

MEMS 激光扫描视网膜投影显示系统设计

林俊国¹, 丛强¹, 许晨¹, 程德文^{1,2}, 王涌天^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081

摘要 视网膜投影显示(RPD)是头戴显示器(HMD)领域的一个研究热点,能够克服传统 HMD 辐辏聚焦矛盾(VAC)。为了使 RPD 小型便携化,以微机电系统(MEMS)扫描镜作为空间光调制器(SLM)设计制造了折反式激光 RPD 系统。首先,介绍了辐辏聚焦矛盾,分析了 RPD 的基本原理。通过传统的 RPD 光路结构,实验验证了以 MEMS 激光扫描投影作为图像源的麦克斯韦观察法原理的可行性,分析并解决了黑斑问题。接着,完成了 RPD 系统的光学设计,分析评价了系统的性能。最后,制造出小型便携式的原型机,原型机瞳距可调,视场角为 $30^\circ(\text{H}) \times 22^\circ(\text{V})$,无畸变,并通过实验对其显示效果进行了验证。

关键词 光学设计; 头戴显示器; 视网膜投影显示; 辐辏聚焦矛盾; 折反式光学系统

中图分类号 TN27 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1222001

Design of MEMS Laser Scanning Retinal Projection Display System

Lin Junguo¹, Cong Qiang¹, Xu Chen¹, Cheng Dewen^{1,2}, Wang Yongtian^{1,2}

¹School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, Beijing 100081, China

Abstract Retinal projection display (RPD) is one of the research hotspots in the field of head-mounted display (HMD), it can overcome the vergence-accommodation conflict (VAC) of the traditional HMD. In order to make the RPD small and portable, a catadioptric laser RPD system, which uses a micro-electromechanical system (MEMS) scanning mirror as the spatial light modulator (SLM), is designed and fabricated. Firstly, the vergence-accommodation conflict is introduced and the basic principle of RPD is analyzed. Then the feasibility of Maxwellian view principle that uses a MEMS laser scanning projection as the image source is experimentally verified by the traditional RPD optical structure. And the black speckle problem is analyzed and solved. The optical design of the RPD system is finished, and the performance of the system is analyzed and evaluated. Finally, the small portable prototype is fabricated, whose interpupillary distance is adjustable, with a viewing angle of $30^\circ(\text{H}) \times 22^\circ(\text{V})$ and distortion-free. Display performance of the prototype is demonstrated through experiments.

Key words optical design; head-mounted display; retinal projection display; vergence-accommodation conflict; catadioptric optical system

OCIS codes 220.4830;120.2040

1 引 言

头戴显示器(HMD)是近年来研究的热点,其包括增强现实(AR)智能眼镜和虚拟现实(VR)设备。HMD 已经从原来的军事训练、航空航天领域拓展到工业、医疗、教育、娱乐等民用领域,具有广阔的应用前景^[1-5]。目前,阻碍 HMD 发展的一个主要技术问题是辐辏聚焦矛盾(VAC),用户长时间佩戴 HMD 会因此感到视觉不适,这极大地影响用户体验^[6]。视网膜投影显示(RPD)具有很长的景深,能够克服辐辏聚焦矛盾

收稿日期: 2017-05-27; **收到修改稿日期:** 2017-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1001502)、国家 863 计划(2015AA016301)、2014 年“万人计划”青年拔尖人才支持计划

作者简介: 林俊国(1993—),男,硕士研究生,主要从事近眼显示方面的研究。E-mail: 2120150532@bit.edu.cn

导师简介: 程德文(1982—),男,博士,教授,主要从事自由曲面光学设计、头戴显示器方面的研究。

E-mail: cdwlxk@163.com(通信联系人)

带来的人眼不适问题^[7-8],是 HMD 领域的一个研究热点。

RPD 技术源于 1980 年 Webb 等^[9]所设计的扫描激光检眼镜。1980~2002 年间,在 Yoshinaka 等^[10-12]研究的推动下,逐步发展成为一种近眼显示设备。2010 年,日本 Brother 公司在世博会上展示了一款基于视网膜投影的眼镜终端 AirScouter^[13],其能够提供单目 AR 视觉显示,视场角为 $20^\circ(\text{H}) \times 11.4^\circ(\text{V})$,质量为 106 g。2014 年,Avegant 公司正式发布一款利用视网膜投影提供立体影像视觉的双目 VR 观影设备 Glyph^[14],其大小相当于一个头戴式耳机,体型较大,质量为 453 g。近年来,国内外关于 HMD 的研究已经获得了很大的进展,但在 RPD 方向的研究仍较为薄弱,现有的 RPD 设备视场角小,体积和质量无法满足小型便携式的要求。针对这些问题,以微机电系统(MEMS)扫描镜和激光二极管为图像源,采用折反式光学结构,设计并制造一款视场角为 $30^\circ(\text{H}) \times 22^\circ(\text{V})$,亮度高,体积小,质量轻且光学结构简单紧凑的视网膜投影 AR 显示原型机,并通过实验对其显示效果进行验证。

2 RPD 原理

2.1 辐辏聚焦矛盾

目前,阻碍 HMD 发展的一个主要技术问题是辐辏聚焦矛盾,其指的是单一固定的虚拟显示屏幕使得人眼晶状体的调焦和双目的辐辏不一致,而引起人眼的视觉不适^[6]。如图 1(a)所示,人在观看自然真实物体时,人眼晶状体调焦到物体上,双眼同时会聚辐辏到该物体,通过双目视差形成立体视觉,这种情况下,人眼的调焦深度和辐辏深度相匹配,为自然视觉;图 1(b)为 VR 双目立体观影设备的视觉原理图,观看 3D 影视时,人眼需要调焦到虚拟显示屏上以获得清晰的数字图像内容,同时又要会聚辐辏到虚拟物体位置以融合出立体图像,此时人眼的调焦和双目的辐辏不一致,是一种不自然的视觉体验;图 1(c)为双目 AR 智能眼镜的视觉原理图,当用户双目聚辐辏到处于同一深度的虚拟物体和真实物体时,人眼需要调焦到虚拟显示屏上以获取附加在真实场景上的数字图像信息,又要调焦到真实物体上,当两者的调焦距离超过人眼所能调节的范围时,便无法同时看清处于同一深度的虚拟物体和真实物体,从而引起人眼非自然的视觉感受。用户佩戴使用 HMD 时,辐辏聚焦矛盾所导致的不自然的视觉体验,容易增加眼睛疲劳,影响用户体验。

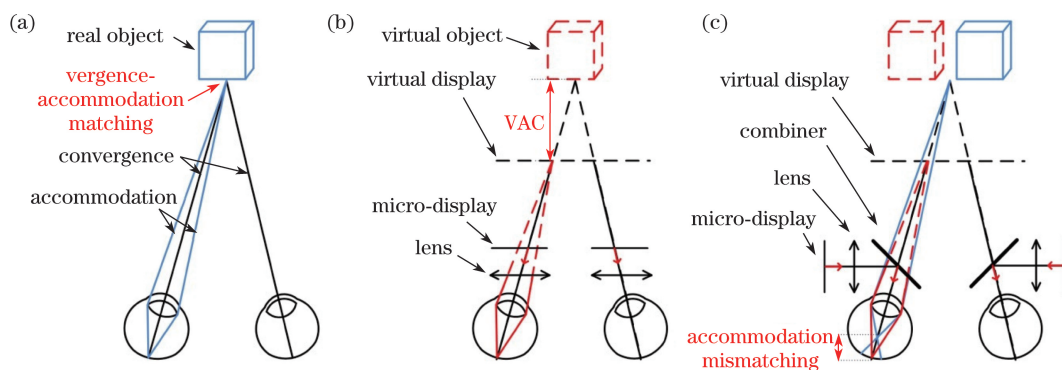


图 1 辐辏聚焦矛盾示意图。(a) 自然视觉;(b) VR 视觉;(c) AR 视觉

Fig. 1 Diagram of VAC. (a) Natural vision; (b) VR vision; (c) AR vision

2.2 传统 RPD 光路

基于麦克斯韦观察法的 RPD 是解决辐辏聚焦矛盾的一种方法^[8]。传统的 RPD 光路结构如图 2 所示,在图像源模块中,光源发出的光经过透镜系统 L_1 和分光镜 M 准直反射进入空间光调制器液晶显示器(LCD)或硅基液晶(LCoS),经调制后出射的平行光束加载了数字图像信息,并且含有衍射光,因此需要添加滤波系统以滤除高级次衍射光波并得到具有很长景深的细光束^[15-16]。滤波系统由透镜系统 L_2 和滤波小孔 P 构成,细光束经过投影系统 L_3 在人眼晶状体光心会聚于一点,然后直接投射到视网膜上形成图像^[7]。经过滤波系统后沿不同方向出射的细光束携带空间光调制器上不同像素点的信息,所有像素点组成的图像被直接投影到人眼视网膜上不同的位置形成图像视觉。由于全部细光束都经过人眼晶状体光心,故晶状体的调焦不影响细光束的传播,而且人眼所观察到的虚拟数字图像具有很长的景深,这便是麦克斯韦观察法的原

理。当人眼调焦和会聚辐辏以观察远近不同的自然真实物体时,虚拟数字图像都能够独立于晶状体的调焦而清晰地显示,避免了辐辏聚焦矛盾。

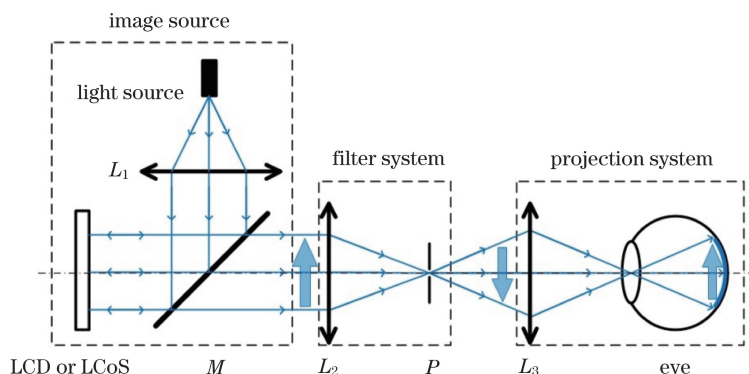


图 2 传统 RPD 光路图

Fig. 2 Optical path of conventional RPD

MEMS 扫描投影具有亮度高、色域广、结构紧凑的优点^[17],基于传统的 RPD 光路,改用 MEMS 为图像源,搭建了如图 3 的系统以验证光路的可行性,实验成像效果如图 4(a)所示。验证光路系统的成像效果清晰,但存在较大色差,而且由于麦克斯韦观察法要求人眼晶状体中点和光束汇聚点严格匹配,所以当偏离观察处观察图像时,图像显示不全,还可能出现图 4(b)中的黑斑。

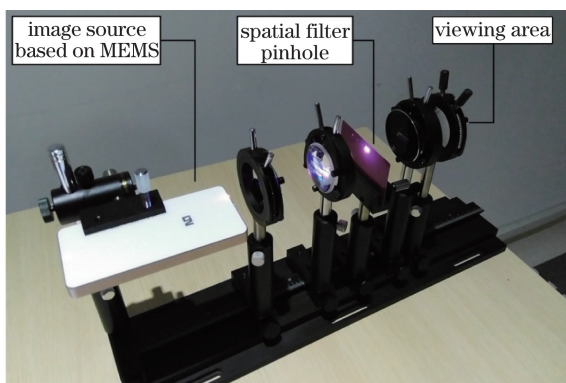


图 3 RPD 可行性验证光路系统

Fig. 3 Feasibility verification optical system of RPD

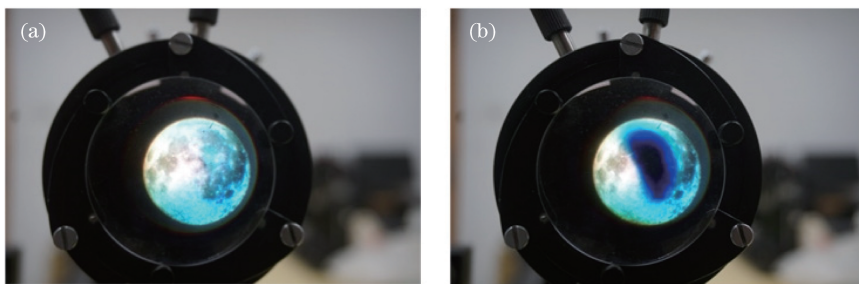


图 4 成像效果图。(a)正常图像;(b)带黑斑的图像

Fig. 4 Imaging effect figures. (a) Normal image; (b) image with black speckle

实验发现改用尺寸较大的滤波小孔能有效地避免黑斑的出现。经分析,这是因为验证实验所用的 MEMS 图像源输出的信息光为细光束^[7],光线经过球面透镜在滤波小孔位置的球差较大,当滤波小孔尺寸较小或位置不佳时,便会遮挡部分细光束,造成部分图像信息光线的丢失,导致图像出现黑斑。传统的 RPD 光路不仅结构复杂,而且要求滤波小孔和光束会聚点严格对准匹配,使得加工和装调难度升级。传统 RPD 光路已经不再适用于以 MEMS 作为图像源的系统,球差的存在使系统容易产生黑斑导致图像不完整,影响显示效果,因此对传统的 RPD 光路进行改进。

2.3 基于 MEMS 的 RPD 光路结构

针对 2.2 节所述 RPD 存在的问题,去除传统 RPD 光路中的滤波系统,采用如图 5 所示的 RPD 光路作为设计原理图。MEMS 扫描镜进行二维扫描将激光光源发出的光束调制为加载了图像信息的细光束,沿不同方向出射的细光束相当于不同像素点发出的光,所有像素点组成的数字图像经过光学系统 L_1 在人眼晶状体光心会聚于一点,进而直接投影到视网膜上不同的位置以形成图像,其中 MEMS 扫描镜中心与人眼晶状体中心共轭。

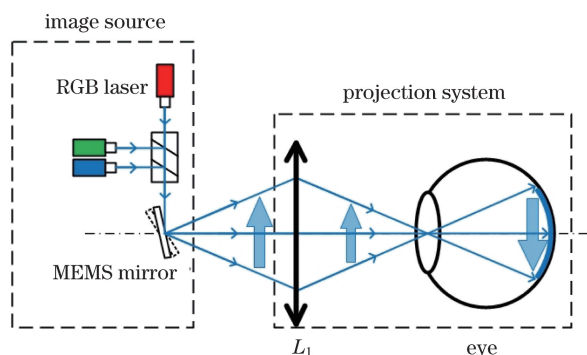


图 5 基于 MEMS 的 RPD 光路图

Fig. 5 Optical path of RPD based on MEMS

该光路结构的图像源由 MEMS 和 RGB 三色激光二极管配合产生,显示系统具有亮度高、色域广的特点。为满足人眼安全等级要求,激光二极管总输出功率严格控制在 $0.4 \mu\text{W}$ 以下^[18]。相比传统 RPD 光路,避免使用滤波系统,能够有效地减小光学系统的尺寸,有利于系统的紧凑小型化,而且球差的存在不再导致黑斑,保证了成像的完整,降低了系统的设计和装调难度。虚拟数字图像独立于人眼的调焦,具有很长的景深,避免了辐辏聚焦矛盾。

3 显示系统光学设计

3.1 设计分析与优化控制

为了保证近眼显示系统结构简单紧凑且适合佩戴,采用折反式光学结构。图像源置于人脸侧面,经 MEMS 调制的信号光经过两次反射进入人眼。位于人脸侧面的中继透镜组将图像源输出的带有数字图像信息的光束进行准直,准直光束经平面反射镜折转进入位于人脸前面的后继透镜组,后继透镜组配合分光镜将光束反射会聚于人眼晶状体光心并投影在人眼视网膜上,人眼便能观测到独立于人眼调焦的具有很长景深的数字图像。通过像面成像光斑尺寸的大小以及对系统调制传递函数(MTF)曲线的评估来分析系统设计结果。RPD 光学系统的尺寸随视场角、出瞳距离和光学系统直径的增大而增大,因此设计前需要对其权衡分析。

系统的设计规格参数如表 1 所示。该 RPD 系统图像源调制器采用 $720 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 分辨率的 MEMS 扫描镜,扫描镜单元的镜面直径为 1 mm 。为了获得比较舒适的佩戴体验,控制光学系统最后一块透镜表面到出瞳处的距离不少于 15 mm ,人眼到分光镜间的出瞳距离不少于 10 mm ,对角线视场角不小于 40° 。为了保证系统的小型化和虚拟图像在透镜投影的完整性,中继透镜组和后继透镜组的透镜设计孔径不大于 20 mm ,并且透镜数目应尽量少以减轻系统质量。通常人侧脸眼角到耳前的距离在 $65 \sim 90 \text{ mm}$ 范围,故图像源及与其相匹配的中继透镜组要满足该距离的尺寸限制,约束中继透镜组的设计长度不大于 90 mm 。人眼瞳孔到同侧的侧脸距离在 $50 \sim 65 \text{ mm}$ 范围,人眼瞳距也因人而异,因此光学系统及其机械结构的设计都必须考虑瞳距可调以适应不同的用户,约束后继透镜组的设计长度不大于 55 mm 。从图 4 中视网膜投影验证光路的成像效果可看出该系统存在较大的色差,故系统设计应考虑使用双胶合透镜以消除色差。

3.2 设计结果与性能分析

根据 3.1 节的设计分析和优化控制,采用折反式光学结构,设计所得的折反式 RPD 系统光路图如图 6 所示。该 RPD 光学系统的中继透镜组(L_1, L_2)和后继透镜组(L_1', L_2')中的透镜均共轴,均为旋转对称面

表 1 RPD 规格参数

Table 1 Specification parameters of RPD

Parameter	Specification
Configuration	On-axis catadioptric
Effective focal length	35.78 mm
Diagonal field of view	40°
Eye relief	10 mm
Resolution	720 pixel×480 pixel
MEMS mirror diameter	1 mm
Interpupillary distance adjustable range	0~20 mm

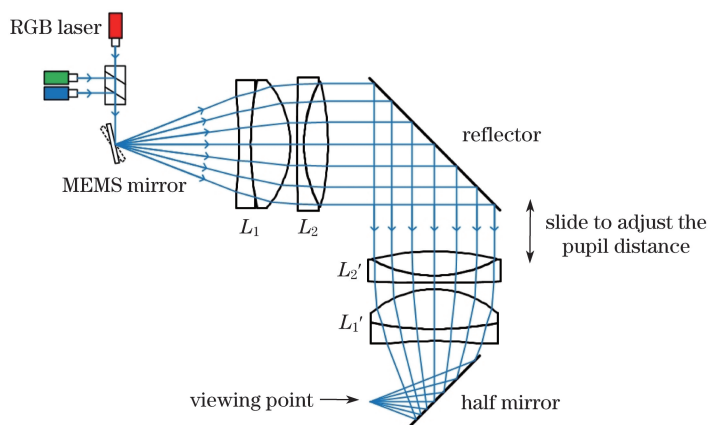


图 6 RPD 光学系统光路图

Fig. 6 Optical path of RPD optical system

型的双胶合透镜,口径均在 18 mm 左右。该系统的中继透镜组和后继透镜组中的透镜为完全对称的结构,角放大率为 1,因此该系统理论上没有畸变。系统共有 6 个光学元件,其中 4 片透镜、1 片平面反射镜和 1 片分光镜。光学系统的有效焦距为 35.78 mm,出瞳距离为 10 mm,视场角 $30^\circ(\text{H}) \times 22^\circ(\text{V})$,满足预先的设计目标。该系统可通过调节后继透镜组和平面反射镜间的距离来实现瞳距的调节。

设计所得的折反式 RPD 光学系统以 MEMS 扫描投影为图像源,像源点发出的光经准直后,在孔径中不同的位置加载了单一视场角的数字图像信息。此时构成数字图像的光线都是单一方向的细光束,因此仅需要考虑一个视场来对系统的性能进行分析。

所设计光学系统的 MTF 曲线如图 7 所示,在 30 lp/mm 处,整个视场的 MTF 值优于 0.9;在 140 lp/mm 处 MTF 值为 0.3 左右,完全满足目视结构系统的要求,说明该光学系统拥有良好的成像质量。光学系统像面

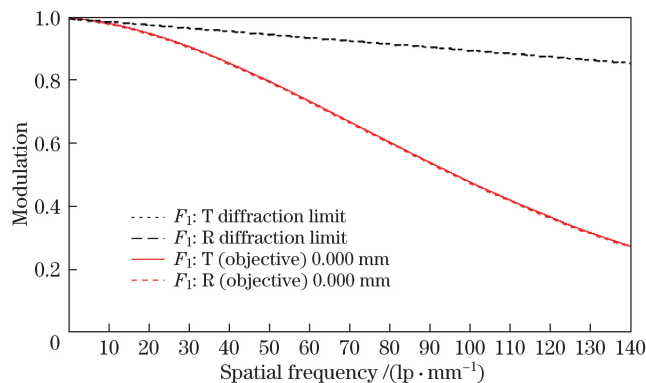


图 7 RPD 光学系统 MTF 曲线图

Fig. 7 MTF curve of RPD optical system

的光束合成传播图如图 8 所示,会聚点的光斑直径只有 $5\ \mu\text{m}$ 左右,基本为一个点光斑,可以满足麦克斯韦观察法中关于光线在晶状体光心处会聚于一点的条件。

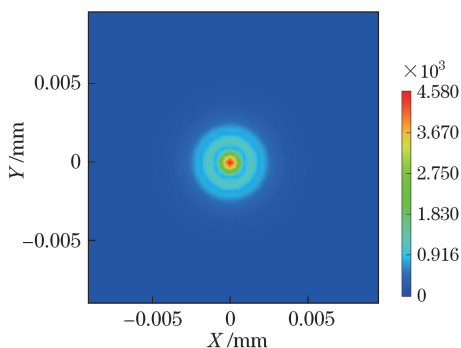


图 8 RPD 光学系统像面光束合成传播图

Fig. 8 Beam synthesis propagation of image plane of RPD optical system

4 实物模型及显示效果

折反式 RPD 系统的实物图及佩戴效果图如图 9 所示,实现了系统的小型轻量化。图 10(a)为图像源的输出图像,图 10(b)、(c)是使用单反相机装载 F 数为 1.8、等效焦距为 50 mm 的镜头进行远近对焦拍摄的成像效果图。通过分光镜可以在看外部物体的同时,清晰地看到由 RPD 系统投射入眼的虚拟图像,RPD 系统距离近焦处的分辨率板 500 mm,距离远焦处的分辨率板 1500 mm。从成像效果图可见无论相机镜头对焦到近处还是远处,均能观察到清晰的数字虚拟图像,这也验证了基于麦克斯韦观察法的 RPD 系统所观察到的虚拟图像具有很长景深的特点。

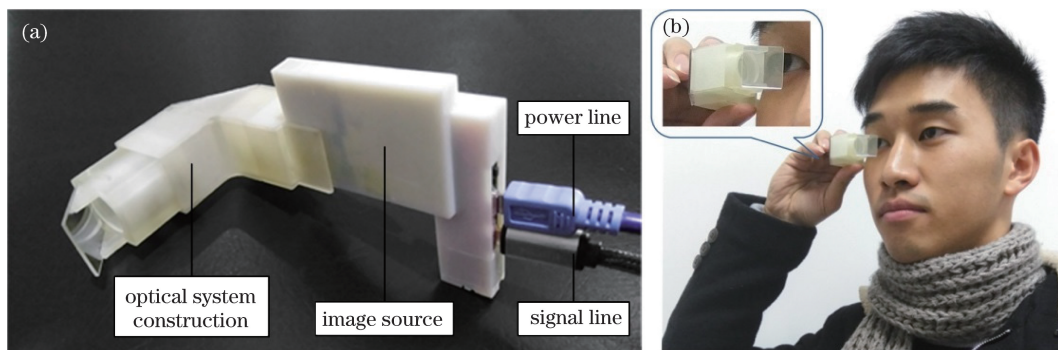


图 9 (a) RPD 光学系统原型图;(b) 佩戴效果图

Fig. 9 (a) Prototype of RPD optical system; (b) wearing performance

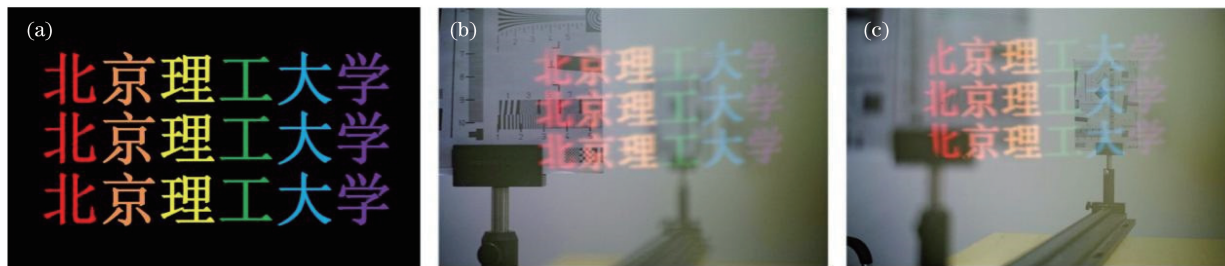


图 10 (a)图像源;(b)对焦到近处成像效果图;(c)对焦到远处成像效果图

Fig. 10 (a) Image source; (b) imaging effect diagram of focusing on the close-distance plane;
(c) imaging effect diagram of focusing on the far-distance plane

5 结 论

基于麦克斯韦观察法的 RPD 是 HMD 的一个研究热点,其能够使虚拟图像的显示独立于人眼调节,解

决了传统 HMD 普遍存在的辐辏聚焦矛盾。针对现有 RPD 设备视场角小、体积和质量无法满足小型便携式要求的问题,区别于传统 RPD 以 LCD 或 LCoS 为微图像源,采用 MEMS 为图像源,避免使用滤波系统,解决了黑斑问题,同时实现了简单紧凑的折反式显示系统的设计制造和性能分析,得到了视场角 $30^\circ(\text{H}) \times 22^\circ(\text{V})$,无畸变,满足小型便携需求的 RPD 系统,并验证了 RPD 具有很长景深的特点。该设计成果对 RPD 的研究具有一定的指导意义,为今后的研究打下基础。

参 考 文 献

- [1] Rauschnabel P, Brem A, Ro Y. Augmented reality smart glasses: definition, conceptual insights, and managerial importance[J]. Working Paper, The University of Michigan-Dearborn, 2015.
- [2] Kress B. The segmentation of the HMD market: optics for smart glasses, smart eyewear, AR and VR headsets[C]. SPIE, 2014, 9202: 92020D.
- [3] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-216.
- [4] Hu Xinrong, Liu Ying, Wang Jian, *et al.* Current progress in head-mounted display based on retinal scanning[J]. Infrared & Laser Engineering, 2014, 43(3): 871-878.
呼新荣, 刘英, 王健, 等. 基于视网膜扫描的头戴显示器研究现状[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 871-878.
- [5] Lü Xiangbo, Wang Zhen, Wei Zhangfan, *et al.* Lightweight design of a helmet-mounted display optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022007.
吕向博, 王振, 魏张帆, 等. 轻量化头戴显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022007.
- [6] Gao Yuan, Liu Yue, Cheng Dewen, *et al.* A review on development of head mounted display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 896-904.
高源, 刘越, 程德文, 等. 头盔显示器发展综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 896-904.
- [7] Lin J G, Cheng D W, Yao C, *et al.* Retinal projection head-mounted display[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2017, 10(1): 1-8.
- [8] Kramida G. Resolving the vergence-accommodation conflict in head-mounted displays[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2016, 22(7): 1912-1931.
- [9] Webb R H, Hughes G W, Pomerantzeff O. Flying spot TV ophthalmoscope[J]. Applied Optics, 1980, 19(17): 2991-2997.
- [10] Yoshinaka K. Display device: 61198892[P]. 1986-09-03.
- [11] Kollin J. A retinal display for virtual-environment applications[C]. Society for Information Display, 1993 International Symposium, 1993: 827.
- [12] Kollin J S, Tidwell M R. Optical engineering challenges of the virtual retinal display[C]. SPIE, 1995, 2537: 48-60.
- [13] Sugawara M, Suzuki M, Miyachi N. Late-news paper: retinal imaging laser eyewear with focus-free and augmented reality[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2016, 47(1): 164-167.
- [14] Evans A T. Imaging a curved mirror and partially transparent plate: WO/2015/103640[P]. 2015-07-09.
- [15] vonWaldkirch M. Effect of light coherence on depth of focus in head-mounted retinal projection displays[J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1552-1560.
- [16] Yang Minna, Guo Zhongda, Yang Zhiqiang. Helmet-mounted displays based on retinal projection display[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(2): 370-373.
杨敏娜, 郭忠达, 阳志强. 基于视网膜投影显示的头盔显示器设计[J]. 应用光学, 2012, 33(2): 370-373.
- [17] Ma J. Advanced MEMS-based technologies and displays[J]. Displays, 2015, 37: 2-10.
- [18] Sliney D H. Laser and LED eye hazards: safety standards[J]. Optics & Photonics News, 1997, 8(9): 31.