

引用格式: WEI Zichao, LOU Yimin, HU Juanmei, et al. Partition and Time Division Multiplexing Retinal Projection Display Based on Human Visual Characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0511001

韦子超,楼益民,胡娟梅,等.基于人眼特性的分区时分复用3D视网膜投影显示[J].光子学报,2022,51(5):0511001

基于人眼特性的分区时分复用3D视网膜 投影显示

韦子超,楼益民,胡娟梅,吴锋民

(浙江理工大学 物理系 浙江省光场调控技术重点实验室,杭州 310018)

摘 要:为克服传统视网膜投影显示技术存在的出瞳小、无法获得单眼调焦深度信息的局限,提出了一种基于麦克斯韦视图的分区时分复用3D视网膜投影显示技术。根据人眼视觉特性将虚拟场景分为边缘背景区域和中心注视区域;对中心注视区域采用时分复用的3D视网膜投影显示技术,实现了具有单眼调焦深度信息的真3D显示,同时增大了出瞳面积。对边缘背景区域采用短焦目镜和液晶显示器件实现了大视角显示。利用半透半反镜实现了边缘和中心区域的图像融合。构建了一套基于LED阵列、数字微镜器件、液晶显示器等光电器件的实验显示系统,实现了大出瞳、宽视角的真3D视网膜投影显示,验证了技术方案的可行性。

关键词:视网膜投影;3D显示;麦克斯韦视图;时分复用

中图分类号:O436

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225105.0511001

0 引言

为解决近眼显示产品存在的3D实体感不强、晕眩、易视觉疲劳等问题,研发人员开始探索将全息^[1]、光场显示^[2]和视网膜投影显示^[3]等技术应用于近眼显示,用以改善视觉效果、提升使用舒适度。其中视网膜投影显示技术因其具有方案简单、结构紧凑、易于集成等优点而备受瞩目。

视网膜投影显示技术基于麦克斯韦视图原理^[4],通过直接在人眼视网膜上投影清晰的图像来避免调焦模糊。可以有效缓解辐辏调焦矛盾(Vergence Accommodation Conflict, VAC)问题^[5]。传统视网膜投影显示系统的出瞳直径仅为一个像点的大小,系统可获得极大的景深^[6],但存在着出瞳面积小、无法提供准确的深度信息、计算量较大等问题。

针对以上问题,YUUKI A等设计了一种结合蝇眼透镜和小孔阵列的显示方案^[7],将实验系统的出瞳面积提高到 $24\text{ mm}\times 24\text{ mm}$,但是光效和分辨率较低。之后KIM S B等用全息光学元件(Holographic Optical Elements, HOE)将显示系统的出瞳面积扩大至 $9\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ ^[8]。HEDILIM K等利用光源阵列和低延迟动态瞳孔跟踪装置将出瞳面积扩大到 $14\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ^[9]。CHAN C等构建了一种无透镜的多视点显示系统^[10],出瞳面积为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$,但是系统计算量较大。SHI X等提出了一种虚拟视点倍增技术^[11],利用HOE和偏振光栅产生了 12 mm 的水平出瞳区域。TAKAHASHI H等利用HOE和视差图为观察者提供了单眼调焦深度信息^[12],但是无法提供平滑的运动视差和正确的调焦刺激。随后JANG C等提出了一种瞳孔跟踪光场显示系统^[13],但是存在图像丢失的问题。UENO T等设计了一种全视差近眼显示系统^[14],可在人眼调节范围内提供单眼调焦深度信息,但是只能单色显示。2020年,他们又提出了一种近似密集视点的显示方法^[15],改善了系统的景深和分辨率。NVIDIA设计了一种实用的中央凹渲染系统^[16],降低了渲染成本和

基金项目:浙江省自然科学基金(Nos. LTY22F020002,LY19F050018),浙江理工大学科研启动项目(No.17062061-Y)

第一作者:韦子超(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为三维显示。Email:Wz.chao@foxmail.com

导师(通讯作者):楼益民(1983—),男,副教授,博士,主要研究方向为增强现实、三维显示、全息技术等。Email:davislou@163.com

吴锋民(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为光电技术、固态光电器件与应用等。Email:wfm@zstu.edu.cn

收稿日期:2021-12-02;录用日期:2022-01-20

<http://www.photon.ac.cn>

计算时间,但无法实现3D显示。JU Y J等结合计算全息和麦克斯韦视图技术提出了一种分区域显示的方案^[17],在减少了数据量的同时消除了VAC,但是显示效果受到全息技术的限制。HUA J等提出了一种变信息密度裸眼3D显示技术,利用人眼的中央凹特性降低了信息冗余^[18],但是尚未能用于近眼显示。

在上述工作的基础上,本文提出了一种基于分区时分复用的3D视网膜投影显示技术,利用人眼特性将虚拟场景分为边缘背景区域和中心注视区域,对中心注视区域采用时分复用的密集视网膜投影显示技术,实现具有单眼调焦响应的真3D显示,同时增大出瞳面积。对边缘背景区域则采用短焦目镜和液晶显示屏实现大视角显示。最后,利用半透半反镜实现边缘和中心区域的图像融合,实现了宽视角的双目彩色真三维视网膜投影显示。

1 分区时分复用的3D视网膜投影显示原理

1.1 密集视点视网膜投影系统的单眼调焦深度信息重建原理

为观察者构造密集视点是实现3D显示的重要技术方案。密集视点视网膜投影显示系统通过空间、角度或者时间复用技术在系统的出瞳处形成多个视点,在扩大系统出瞳的同时为每个视点输入正确的视差图像信息^[19],当视点间隔小于人眼瞳孔直径时,观察者即可获得单眼调焦深度信息,从而实现3D视网膜投影显示。密集视点的3D视网膜投影系统的成像过程示意图如图1所示。假设系统在眼睛瞳孔平面处形成三个视点,分别与三个视差图像相对应,远处的3D像点 F 由视差图像上的 F_1 、 F_2 、 F_3 三个像素合成,近处的3D像点 N 由对应图像上的 N_1 、 N_2 、 N_3 三个像素合成。如图1(a),当单眼调焦深度 A 位于点 F 所在深度平面 Z_F 时, F_1 、 F_2 、 F_3 三个像素对应的光线将汇聚在视网膜平面上形成一个清晰的像点。而像素 N_1 、 N_2 和 N_3 对应的光线在视网膜后方重合,所以近处的像点 N 会在视网膜上形成一个模糊的图像。同理, A 位于点 N 所在深度平面 Z_N 时,如图1(b)所示,像素 N_1 、 N_2 和 N_3 对应的光线在视网膜上形成一个聚焦的像点,而远处的物点 F 在视网膜前聚焦,在视网膜上形成一个模糊的图像。所以,密集视点的3D视网膜投影显示技术可为观察者提供单眼调焦深度信息。

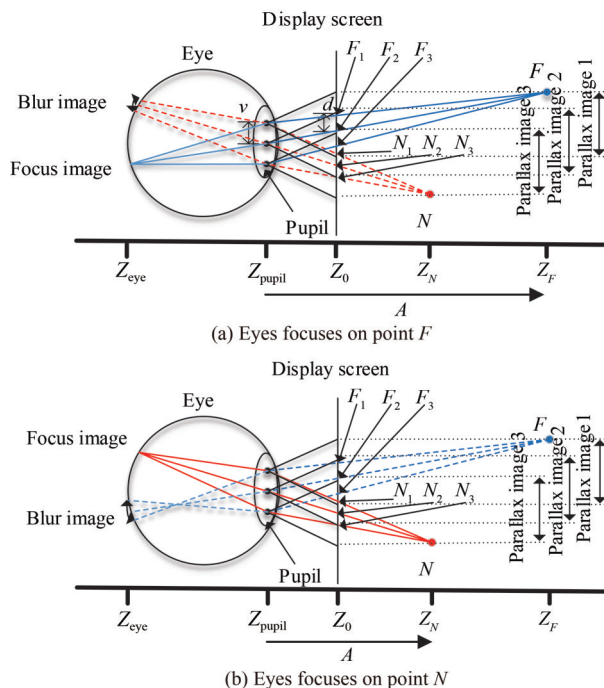


图1 密集视点视网膜投影系统的成像过程

Fig. 1 The imaging processes of the retinal projection system with dense viewpoints

如图1(a)所示,将显示屏所在平面 Z_0 作为参考平面。在密集视点3D视网膜投影系统的成像模型中,同一物点发出的不同方向的光线将分别依次穿过显示平面上不同的像素点和瞳孔平面上不同的视点,这些不同方向的光线被眼睛聚焦后形成像点。对像点 F 或者 N 点来说,其成像位置由相似三角形可推出,即

$$Z = Z_0 + \frac{d}{v} (Z - Z_{pupil}) \quad (1)$$

式中, d 为视差图像上同一物点对应像素的间距, v 为视点间距, Z 为像点深度, Z_{pupil} 为瞳孔平面深度。对于给定的系统, 参数 Z_{pupil} 、 v 、 Z_0 一定, 所以像点深度 Z 是关于 d 的函数, 即可以通过调制参数 d 重建不同深度位置的图像。

1.2 分区时分复用的3D视网膜投影显示系统

人眼在观察景物时, 光信号从眼睛传入大脑神经形成视觉形象, 需经过一段短暂的时间。同样, 光的作用结束后, 视觉形象并不立即消失, 也需经过一段时间后才消失, 这一现象被称为“视觉暂留”。时分复用技术利用人眼的视觉暂留特性, 采用大于人眼时间分辨率的频率对图像组进行高频显示, 可以让人眼感受到多幅图像信息叠加的效果, 所以可利用视觉暂留形成3D效果。人眼的单眼视角可达 150° 以上, 但是只有投射到中央凹区域的图像才能够被精确分辨, 而外围区域的图像分辨率明显降低。人眼的这种特性在实现高分辨率聚焦的同时有利于压缩冗余的周边数据。通常情况下中央凹区域的视角约为 5° , 中央凹区域外又分为有效视域和诱导视域。有效视域一般小于 30° , 超过 30° 则是诱导视域, 也称为余光区域。中央凹区域也是对深度信息最敏感的区域。根据上述特性, 提出了分区时分复用的3D视网膜投影显示系统, 在中心注视区域采用3D视网膜投影显示技术, 实现具有单眼调焦深度信息的真3D显示。对边缘背景区域采用短焦目镜和液晶显示器件实现大视角显示。

图2为所提出的分区时分复用的3D视网膜投影显示系统示意图。该系统由三个子系统构成, 分别为: ①采用3D视网膜投影技术的中心注视区域显示子系统(绿色虚线框区域)、②边缘背景区域显示子系统(红色虚线框区域)、③光源阵列子系统(蓝色虚线框区域)。光源阵列子系统由三色发光二极管(Light Emitting Diode, LED)阵列和准直透镜构成。LED阵列发出的光束通过准直透镜后形成平行光束, 进入中心注视区域显示子系统。

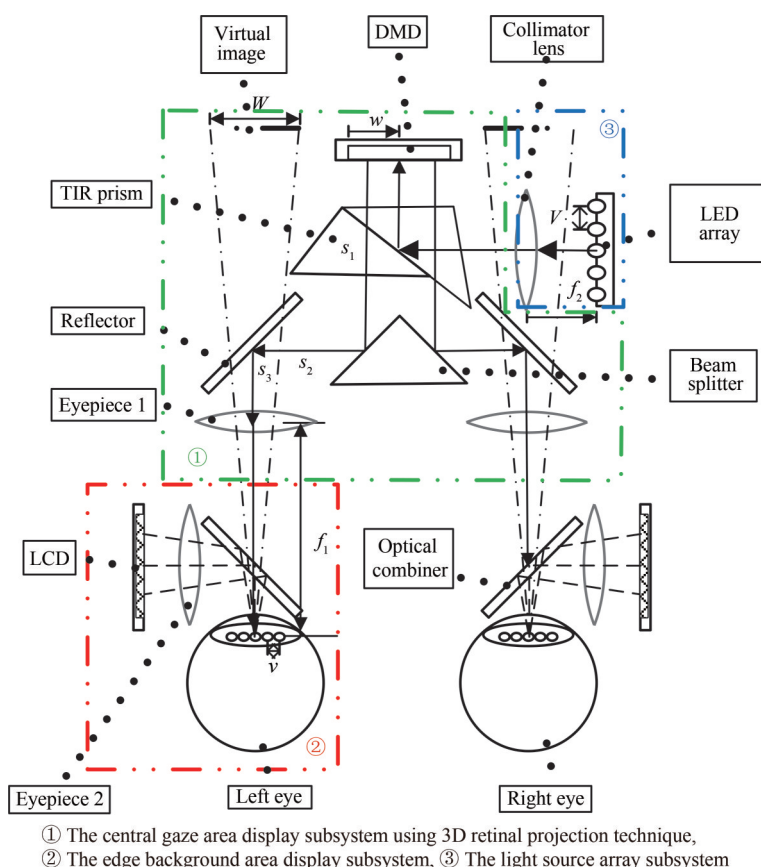


图2 实验系统成像光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the imaging light path of the experimental system

中心注视区域显示子系统包括:全内反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜、高刷新率数字微镜器件(Digital Micro mirror Device, DMD)显示器、分束器(Beam splitter)、反射镜(Reflector)、目镜(Eyepiece)。光源阵列(LED array)子系统发出的平行光通过TIR棱镜耦合后照明DMD显示屏,光线通过DMD反射后透过TIR棱镜,被分束器分为左右两部分,分别对应左右两个观察通道。左/右通道的光线通过反射镜和目镜1后在左/右眼瞳孔附近形成多个视点。DMD显示屏位于目镜1的一倍焦距以内,其显示区域分为左右两部分,分别通过左右通道的目镜1形成虚像。LED阵列、DMD与控制系统连接。控制系统按照时序控制DMD刷新显示,同时控制LED阵列中的点光源按照相同的时序依次同步照明。DMD刷新的图像为各个视角对应的视图,这些视图与点光源的照明角度对应的视角相匹配。形成利用时分复用技术投影的多视角图像。当系统控制时序的频率足够高时,利用人眼的视觉暂留效应即可在出瞳处形成密集视点的观察窗口,实现3D视网膜投影显示。

该子系统的DMD屏幕和目镜1之间的距离(物距) $s=s_1+s_2+s_3$ 。目镜1到DMD的虚拟图像的距离(像距)为 $s'=(1/f_1-1/s)^{-1}$ 。由于DMD需要同时显示左眼和右眼图像,左眼使用的半块DMD显示区域的宽度用 w 表示,虚拟图像尺寸为 $W=w f_1/(f_1-s)$ 。中心区域横向最大视场角 $FOV_1=2\arctan(w/f_1)$ 。LED阵列中LED的间隔为 V ,子系统产生的视点的间隔为 v ,其大小为 $v=V f_1/f_2$ 。DMD的帧速率为 F_{DMD} ,视点的数量为 n ,系统显示的3D图像的帧速率为 $F_{3D}=F_{DMD}/n$ 。

边缘背景显示子系统由液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)、目镜2和作为光学合成器(Optical combiner)的半透半反射镜构成。其中目镜2为短焦目镜,用于获得大的边缘视角。LCD位于目镜2的一倍焦距以内,目镜2的光轴和出瞳通过半透半反镜后与目镜1的光轴和出瞳重合。边缘背景显示区域的半径约等于目镜2的半径 r ,从而背景区域的视场角 $FOV_2=2\arctan(r/f_3)$ 。人眼可以通过重合的出瞳同时看到中心注视区域的3D图像和边缘背景区域的广角图像信息。这种分区域显示的方法可以在保证人眼视觉中心区域获得精确3D显示的同时,获得大视角的边缘信息,从而优化显示效果,降低计算负载。

2 实验验证

2.1 实验系统实物图

为验证技术方案的可行性搭建了分区域时分复用的3D视网膜投影显示系统。由于左右观察通道的对称性,图3以左眼观察通道为例展示了实验系统实物。系统的光源阵列由间距 $V=3.0$ mm的 4×4 的彩色LED阵列构成,每个LED由红绿蓝三个发光区组成,发光面积为 1.5 mm²。准直透镜的焦距为 $f_2=130$ mm。中心注视区域显示系统中,DMD的帧速率设定为 $F_{DMD}=4\ 800$ Hz,分辨率为 $1\ 920\times 1\ 080$,像素大小为 10.8 μm,屏幕尺寸为 20.7 mm \times 11.7 mm。目镜1的焦距为 $f_1=90$ mm。DMD与目镜1之间的物距为 79.6 mm,即 $s=s_1+s_2+s_3=79.6$ mm。DMD的虚像和目镜1的距离为 $s'=685$ mm。中心注视区域的横向视场角为 $FOV_1=7.41^\circ$ 。视点的间隔为 $v=2.0$ mm。出瞳面积为 7 mm \times 7 mm。由于系统分时复用产生16个视点的信息,且每个视点包含红绿蓝三色子图,所以当DMD帧频设置为 $4\ 800$ Hz时,中心注视区域3D图像的帧速率为 $F_{3D}=100$ Hz,在利用人眼时间暂留效应的同时,可以有效避免图像闪烁的问题。为确保照明和显示的严格同步,使用计算机软件对基于FPGA的DMD和基于单片机的LED阵列进行协调控制。边缘背景区域显示系统中,目镜2的焦距为 $f_3=63$ mm,透镜半径 $r=20$ mm。LCD的分辨率为 $2\ 560\times 1\ 440$,像素大小为 47.3 μm,屏幕尺寸为 68.0 mm \times 121.0 mm。边缘背景区域的视场角 $FOV_2=32^\circ$ 。半透半反射镜的厚度为 1.1 mm,其中一面镀增透膜,一面镀半透半反射膜,以最大限度减小重影。通过半透半反镜将目镜1和目镜2的光轴和出瞳精确重合形成系统出瞳,在系统出瞳处即可看到显示效果。

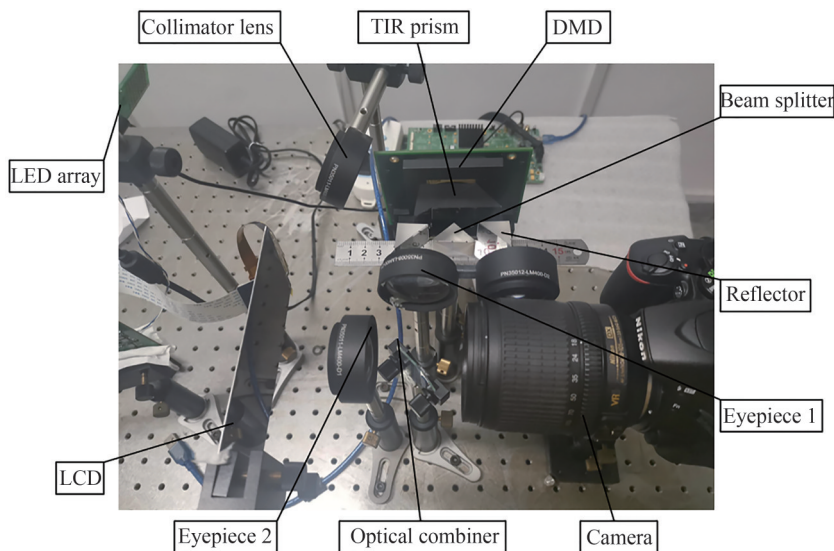


图3 实验系统实物图

Fig. 3 Photo of the experimental system

2.2 实验结果与分析

2.2.1 中心注视区域的3D显示效果

为验证中心注视区域的3D显示效果,首先使用3dsMax或Blender等商业软件建模获得两个位于不同深度的模型,其中红色汽车中心位于 $(-7, -5, 101)$ 坐标、紫色茶壶中心位于 $(21, 0, 131)$ 坐标。然后利用 4×4 个虚拟相机渲染16个不同视角的视差图像。相机矩阵的中心坐标为 $(0, -3, 0)$ 。该视差图像的视点方位和分布与显示系统的实际视点方位和分布一致。再将16个视差图像分色,二值化形成图像序列。上位机软件将图像序列输入DMD内存,并控制DMD按照时序显示图像序列,同时协调LED阵列进行同步照明。图4即是相机聚焦在不同深度位置时拍摄的成像效果。图4(a)显示当相机聚焦在近处的小车上时小车清晰,远处的茶壶因离焦而模糊。图4(b)显示当相机聚焦在远处的茶壶上时茶壶清晰,近处的小车因离焦而模糊。由此可以证明本系统实现了具有单眼调焦深度信息的真3D视网膜投影显示。

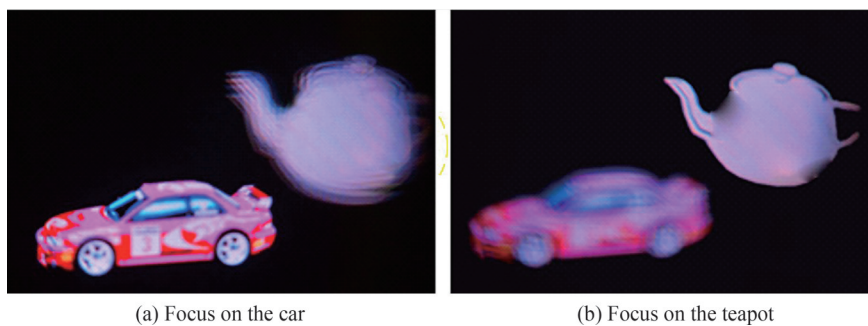


图4 中心注视区域不同深度模型的成像效果

Fig. 4 Imaging results of different depth models in central gaze area

为了实现精确的深度显示,设计实验对计算机中设定的深度值和实际显示深度位置进行了标定^[20]。首先将相机聚焦在虚拟图像上,然后挪动标定板使虚拟图像和标定板图像同时清晰,由此测量出虚拟图像的实际深度。实验效果如图5所示,图5(a)聚焦在字母NEAR处,其设定的虚拟深度为90 mm,距离相机镜头的实际深度为685 mm。图5(b)聚焦在字母FAR上,其设定的虚拟深度为215.5 mm,距离相机镜头的实际深度为2 000 mm。

图6为实际深度 Z_a 与虚拟深度 Z 的关系。通过数据分析拟合可得,实际深度和虚拟深度的关系为

$$Z_a = 685 + 10.5Z \quad (2)$$

由式(2)可知实际深度与虚拟深度符合线性关系,利用该函数关系可进行准确的深度重建。由于显示

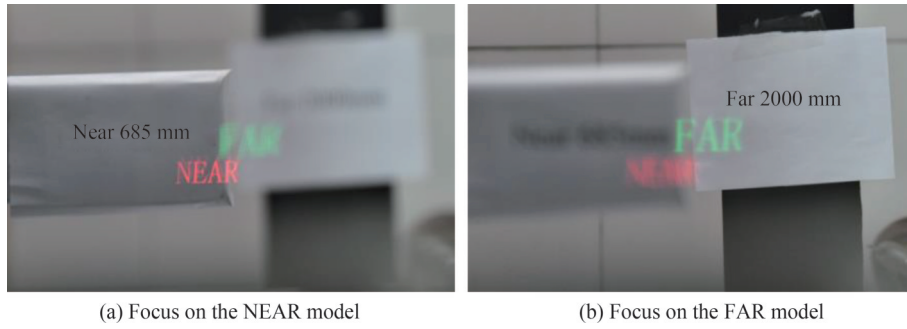


图5 深度标定显示效果
Fig. 5 Display effects of depth calibration

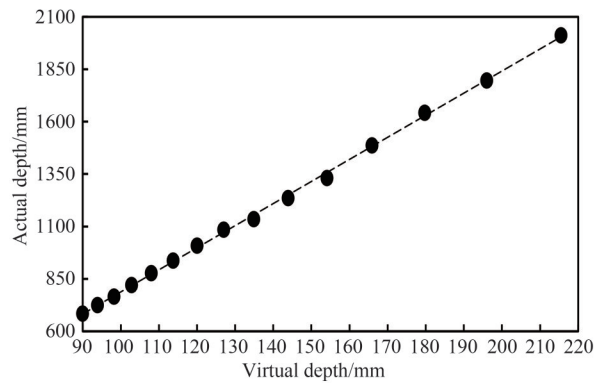


图6 虚拟深度和重建图像的实际深度之间的关系
Fig. 6 Relationship of virtual depth and actual depth of the reconstructed images

器的像素是离散的,视差图像上同一物点对应像素的间距变化并不连续,故而无法实现连续任意位置的深度重建。但是,随着显示技术的不断发展,像素尺寸会越来越小,会更利于模型的精确深度重建。

2.2.2 分区域显示效果

为验证分区显示效果,设计了如图7所示的场景:中心注视区域包括位于不同深度位置的四个立方体模型,其中模型a中心位于坐标 $(-7.4, 3.5, 0)$ 、模型b中心位于 $(6.7, 3.5, 10.5)$ 、模型c中心位于 $(-12.3, -12.3, 23.7)$ 、模型d中心位于 $(6.6, -14.7, 41.0)$ 。四个模型对应的参数 d 分别为0 mm, 0.209 mm, 0.416 mm, 0.625 mm。场景中相机矩阵的中心坐标为 $(0, 0, -90)$,焦平面位于示意图中 XOY 平面。

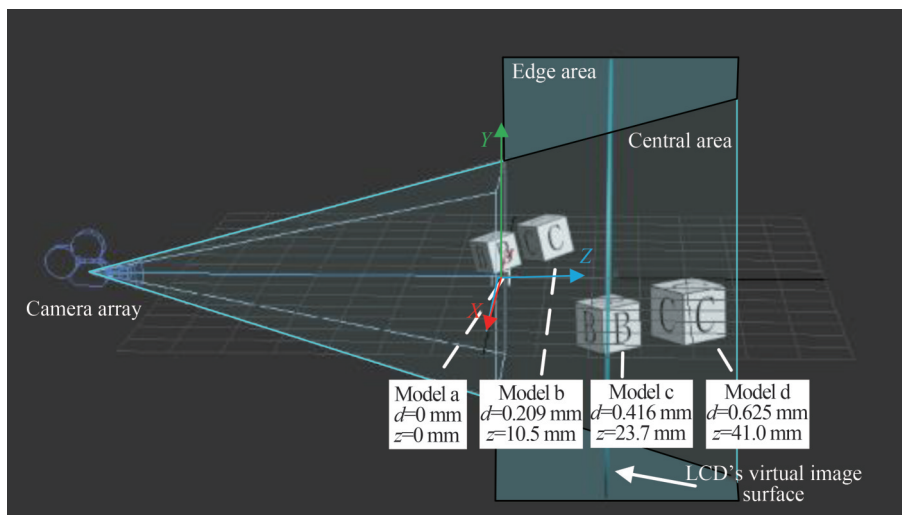


图7 用于显示的场景
Fig. 7 Scene to be displayed

中心注视区域采用与2.2.1节相同的方法进行显示。背景区域通过调节目镜2到LCD的距离为59 mm,将LCD的虚像设置在与模型c中心共面的平面 $Z_a=934$ mm处。

图8是分区显示时相机聚焦在不同深度位置时拍摄的成像效果。图8(a)显示当相机聚焦在模型a时,聚焦位置处的模型a清晰,其他位置模型和背景因离焦而模糊。图8(b)显示当相机聚焦在模型b上时模型b清晰,其他模型和背景因离焦而模糊。图8(c)显示当相机聚焦在模型c时,模型c和与其共面的背景区域同时清晰,其他模型因离焦而模糊。图8(d)显示当相机聚焦在模型d时,模型d清晰,其他模型和背景因离焦而模糊。

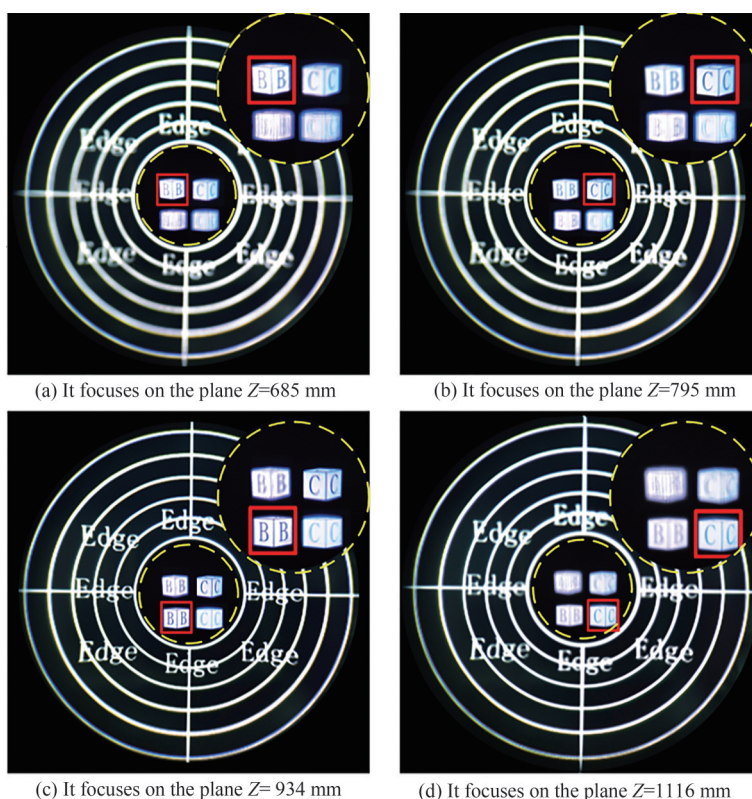


图8 分区显示时聚焦在不同深度的图像(聚焦的模型用红框标出)

Fig. 8 Images focused on different depths in partition display mode, and the focused model has been marked with a red frame

上述实验验证了分区域显示的成像效果,中心区域采用3D视网膜投影成像技术获得了具有单眼调焦暗示的真3D显示,聚焦离焦效果明显。边缘区域利用LCD和短焦目镜实现了宽视角的显示,而且中心和边缘的图像融合较好。由于目镜2边缘像差影响,系统的总视角约为 32° ,可覆盖人眼的有效视域。对于边缘区域显示系统其显示深度 Z_e 为

$$Z_e = \frac{s_4 f_3}{s_4 - f_3} \quad (3)$$

式中, f_3 为目镜2的焦距,通过控制短焦透镜到LCD的距离 s_4 ,灵活设置背景区域深度 Z_e 。

表1展示了视场角相等时,传统3D和分区3D视网膜投影显示所需的计算量。传统技术需要计算16个视角的图像的全部像素,总彩色像素数为 24.4×10^6 ,其中包括DMD显示区域的 15.8×10^6 和LCD显示区域的 8.6×10^6 。分区3D视网膜投影显示所需的计算量,只需渲染一个16个视角图像的中心区域和一个边缘区域,总共需要计算的彩色像素数目为 16.4×10^6 ,其中包括DMD显示区域的 15.8×10^6 和LCD显示区域的 0.6×10^6 。所以相比于传统3D渲染技术,本文方法的计算量减小了33%。在以后的研究中可以进一步使用图像压缩算法减小计算量^[21]。

传统二维中央凹显示技术只有一个准确的深度平面,无法实现不同深度物体的聚焦和离焦效果。如图9(a)所示,传统中央凹显示技术的整个视野中的图像都发生相同的离焦模糊,而本实验系统可以实现一

表1 分区域3D视网膜显示和传统3D视网膜显示数据量对比

Data	Partitive 3D retina display	Traditional 3D retina display
DMD area pixel data	15.8×10^6	15.8×10^6
LCD area pixel data	0.6×10^6	8.6×10^6
Total pixel data	16.4×10^6	24.4×10^6

个视野中不同深度的图像具有不同的离焦模糊,如图9(b)所示,不同位置模型的清晰度不同。所以,相较于传统技术,本文所提出的显示技术可以为眼提供有效的单眼聚焦深度暗示,从而有效缓解视觉疲劳。相较于全息中央凹显示技术,所提出的技术无需海量的复数运算和相干光照明,具有较好的成像质量,便于推广应用。

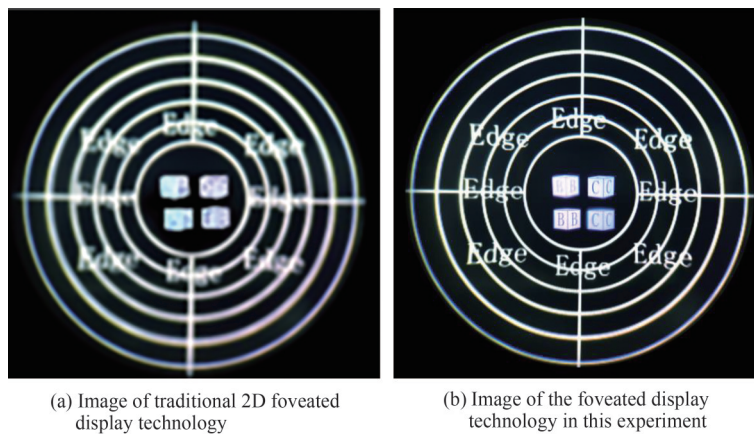


图9 传统二维中央凹技术显示的图像和本实验系统显示的图像效果对比示意图

Fig. 9 The comparison between the traditional two-dimensional foveated technology display effect and the proposed experimental system display effect

3 结论

本文基于人眼的视觉暂留效应和中央凹的视觉特性,利用分区时分复用技术实现了一种3D视网膜投影显示技术与系统。在中心注视区域,结合二维动态照明和高刷新率DMD等器件实现了具有单眼聚焦深度暗示信息的真3D显示,可以有效缓解视觉疲劳问题。在边缘背景区域,利用短焦目镜和高分辨率LCD实现了大视角的近眼显示。搭建了一套3D视网膜投影显示系统,系统出瞳面积为 $7\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 、总视场角约为 32° 、3D刷新率为 100 Hz ,单眼渲染分辨率为 16.4×10^6 。相对于传统多视角3D渲染技术计算量减小了33%。对系统深度的定标实验结果显示该实验系统可以提供正确的深度信息。同时中心区域的高分辨率图像和边缘的背景融合度较好。这种系统在提升近眼显示系统视觉体验的同时,减小了3D渲染所需的数据量,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] YANG Xin, JIAO Shuming, SONG Qiang, et al. Computer generated phase-only rainbow holographic near-eye display[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 2209001.
杨鑫, 焦述铭, 宋强, 等. 计算机制相位彩虹全息近眼显示[J]. 光学学报, 2021, 41(22): 2209001.
- [2] XING Shujun, CAO Liangcai, SANG Xinzhu, et al. Overview of virtual stereo content generation technology for super multi-view light field[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1509001.
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.
- [3] LIN Junguo, CONG Qiang, XU Chen, et al. Design of MEMS laser scanning retinal projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1222001.
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.
- [4] TAKAKI Y, FUJIMOTO N. Flexible retinal image formation by holographic Maxwellian-view display [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 22985-22999.
- [5] DAVID M. Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue [J]. Journal of Vision,

- 2008, 8(3): 33-33.
- [6] LIN J, CHENG D, CHENG Y, et al. Retinal projection head-mounted display[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2017, 10(1): 1-8.
- [7] 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.
- [8] KIM S, PARK J. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 767-770.
- [9] HEDILI M K, SONER B, ULUSOY E, et al. Light-efficient augmented reality display with steerable eyebox[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12572-12581.
- [10] CHANG C, CUI W, PARK J, et al. Computational holographic Maxwellian near-eye display with an expanded eyebox[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 18749.
- [11] SHI X, LIU J, ZHANG Z, et al. Extending eyebox with tunable viewpoints for see-through near-eye display[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11613-11626.
- [12] TAKAHASHI H, ITO Y, NAKATA S, et al. Retinal projection type super multi-view head-mounted display[C]. *SPIE*, 2014, 9012: 90120L.
- [13] JANG C, BANG K, MOON S, et al. Retinal 3D: augmented reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 190.
- [14] UENO T, TAKAKI Y. Super multi-view near-eye display to solve vergence-accommodation conflict [J]. *Optics Express*, 2018, 26(23): 30703-30715.
- [15] UENO T, TAKAKI Y. Approximated super multi-view head-mounted display to reduce visual fatigue [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 14134-14150.
- [16] PATNEY A, SALVI M, KIM J, et al. Towards foveated rendering for gaze-tracked virtual reality [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2016, 35(6): Article 179.
- [17] JU Y, PARK J. Foveated computer-generated hologram and its progressive update using triangular mesh scene model for near-eye displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 23725-23738.
- [18] HUA J, HUA E, ZHOU F, et al. Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 213.
- [19] 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.
- [20] AN Zhe, XU Xiping, YANG Jinhua, et al. Calibration method of optical transmission AR-HUD system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0412002.
安喆, 徐熙平, 杨进华, 等. 光学透射式 ARHUD 系统的标定方法研究[J]. *光子学报*, 2019, 48(4): 0412002.
- [21] JI Yuan, SONG Yuansheng, CHEN Yuansheng, et al. Bit-plane motion estimation for digitally driven near-eye display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(7): 0710001.
季渊, 宋远胜, 陈远生, 等. 面向数字驱动近眼显示的位平面运动估计算法[J]. *光子学报*, 2021, 50(7): 0710001.

Partition and Time Division Multiplexing Retinal Projection Display Based on Human Visual Characteristics

WEI Zichao, LOU Yimin, HU Juanmei, WU Fengmin

(Key Laboratory of Optical Field Manipulation of Zhejiang Province, Department of Physics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Recently, near-eye display technology has developed rapidly. Augmented reality, virtual reality, and other related products have begun to enter the field of mass consumption, bringing people a novel visual experience. However, while enjoying the visual feast, users have to endure traditional near-eye display technology defects, such as small angle of view, limited exit pupil area and resolution, easy to cause dizziness, and visual fatigue. To solve the above problems, researchers began to explore the application of holographic display, light field display, and retinal projection display technology to improve the visual effect of near-eye display and enhance the comfort of use. Among them, retinal projection display technology has attracted much attention because of its advantages of a simple solution, compact structure and easy integration.

Retina projection display technology is based on the principle of Maxwellian view. The human eye's retina is used as a display screen, and a clear image is projected directly on it to avoid image blur caused by eye focusing. Using this method can effectively alleviate the problem of visual fatigue caused by the conflict of vergence and accommodation, but it has the disadvantages of small exit pupil diameter and inability to provide correct depth information. To overcome the above shortcomings, a partition and time-division multiplexing 3D retinal projection display technology using the principle of Maxwellian view is proposed.

According to the human visual characteristics, the virtual scene is divided into an edge background area and a central gaze area. Time-division multiplexing 3D retinal projection display technology is used for the central gaze area to display the image group on the DMD at high frequency. At the same time, the point light sources in the LED array are controlled to illuminate synchronously according to the same time sequence, and the image group refreshed by the DMD are views corresponding to each viewing angle. These views are matched with the viewing angles corresponding to the illumination angles of the point light sources to form multi-view images for time-division multiplexing projection. When the frequency of the time sequence is high enough, an observation window with dense viewpoints can be formed at the exit pupil by using the visual persistence effect of the human eye. The human eye can feel the effect of continuous superposition of multi-view images at the exit pupil position, realizing a true three-dimensional display with monocular focusing depth information, and increasing the exit pupil area. In the edge background area, a short-focus lens and a liquid crystal display device are used to obtain a larger edge viewing angle, and a half mirror is used as an optical combiner to fuse the image information of the central gaze area and the edge background area. It can be seen from the 3D effects of the central gaze area that the system realized a true 3D retinal projection display with monocular focusing depth information. Afterwards, to achieve an accurate depth display, we calibrated the actual depth position of the 3D images using the virtual depth value set in the computer. By calibration, the relationship between actual and virtual depths is obtained, so that more accurate depth images can be achieved. In further experiments, we verified the effect of the partition display: 3D retinal projection technology was used in the central gaze area to obtain a true three-dimensional display with monocular focusing and defocusing effects. The LCD and short focus eyepieces were used in the edge area to achieve a wide viewing angle display, and the center and edge images were well fused. The total viewing angle of the system is about 32° , which can cover the effective field of view of the human eye, including a viewing angle of about 7° in the foveated region. For edge areas, our system can also flexibly set the required depth of the background area by controlling the distance from the short focal lens to the LCD. This system can effectively alleviate the problem of visual fatigue. It also reduces the amount of data required for 3D rendering, while improving the visual experience of the near-eye display system, and also has good application prospects.

Key words: Retinal projection; 3D display; Maxwellian view; Time division multiplexing

OCIS Codes: 110.3010; 110.6880; 170.6920; 170.0110