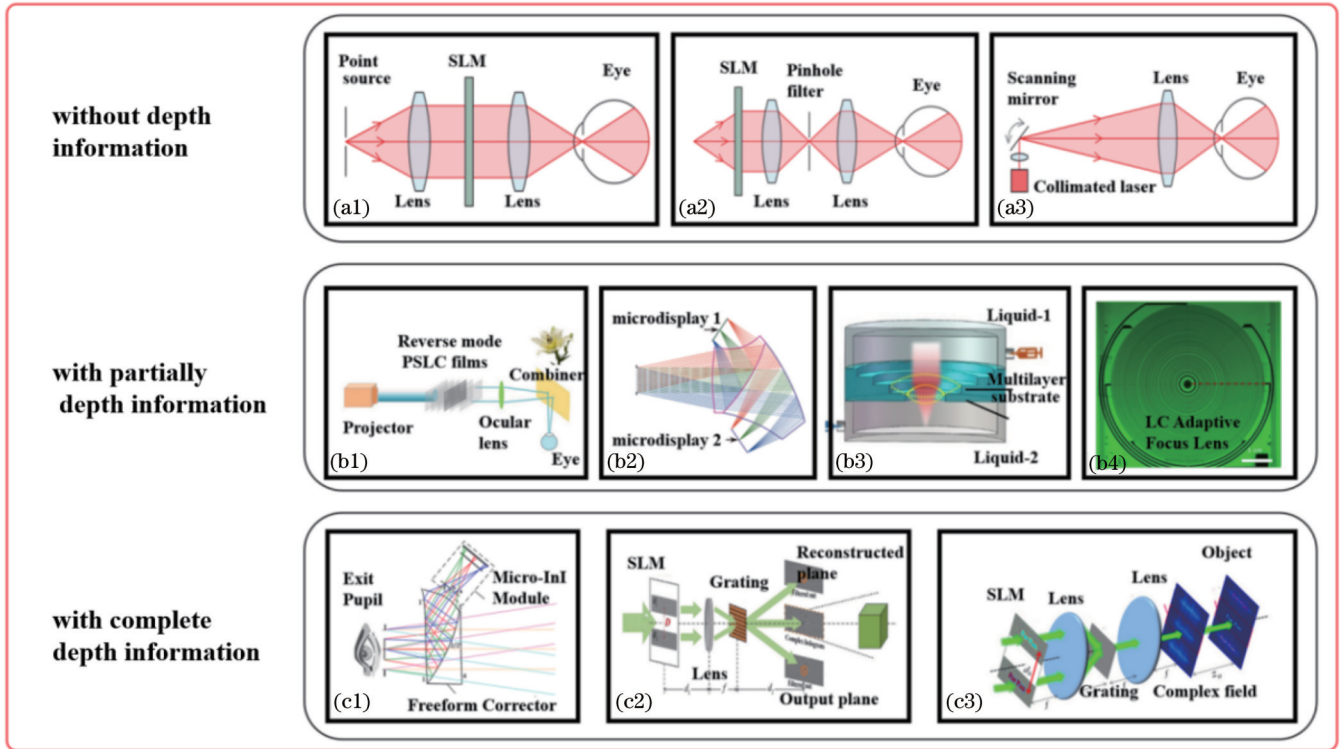


图 2 当前主流 VAC 解决方案分类。无深度信息 VAC 解决方案<sup>[47]</sup>: (a1)准直照明式 Maxwellian 显示技术; (a2)图像滤波式 Maxwellian 显示技术; (a3)激光扫描投影式 Maxwellian 显示技术。部分深度信息 VAC 解决方案: (b1)PSLC 薄膜多焦面技术<sup>[50]</sup>; (b2)基于多显示器空间复用多焦面技术<sup>[118]</sup>; (b3)光流控调焦透镜技术<sup>[52]</sup>; (b4)液晶调焦透镜技术<sup>[54]</sup>。完整深度信息 VAC 解决方案: (c1)基于微透镜阵列的集成成像显示技术<sup>[40]</sup>; (c2)基于复振幅调制的计算全息技术<sup>[62]</sup>; (c3)基于波前调制的全息技术<sup>[63]</sup>

Fig. 2 Current mainstream VAC solution classification. Without depth information<sup>[47]</sup>: (a1) collimated illumination Maxwellian display; (a2) image filtering Maxwellian display; (a3) scanning laser projection Maxwellian display. With partially depth information: (b1) PSLC film multi-focal plane<sup>[50]</sup>; (b2) multi-display spatial-multiplexed multi-focal plane<sup>[118]</sup>; (b3) optofluidic adaptive focus lens<sup>[52]</sup>; (b4) liquid crystal adaptive focus lens<sup>[54]</sup>. With complete depth information: (c1) integral imaging display based on microlens array<sup>[40]</sup>; (c2) holographic display based on complex amplitude modulation<sup>[62]</sup>; (c3) holographic display based on wavefront modulation<sup>[63]</sup>

补偿近眼显示系统的深度信息线索,也是缓解或克服 VAC 的重要技术方向之一。提出的解决方案可以补偿一部分深度信息[图 2(b1)~(b4)]或完整深度信息[图 2(c1)~(c3)],其中,部分深度信息近眼显示系统可以是固定位置多焦面显示方案,例如可以在近眼显示系统中放置两片或多片聚合物稳定液晶(PSLC),如图 2(b1)所示,使得近眼显示光学系统可以成像于不同焦面距离<sup>[50]</sup>,从而具有两个或多个焦面深度信息,一定程度上缓解 VAC。使用多个深度信息的全息图切片载入 SLM 作为近眼显示像源,也可以带来多个焦面深度信息<sup>[51]</sup>。此外,部分深度信息近眼显示系统也可以是焦面可调节的具有动态深度信息的近眼显示方案,例如可变焦光流控透镜<sup>[52]</sup>,如图 2(b3)所示的是可

调焦的液晶透镜用于近眼显示系统实现 AR/VR 模式切换的显示装置<sup>[53]</sup>,如图 2(b4)所示的是具有更快响应速率的可变焦菲涅耳透镜<sup>[54]</sup>,用于近眼显示系统可实现每秒 1600 个焦平面高速变化的可变焦显示<sup>[55]</sup>。

具有完整深度信息的近眼显示系统包括光场集成成像显示和波前重建等方案。光场集成成像显示通过微透镜阵列记录不同角度物体信息,对应地将记录信息通过微透镜阵列复现作为有深度信息的立体微显示像源<sup>[40]</sup>,如图 2(c1)所示。类似于光场显示,研究者也进行了超多视点克服 VAC 的研究<sup>[56-58]</sup>,通过复用技术生成多个视差图像,使不止一个的视差图像进入单个眼睛,重建 3D 物体光场并引起人眼的调节反应。全息记录介质可以记录完整的光空间信息,并重现具有深

度信息的空间场景,从而克服 VAC。对于显示领域来说,需要实现动态的具有深度信息的画面,计算全息<sup>[59-61]</sup>很好地解决了动态画面的需求,如图 2(c2)~(c3)所示,通过 SLM 等光学器件可实现光空间信息波前重建,搭建具有深度信息显示的近眼显示装置<sup>[60, 62-63]</sup>。

如图 2 所示的 VAC 解决方案将分别在第 3 节、4.1 节和 4.2 节介绍。其中,无深度信息 VAC 解决方案主要介绍 Maxwellian 显示技术,部分深度信息 VAC 解决方案的介绍包括多焦面显示技术(物理多焦面和虚拟多焦面)以及可调焦显示技术等,完整深度信息 VAC 解决方案介绍集成成像、计算全息技术方案等。

### 3 无深度信息近眼显示光学系统

无深度信息近眼显示光学系统中,晶状体在任意屈光度状态下,显示画面均能在视网膜上清晰成像,从而消除 VAC,其具体方案为 Maxwellian 近眼显示,又称为视网膜扫描显示。人眼晶状体可理解为具有变焦特性的光学透镜,不同方向光束经过透镜光心入射时,光线传播方向不随透镜曲率变化而变化,当晶状体聚焦到远处或近处时,人眼均可以清晰看到成像画面。微软公司的 Maimone 等<sup>[64]</sup>实现了基于全息相位离轴投影的 Maxwellian 显示<sup>[65]</sup>。Lin 等<sup>[66]</sup>基于 MEMS 的 Maxwellian 显示系统实现了  $33^\circ \times 22^\circ$  的显示视场,出瞳距为 10 mm,将成像光束会聚成  $5 \mu\text{m}$  的点光斑,当光斑处于人眼晶状体光心位置时,成像质量最好。Maxwellian 近眼显示系统允许人眼晶状体在任意焦点的情况下,清晰地观看到近眼显示系统的虚拟画面信息,通过基于 Maxwellian 技术的近眼显示系统观看 3D 画面,眼睛的辐辏距离会随着画面场景变化,而晶状体调节不须强制聚焦在特定的位置处(微显示屏位置),可随着人眼辐辏的改变而调节,从而解决 VAC 问题。它要求会聚光形成的光束点与眼睛出瞳相契合,导致该方案天然地具有出瞳范围的限制及缺陷。同时,Maxwellian 近眼显示方案所能提供的景深范围  $\Delta l$  表达式<sup>[67]</sup>为

$$\Delta l = 2\delta f d l^2 / (f^2 d^2 - l^2 \delta^2), \quad (1)$$

式中: $\delta$  为视网膜上可感知的最小分辨率尺寸; $f$  为人眼等效焦距; $d$  为瞳孔处的系统出瞳孔径大小; $l$  为人眼聚焦面深度,当系统出瞳孔径大小变化时会有不同的景深范围。

Maxwellian 天然具有出瞳范围小的限制,在 3.1 节、3.2 节将介绍对应的解决方案。其中,激光扫描投影方式是通过 MEMS 电磁微镜按时序扫描光束来实现在视网膜上的图像显示,近年在 AR 领域已经引起广泛探索及应用<sup>[68-71]</sup>,3.3 节综述了 MEMS 微镜技术与各类微显示技术的综合对比。

#### 3.1 Maxwellian 近眼显示的横向出瞳扩展

Maxwellian 显示<sup>[46, 72]</sup>用于 AR 近眼显示光学系统<sup>[73-75]</sup>,能消除人们在观看 3D 画面时晶状体强制聚焦的限制,使眼睛在任意聚焦情况下均可以实现清晰视网膜成像。由于 Maxwellian 近眼显示以单点光束进入人眼成像,严格要求人眼瞳孔位置与光束点位置匹配。这就给 Maxwellian 近眼显示系统带来了一定的限制,显示系统要求人眼必须限制在 Maxwellian 光束范围内,即 Maxwellian 近眼显示系统存在眼动范围小的问题。

对 Maxwellian 近眼显示系统进行出瞳扩展的主要方案包括眼球跟踪和视点复制。Kim 等<sup>[76]</sup>在全息光波导光线耦出部分设置多个复用反射和聚焦功能全息光学元件(HOE),通过 3 个反射聚焦式 HOE 实现  $9.2^\circ \times 5.2^\circ$  的显示视场,眼动范围为  $9 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,如图 3 所示。同样利用视点的复制,Xiong 等<sup>[77]</sup>采用离轴反射透镜阵列将光波导系统的复制出瞳与 Maxwellian 近眼显示系统相结合,对出瞳进行扩展的同时实现  $100^\circ$  对角线视场,但该方案的分辨率在眼睛视轴方向的正常观察距离下受到了影响。便携性是 AR 穿戴显示的核心要素之一,Wang 等<sup>[78]</sup>提出了基于 Maxwellian 显示的无目镜光学方案,使用单个振幅型 SLM 加载  $1200 \times 1200$  分辨率的彩色全息图,进行离轴全息投影的 Maxwellian 近眼显示,同时在水平方向添加多个球面波会聚产生多个视点进行水平方向的出瞳扩展,相邻视点间隔设置为 4 mm,并且可以根据不同的观测条件进行调整。

#### 3.2 Maxwellian 近眼显示的轴向出瞳扩展

在眼睛视轴方向,Maxwellian 近眼显示要求出瞳能严格匹配光束聚焦点轴向位置,眼睛向前或向后移动都会导致画面显示不完整。针对这一问题,Choi 等<sup>[79]</sup>使用可调焦透镜(FTL)匹配人眼向前或向后的轴向运动,经过可调焦透镜修正后的 Maxwellian 近眼显示系统可以使人眼在焦距可调节范围内清晰观看显示画面,实现  $10.7^\circ \times 7.99^\circ$  的显示视场,在视轴方向 1 cm 范围内可以完整显示图像,如图 4 所示。该方案提出并补偿眼球在视轴方向运动偏移的眼动范围,起到了良好的补偿效果。然而,该方案也存在一定的不足,如眼睛前端集成聚焦反射功能的 HOE 引入了成像像差,以及需要深入分析经过 FTL 调节后视场角(FOV)参数和相对于变焦补偿后不同 FOV 对应的显示图像分辨率等相关参数变化。对于 AR 近眼显示系统,显示图像 FOV、图像分辨率、显示像差等都是 AR 显示光学系统的核心参数。此外,Zhang 等<sup>[80]</sup>提出全息 Maxwellian 近眼显示,可调整光线的投影角度从而扩展连续可变的眼动范围,实现了近眼显示系统出瞳位置与人眼位置的动态匹配,解决了眼动范围小以及视点间距与人眼瞳孔直径不匹配的问题。



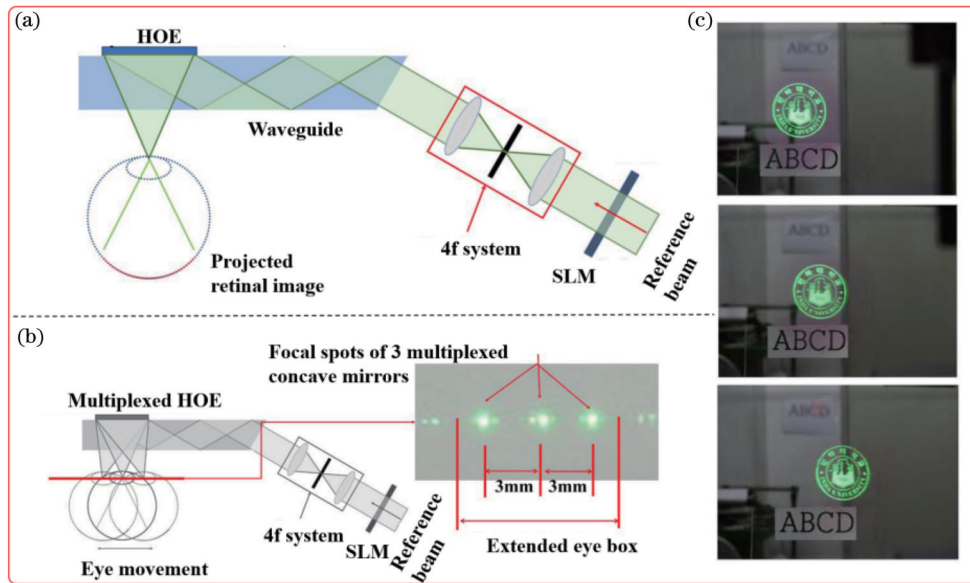


图 3 Maxwellian 显示系统出瞳扩展<sup>[76]</sup>。(a) 图像滤波式 Maxwellian 显示, HOE 作为耦出元件; (b) 多路复用的 HOE 作为耦出元件; (c) 出瞳扩展后不同位置的画面显示

Fig. 3 Maxwellian display system with pupil expanded<sup>[76]</sup>. (a) Image filtering Maxwellian display. HOE as coupling-out element; (b) multiplexed HOE as coupling-out element; (c) screen display of different positions with pupil expanded

### 3.3 半导体 MEMS 电磁微镜 Maxwellian 近眼显示

MEMS 电磁微镜技术的发展由来已久<sup>[81]</sup>, 其最为典型、广泛的应用是以德州仪器为代表的数字光处理 (DLP) 微显示屏<sup>[82-83]</sup>。它是以单个微镜为像素点, 微镜阵列实现屏幕显示, 通过控制微镜产生一定角度翻转, 实现该像素微镜的开闭。而单片微镜振荡扫描光束显示技术由于单个微镜扫描速率的工艺技术限制<sup>[84-85]</sup>, 在显示行业产品应用中较为少见。随着微软发布其代表性近眼显示头戴产品 HoloLens 2 搭载了 MEMS 电磁微镜, 使得 MEMS 电磁微镜在 AR 近眼显示行业中引起广泛的关注<sup>[69-71]</sup>。

#### 3.3.1 半导体 MEMS 电磁微镜与其他像素点阵列微显示技术的对比

Maxwellian 近眼显示实施方式除了准直照明和图像滤波的实现方式, 还包括激光投影扫描方式。近眼显示系统中, 虚拟画面显示的图像源来自微显示器, 这是 AR 显示系统的核心组成部件之一。激光投影扫描式 Maxwellian 近眼显示系统使用半导体 MEMS 电磁微镜替代微显示器作为像源呈现虚拟画面。更高速率扫描意味着可以为用户提供更高质量显示画面, 而 MEMS 电磁微镜扫描速率的限制一直是制约其发展的重要因素之一<sup>[84-85]</sup>。

MEMS 电磁微镜的作用等效于传统的微显示器, 如微型发光二极管 (Micro-LED)、微型有机发光二极管 (Micro-OLED)、硅基液晶 (LCoS) 等, 如图 5 所示。Micro-LED 显示技术<sup>[86]</sup>是 LED 微缩化和矩阵化技术。相比于传统显示技术, Micro-LED 拥有出色的亮度<sup>[87]</sup>、高光效率<sup>[88]</sup>、低能耗、高反应速度、高对比度、超高分辨率与色彩饱和度等, 被认为是理想的显示技

术。目前, 单色和彩色 Micro-LED 微显示屏均有样品, 但仍有待进一步克服工艺难题<sup>[89-92]</sup>, 采用量子点色转换技术实现 Micro-LED 的全彩化是一条潜在可行的技术路线<sup>[93-96]</sup>。另一种自发光微显示屏技术为 Micro-OLED, 是以单晶硅晶圆为背板的有机发光二极管作为单颗像素点的显示技术。有机材料对潮湿度、空气、温度以及驱动电流大小较为敏感, 一定程度上影响了 Micro-OLED 的使用寿命。更大的驱动电流值意味着更短的显示寿命, 使得 Micro-OLED 微显示屏亮度存在一定的局限性, 不太适用于户外强光 AR 近眼显示应用场景。LCoS<sup>[97]</sup>作为反射式硅基液晶显示技术已发展多年, 广泛应用于微型投影市场。由于 LCoS 微显示器自身不发光, 需要设计额外的照明系统<sup>[98]</sup>。在 Micro-LED 技术还未成熟、Micro-OLED 亮度不够高的情况下, LCoS 微显示屏成为折中的显示方案, 如微软的 HoloLens 1 就采用了 LCoS 显示器<sup>[99]</sup>方案。

#### 3.3.2 MEMS 电磁微镜振荡扫描显示

LCoS 需要增加额外的光学照明模块<sup>[98-100]</sup>, 这无疑影响了 AR 光学显示引擎的紧凑性<sup>[101]</sup>、轻薄性等特点。同时, 照明系统引入的杂光影响了 AR 显示虚拟画面对比度。基于以上原因, 微软 HoloLens 2 采用衍射光波导结合 MEMS 扫描微镜的技术路线<sup>[102-103]</sup>, 在 AR 近眼显示领域引起广泛探索, 成为 AR 近眼显示领域重要的技术路线之一。

如图 5(a)<sup>[104]</sup>、5(b)<sup>[105]</sup>、5(c)<sup>[106]</sup>所示分别为 Micro-LED、Micro-OLED 以及 LCoS 微显示屏, 他们通常都需要三基色子像素点实现彩色显示。图 5(d)为基于 MEMS 图像源的微显示技术, 需要三基色激光束作为

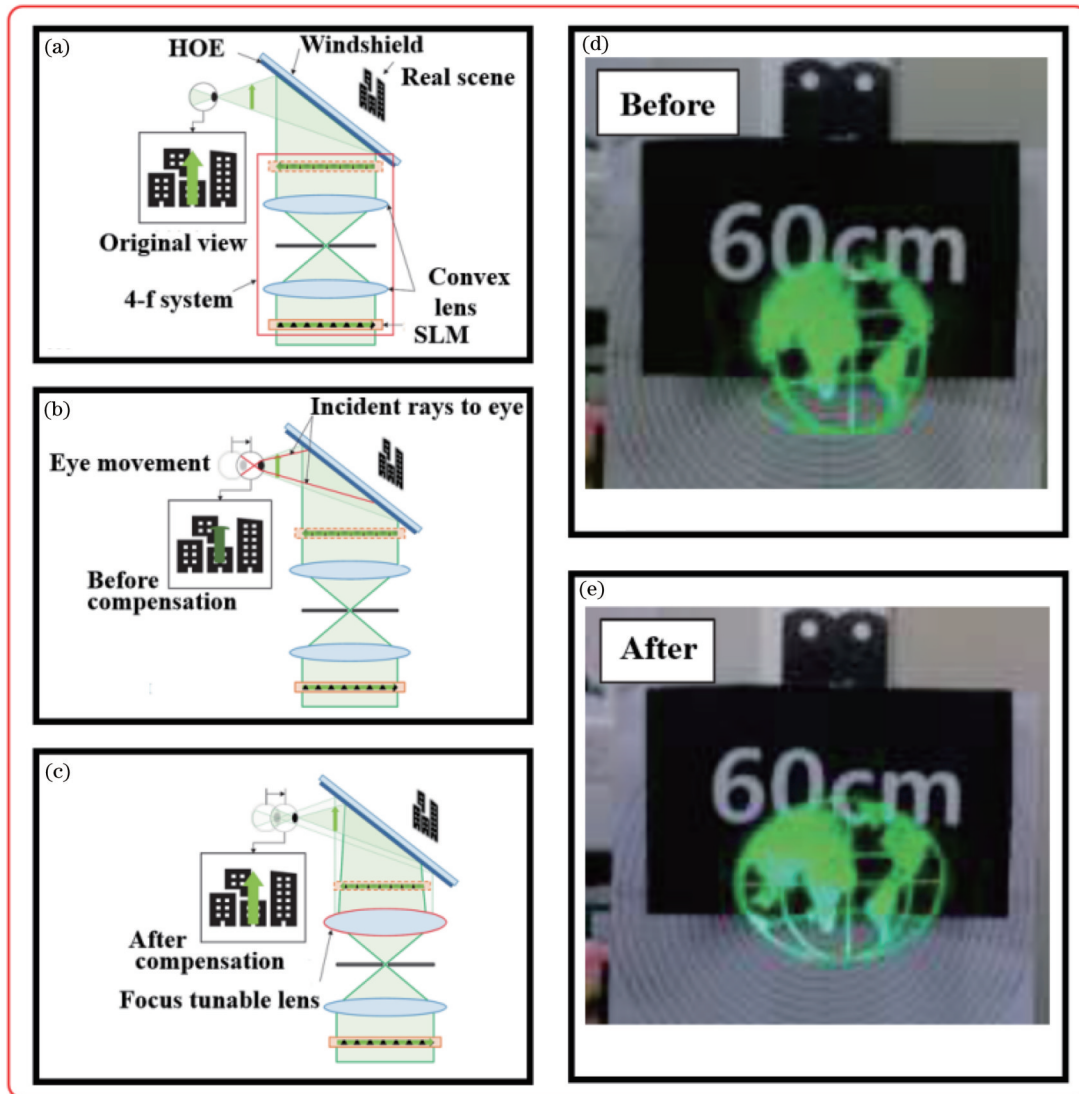


图 4 Maxwellian 近眼显示系统轴向出瞳扩展<sup>[79]</sup>。(a)眼球严格保持在 Maxwellian 光束点位置;(b)眼球发生了一定轴向移动;(c)经过 FTL 补偿调节;(d)人眼轴向运动,显示图像画面缺失;(e)FTL 补偿调节后,显示图像画面完整

Fig. 4 Axial pupil expansion solution for Maxwellian near-eye display system<sup>[79]</sup>. (a) Eye is held rigidly at Maxwellian beam point position; (b) forward shift of eye occurs in axial direction; (c) compensated by FTL; (d) forward shift of eye occurs, display image missing; (e) display full image compensated by FTL

光源,通过 MEMS 微镜扫描呈现彩色图像<sup>[49]</sup>,商用产品如韩国的 PicoPro<sup>[108]</sup>。图 5(e)为微软专利中报道的两级 MEMS 微镜结构,在微镜结构设计上采用两组旋转轴,可以实现更高分辨率的扫描图像显示<sup>[103]</sup>。图 5(h)为 Hofmann 等<sup>[49]</sup>报道的两级 MEMS 微镜原型机。图 5(f)为 MEMS 扫描微镜匹配的反射镜,像源光线进入人眼的成像示意<sup>[76]</sup>。图 5(g)和 5(i)为微软 HoloLens 中使用的 MEMS 微镜及相关的光路结构示意图<sup>[107]</sup>。激光扫描式 Maxwellian 显示技术采用的半导体 MEMS 电磁微镜对半导体加工工艺要求高, Hofmann 等<sup>[49]</sup>实现了 MEMS 电磁微镜每秒 54000 次扫描振荡。MEMS 电磁微镜振荡扫描速率对应于微显示屏分辨率,更高的分辨率要求更快的微镜振荡扫描速率,例如 60 frame 画面 720P(1024×720)分辨率

的图像,要求 MEMS 微镜的振荡速度达到每秒 43200 次<sup>[49]</sup>。单束微弱激光在人眼视网膜上时序扫描形成图像显示,当光束扫描的速率足够快,由于视觉暂留效应,人眼就可以形成对 AR 显示画面的感知。

## 4 有深度信息近眼显示系统

### 4.1 有部分深度信息

真实环境有完整的深度信息,不同深度场景和眼睛的辐辏相对应,使人眼观察时都能处于舒适状态。缓解 VAC 的一个折中方案是在近眼显示系统中设置多个距离处的虚拟影像信息,此时晶状体随着辐辏距离的不同,可以对多个距离处影像产生晶状体的聚焦调节,避免辐辏距离和调节距离失配过大,能在一定程度上缓解人眼的疲劳与不适。Yin 等<sup>[109]</sup>总结了液晶



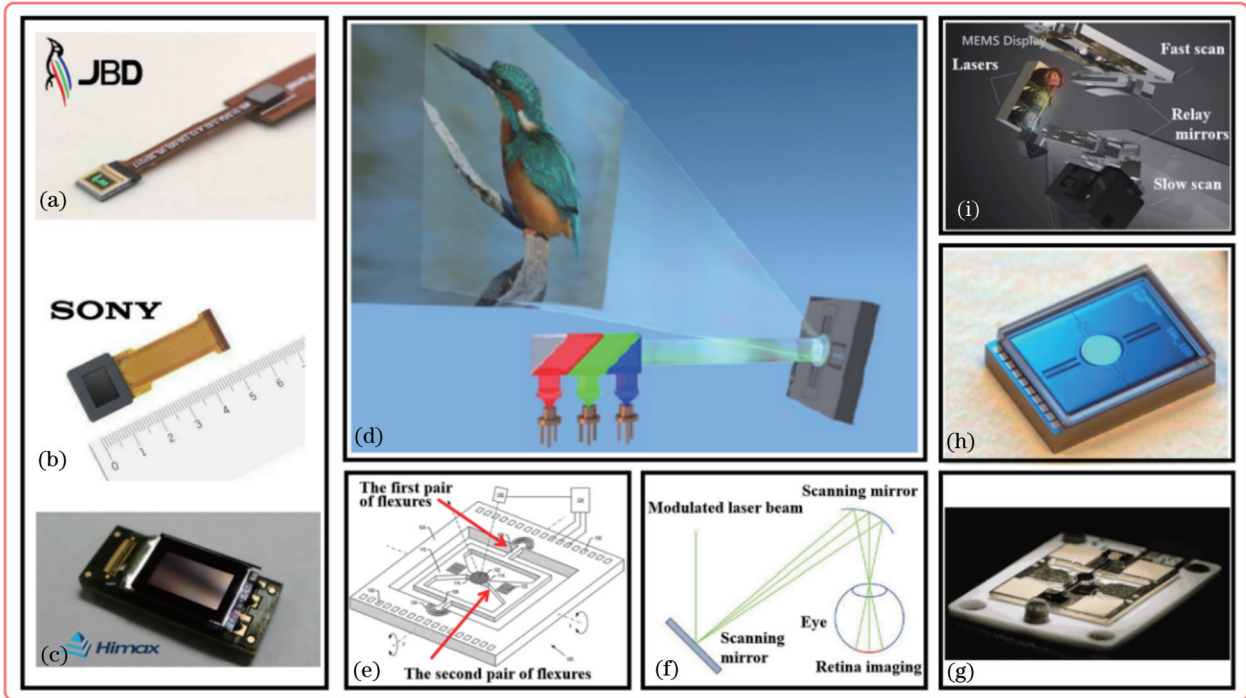


图 5 微显示屏技术与 MEMS 电磁微镜激光扫描技术。(a) JBD 的 Micro-LED 微显示屏<sup>[104]</sup>; (b) 索尼的 Micro-OLED 微显示屏<sup>[105]</sup>; (c) Himax 的 LCoS 微显示屏<sup>[106]</sup>; (d) 通过三基色激光合色, 结合 MEMS 电磁微镜实现彩色投影显示的原理示意<sup>[49]</sup>; (e) 微软用于 AR 近眼显示中的 MEMS 电磁微镜结构<sup>[103]</sup>; (f) 激光束通过扫描微镜经过凹面镜聚焦形成 Maxwellian 近眼显示的原理示意<sup>[103]</sup>; (g) 微软的 HoloLens 2 中采用的单级 MEMS 电磁微镜<sup>[107]</sup>; (h) Hofmann 等报道的两级 MEMS 电磁微镜<sup>[49]</sup>; (i) 微软的 HoloLens 2 中近眼显示模块 MEMS 电磁微镜及显示装置结构示意图<sup>[107]</sup>

Fig. 5 Microdisplay and MEMS resonators for laser beam scanning displays. (a) JBD's Micro-LED<sup>[104]</sup>; (b) Sony's Micro-OLED<sup>[105]</sup>; (c) Himax's LCoS<sup>[106]</sup>; (d) schematic of color projection display by MEMS resonators through 3 beams of RGB laser color combining<sup>[49]</sup>; (e) Microsoft's MEMS used in AR near-eye displays<sup>[103]</sup>; (f) laser beam first passes through MEMS and then focuses by concave mirror to form Maxwellian near-eye display<sup>[103]</sup>; (g) single stage MEMS resonators used in Microsoft's HoloLens 2<sup>[107]</sup>; (h) two-stage MEMS resonators reported by Hofmann et al<sup>[49]</sup>; (i) schematic of structure of near-eye display module MEMS device in Microsoft's HoloLens 2<sup>[107]</sup>

(LC)光学器件在近眼显示设备中的重要应用,指出超薄平板式 LC 衍射光学元件可用于搭建多焦面近眼显示系统以解决 VAC 问题。Zhan 等<sup>[110]</sup>总结了近眼显示系统中多焦面 VAC 解决方案,将多焦面 VAC 解决方案按照产生机制以及如何将 2D 信息多路复用到 3D 场景进行了梳理划分。

#### 4.1.1 多个物理焦面近眼显示

有部分深度信息的近眼显示光学系统有助于缓解 VAC,这包括了双焦面或多焦面的近眼显示光学系统<sup>[111]</sup>。Magic Leap 公司通过设置多层衍射光波导<sup>[112]</sup>,实现了  $30^\circ \times 40^\circ$  的显示视场,具有两个焦面的近眼显示光学系统。衍射光波导耦合器件具有大色散缺陷,可采用红绿蓝(RGB)三层衍射光波导器件实现光波导模组彩色显示,如图 6(a1)~(a2)所示。Magic Leap 设置了 6 层衍射光波导层以实现 1 m 和 3 m 的不同距离处的两焦面显示。由于光波导衍射结构具有较大的色散特性,通常在衍射光波导中通过不同颜色的光线独立全反射传输实现彩色显示,如图 6(b)所示。因此,多层光波导结构可用于实现两个或多个不同的焦

面处的显示需要。

自由曲面<sup>[113-116]</sup>由于具有更高的设计自由度,也是 AR 近眼显示方案的主要技术路线之一<sup>[117]</sup>,Cheng 等<sup>[118]</sup>搭载 2 片微显示器,通过空间复用的方式实现两焦面 AR 近眼显示模组,如图 6(c)所示。该显示方案实现了  $40^\circ$  显示视场,出瞳距为 20 mm,眼动范围孔径为 6 mm,实现了 1.25 m 和 5 m 两个不同距离的焦面。以上通过堆叠光学组合器实现空间复用<sup>[119]</sup>方式的多焦面 VAC 解决方案中,每增加一个焦平面,其组合器体积就要进一步增大或需要多配备一个微显示器,尽管有较高的图像分辨率但对于整个系统的小型化来说非常具有挑战性。

类似于以上物理堆叠组合器或显示器的方案,生成动态切换焦平面也可以用来避免或缓解 VAC。LC 光学元件因其高的衍射效率、强的切换能力、超薄的外形,以及具有极化选择性等优势而应用于近眼显示<sup>[121]</sup>。Liu 等<sup>[50]</sup>将多片 PSLC 置于商用投影仪不同位置处承接投影实像,将该实像作为近眼显示系统不同深度像源,通过显示目镜系统,即可观测到不同距离处

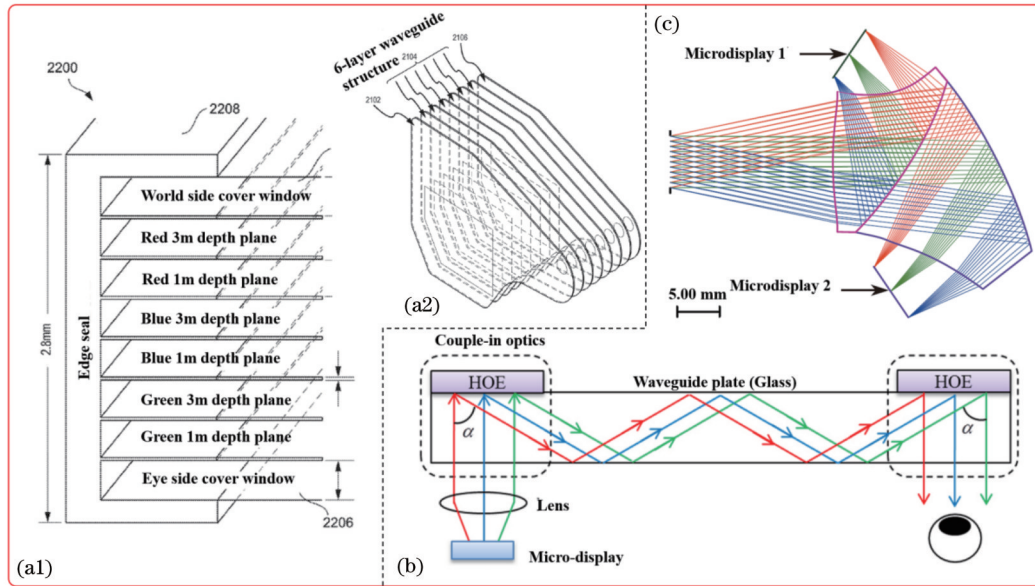


图 6 多焦面 AR 近眼显示光学系统方案。(a1)~(a2) Magic Leap 设置 6 层衍射光波导光线耦出层, 实现焦距在 1 m 和 3 m 距离处的显示方案<sup>[112]</sup>; (b) 通过 3 路 RGB 光源实现彩色衍射光波导光线耦入耦出部分原理示意<sup>[120]</sup>; (c) Cheng 等采用两片微显示器结合自由曲面棱镜, 通过空间复用的形式实现两焦面显示模组<sup>[118]</sup>

Fig. 6 Multi-focal plane AR near-eye display solution. (a1)~(a2) Magic Leap's scheme arranges 6 waveguide light coupling-out layers to achieve two focal plane displays at 1 m and 3 m distances<sup>[112]</sup>; (b) schematic of color diffraction waveguide light coupling-in and coupling-out by 3 RGB beams<sup>[120]</sup>; (c) Cheng et al. used two microdisplays in form of spatial multiplexing to achieve a two-focal plane display with free-form prism design<sup>[118]</sup>

的虚拟画面信息, 如图 7(a) 所示。PSLC 薄膜在未通电状态下, LC 分子有序排列, PSLC 呈现透明状态。在通电情况下, LC 分子无序排布, 呈现散射不透明状态, 如图 7(b) 所示。通过改变膜片散射状态可以形成对应距离处的像, 从而实现多焦面显示。该 LC 薄片可电致控制薄片透射率, 并且具有快速切换的响应时间 (2 ms), 能避免画面切换过程中的拖影现象<sup>[122]</sup>, 实现切换焦距时流畅的显示效果, 同时基于 LC 光学元件的堆叠只需要少量的空间及较轻的质量, 仍然满足近眼显示设备的轻量化需求。但该方案需要有一个高准直像源和一系列具有快速切换时间、高清晰状态透射率和低散射态透射率的 PSLC 薄膜, 根据多焦面的数量牺牲画面的刷新率来缓解 VAC, 易发生闪烁效应。基于此, 还出现了诸多应用 PSLC 的相关研究工作<sup>[123-124]</sup>。

#### 4.1.2 多个虚拟焦面近眼显示

伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校 Cui 等<sup>[125]</sup>将微显示屏划分成不同图像子区域, 通过  $4f$  系统将屏幕子区域图像信息映射到预设的不同空间深度排列, 从而形成具有多个焦面的立体微显示像源, 最后通过目镜系统可以观看到多个深度的画面信息。Su 等<sup>[126]</sup>通过多平面全息技术, 利用 SLM 加载多个 2D 切片图形对应的全息图, 再现多平面深度的 3D 场景信息作为空间立体微显示像源, 应用到近眼显示系统中实现了多焦面显示。Lee 等<sup>[127]</sup>利用晶体双折射特性, 采用偏振-复用

光路方法实现以 Micro-OLED 作为微显示器像源的双焦面显示, 显示视场为  $37^\circ$ , 出瞳距为 20 mm, 眼动范围为  $24 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ , 显示焦面位于 64 cm 和 90 cm 不同距离处, 为缓解 VAC 提供了新思路。类似地, Tan 等<sup>[128]</sup>和 Shin 等<sup>[9]</sup>利用偏振光复用形成多焦面近眼显示系统, Matsuda 等<sup>[129]</sup>提出将 SLM 作为可动态变化的自由曲面透镜置于投影模块和微显示器之间, Zhan 等<sup>[130]</sup>通过引入可切换 LC Pancharatnam-Berry (PB) 相位超表面透镜, 实现近眼显示系统多焦面显示。多焦面的技术路线为了给人眼提供更真实环境深度信息感知, 需要尽可能多的焦平面来匹配人眼所能期望观察到的连续深度信息。Rolland 等<sup>[131]</sup>的研究表明, 在近眼显示系统中, 2D 屈光度内设置 14 个焦平面能够较好地模拟真实环境深度, 这给多焦面方案设计的复杂性及图像运算渲染提出了很大的挑战性。基于此提出了深度融合显示技术<sup>[132-134]</sup>, 通过设置两个焦平面像素亮度比, 进行像素亮度加权混合, 实现两个焦平面中间深度的画面显示, 能够使用尽量少的焦面提供更多的深度信息。2023 年, 天马也发布了相关的 3D 深度融合显示方案<sup>[135]</sup>。

与多个物理焦面方案相比, PSLC 多焦面方案<sup>[50]</sup>实现技术形式简单、易搭建, 但是易出现 LC 闪烁的现象从而影响画面质量, 其形成紧凑型穿戴显示方案有一定挑战, 适合于固定位置的 AR 设备上展示使用。多显示屏的空间复用自由曲面多焦面方案<sup>[118]</sup>设计采



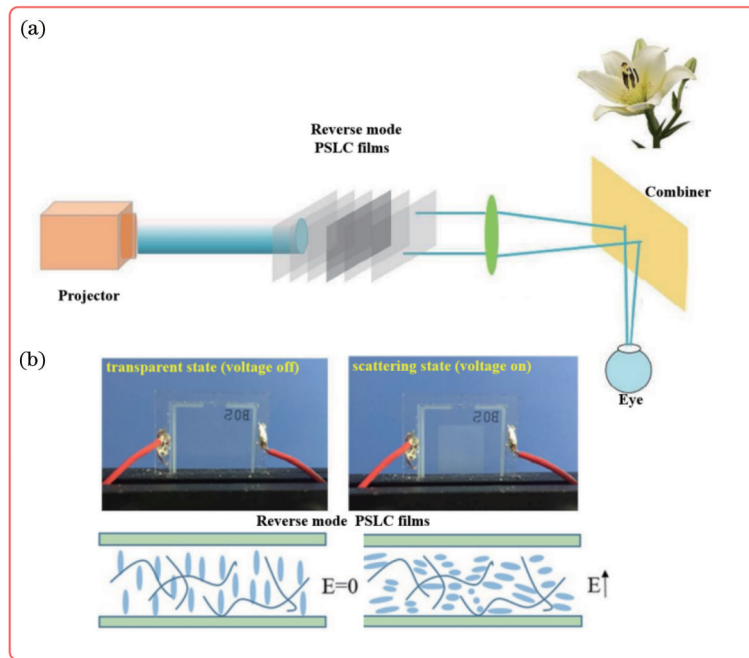


图 7 基于 PSLC 实现多焦面近眼显示<sup>[50]</sup>。(a)通过 PSLC 实现多焦面近眼显示的原理示意图;(b)PSLC 薄片通电与不通电状态以及其内部的 LC 分子排列示意图

Fig. 7 Multi-focal plane near-eye display based on PSLC<sup>[50]</sup>. (a) Schematic diagram of a multi-focal plane near-eye display using PSLC; (b) arrangement of liquid crystal (LC) molecules inside PSLC films in powered and non-powered states

用注塑透镜材料,可以缓解模组在质量上的劣势,但在大体积方面需要进一步克服。而多层衍射光波导方案<sup>[112]</sup>在体积方面相对具有一定优势,可以实现眼镜片的轻薄形态。另一方面,多层衍射光波导结构需要考虑光经过多层波导片到达人眼的能量利用率,同时需要考虑更复杂的微纳加工工艺以及多层光波导衍射层的封装工艺。与之相比,多个虚拟焦面技术方案,如利用不同属性偏振光具有不同屈光度的 PB 相位超透镜形成多个虚拟焦面的方案<sup>[130]</sup>,在体积和质量上都具有一定优势。此外,利用晶体双折射效应也可以形成多焦面显示<sup>[127]</sup>,这需要进一步考虑双折射晶体本身的尺寸,以便形成紧凑型穿戴式显示方案。

#### 4.1.3 可变化焦面近眼显示

实现不同焦距处的虚拟画面显示还可以通过光学系统的物理滑动变焦实现,其可调谐的光学元件有助于搭建缓解 VAC 的近眼显示光学系统,例如机械滑动变焦方式<sup>[39, 136-139]</sup>。近眼显示光学系统可以直观地理解为由目镜透镜组和微显示屏组成,通过目镜观看微显示屏上放大后的图像信息。因此,机械滑动变焦可以通过电机改变微显示屏位置<sup>[39]</sup>或目镜中透镜的位置<sup>[136-139]</sup>,实现显示系统变焦。Stevens 等<sup>[140]</sup>通过微电机驱动两个可调节镜片形成 Alvarez 镜,用于近眼显示系统形成变焦系统。Alvarez 镜通过两个马鞍形镜片沿垂直于光轴方向位移变化实现变焦,相对于传统沿光轴位置变化镜片变焦原理,结构上更加紧凑。另一方面,马鞍形镜片并非旋转对称结构<sup>[141]</sup>,有一定的非球面加工难度。再者,当成像光束通过 Alvarez 镜多个

表面发生多次反射折射时,易产生图像分离和平移现象,形成图像鬼影,影响显示画面质量<sup>[140]</sup>。由于 Alvarez 镜是通过垂直于光轴方向的镜片位移实现变焦,这时 Alvarez 镜横向尺寸面积增大,一定程度上干扰到使用者的鼻梁位置,因此,Alvarez 镜在类似于头盔显示的 VR 场景更为适用。另外,Alvarez 镜基于电机驱动变焦装置,需匹配额外的眼动跟踪装置,提取眼球聚焦线索,从而匹配出人眼合适位置处的图像,增加了设备复杂程度。

可变焦 LC 透镜系统是缓解近眼显示 VAC 的一条重要路线。Meta(原名 Facebook)继 2018 年发布机械可变焦显示的第一代原型机后,于 2020 年开始了新一代原型机的验证,通过电子变焦取代了移动式机械变焦,采用菲涅耳 LC 变焦透镜方案<sup>[54]</sup>,如图 8 所示,有助于兼顾大口径和快速切换变焦响应速率,实现了变焦切换时间为 500 ms、透镜厚度小于 5 mm、口径达到 5 cm、从平焦到 +0.2D 的变焦调节(等效于无穷远到 5 m 距离)。Liu 等<sup>[52]</sup>将光流控透镜应用到近眼显示系统中,实现了 AR 近眼显示系统的变焦显示。Xia 等<sup>[53]</sup>将可调焦的 LC 透镜用于近眼显示系统中缓解 VAC,实现了 37° 显示视场,出瞳距为 15 mm,眼动范围孔径为 6 mm,同时具有 AR/VR 显示功能的切换。Lin 等<sup>[142]</sup>通过将三片式 LC 透镜组用于近眼显示光学系统中,实现可变焦特性的同时兼顾矫正显示图像畸变。

可电子变焦的光学反射面镜通过改变反射面曲率也可以实现光学元件变焦,又被称为可变形薄膜镜<sup>[143]</sup>。实现方式是通过镀有高反射率铝膜的氮化镓薄膜材

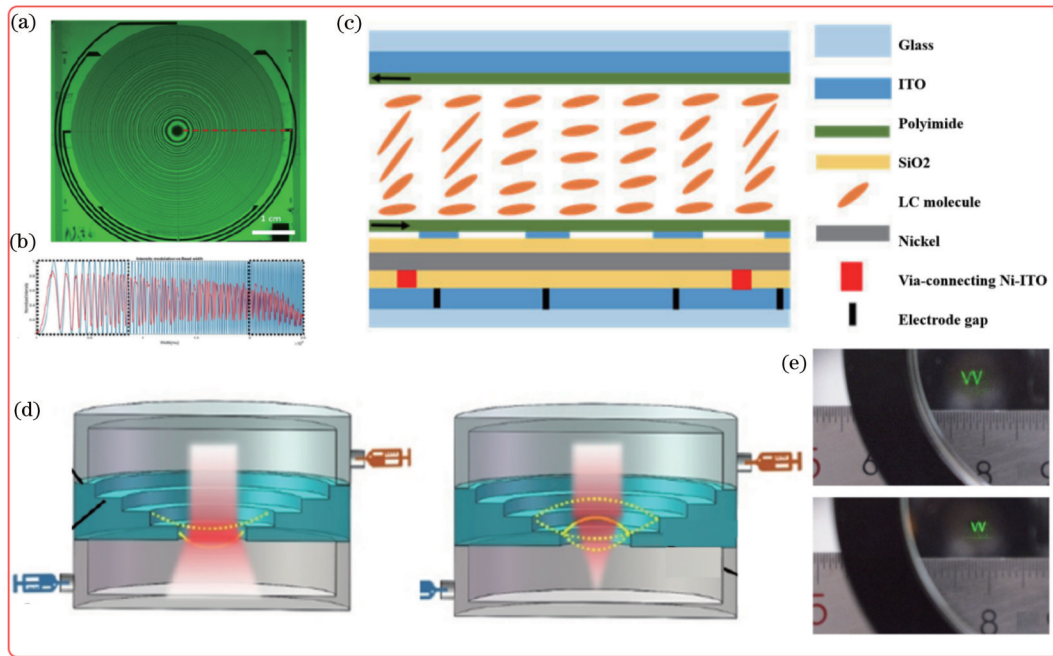


图 8 可变化焦面的 AR 近眼显示光学系统。(a) Meta 提出的可变焦菲涅耳 LC 透镜由 28 个环带组成<sup>[54]</sup>；(b) 菲涅耳 LC 变焦透镜外观尺寸设计轮廓与实测轮廓对比<sup>[54]</sup>；(c) 菲涅耳 LC 变焦透镜及其控制电路的内部多层结构<sup>[54]</sup>；(d) 应用于 AR 近眼显示的光流控变焦透镜示意图<sup>[52]</sup>；(e) 实验验证 100 mm 和 150 mm 两个距离的字母显示画面<sup>[52]</sup>

Fig. 8 AR near-eye display system based on varifocal principle. (a) Meta's varifocal Fresnel LC lens consists of 28 ring bands<sup>[54]</sup>; (b) comparison of design profile and measured profile of dimension of Fresnel LC varifocal lens<sup>[54]</sup>; (c) internal multilayer structure of Fresnel LC varifocal lens and its control circuit<sup>[54]</sup>; (d) schematic diagram of optofluidic varifocal lens applied to AR near-eye display<sup>[52]</sup>; (e) experimental verification of letter display for two distances of 100 mm and 150 mm<sup>[52]</sup>

料,通过施加电压的变化改变薄膜曲率,对入射激光束或其他入射光进行不同焦距的反射调节<sup>[29]</sup>。将此类可变焦反射面镜用于光学系统中,可以成为缓解 VAC 的技术方案之一<sup>[144-145]</sup>。Hu 等<sup>[146]</sup>通过结合可变形薄膜镜和数字微镜器件(DMD)微显示屏作为具有空间信息的立体微显示像源,将自由曲面棱镜模组作为近眼显示光学系统,调整可变形薄膜镜上的电压控制 3D 场景的深度体积以及焦平面间距,同步渲染显示图像,多个焦平面被时间复用,在其不同的深度生成不同的虚拟内容,实现了 40° 的显示视场,出瞳距为 25 mm,眼动范围孔径为 6.3 mm,同时实现了从无穷远到 0.3 m 处连续的真实 3D 空间。虽然采用可调谐光学器件提供了更多焦平面的可能性,但采用时间复用方式其切换速度和相邻状态串扰仍存在挑战,通过偏振复用以及波长复用等复用方式进行多路复用也可以实现更多的焦平面或减轻时间复用及空间复用的负担<sup>[9, 130, 147]</sup>。

## 4.2 有完整深度信息

### 4.2.1 光场近眼显示

使虚拟场景能提供完整深度信息是解决 VAC 问题的最终目标。集成成像光场显示技术是一种能够还原深度信息的重要显示技术,其基本原理是利用微透镜阵列对真实场景进行采集,阵列中每个微透镜单元可采集不同角度方向的真实环境信息,得到不同方向具有视差的单元像阵列,随后在 3D 信息重建过程中,

每个微透镜单元中对应于同一物点不同方向的光信息在空间会聚,重建具有深度信息的图像显示。Hua 等<sup>[40]</sup>将集成成像单元作为立体微显示像源,结合自由曲面棱镜,形成有深度信息的 AR 近眼显示模组,实现了 33.4° 的显示视场,出瞳距为 19 mm,眼动范围孔径为 6.5 mm,如图 9(a)所示。NVIDIA 同样将集成成像显示技术应用于近眼显示模组<sup>[148]</sup>,如图 9(b)所示。基于微透镜阵列的光场显示分辨率会随着单个立体像素角度分辨率的提升而快速降低。压缩光场显示技术通过添加光学掩膜对真实环境信息进行压缩编码调制记录光场信息,如图 9(d)所示。随后通过非线性算法进行光场重建,形成具有深度信息的 3D 显示,可以一定程度上提升显示分辨率<sup>[149-151]</sup>。超多视点(SMV)显示技术<sup>[59, 152-153]</sup>则通过向人眼投射多个视点使得眼睛聚焦于显示场景,从而在一定程度上缓解 VAC,其实现方式包括柱镜光栅式和阵列投影机式,基于微透镜阵列的集成成像技术在一定程度上也可以理解为超多视点显示技术<sup>[154]</sup>,其原理如图 9(e)所示。

集成成像单元作为近眼显示的微小立体像源,经过近眼显示目镜系统放大,在各个不同深度处物体信息经过目镜系统放大倍率不一致,导致纵向梯形畸变。Deng 等<sup>[155]</sup>提出比例缩放调节方式,用于补偿梯形畸变以改善 AR 虚拟画面显示效果。Shen 等<sup>[156]</sup>在集成光场成像中引入变焦透镜动态调整集成成像单元,进



一步增加近眼显示系统深度信息。集成成像光场显示以降低分辨率为代价形成深度信息显示,具有分辨率低的缺陷<sup>[47]</sup>。Qin 等<sup>[157]</sup>通过开发一种新的子像素算法,通过高精度图像形成模型使集成成像光场显示分辨率显著提高。压缩光场显示作为相对新的一种显示方案<sup>[158]</sup>,通过引入多层结构再现光场的同时能够保持高像素密度的 3D 图像,与其他光场显示相比,无论是乘法式或是加法式的压缩光场显示,其观看区域都受

到了限制。Huang 等<sup>[159]</sup>通过堆叠 LC 衰减器实现乘法合成光场,在渲染构成显示器每个图层的图像时,使用不同的视图图像进行优化,保证了一定的查看区域。类似于光场显示,超多视图技术也可用于近眼显示中缓解 VAC。Wang 等<sup>[160]</sup>将超多视图技术与 Maxwellian 显示相结合,利用偏振将图像划分为三个区域,以提供三个视差视图图像,在 20~160 cm 的大范围内可以获得正确的调节深度信息线索。

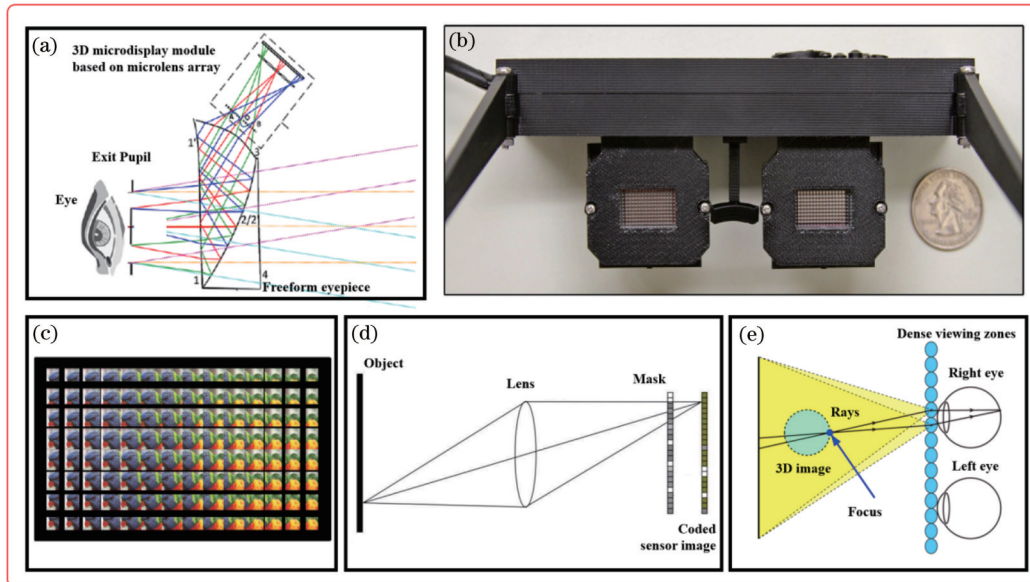


图 9 光场显示技术缓解 VAC 的近眼显示方案。(a)集成成像单元结合自由曲面棱镜<sup>[40]</sup>; (b)基于集成成像的近眼显示眼镜原型机<sup>[148]</sup>; (c)原型机显示器上记录的立体像素信息<sup>[148]</sup>; (d)基于光学掩膜的压缩光场显示技术; (e)超多视点显示技术<sup>[161]</sup>

Fig. 9 Near-eye display solution based on light field display technology to relieve VAC. (a) Integral imaging units combined with free-form prisms<sup>[40]</sup>; (b) near-eye display glasses prototype based on integral imaging<sup>[148]</sup>; (c) stereo pixel information recorded on prototype display<sup>[148]</sup>; (d) compressive light field display based on mask; (e) super multi-view display technology<sup>[161]</sup>

#### 4.2.2 计算全息近眼显示

将全息显示技术应用到 AR 近眼显示系统中<sup>[162]</sup>,也能够重现全息 3D 图像,为人眼提供所有的深度信息需求。计算全息复振幅波前重建形式<sup>[163-166]</sup>,通常将振幅型或者相位型全息图加载到 SLM 上进行波前重建。Zhang 等<sup>[62]</sup>通过级联形式振幅全息图,实现图像信息的复振幅波前重建,为 AR 近眼显示装置提供完整深度信息,消除人眼 VAC,实现  $4.8^\circ$  的显示视场(二次放大 9.4 倍),出瞳距为 10 mm,如图 10(a)、10(b)所示。Gao 等<sup>[63]</sup>提出相位型全息图波前重建方式,相对于振幅型波前重建,减少了数据的迭代运算过程,从而在一定程度上降低了图像系统的计算负载,实现了  $3.8^\circ$  的显示视场,出瞳距为 10 mm,眼动范围为  $20.1 \text{ mm} \times 20.1 \text{ mm}$ ,如图 10(c)、10(d)所示。运算速度慢、计算量大是制约计算全息显示技术快速发展的重要因素。Chen 等<sup>[167]</sup>基于分层计算方法,将 AR 近眼显示系统中计算全息成像速度提升了 4 倍。近年来,随着深度学习技术的飞跃式发展以及 GPU 的商用普及,基于深度学习的计算全息技术可以实现高质量、快速地生成全

息图,可以将相位全息图计算时间缩短到毫秒量级,基于深度学习的全息图生成方式包括数据训练驱动算法和模型驱动算法等<sup>[168]</sup>。

## 5 总结与展望

不准确的深度信息及调节距离与辐辏距离的不匹配会带来视觉不舒适或者视觉错误。本文针对 AR 近眼显示光学系统中 VAC 解决方案进行了系统综述,对 VAC 解决方案按照是否有深度线索,以及有部分深度信息(多焦面)或完整深度信息进行分类,重点介绍了解决 VAC 问题的基本原理和各种近眼显示光学方案的技术特点、实现方式以及代表性文献。综上,当前的研究就缓解或消除近眼显示 VAC 问题,提出的各种光学方案对比,如表 1 所示。

### 5.1 VAC 解决方案的特点总结

无深度信息的 Maxwellian 显示技术由于其解除了辐辏和调节的关联,从而可解决 VAC 问题。与其他 VAC 解决方案对比,其优势表现在不需要晶状体聚焦调节即可形成清晰视网膜投影,不会出现重影以及

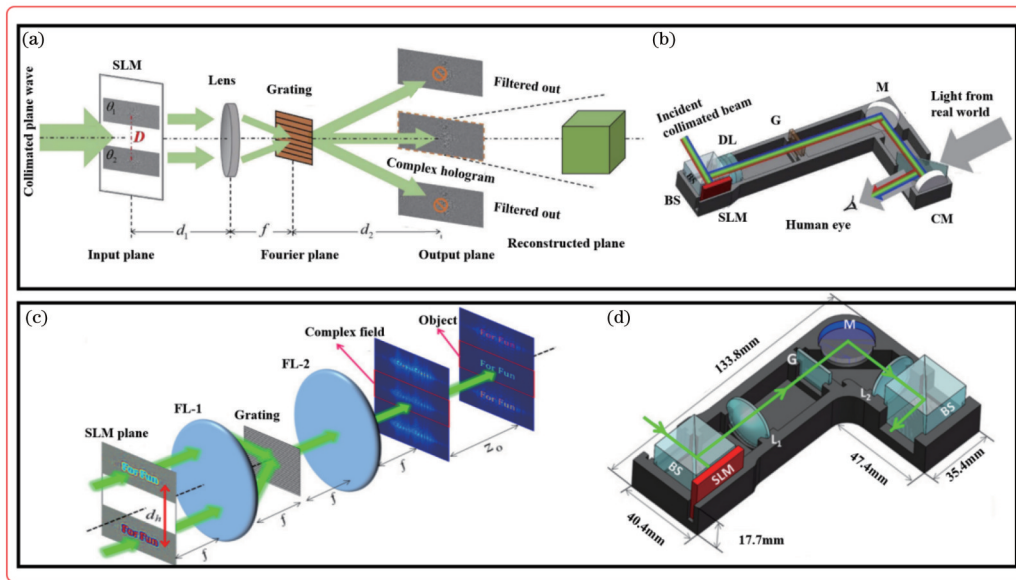


图 10 基于复振幅波前重建的近眼显示装置具有完整深度信息消除 VAC。(a)通过级联振幅型全息图实现波前重建<sup>[62]</sup>；(b)对应(a)图的 AR 近眼显示原型机设计及效果图<sup>[62]</sup>；(c)通过相位型全息图实现波前重建<sup>[63]</sup>；(d)对应(c)图的 AR 近眼显示原型机设计及效果图<sup>[63]</sup>

Fig. 10 Near-eye display based on complex amplitude wavefront reconstruction with full depth information that eliminates VAC. (a) Wavefront reconstruction by cascaded amplitude type hologram<sup>[62]</sup>; (b) prototype design and effect of AR near-eye display corresponding to (a)<sup>[62]</sup>; (c) wavefront reconstruction by phase type hologram<sup>[63]</sup>; (d) prototype design and effect of AR near-eye display corresponding to (c)<sup>[63]</sup>

表 1 近眼显示光学系统中 VAC 解决方案对比  
Table 1 Comparison of VAC solutions in near-eye display optical systems

Classification	Optical solution	Typical company	Image quality	FOV	Eye box	VAC solution effect	Calculation load advantage
Without depth information	Maxwellian	QD Laser, Microsoft	★★★★	★★	★	★★	★★★★
With partially depth information	Multi-focal plane	Magic Leap	★★★★	★★★★	★★★★	★	★★★★
	Adaptive focus	Meta	★★★★	★	★	★★★★	★★★★
With complete depth information	Integral imaging based on microlens array	NVIDIA	★★	★	★★	★★	★★
	Computer-generated holography	—	★★	★	★	★★★★	★

鬼影方面的瑕疵。其中激光扫描投影式以 MEMS 微镜作为像源,具有小型化、紧凑化的优势,相比于准直照明式和图像滤波式更能满足穿戴式特点要求。Maxwellian 方案的劣势在于无法产生对应的视网膜模糊,这与人眼在真实的环境体验中,在非聚焦的深度处成像模糊景象具有一定的差异。同时,Maxwellian 显示方案的特点注定了它具有眼动范围不足的局限性,对应的解决方案有前文提到的采用眼球跟踪和横向的视点复制以及采用可变焦透镜实现眼动范围扩展。基于 MEMS 微镜的激光扫描投影的实现方式由于使用激光束扫描成像,易产生激光散斑现象,影像显示画面

质量。同时,为了实现更高分辨率的显示画面,需要更快的 MEMS 微镜扫描速率,对半导体微机电加工提出了更高的工艺要求。

部分深度信息的方案包括多个物理焦面、多个虚拟焦面、机械滑动变焦及电子变焦等方案。机械滑动变焦和 Alvarez 镜的优势在于具有一定的传统相机变焦技术传承,且其原理易理解、易于实现、成本低。该方案的不足之处在于需要配备额外的眼动跟踪装置,用以提取眼球聚焦线索,匹配滑动变焦装置使其调节到对应的变焦距离,滑动变焦机构的本身以及额外的眼动跟踪装置造成该显示方案体积大、笨重等,更适用



于对体积和质量不敏感的头盔显示设备。多焦面显示方案中采用时分复用画面显示的形式,其优势在于可根据需求开发出大纵深的多焦面显示方案,两个焦面即可实现差别较大的深度信息区别,劣势在于对微显示器像源要求有更高的图像刷新率。多个物理焦面方案如 PSLC 方案、多显示屏的空间复用和自由曲面多焦面方案在形成紧凑型显示模组上仍具有一定挑战性。光流控透镜方案在彩色显示、视场角及可调控焦距深度上需要进一步提升。LC 变焦透镜方案发展由来已久,但是更大口径的 LC 变焦透镜意味着其变焦调节响应速率将会有所降低,改进的技术方案之一是使 LC 透镜本身 LC 材料更薄,如做成菲涅耳薄片形态,可以提高其变焦响应速率。另一种电子变焦方案采用氮化硅圆形薄膜改变反射曲率实现变焦调节,相比于其他变焦方案可以实现极快速的深度变焦调节,但需要对像差进一步调整来满足高质量显示画面的需求。以上描述的电子变焦方案均需要安装对应的眼动跟踪装置,增加了系统的复杂性。

完整深度信息方案,如基于微透镜阵列的集成光场成像方案,可以提供较为完整连续的深度信息<sup>[169]</sup>。多个角度的光线进入人眼形成不同视角的图像,要求诸多 2D 像素点结合微透镜重建出 3D 像素点,因此其在显示分辨率方面会大大降低。计算全息方案具有完整的光学信息要素,可以提供最真实的画面深度信息场景,其不足之处在于计算全息对设备运算性能要求较高,另一方面全息显示中大视场的图像显示意味着更小的眼动范围,需要匹配相应的扩瞳技术<sup>[170]</sup>以实现大眼动范围。

## 5.2 VAC 解决方案的发展展望

VAC 问题有悖于人眼日常观察的生理特征,是 AR 提升观看舒适度不可避免的痛点之一。就目前 VAC 解决方案而言,Maxwellian 近眼显示、变焦及多焦面的近眼显示方案在设计以及图像质量等方面相对有优势。

一方面,采用复用技术可以根据需求实现多焦面来缓解 VAC 并在 Maxwellian 显示方案中解决眼动范围小的问题。进一步可以将多种复用技术并用,提供更多焦面的同时缓解单一复用方法带来的例如空间、画面刷新率及分辨率等资源占用等问题。此外,复用技术也可以实现除了解决 VAC 问题外的其他显示性能优化,如提升 FOV、扩展眼动范围等,为 AR 近眼显示 VAC 解决方案提供更多的设计维度。随着可调/可切换光学器件的快速发展,对响应速率有要求的 VAC 解决方案,如变焦及多焦面显示表现出更具发展潜力的前景。同时,新型的光学元件例如超表面<sup>[171]</sup>也在 AR 近眼显示系统中表现出潜在的优势,具有出色的光调控能力以及多通道复用的性能,且设计灵活,结合 Maxwellian 显示技术或多焦面显示技术可以为 VAC 近眼显示解决方案小型化、轻薄化提供新思路。

另一方面,微显示器的发展趋势也为 VAC 的发展方向提供了指导性意见。MEMS 电磁微镜技术因其极高的扫描频率以及分辨率的优势可以与复用技术相互适配,推动 Maxwellian 显示、变焦及多焦面 VAC 解决方案的发展。同样地, Micro-LED 显示技术相较于传统显示技术在各个方面均表现出明显优势,被认为是下一代的主流微显示技术。鉴于 Micro-LED 分辨率高、响应速度快等特征<sup>[90]</sup>,这些对分辨率、响应速度、刷新率等有更高要求的 VAC 解决方案未来必定会展现出更好的效果。然而,VAC 解决效果只是近眼显示设备评价的维度之一,近眼显示设备还需要考虑图像质量、FOV、眼动范围等光学性能,基于多焦面的 VAC 解决方案在各方面均表现出一定的可塑性,随着显示技术的发展在未来可能具有更可观的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Azuma R, Baillet Y, Behringer R, et al. Recent advances in augmented reality[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(6): 34-47.
- [2] Carmigniani J, Furht B, Anisetti M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications[J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 51(1): 341-377.
- [3] Sutherland I E. A head-mounted three dimensional display[C]// Proceedings of the Fall Joint Computer Conference, part I, December 9-11, 1968, San Francisco, California. New York: ACM Press, 1968: 757-764.
- [4] Sutherland I E. Computer displays[J]. Scientific American, 1970, 222(6): 56-81.
- [5] Lu F, Hua J Y, Zhou F B, et al. Pixelated volume holographic optical element for augmented reality 3D display[J]. Optics Express, 2022, 30(10): 15929-15938.
- [6] Zhan T, Yin K, Xiong J H, et al. Augmented reality and virtual reality displays: perspectives and challenges[J]. iScience, 2020, 23(8): 101397.
- [7] Abrash M. Creating the future: augmented reality, the next human-machine interface[C]//2021 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), December 11-16, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2022: 1-2.
- [8] Lu Y Q, Li Y. Planar liquid crystal polarization optics for near-eye displays[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 122.
- [9] Shin K S, Choi M H, Jang J, et al. Waveguide-type see-through dual focus near-eye display with a polarization grating[J]. Optics Express, 2021, 29(24): 40294-40309.
- [10] Ni D W, Cheng D W, Liu Y E, et al. Uniformity improvement of two-dimensional surface relief grating waveguide display using particle swarm optimization[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 24523-24543.
- [11] Chen C P, Cui Y P, Chen Y, et al. Near-eye display with a triple-channel waveguide for metaverse[J]. Optics Express, 2022, 30(17): 31256-31266.
- [12] Wang S L, Anthony Surman P, Sun X W, et al. Objective measurement technique for mitigating the augmented-reality geometric waveguide double-image problem[J]. Optics Continuum, 2022, 1(11): 2319-2335.
- [13] Cheng D W, Wang Q W, Wei L, et al. Design method of a wide-angle AR display with a single-layer two-dimensional pupil expansion geometrical waveguide[J]. Applied Optics, 2022, 61(19): 5813-5822.
- [14] Weng J C, Li H F, Wu R M, et al. Single-image-source binocular waveguide display based on polarization volume gratings and lenses[J]. Optics Letters, 2023, 48(8): 2050-2053.

- [15] 梅宇, 彭飞, 孙明, 等. 基于柱面全息波导的增强现实近眼显示系统[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 2011012.  
Mei Y, Peng F, Sun M, et al. Augmented reality near-eye display system based on cylindrical holographic waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(20): 2011012.
- [16] Mei Y, Peng F, Xia X X, et al. Design of near-eye display with cylindrical holographic waveguide[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11898: 118980M.
- [17] Liu Z Y, Pan C, Pang Y J, et al. A full-color near-eye augmented reality display using a tilted waveguide and diffraction gratings[J]. Optics Communications, 2019, 431: 45-50.
- [18] Liu Z Y, Pang Y J, Pan C, et al. Design of a uniform-illumination binocular waveguide display with diffraction gratings and freeform optics[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30720-30731.
- [19] 陈晓伟, 曹妍, 薛嘉隆, 等. 双自由曲面平视显示系统光学模组优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0922001.  
Chen X W, Cao Y, Xue J L, et al. Optimal design of optical modules for double free-form surface head-up display systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0922001.
- [20] Applin S A, Flick C. Facebook's Project Aria indicates problems for responsible innovation when broadly deploying AR and other pervasive technology in the Commons[J]. Journal of Responsible Technology, 2021, 5: 100010.
- [21] Hoffman D M, Girshick A R, Akeley K, et al. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue[J]. Journal of Vision, 2008, 8(3): 33.
- [22] Bharadwaj S R, Candy T R. Accommodative and vergence responses to conflicting blur and disparity stimuli during development[J]. Journal of Vision, 2009, 9(11): 4.
- [23] Watt S J, Akeley K, Ernst M O, et al. Focus cues affect perceived depth[J]. Journal of Vision, 2005, 5(10): 7.
- [24] Qin Z, Zhang Y H, Yang B R. Interaction between sampled rays' defocusing and number on accommodative response in integral imaging near-eye light field displays[J]. Optics Express, 2021, 29(5): 7342-7360.
- [25] Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror[J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5366-5374.
- [26] Lambooj 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): 30201.
- [27] Reichelt S, Häussler R, Fütterer G, et al. Depth cues in human visual perception and their realization in 3D displays[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7690: 76900B.
- [28] Okada T, Miyamoto T, Ito S I, et al. Research on blinking-luminescence travel support for visually impaired persons[M]// Stanton N A. Advances in human aspects of transportation. Advances in intelligent systems and computing. Cham: Springer, 2018, 597: 319-324.
- [29] Kramida G. Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2016, 22(7): 1912-1931.
- [30] Hung G K, Ciuffreda K J, Rosenfield M. Proximal contribution to a linear static model of accommodation and vergence[J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 1996, 16(1): 31-41.
- [31] Suryakumar R, Meyers J P, Irving E L, et al. Vergence accommodation and monocular closed loop blur accommodation have similar dynamic characteristics[J]. Vision Research, 2007, 47(3): 327-337.
- [32] Dodgson N A. Autostereoscopic 3D displays[J]. Computer, 2005, 38(8): 31-36.
- [33] Li Z Y, Gao C, Li H F, et al. Portable autostereoscopic display based on multi-directional backlight[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21478-21490.
- [34] Zhou F, Hua J Y, Shi J C, et al. Pixelated blazed gratings for high brightness multiview holographic 3D display[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(5): 283-286.
- [35] Hua J Y, Yi D H, Qiao W, et al. Multiview holographic 3D display based on blazed Fresnel DOE[J]. Optics Communications, 2020, 472: 125829.
- [36] Wan W Q, Qiao W, Huang W B, et al. Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1114-1122.
- [37] Wan W Q, Qiao W, Pu D L, et al. Holographic sampling display based on metagratings[J]. iScience, 2020, 23(1): 100773.
- [38] Bando T, Iijima A, Yano S. Visual fatigue caused by stereoscopic images and the search for the requirement to prevent them: a review[J]. Displays, 2012, 33(2): 76-83.
- [39] Shibata T, Kawai T, Ohta K, et al. Stereoscopic 3-D display with optical correction for the reduction of the discrepancy between accommodation and convergence[J]. Journal of the Society for Information Display, 2005, 13(8): 665-671.
- [40] Hua H, Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [41] Condino S, Carbone M, Piazza R, et al. Perceptual limits of optical see-through visors for augmented reality guidance of manual tasks[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2020, 67(2): 411-419.
- [42] Konrad R, Cooper E A, Wetzstein G. Novel optical configurations for virtual reality: evaluating user preference and performance with focus-tunable and monovision near-eye displays [C]//Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, May 7-12, 2016, San Jose, California, USA. New York: ACM Press, 2016: 1211-1220.
- [43] Shibata T, Kim J, Hoffman D M, et al. Visual discomfort with stereo displays: effects of viewing distance and direction of vergence-accommodation conflict[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7863: 78630P.
- [44] Zhang Q T, Piao Y R, Ma S N, et al. Design, analysis and optimization of a waveguide-type near-eye display using a pin-mirror array and a concaved reflector[J]. Optics Express, 2022, 30(18): 33208-33221.
- [45] Hua H. Enabling focus cues in head-mounted displays[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(5): 805-824.
- [46] Westheimer G. The Maxwellian view[J]. Vision Research, 1966, 6(11/12): 669-682.
- [47] Shrestha P K, Pryn M J, Jia J, et al. Accommodation-free head mounted display with comfortable 3D perception and an enlarged eye-box[J]. Research, 2019, 2019: 9273723.
- [48] Liao C D, Tsai J C. The evolution of MEMS displays[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(4): 1057-1065.
- [49] Hofmann U, Janes J, Quenzer H J. High-Q MEMS resonators for laser beam scanning displays[J]. Micromachines, 2012, 3(2): 509-528.
- [50] Liu S X, Li Y, Zhou P C, et al. Reverse-mode PSLC multiplane optical see-through display for AR applications[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 3394-3403.
- [51] Chang C L, Cui W, Gao L A. Holographic multiplane near-eye display based on amplitude-only wavefront modulation[J]. Optics Express, 2019, 27(21): 30960-30970.
- [52] Liu C, Wang D, Wang Q H. Holographic display system with adjustable viewing angle based on multi-focus optofluidic lens[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18210-18221.
- [53] Xia X X, Guan Y Q, State A, et al. Towards a switchable AR/VR near-eye display with accommodation-vergence and eyeglass prescription support[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(11): 3114-3124.
- [54] Bhowmick A K, Jamali A, Bryant D, et al. 31-5: student paper: liquid crystal based 5 cm adaptive focus lens to solve accommodation-convergence (AC) mismatch issue of AR/VR/



- 3D displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52(1): 410-413.
- [55] Chang J H R, Kumar B V K V, Sankaranarayanan A C. Towards multifocal displays with dense focal stacks[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 198.
- [56] Liu L L, Ye Q, Pang Z Y, et al. Polarization enlargement of FOV in Super Multi-view display based on near-eye timing-apertures[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1841-1859.
- [57] Ueno T, Takaki Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [58] Wang L, Li Y, Liu S X, et al. Large depth of range maxwellian-viewing SMV near-eye display based on a Pancharatnam-Berry optical element[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 14(1): 7001607.
- [59] Gao C, Liu J, Li X, et al. Accurate compressed look up table method for CGH in 3D holographic display[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33194-33204.
- [60] Bartelt H. Computer-generated holographic component with optimum light efficiency[J]. Applied Optics, 1984, 23(10): 1499-1502.
- [61] Wang W S, Yang F R, Shui X H, et al. Wirtinger-derivative-based tilted plane diffraction propagation for holographic near-eye displays[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12318: 1231814.
- [62] Zhang Z Q, Liu J A, 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.
- [63] Gao Q K, Liu J, Duan X H, et al. Compact see-through 3D head-mounted display based on wavefront modulation with holographic grating filter[J]. Optics Express, 2017, 25(7): 8412-8424.
- [64] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. ACM Transactions on Graphics, 36(4): 85.
- [65] 张旭, 王梓, 屠科锋, 等. 视网膜投影显示技术研究进展[J]. 液晶与显示, 2022, 37(5): 639-646.
- Zhang X, Wang Z, Tu K F, et al. Research progress of retinal projection displays[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(5): 639-646.
- [66] 林俊国, 丛强, 许晨, 等. MEMS 激光扫描视网膜投影显示系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1222001.
- Lin J G, Cong Q, Xu C, et al. Design of MEMS laser scanning retinal projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1222001.
- [67] Takaki Y, Fujimoto N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display[J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [68] Reitterer J, Chen Z, Balbekova A, et al. Ultra-compact micro-electro-mechanical laser beam scanner for augmented reality applications[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11765: 1176504.
- [69] Boni N, Carminati R, Mendicino G, et al. Piezoelectric MEMS mirrors for the next generation of small form factor AR glasses[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12013: 1201305.
- [70] Park S, Wakelin M, Malea D, et al. Low-power, small-form-factor angle sensing circuit for an electrostatic, quasi-static MEMS mirror in AR applications[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 11931: 119310M.
- [71] Akutsu K, Seino S, Ogawa Y, et al. A compact retinal scan near-eye display[C]//ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies, July 28-August 1, 2019, Los Angeles, California, USA. New York: ACM Press, 2019.
- [72] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F79-F98.
- [73] Ando T, Yamasaki K, Okamoto M, et al. Head-mounted display using a holographic optical element[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3293: 183-189.
- [74] von Waldkirch M, Lukowicz P, Tröster G. Spectacle-based design of wearable see-through display for accommodation-free viewing[M]//Ferscha A, Mattern F. Pervasive computing. Lecture notes in computer science. Heidelberg: Springer, 2004, 3001: 106-123.
- [75] Yuuki A, Itoga K, Satake T. A new Maxwellian view display for trouble-free accommodation[J]. Journal of the Society for Information Display, 2012, 20(10): 581-588.
- [76] Kim S B, Park J H. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 767-770.
- [77] Xiong J H, Tan G J, Zhan T, et al. Breaking the field-of-view limit in augmented reality with a scanning waveguide display[J]. OSA Continuum, 2020, 3(10): 2730-2740.
- [78] Wang Z, Zhang X, Tu K F, et al. Lensless full-color holographic Maxwellian near-eye display with a horizontal eyebox expansion[J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4112-4115.
- [79] Choi M H, Park J H. Optical see-through Maxwellian-view display with axial focal spot steering using focus-tunable lens[C]//14th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO PR 2020), August 3-5, 2020, Sydney. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: C2G\_3.
- [80] Zhang S J, Zhang Z Q, Liu J A. Adjustable and continuous eyebox replication for a holographic Maxwellian near-eye display[J]. Optics Letters, 2022, 47(3): 445-448.
- [81] Van Kessel P F, Hornbeck L J, Meier R E, et al. A MEMS-based projection display[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(8): 1687-1704.
- [82] Sampsell J. An overview of Texas Instruments digital micromirror device (DMD) and its application to projection display[J]. Texas Instruments Incorporated, 1993, 24(2): 112-115.
- [83] Hornbeck L J. Current status of the digital micromirror device (DMD) for projection television applications[C]//Proceedings of IEEE International Electron Devices Meeting, December 5-8, 1993, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2002: 381-384.
- [84] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-216.
- [85] Liu S, Cheng D W, Hua H. An optical see-through head mounted display with addressable focal planes[C]//2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, September 15-18, 2008, Cambridge. New York: IEEE Press, 2008: 33-42.
- [86] Huang Y G, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: present status and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2020, 9: 105.
- [87] Liu X H, Wu Y P, Malhotra Y, et al. Submicron full-color LED pixels for microdisplays and micro-LED main displays[J]. Journal of the Society for Information Display, 2020, 28(5): 410-417.
- [88] Liu Y Z, Xia T W, Du A C, et al. Omnidirectional color shift suppression of full-color micro-LED displays with enhanced light extraction efficiency[J]. Optics Letters, 2023, 48(7): 1650-1653.
- [89] Jiang H N, Lin Z B, Li Y, et al. Design of self-luminous pico-projection optical engine based on a quantum-dot color converted micro-LED[J]. Proceedings of SPIE, 2022, 12448: 1244815.
- [90] 周自平, 黎垚, 严银策, 等. Micro-LED 应用于近眼显示的现状与趋势[J]. 液晶与显示, 2022, 37(6): 661-679.
- Zhou Z P, Li Y, Yan Y G, et al. Current situation and trend of Micro-LED application in near-eye display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2022, 37(6): 661-679.
- [91] Zhang X, Chen A L, Yang T, et al. Tripling light conversion efficiency of  $\mu$ LED displays by light recycling black matrix[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 7014207.
- [92] Du Z F, Feng H J, Liu Y Z, et al. Localized surface plasmon coupling nanorods with graphene as a transparent conductive electrode for micro light-emitting diodes[J]. IEEE Electron

- Device Letters, 2022, 43(12): 2133-2136.
- [93] Ren X X, Zhang X A, Xie H X, et al. Perovskite quantum dots for emerging displays: recent progress and perspectives[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(13): 2243.
- [94] Wang C H, Cai J H, Ye Y Y, et al. Full-visible-spectrum perovskite quantum dots by anion exchange resin assisted synthesis[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(7): 1355-1366.
- [95] Chen E G, Lin J Y, Yang T, et al. Asymmetric quantum-dot pixelation for color-converted white balance[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(7): 2158-2165.
- [96] Deng L W, Zhang X, Yan Y G, et al. Ambient contrast ratio of quantum-dot color-converted micro-LED displays[J]. *Results in Physics*, 2023, 48: 106462.
- [97] Li P K. LCOS and AR/VR[J]. *Information Display*, 2018, 34(2): 12-15.
- [98] Chen E G, Yu F H. Design of an elliptic spot illumination system in LED-based color filter - liquid-crystal-on-silicon pico projectors for mobile embedded projection[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3162-3170.
- [99] Melena N W, Wiersma J T. Pixel size requirements for AR/MR [J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11765: 1176505.
- [100] Chen E G, Liu P, Yu F H. Synchronized parameter optimization of the double freeform lenses illumination system used for the CF-LCoS pico-projectors[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2080-2087.
- [101] Wu Y J, Pan C, Gao Y B, et al. Design of ultra-compact augmented reality display based on grating waveguide with curved variable-period grating[J]. *Optics Communications*, 2023, 529: 128980.
- [102] Kress B, Pace M, Chatterjee I. 5-3: invited Paper: towards Cost-Effective AR/MR Display Systems: the Emergence of an Industrial Hardware Ecosystem allowing low cost mass production[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2020, 51(1): 45-48.
- [103] Robbins S J, Glik E, He S H, et al. MEMS laser scanner having enlarged FOV: US10088686[P]. 2018-10-02.
- [104] JBD[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.jb-display.com>.
- [105] Sony-semicon[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.sony-semicon.com/>.
- [106] Himax[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.himax.com.tw>.
- [107] Microsoft HoloLens[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>.
- [108] Celluon[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.celluon.com>.
- [109] Yin K, Hsiang E L, Zou J Y, et al. Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11: 161.
- [110] Zhan T, Xiong J H, Zou J Y, et al. Multifocal displays: review and prospect[J]. *Photonix*, 2020, 1(1): 1-31.
- [111] Rolland J P, Krueger M W, Goon A A. Dynamic focusing in head-mounted displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3639: 463-470.
- [112] Schowengerdt B T, Lin D M, St Hilaire P. Multi-layer diffractive eyepiece: US20180052277[P]. 2018-02-22.
- [113] Shen F Q, Yang L, She J, et al. Tailoring freeform beam-shaping lenses for edge-emitting lasers[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 167: 107603.
- [114] Yang L, Shen F Q, Ding Z H, et al. Freeform optical design of beam shaping systems with variable illumination properties[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31993-32005.
- [115] Liu Z W, Yang L, Yang Y B, et al. Improved optical camera communication systems using a freeform lens[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 34066-34076.
- [116] Yang L, Liu Y L, Ding Z H, et al. Design of freeform lenses for illuminating hard-to-reach areas through a light-guiding system[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 38155-38168.
- [117] Shu T, Hu G Y, Wu R M, et al. Compact full-color augmented reality near-eye display using freeform optics and a holographic optical combiner[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31714-31727.
- [118] Cheng D W, Wang Q F, Wang Y T, et al. Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 31201-31204.
- [119] Shi J C, Qiao W, Hua J Y, et al. Spatial multiplexing holographic combiner for glasses-free augmented reality[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 3003-3010.
- [120] Piao J A, Li G, Piao M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(3): 242-248.
- [121] Liu S X, Li Y, Su Y K. Multiplane displays based on liquid crystals for AR applications[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(3): 224-240.
- [122] 刘澍鑫, 李燕, 苏翼凯. 基于液晶散射膜的多平面增强现实显示[J]. *液晶与显示*, 2020, 35(7): 725-732.
- Liu S X, Li Y, Su Y K. Review on multi-plane augmented reality display based on liquid crystal scattering films[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(7): 725-732.
- [123] Liu S X, Li Y, Li X, et al. 3-1: a multi-plane volumetric optical see-through head mounted 3D display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2016, 47(1): 1-3.
- [124] 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]. *Journal of the Society for Information Display*, 2016, 24(4): 246-251.
- [125] Cui W, Gao L A. Optical mapping near-eye three-dimensional display with correct focus cues[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2475-2478.
- [126] Su Y F, Cai Z J, Shi L Y, et al. A multi-plane optical see-through holographic three-dimensional display for augmented reality applications[J]. *Optik*, 2018, 157: 190-196.
- [127] Lee C K, Moon S, Lee S, et al. Compact three-dimensional head-mounted display system with Savart plate[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19531-19544.
- [128] Tan G J, Zhan T, Lee Y H, et al. Polarization-multiplexed multiplane display[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(22): 5651-5654.
- [129] Matsuda N, Fix A, Lanman D. Focal surface displays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4): 86.
- [130] Zhan T, Lee Y H, Wu S T. High-resolution additive light field near-eye display by switchable Pancharatnam - Berry phase lenses[J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4863-4872.
- [131] Rolland J P, Krueger M W, Goon A. Multifocal planes head-mounted displays[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(19): 3209-3215.
- [132] MacKenzie K J, Hoffman D M, Watt S J. Accommodation to multiple-focal-plane displays: implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control[J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(8): 22.
- [133] Hu X D, Hua H. Design and assessment of a depth-fused multi-focal-plane display prototype[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(4): 308-316.
- [134] Rathinavel K, Wang H P, Blate A, et al. An extended depth-of-field volumetric near-eye augmented reality display[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, 24(11): 2857-2866.
- [135] Tianma[EB/OL]. [2023-02-03]. <https://www.tianma.cn>.
- [136] Shiwa S, Omura K, Kishino F. Proposal for a 3-D display with accommodative compensation: 3DDAC[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 1996, 4(4): 255-261.
- [137] Yanagisawa N, Kim K T, Son J Y, et al. Focus-distance-controlled 3D TV[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 3012: 256-261.
- [138] Sugihara T, Miyasato T. System development of fatigue-less HMD system 3DDAC (3D display with accommodative



- compensation: system implementation of Mk. 4 in light-weight HMD[J]. ITE Technical Report, 1998, 22(1): 33-36.
- [139] Lockhart T E, Shi W. Effects of age on dynamic accommodation [J]. Ergonomics, 2010, 53(7): 892-903.
- [140] Stevens R E, Rhodes D P, Hasnain A, et al. Varifocal technologies providing prescription and VAC mitigation in HMDs using Alvarez lenses[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10676: 106760J.
- [141] 程德文, 陈海龙, 王涌天, 等. 复杂光学曲面数理描述和设计方法研究[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822008.  
Cheng D W, Chen H L, Wang Y T, et al. Mathematical description and design methods of complex optical surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822008.
- [142] Lin Y H, Huang T W, Huang H H, et al. Liquid crystal lens set in augmented reality systems and virtual reality systems for rapidly varifocal images and vision correction[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22768-22778.
- [143] Rolland J P, Hua H. Head-mounted display systems[J]. Encyclopedia of Optical Engineering, 2005, 2: 1-14.
- [144] McQuaide S C, Seibel E J, Kelly J P, et al. A retinal scanning display system that produces multiple focal planes with a deformable membrane mirror[J]. Displays, 2003, 24(2): 65-72.
- [145] Schowengerdt B T, Seibel E J, Kelly J P, et al. Binocular retinal scanning laser display with integrated focus cues for ocular accommodation[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5006: 1-9.
- [146] 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.
- [147] Zhan T, Zou J Y, Lu M, et al. Wavelength-multiplexed multifocal displays[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11304: 1130408.
- [148] Lanman D, Luebke D. Near-eye light field displays[J]. ACM Transactions on Graphics, 32(6): 220.
- [149] Zhu L M, Du G, Lü G Q, et al. Performance improvement for compressive light field display with multi-plane projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 142: 106609.
- [150] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Compressive light field displays[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, 32(5): 6-11.
- [151] Lee S, Jang C, Moon S, et al. Additive light field displays: realization of augmented reality with holographic optical elements [J]. ACM Transactions on Graphics, 35(4): 60.
- [152] Teng D D, Lai C L, Song Q, et al. Super multi-view near-eye virtual reality with directional backlights from wave-guides[J]. Optics Express, 2023, 31(2): 1721-1736.
- [153] Wang P R, Sang X Z, Yu X B, et al. Demonstration of a low-crosstalk super multi-view light field display with natural depth cues and smooth motion parallax[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 34442-34453.
- [154] 邢树军, 曹良才, 桑新柱, 等. 面向超多视点光场的虚拟立体内容生成技术综述[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1509001.  
Xing S J, Cao L C, Sang X Z, et al. Overview of virtual stereo content generation technology for super multi-view light field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1509001.
- [155] Deng H, Wang Q H, Xiong Z L, et al. Magnified augmented reality 3D display based on integral imaging[J]. Optik, 2016, 127(10): 4250-4253.
- [156] Shen X, Javidi B. Large depth of focus dynamic micro integral imaging for optical see-through augmented reality display using a focus-tunable lens[J]. Applied Optics, 2018, 57(7): B184-B189.
- [157] Qin Z, Chou P Y, Wu J Y, et al. Resolution-enhanced light field displays by recombining subpixels across elemental images [J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2438-2441.
- [158] Watanabe H, Omura T, Okaichi N, et al. Full-parallax three-dimensional display based on light field reproduction[J]. Optical Review, 2022, 29(4): 366-374.
- [159] Huang F C, Luebke D, Wetzstein G. The light field stereoscope [C]//SIGGRAPH '15: ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies, August 9-13, 2015, Los Angeles, California. New York: ACM, 2015.
- [160] Wang L, Li Y, Liu S X, et al. 42.6: Maxwellian-viewing-super-multi-view near eye display using a Pancharatnam-Berry optical element[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52: 533-536.
- [161] 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.
- [162] 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.
- [163] Amako J, Miura H, Sonehara T. Wave-front control using liquid-crystal devices[J]. Applied Optics, 1993, 32(23): 4323-4329.
- [164] Roberge D, Neto L G, Sheng Y L. Full-complex modulation spatial light modulator using two coupled-mode modulation liquid crystal televisions[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2490: 407-415.
- [165] Hsieh M L, Chen M L, Cheng C J. Improvement of the complex modulated characteristic of cascaded liquid crystal spatial light modulators by using a novel amplitude compensated technique[J]. Optical Engineering, 2007, 46(7): 070501.
- [166] Gregory D A, Kirsch J C, Tam E C. Full complex modulation using liquid-crystal televisions[J]. Applied Optics, 1992, 31(2): 163-165.
- [167] Chen J S, Chu D P. Improved layer-based method for rapid hologram generation and real-time interactive holographic display applications[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18143-18155.
- [168] 刘珂瑄, 吴佳琛, 何泽浩, 等. 基于深度学习的计算全息显示进展[J]. 液晶与显示, 2023, 38(6): 819-828, 690.  
Liu K X, Wu J C, He Z H, et al. Progress of learning-based computer-generated holography[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2023, 38(6): 819-828, 690.
- [169] Qin Z, Wu J Y, Chou P Y, et al. Revelation and addressing of accommodation shifts in microlens array-based 3D near-eye light field displays[J]. Optics Letters, 2019, 45(1): 228-231.
- [170] Xia X X, Guan Y Q, State A, et al. Towards eyeglass-style holographic near-eye displays with statically[C]//2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), November 9-13, 2020, Porto de Galinhas, Brazil. New York: IEEE Press, 2020: 312-319.
- [171] Boo H, Lee Y S, Yang H B, et al. Metasurface wavefront control for high-performance user-natural augmented reality waveguide glasses[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 5832.

# Research Progress of Vergence-Accommodation Conflict in Near-Eye Display Based on Augmented Reality

Wang Shulong<sup>1</sup>, Lin Zijian<sup>2</sup>, Xu Shixiang<sup>1\*</sup>, Wang Yu<sup>3</sup>, Yang Kun<sup>3</sup>, Huang Yidan<sup>2</sup>,  
Chen Enguo<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;

<sup>2</sup>National and Local United Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology, College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

<sup>3</sup>Nanyang Lida Optic-electronics Co., Ltd., Nanyang 473003, Henan, China

## Abstract

**Significance** As the entrance technology of metaverse, augmented reality (AR) is highly likely to become the next generation computing platform. Near-eye display is the core foundation for the development and application of AR technology and is the direct medium for people to receive virtual information and combine reality. Near-eye display optical systems are the core component of AR, and the maturity of the display module is part of AR technology popularization. The vergence-accommodation conflict (VAC) of near-eye display systems is a key challenge restricting the large-scale AR application.

Human beings obtain 80% of external information by human eye vision. To obtain the 3D display effect, near-eye display optical systems will simulate the real scenes through both eyes, displaying the independent pictures of the two eyes with certain parallax to make the brain perceive the 3D display effect. Meanwhile, the eye lens is always focused on the virtual image plane of the micro-display of the optical system, which indicates the fixed eye accommodation distance. Due to the setting of the left and right eye images with parallax, the brain will perceive the distance of the 3D image objects, and then the convergence distance of human eyes will change with the built-in image source. As a result, a mismatch is caused between the convergence distance and the accommodation distance, which is a VAC problem. When the user is in this state for a long time, visual fatigue, dizziness, and vomiting will occur. The VAC problem in the near-eye display optical system causes the display scene to deviate from people's perception in the real world, which brings bad user experience and is a major challenge to be solved for the long-term utilization and popularization of AR devices.

**Progress** VAC is an insurmountable technical challenge in the development of AR display technology. We classify its solutions to provide references for selecting solutions suitable for different technical development needs, and review current VAC solutions, classifying them as solutions without depth information, with partial depth information, and with complete depth information (Fig. 2). In the VAC solutions without depth information, we mainly introduce Maxwellian display technology, which takes the image as a single point beam through the eye lens photocentric position and subsequently images it directly onto the retina. Thus, the limitation that the eye lens must be forced to focus can be addressed, which means the human eye lens can observe the image in different diopter states and the VAC problem can be overcome. Lin et al. implemented a MEMS-based Maxwellian display system to achieve a  $33^\circ \times 22^\circ$  display field of view with an exit pupil distance of 10 mm, converging the imaging beam into a  $5 \mu\text{m}$  spot with the best imaging quality when the spot is at the photocentric position of the human eyes. The Maxwellian technique requires the converging light to form a beam point that matches the pupil position, resulting in the natural limitation and drawback of this solution in the exit pupil range and needs to be matched with a corresponding pupil extension technique.

In the VAC solutions with partial depth information, we mainly introduce multi-focal plane display technology (physical multi-focal plane and virtual multi-focal plane) and adjustable focus display technology. Cheng et al. equipped two microdisplays to implement a two-focal plane AR near-eye display module by spatial multiplexing [Fig. 6(c)]. The display solution achieves a  $40^\circ$  display field of view, an exit pupil distance of 20 mm, and an eyebox aperture of 6 mm, enabling two different focal planes at 1.25 m and 5 m distances.

In the VAC solutions with complete depth information, we introduce integrated imaging and computational holography solution. Hua et al. employed an integrated imaging unit as a stereo microdisplay image source combined with a free-form prism to form an AR near-eye display module with depth information, achieving a  $33.4^\circ$  display field of view, an exit pupil distance of 19 mm, and an eyebox aperture of 6.5 mm [Fig. 9(a)]. Zhang et al. achieved complex amplitude wavefront reconstruction of image information by cascading amplitude holograms to provide complete depth information for AR near-eye display. Finally, the undesirable effects of VAC are eliminated to achieve a  $4.8^\circ$  display field of view ( $9.4 \times$  secondary magnification) with an exit pupil distance of 10 mm.



**Conclusions and Prospects** We present a systematic review of VAC solutions in AR near-eye display optical systems. Meanwhile, the focus is on the basic principles of the VAC problem and the technical features, implementation methods, and representative literature of current near-eye display optical solutions.

The VAC problem is contrary to the physiological characteristics of human eyes in daily observation and is an inevitable difficulty for AR to enhance viewing comfort. In current VAC solutions, Maxwellian near-eye display, variable focus, and multi-focal plane near-eye display solutions have relative advantages in design and image quality.

**Key words** near-eye display; augmented reality; vergence-accommodation conflict; depth information