

多焦平面三维投影光学系统设计

陈寰**, 乔杨*, 徐熙平, 陈贺, 周晶

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了解决传统立体显示器成像不满足人眼正常成像规律的问题,同时考虑到穿戴设备兼具质量小、体积小特点,在计算分析光学系统参数的基础上,结合数字微镜元件(DMD)和压电可变形反射镜(PDM),利用 Zemax 软件设计出了具有多焦平面投影功能的光学系统。该光学系统由 7 片透镜组成,总长为 200 mm,视场角为 40°,采用双远心光路结构。对光学系统的整体分析结果表明,改变 PDM 的曲率半径,可实现多焦平面的成像。人眼根据自身的调节作用,在特定位置处可观察到由各个焦面位置处(屈光度范围为 0~3 m⁻¹)的二维图像重叠所带来的整体三维效果。最后对系统的成像质量进行分析,结果表明该系统在极限分辨率为 37 lp/mm 时,各视场处的调制传递函数(MTF)均高于 0.4,性能良好,满足设计要求。

关键词 光学设计; 多焦面投影; 数字微镜元件; 双远心光路

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0922002

Optical Design of Three-Dimensional Projection on Multifocal Planes

Chen Huan**, Qiao Yang*, Xu Xiping, Chen He, Zhou Jing

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract It is a problem that the conventional stereoscopic display imaging does not satisfy with the regular imaging rules of human eyes. Besides, the miniaturization of wearable device needs to be considered. In order to solve these problems, Zemax is used to design a multifocal planes projection optical system combined with the digital micro-mirror device(DMD) and piezoelectric deformable mirrors(PDM), based on calculating analysis of optical system parameters. This optical system uses double-telecentric optical path which is composed of seven lenses with a total length of 200 mm and a field of view of 40°. According to the overall analysis, changing the curvature radius of PDM can realize the multifocal planes imaging. At a particular position, human eyes can observe the overall three-dimensional effect which is overlapped by two dimensional images at the location of each focal plane (range from 0 to 3 m⁻¹). Finally, the imaging quality of the system is analyzed. The result shows that the modulation transfer function (MTF) value of the system is higher than 0.4 at the limit resolution of 37 lp/mm in all field of view. The performance is well and it meets the design requirement.

Key words optical design; projection on multifocal planes; digital mico-mirror device; double-telecentric optical path

OCIS codes 220.4830; 110.6880; 230.3990

1 引 言

人在正常情况下观察三维场景时,能够感知各个物体的相对位置,整个场景清晰与模糊分明,这主要是通过人眼结构的相互协调作用和物体间的深度信息来体现的。传统的立体穿戴显示器所传达的三维感知是将不同的位置图像,或者是不同时间差图

像叠加显示于左右眼上,并成像于固定距离的液晶显示屏上。它尽管能创造一种二维显示器中没有的令人信服的深度感,但会与正常人眼观察的三维场景产生冲突。三维场景的像素点均来自于同一表面,即显示屏表面,人眼通过立体显示器观察场景时会有位于屏前屏后的深度立体感,但实际上人眼看到的所有场景均处于同一面上,整个画面都是清晰

收稿日期: 2018-03-19; 修回日期: 2018-04-19; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61605016)

* E-mail: qiaoyangmilier@hotmail.com; ** E-mail: chen_huan_kevin@163.com

的,此情况称作“假 3D”成像^[1-3]。“假 3D”成像不符合人眼正常成像规律,研究表明长期使用该类显示器会损害人眼的视觉系统^[1,4]。为此设计出能符合人眼正常观察的三维显示器具有重要意义。

针对此问题,目前国内外穿戴立体显示器一个主流的设计方向就是将图像快速投影到不同焦平面上,人眼根据图像位置自动调节以达到最佳观察效果,这和现实生活中人眼的感知是相同的。有学者已经开展多焦平面成像的相关研究,Suyama 等^[5]使用双频液晶变焦镜头做出了双焦平面的显示器;Akeley 等^[6]结合了 3 个二维显示器和分光镜做出了相邻焦平面间距为 0.67 m^{-1} 的三焦平面显示器;Schowengerdt 等^[7]提出了一种采用变形镜的双焦平面视网膜扫描显示器。这些成像结构存在的问题是焦平面数少,获得的图像叠加效果不清晰,能分辨的位置数量少。

本文在基于多焦平面成像技术的基础上,结合数字微镜元件(DMD)和压电可变形反射镜(PDM)的特点,设计了 DMD 投影多焦平面成像的光学系统。该光学系统最大的特点就是利用 PDM 实现连续的焦平面成像,解决焦平面数少的问题。DMD 的开闭功能可以将照明光路和成像光路分开,不仅便于设计装调,还能减少杂散光的干扰。研究结果表明调节 PDM 的曲率半径,该光学系统可实现屈光度在 $0 \sim 3 \text{ m}^{-1}$ 范围内的多焦平面显示,设计结果可很好地满足应用要求。

2 系统结构设计原理

多焦平面的成像光学系统主要分为两部分:投影成像系统和照明系统,如图 1 所示。该系统采用了 DMD 和 PDM,用于提供高速变化的图像和离焦。投影成像系统和照明系统共用偏振分光板(PBS),可实现 s 方向偏振光的全反射和 p 方向偏振光的全透射。

首先,偏振光源发出的圆偏振光经过照明系统后到达 DMD 上,为 DMD 提供照明。1/4 波片(QWP)能改变偏振光的偏振方向,光源变成 s 方向后通过照明镜头到达 PBS 发生全反射,再经过前端透镜到达 DMD 上。“开”状态下的 DMD 上各个微型反射镜成 12° 角,改变光路使其进入投影成像系统。其次,光经过投影系统后成像在中间像面上。从 DMD 反射进入投影系统的光经过 QWP 后变成 p 方向偏振光,完全透过 PBS 后,再经过远心透镜组会聚准直到达 PDM 上。之后,光反射回来,同理

偏振光返回时变成 s 方向,经 PBS 全反射后在另一垂直方向上形成中间像面。最后,光透过目镜在人眼视网膜上成像。投影系统是双远心光路,PDM 放置在远心透镜组的焦平面处,即出瞳位置。PDM 相当于整个系统的光阑,也就是说当改变 PDM 曲率的时,只会改变中间像面的位置而不会使中间像面的图像放大。

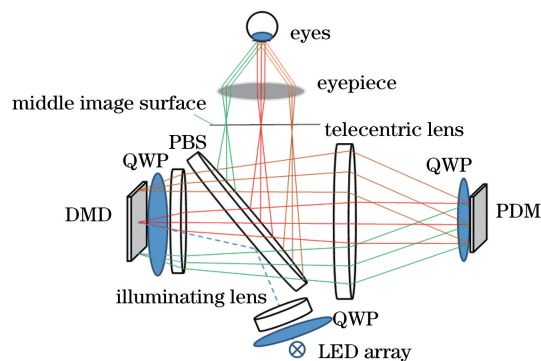


图 1 多焦平面成像光学系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-focal planes imaging optical system

3 光学结构设计

3.1 主要技术指标

光学系统的像面是人眼视网膜,瞳孔是眼睛的光阑,它的直径可以根据光的强弱而自动调节,从而控制进入眼睛的光通量。一般来说,瞳孔直径在 4 mm 左右时,人眼可以得到最佳像质^[8]。理论上,系统视场角(FOV)越大,对于人眼观察效果越好。实际上,视场角选择在 40° 左右时人眼就能很好地分辨图像。投影成像系统选用的 DMD 的最小像元尺寸为 $13.68 \mu\text{m}$,根据计算可以得到系统的极限分辨率为 37 lp/mm 。为了保证图像不失真,要求畸变值不超过 10% ^[9-10]。此外,照明系统要保证对 DMD 均匀照明,其相对照度必须大于 90% 。

根据要求选择合适的光学器件,其相关参数和设计的多焦平面投影成像光学系统技术指标如表 1 所示。

3.2 参数分析

将瞳孔作为系统光阑,要有 40° 视场角的平行光线进入人眼。根据该光学系统的原理,整个光路可以看成两部分组成:1) DMD 显示的信息先经过投影光学系统形成中间像面;2) 人眼由目镜观看中间像面。投影系统采用的是远心光路,也就是说目镜的焦距与人眼至目镜的距离(适眼距)基本一致,如图 2 所示。

表 1 多焦平面成像光学设计指标
Table 1 Specifications of multi-focal planes imaging optical design

Parameter	Value
Specification of DMD / (°)	0.7 (pixel size: 13.68 μm)
Size of DMD / (mm × mm)	13.9 × 10.5
Wavelength	Visible (470-650 nm)
Entrance pupil diameter / mm	5
Field of view / (°)	40
Defocus range / m ⁻¹	0 to 3
Aperture of PDM / mm	10

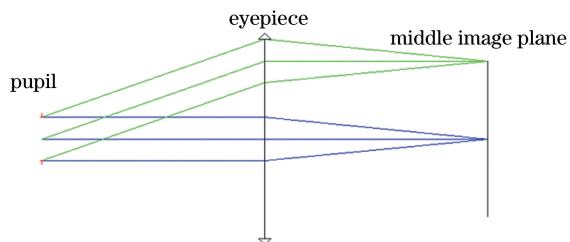


图 2 人眼观察中间像的成像关系

Fig. 2 Imaging relationship of middle image surface observed by human eyes

由图 2 可以看出,该可视空间的视场由目镜的焦距和中间像面的大小所决定,则

$$\tan \omega = \frac{y_m}{f_e}, \quad (1)$$

式中: y_m 为中间像面半高度; ω 为半视角; f_e 为目镜的焦距。

由于光在光学系统中的远心透镜组往返经过了两次, PDM 的位置又位于远心透镜组的焦点处, 因此远心透镜组并不会对中间像面的大小产生任何影响, 中间像面的大小只与 DMD 前端透镜的焦距和摆放的位置有关。记中间像面放大倍数为 k , 则

$$k = \frac{y_m}{y_d} = \frac{f_s}{f_s - d_s}, \quad (2)$$

式中: y_d 为 DMD 尺寸长度的一半; f_s 为 DMD 前端透镜的焦距; d_s 为透镜距离 DMD 的位置。考虑到投影光路和照明光路都会经过 DMD 前端透镜, 所以必须确保该透镜位置不能太远, 防止透镜直径太大。经过分析将 d_s 确定为 5~10 mm, 对于一般的目视系统, 适眼距保持在 15~20 mm^[11]。由 (1) 式和 (2) 式可推出

$$f_s = \frac{f_e \tan \omega}{f_e \tan \omega - y_d} \cdot d_s. \quad (3)$$

因此, 通过设置恰当的 d_s 和 f_e 值可决定 DMD 前端透镜焦距的大小。

将整个光路展开, 从中间像面到人眼视网膜成

像的光路, 如图 3 所示。PDM 的曲率变化范围是 0~1 m⁻¹, 但是实现人眼的深度感知范围需要达到 0~3 m⁻¹。从图 3 可以看出, PDM 曲率变化范围 D 由远心透镜组的焦距所决定, 而人眼的感知范围 ΔD 由目镜的焦距所决定, 两者正好满足横向放大关系, 因此可得到以下结果:

$$\alpha = \frac{\Delta D}{D} = \left(\frac{f_t}{f_e}\right)^2, \quad (4)$$

式中: f_t 为远心透镜组的焦距, 则 $\frac{f_t}{f_e} = 1.732$, 为定值, 这在后续的光学设计中必须保持不变。特殊的光学结构也正好确定了瞳孔的大小:

$$\frac{D_d}{D_e} = \frac{f_t}{f_e}. \quad (5)$$

由 $D_d = 10$ mm 可知, $D_e = 5.88$ mm, 也符合前面分析的瞳孔大小能达到最佳像质的条件。

以上这些参数对每个组件的焦距和位置的确定是非常有用的, 对于整个光学系统的设计起到至关重要的作用。

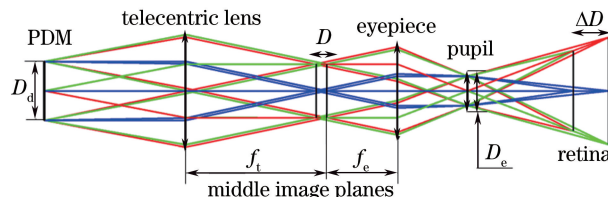


图 3 人眼深度感知范围示意图

Fig. 3 Diagram of human eyes' depth perception range

3.3 系统设计

该多焦平面投影成像是穿戴式的, 所以结构不能太长。整个系统由照明镜头、DMD、DMD 前端透镜、PBS、远心透镜组、PDM 和目镜组成。由于 DMD 的存在只是改变光路的方向, 不影响像质, 因此投影系统和照明系统可以分开设计。另外, 经过投影系统后的中间像面大小并不会随着 PDM 曲率半径大小的改变而改变, 因此又可以根据中间像面的大小单独设计目镜结构。

3.3.1 目镜设计

目镜的选择多样化, 主要考虑能与投影成像系统的中间像面对接, 还要满足 40° 视场角的成像要求, 综合考虑, 选择对称式目镜为该光学系统的目镜。为了尽可能让目镜平衡像差, 人眼能观察到清晰的中间像面的图像, 也为了便于后续远心透镜组的安放, 先用 Zemax 软件对目镜优化, 参数已在第 2 节给出。目镜优化的过程主要目的是尽可能消除球差、色差、畸变, 结果如图 4 所示, 其焦距为 36.647 mm, 前

后截距分别为 23.353 mm 和 27.407 mm,符合设计要求。

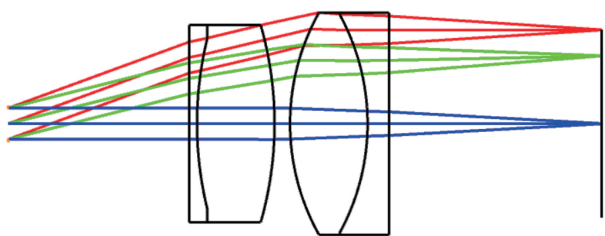


图 4 目镜优化结果

Fig. 4 Optimization result of eyepiece

3.3.2 投影成像系统设计

投影成像系统的光从 DMD 的像面到 PDM 反射后再到中间像面成像,是一个双远心光路。PDM 是一个反射镜,放置于远心透镜组焦距处,相当于系统的光阑。DMD 前端透镜将 DMD 放大,参数由第 2 节给出。远心透镜组的主要目的是将放大的 DMD 像会聚准直,这是根据 PDM 的孔径比 DMD 小,以及光路在 PDM 上反射返回不会改变远心透镜组孔径大小所决定的。在设计远心透镜组过程中,除了需要考虑其焦距与目镜焦距有固定的比例外,还要考虑补偿远心透镜组对目镜产生的场曲畸变等像差,综合考虑,远心透镜组需要 3~5 片透镜。采用对称式的双胶合透镜结构作为会聚光线,原因有二:1)可以矫正系统的垂轴色差;2)其出瞳距离大有利于缩小整个仪器的体积和质量。加入平凸透镜以对系统的光焦度进行调节以及对光线进行准直输出,采用单弯月形透镜校正系统场曲。在 DMD 的前面放置透镜组,用来放大图像,参数根据第 2 节所述确定。此外,第 2 节提出系统采用 PBS 和若干 QWP 保证光路传输,为了便于 PBS、QWP 的放置和 PDM 在不同曲率半径下中间像面的位置移动,PBS、QWP 两侧空间必须留出一定的余量。

设定好投影系统所有初始结构后,将 DMD 对角线长度、远心透镜组焦距和目镜焦距比值作为约束条件对系统进行优化设计。优化过程主要分为以下两步:第一步只对系统展开的中间像面成像进行优化,第二部加入分光镜再对整个系统总体进行优化。优化设计的结果如图 5 所示。图 5 显示的是 DMD 图像到中间像面的优化结果,此时偏振分光板前后两侧距离分别为 24.1 mm 和 24.9 mm,为中间像面位置调节和各组件的放置留下了足够的空间。

3.3.3 照明系统设计

设计照明光路主要是为 DMD 提供照明,增加

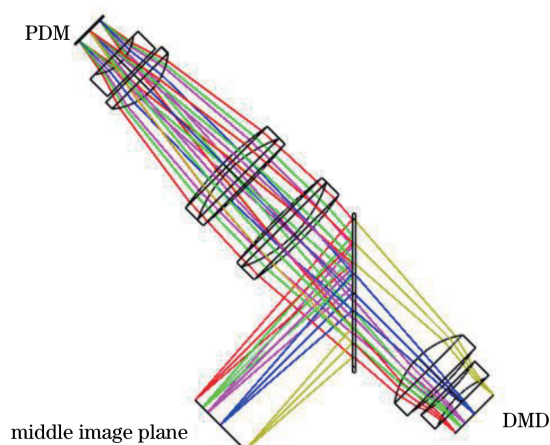


图 5 DMD 像到中间像面的光路优化结果

Fig. 5 Optimization result of light path from DMD's image to middle image surface

成像的亮度。由于 DMD 表面上的微镜组具有 0° 、 $\pm 12^\circ$ 的三种反射情况,可以考虑将照明系统和投影系统放置在不同轴方向上: DMD 微镜置于“开”状态 ($+12^\circ$) 时,照明光线被完全反射到投影系统中; DMD 微镜置于“闭”状态 (-12°) 时,照明光线被完全反射到投影系统外; DMD 微镜置于“0”状态时, DMD 处于掉电状态,不工作。DMD 的这种特性避免了投影系统杂散光的产生,有利于整体结构的搭建。设计时考虑到该照明光路会与投影系统中的 DMD 前端透镜和偏振分光板重叠使用,需要对之前设计好的两个元件尺寸进行适当的增加,以确保整个照明光通过系统时没有能量丢失,这就造成设计上的难度。同时,设计过程中还需考虑 DMD 入射角度所致的光学元件摆放问题,并应尽量节省空间。照明光路主要采用临界照明,最主要的目的是尽可能利用光源的光照强度为整个 DMD 芯片提供均匀的照明。临界照明有照明不均的缺点,但是当光源采用 LED 阵列时,可通过增加匀光片或透镜阵列将照明的不均匀性降到最低,使得照明不均的问题可以忽略不计。照明光路设计是针对 DMD 开状态下进行的,投影光路与照明光路的夹角成 12° ,属于离轴光学系统,需要摆放好照明镜头的位置,留出适当的余量以便于装调。设计结果如图 6 所示,照明系统和投影成像系统共用偏振分光板、DMD 前端透镜,两者的尺寸相对于前面的设计有所增大,但不会影响两路光学系统的成像质量。

3.4 设计结果

图 7 为投影成像系统的成像结果。由图 7(a) 可以看出,当 PDM 半径为无穷大(即屈光度为 0)

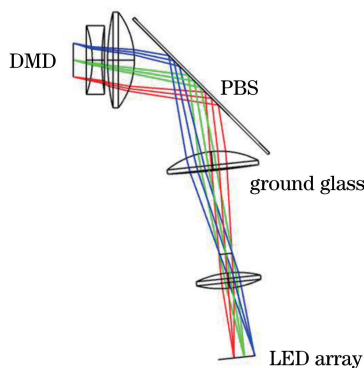


图 6 照明系统设计结果

Fig. 6 Design result of lighting system

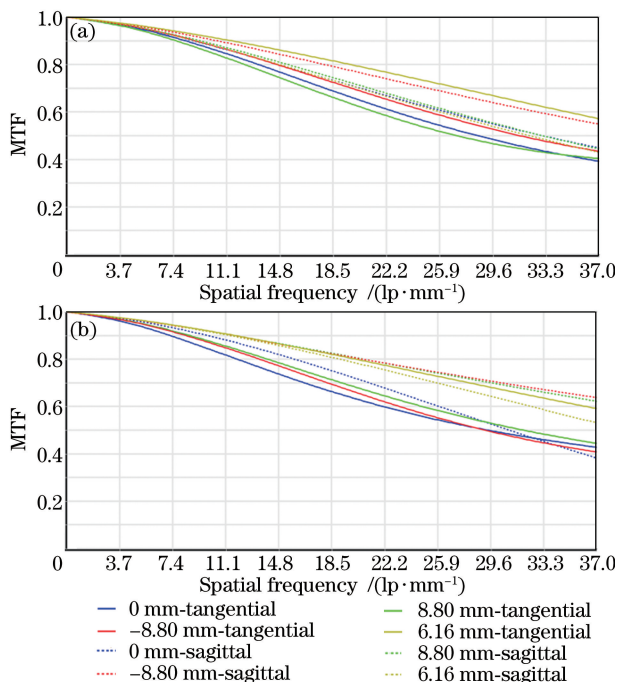


图 7 投影成像系统 MTF 曲线。(a) PDM 直径为无穷远；
(b) PDM 直径为 -1000 mm

Fig. 7 MTF curves of projection imaging system. (a) PDM's diameter is infinity; (b) PDM's diameter is -1000 mm
时,系统各个视场的调制传递函数(MTF)在分辨率为 37 lp/mm(极限分辨率)处的值都高于 0.4,同时具有良好的分辨率,且满足设计要求。将 PDM 的曲率从 0 依次变化到 1 m^{-1} ,对应的直径从无穷大变化至 -1000 mm,通过投影光学系统和目镜后,人眼可以实现屈光度为 $0 \sim 3 \text{ m}^{-1}$ 的深度感知范围,具体的变化由表 2 给出。在 PDM 曲率变化的过程中,MTF 值的变化范围在 0.1 以内,对成像质量几乎不造成影响,如图 7(b)所示。中间像面的位置变化为 9 mm,像面的尺寸变化为 0.6 mm,人眼观察两个图像的重叠效果时不会出现大小不一致的现象。

表 2 改变 PDM 曲率中间像面像质变化情况

Table 2 Changes of middle image quality by changing PDM's curvature

Parameter	PDM's curvature	
	0 m^{-1}	1 m^{-1}
37 lp/mm MTF range (all FOV)	0.443-0.548	0.382-0.638
Middle image size /mm	26.00	25.36

投影成像系统的点列图如图 8(a)所示,可以看出,成像半径的方均根值远小于常用的 DMD 像元尺寸,不同波长、不同视场的光线均可以得到良好的成像效果。该成像系统的场曲和畸变曲线如图 8(b)和(c)所示,场曲小于 0.5 mm,畸变小于 0.5%。在 PDM 曲率变化的过程中,中间像面上系统的场曲和畸变均无明显变化,多个焦平面图像的叠加,使人眼能直接感知图像的三维效果,不需要进行后期处理。

将投影系统和目镜衔接,再进行优化,结果如图 9 所示。优化后的结果显示,系统各个视场的 MTF 在分辨率为 37 lp/mm(极限分辨率)处的值都

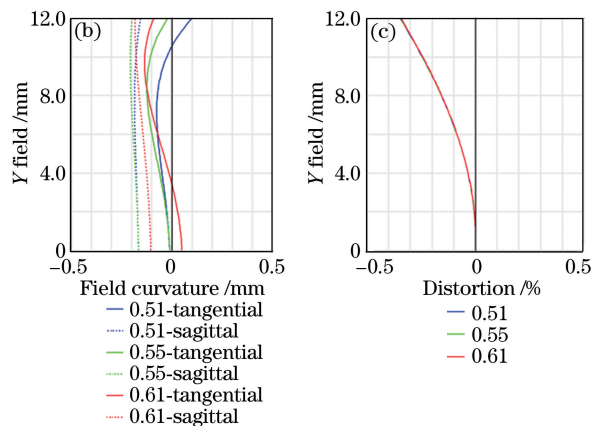
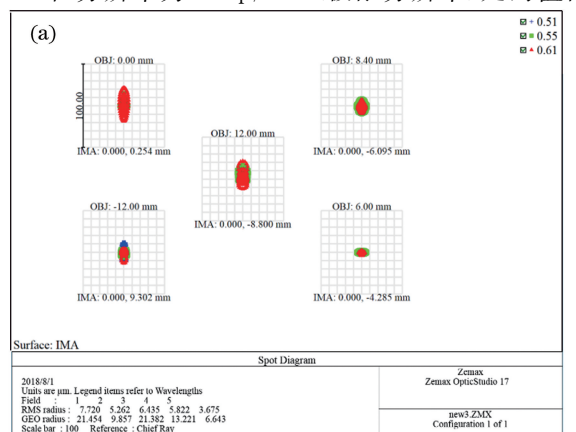


图 8 投影成像系统。(a)点列图;(b)场曲;(c)畸变
Fig. 8 projection imaging system. (a) Spot diagram;
(b) field curvature; (c) distortion

高于 0.3,有良好的分辨率,在 MTF 为 0.707 的视场以内,球差、色差优化效果良好。虽然视场的存在高阶球差,存在一定的畸变,但不影响人眼的观察效果,符合设计要求。

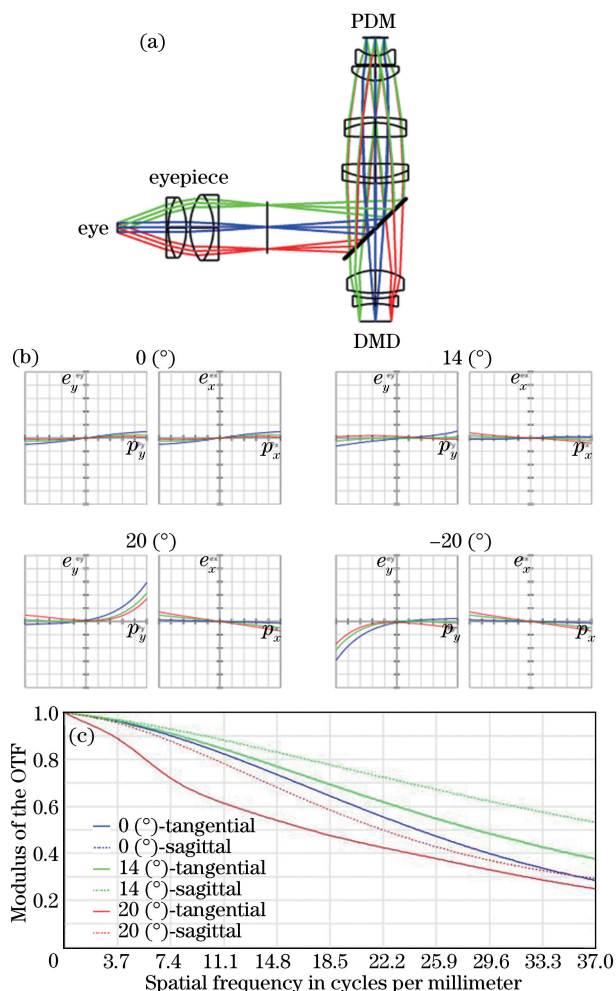


图 9 目镜衔接投影成像系统后成像质量。

(a) 优化结果; (b) 光程图; (c) MTF 曲线

Fig. 9 Image quality of eyepiece with projection imaging system.

(a) Optimized result; (b) ray aberration; (c) MTF curve

对于照明系统,需要考虑其照明的均匀性。该照明系统的相对照度如图 10 所示,在最大视场处的相对照度达到 0.97 以上,符合均匀照明的原则,可以对 DMD 实现均匀的照明。

目镜、投影系统、照明系统设计完成后,将三者进行整合,以获得最终的多焦平面成像结构,整合后的结果如图 11 所示。该结果表明,适当对各个连接处元件进行放大、缩小,细微调整位置间距等,既不会改变之前设计好的形状,也不会对之前的成像结果造成太大影响。该光学系统总长约为 200 mm,各个光学元件周围余量充分,位置合理,便于装调,满足穿戴虚拟现实设备要求。

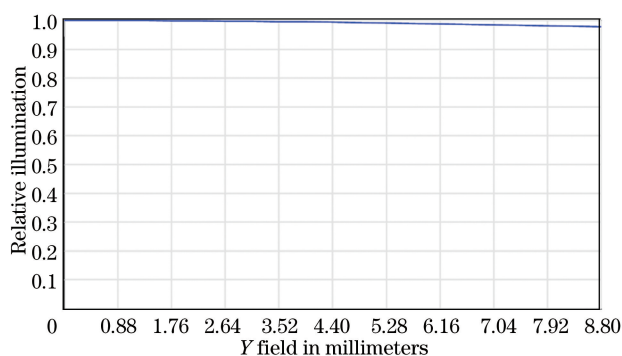


图 10 照明系统的相对照度

Fig. 10 Relative illumination of illuminating system

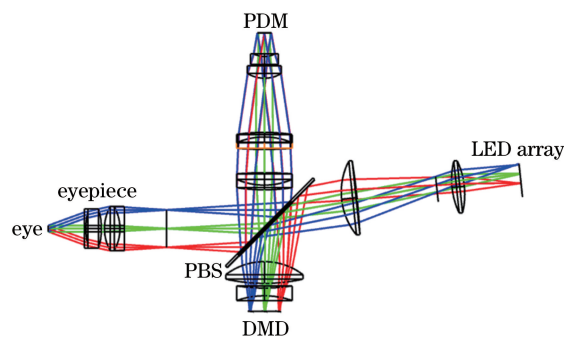


图 11 投影成像系统优化结果

Fig. 11 Optimization results of projection imaging system

4 结 论

设计了一种视场角为 40° ,可实现屈光度为 $0 \sim 3 \text{ m}^{-1}$ 多个焦平面成像的可穿戴式光学结构。该结构结合了 DMD 和 PDM 的特点,以及偏振分光板的特殊性,将投影成像系统和照明系统相结合,结构简单。该研究光学系统的结果表明:人眼可观察到不同焦平面的图像效果,经过适当的调节可感知三维成像效果。该光学系统符合人眼的正常使用环境。此外,通过改变目镜结构就可以应用于不同的三维成像环境,例如加入半反半透镜可实现增强现实,或者设计较大的目镜可实现双目成像等。对该系统的研究可促进三维成像领域的发展,对虚拟现实、增强现实技术的发展起到推进作用。

参 考 文 献

[1] Watt S J, Akeley K, Ernst M O, *et al.* Focus cues affect perceived depth[J]. *Journal of Vision*, 2005, 5 (10): 834-862.
 [2] Emoto M, Niida T, Okano F. Repeated vergence adaptation causes the decline of visual functions in watching stereoscopic television [J]. *Journal of Display Technology*, 2005, 1(2): 328-340.
 [3] Lambooj M, IJsselsteijn W, Fortuin M, *et al.*

- Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3): 030201.
- [4] 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): 1-30.
- [5] Suyama S, Date M, Takada H. Three-dimensional display system with dual-frequency liquid-crystal varifocal lens[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(2A): 480-484.
- [6] Akeley K, Watt S J, Girshick A R, *et al.* A stereo display prototype with multiple focal distances[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2004, 23(3): 804-813.
- [7] Schowengerdt B T. True 3-D scanned voxel displays using single or multiple light sources[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2012, 14(2): 135-143.
- [8] Barfield W. Wearable computers and augmented reality: musings and future directions [M] // *Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality*. Boca Raton: CRC Press, 2015: 3-12.
- [9] Yang J Q, Cheng D W, Wang Q F, *et al.* Design of a novel wide view-field angle and anti-stray-light fundus camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1122002.
杨加强, 程德文, 王庆丰, 等. 新型大视场消杂光眼底相机光学系统的设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1122002.
- [10] Wang X H, Xue Q S. Optical design of portable non-mydiatic fundus camera with large field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922001.
王晓恒, 薛庆生. 大视场手持式免散瞳眼底照相机光学设计 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922001.
- [11] Kamiya K, Kobashi H, Shimizu K, *et al.* Effect of pupil size on uncorrected visual acuity in astigmatic eyes [J]. *The British Journal of Ophthalmology*, 2012, 96(2): 267-270.