

大视场高分辨率光学拼接头盔显示器的设计

王士铭, 程德文, 黄一帆, 王涌天

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 视场角(FOV)和分辨率是头盔显示器(HMD)非常重要的两个参数。但是由于“视场角-分辨率不变量”的存在,限制了单一通道头盔显示器同时实现大视场角和高分辨率的能力,通过拼接的方法可以有效地打破这个限制。利用4个经过精密切割的球面透镜进行拼接,组成双目头盔显示器,每只眼睛各包括两个通道。目镜由两个通道组成,水平视场角为 111.4° ,竖直最大视场角为 90° 。在原型机中,用三个6 inch (15.24 cm)、分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的液晶显示屏作为图像源。单目角分辨率达到 3.85 arcmin 。通过3D打印的方式制作了头盔显示器原型机的外部结构。对于拼接系统中的关键问题,如出瞳直径和出瞳距离进行详细讨论。基于这些讨论,在LightTools中对人眼视网膜的光强分布进行仿真。另外,根据镜片设计的畸变数据获得了处理之后的畸变图像。对原型机进行图像显示实验,验证所提方法的可行性。

关键词 光学设计; 头盔显示器; 光学拼接; 虚拟现实

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.062201

Design of Wide FOV Optical-Tiled Head-Mounted Display with High-Resolution

Wang Shiming, Cheng Dewen, Huang Yifan, Wang Yongtian

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

Abstract Field of view (FOV) and resolution are very important parameters for head-mounted displays (HMD). However, so-called "resolution/field-of-view invariant" prevents single-channel HMD from achieving both high resolution and wide FOV. This limitation can be effectively broken by the tiled method. A binocular optical-tiled HMD with four spherical lenses that have been cut precisely is designed. Each eye includes two channels. For an eyepiece consisting of two channels, the horizontal FOV is 111.4° and the maximum vertical FOV is 90° . Three 6 inch (15.24 cm) liquid crystal displays with resolution of $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ are used in this prototype as image source. The monocular angle resolution reaches 3.85 arcmin . 3D printing is also used to make the external structure of the HMD prototype. Key issues in the tiled system, such as exit pupil and exit pupil distance, are analyzed in detail. Based on these discussions, the intensity distribution of the human eye retina is simulated in LightTools. In addition, according to the distorted data of the lens design, the distorted image after processing is obtained. The image display experiment is performed on the prototype, and the results verify the feasibility of the proposed method.

Key words optical design; head-mounted display; optical tiling; virtual reality

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 350.5730; 110.2960

1 引言

利用虚拟现实(VR)技术重现真实物体是目前

的研究热点之一。该技术主要设备包括:产生图像和视频的计算机、头盔显示器(HMD)、控制手柄等^[1]。作为重要的输出设备之一,头盔显示器能将

收稿日期: 2017-09-13; 收到修改稿日期: 2017-10-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1001502)

作者简介: 王士铭(1992—),男,硕士研究生,主要从事光学设计及视场拼接显示方面的研究。E-mail: wsm_bit@163.com

导师简介: 程德文(1982—),男,博士,教授,主要从事光学设计及自由曲面等方面的研究。

E-mail: cdwlxk@bit.com(通信联系人)

计算机产生的虚拟画面输出到人眼,在很多领域得到广泛应用,如游戏娱乐、军事模拟、飞行训练和教育培训等^[1]。大视场角、高分辨率以及良好的图像质量,是产生沉浸感、让人身临其境的重要因素。因此,同时实现大视场角、高分辨率,是VR头盔显示器的重要发展趋势之一^[2-3]。

随着计算机性能的提升,图像渲染的速度大幅度提高,难度也随之降低。但是,在保持高分辨率的同时提升视场角一直存在着很大的困难。这个限制称之为“视场角-分辨率不变量”^[4]。这是由于在传统的单通道头盔显示器目视光学系统中,人眼观察到的像素尺寸(以角度表示)同时取决于目镜焦距和显示器的像素尺寸,它们的关系为:显示器的像素尺寸是人眼观察到的像素尺寸的正切与焦距的乘积,而视场角与焦距相关。如果像素尺寸不变,视场角增大,焦距减小,人眼观察到的像素尺寸将会增大,图像质量下降;反之亦然。增大视场角的传统方法是缩短头盔显示器目镜的焦距,但是这种方法导致像素点也同时放大,降低了人眼所观察到的图像质量。即使采用更复杂的光学系统校正了像差,这个关系依然存在。“视场角-分辨率不变量”的存在严重制约了头盔显示器的发展以及使用者的体验。

为了解决这个问题,研究者提出的方法有:注视区域高清化^[5]、部分双目重叠^[6]、双目分视显示和拼接方法^[7-8]等。这些方法各有优点和缺点,具体如下^[9]:注视区域高清化通过定位人眼瞳孔的位置,在视场中心显示高分辨率图像,边缘则是低分辨率的图像,比较符合人眼视觉特点。这种方法可以同时实现高分辨率和大视场角,但是要引入眼动追踪系统导致系统复杂,而且由于使用激光产生图像,可能对人眼产生损害;部分双目重叠的原理简单,并且作为头盔显示器重量比较轻,但是这种方法对于目镜畸变的要求很严格,还会产生视觉疲劳;双目分视显

示无法实现立体效果。虽然这些方法都在一定程度上减小了“视场角-分辨率不变量”的影响,但缺点也十分突出。相比之下,利用拼接的方式能以较低的成本同时实现大视场角与高分辨率,且这种方法适用于很多光学元件,如非球面透镜^[10]、双胶合透镜^[11]、衍射光学元件^[12]等。虽然存在着光轴与人眼视轴不重合的问题,但这是一种非常可行的方式。这种方法在形式上有些类似复眼成像^[13],利用多个小视场、高分辨率目镜通道,对边缘进行切割后固定,共同组成超高分辨率的大视场图像,并且能够保证整个视场内分辨率的均匀性,能有效打破视场角和分辨率之间的制约关系,同时还可根据人眼的视觉特性^[14]实现三维显示。

因此,本文提出一种能同时实现大视场角、高分辨率的头盔显示器的设计方案,由4个经过精确切割的旋转对称球面透镜组成目镜,并对该系统进行研究和讨论。

2 原型机的规格说明

图1是头盔显示器的原理示意图,关于出瞳等问题将在下一部分展开。头盔显示器包括4个显示通道,因此每只眼睛各有两个显示通道:一个主显示通道和一个子显示通道。三个6 inch(15.24 cm)、分辨率为1920 pixel×1080 pixel的显示屏作为显示模块。透镜的口径和焦距分别为38,62 mm,视场角为90°(H)×90°(V)。左右眼的主通道共用中间的屏幕。由于屏幕实际尺寸略大于所需的尺寸,中间屏幕的一部分会被左右遮挡,所以中间的实际分辨率略小于1080 pixel,约为1787 pixel×1080 pixel。副通道屏幕所用的分辨率约为725 pixel×1080 pixel,因此整个显示模块的像素数量将超过3200 pixel×1080 pixel。

图2是一对经过切割的透镜。图中左侧

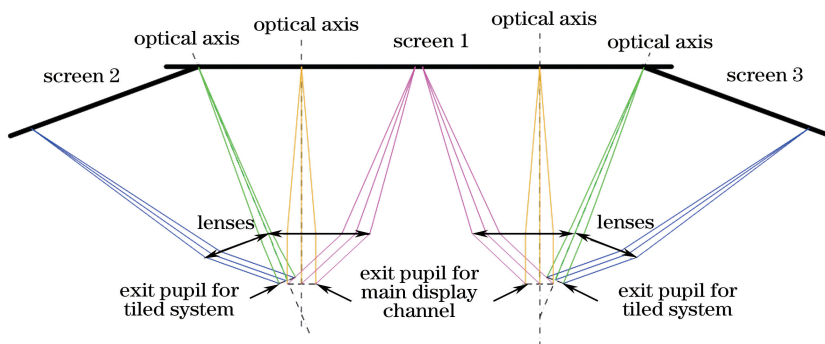


图1 拼接头盔显示的原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tiled HMD

的透镜是主通道透镜。切割截面与光轴的夹角为 21.4° ，因此主通道透镜的视场角变为 $66.4^\circ(\text{H}) \times 90^\circ(\text{V})$ 。副通道透镜切掉一半，视场角变为 $45^\circ(\text{H}) \times 90^\circ(\text{V})$ 。那么二者拼接之后单目水平视场角为 $111.4^\circ(\text{H})$ 。三个显示屏分别放置在透镜的后焦平面上，因此主通道和子通道显示屏之间的夹角也为 21.4° 。



图2 两种经过精密切割的透镜

Fig. 2 Two kinds of lens been cut precisely

原型机的外部结构用3D打印的方式制作。在设计结构和装配时，必须让透镜拼接的缝隙正对屏幕的转折处。考虑到3D打印的误差和人眼瞳距的不同，镜片的固定结构可以有一定的调节范围，以避免屏幕边框的影响。透镜和屏幕都是利用外部结构来固定的，可避免透镜胶合影响画面的实际效果。装配之后的原型机如图3所示。

3 拼接参数

由于原型机是左右对称的，因此以下只考虑单目情况。假设主通道的出瞳距离和出瞳直径(EPD)分别为 l_1 和 d_1 ，子通道分别为 l_2 和 d_2 。由于主通道和子通道的透镜参数相同，则：

$$\begin{cases} l_1 = l_2 \\ d_1 = d_2 \end{cases} \quad (1)$$

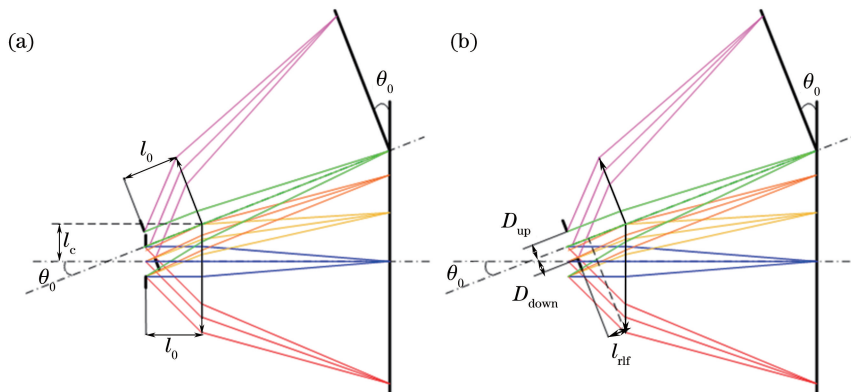


图4 单目出瞳直径示意图

Fig. 4 Diagram of exit pupil diameter for single eye

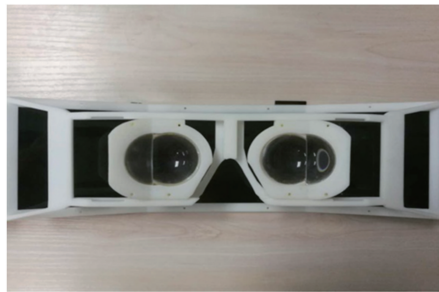


图3 装配后的原型机照片

Fig. 3 Photo of the prototype after assembly

为了便于表达和推导，这里统一用 l_0 和 d_0 表示。对于单个透镜，出瞳距离为 14 mm ，出瞳直径为 6 mm 。由于透镜的接缝在两个通道之间，这里的图像显示效果可能会受到影响，所以对于拼接后的出瞳直径和距离的确定是关键。

为了满足不同人的使用需求，头盔显示器的出瞳距离和出瞳直径都大一些。但是，由于镜片的边缘被切割，目镜的外部出瞳不再是限制光线的唯一光阑，所以部分边缘光线不再进入人眼。因此，对于单个目镜，拼接后有效出瞳直径和出瞳距离相对未切割的透镜都会减小。

3.1 有效出瞳直径

考虑到眼睛的旋转，拼接系统的出瞳可以设置在子显示通道的出瞳平面，这样可以同时观察到两个显示通道的连续图像。因此，拼接后出瞳的平面应该与接缝处的平面垂直。另一方面，为了减小接缝对人眼的影响，出瞳直径不能过大，以避免人眼观察到的图像出现间断。

如图4(a)所示，对拼接系统出瞳的上边缘(D_{up})和下边缘(D_{down})会有所不同。 D_{down} 垂直于子通道透镜的光轴，所以它取决于子通道镜片出瞳的大小。为了让尽量多的光通过，可以让 D_{down} 的大小

等于子通道的出瞳直径的一半,即:

$$D_{\text{down}} = d_0/2. \quad (2)$$

这样,来自子显示通道的光线就可以尽可能地通过而不被阻挡,此时人眼能够观察到子通道较大范围的图像。

出瞳的上边缘需要根据主显示通道确定。由于光轴的倾斜,子显示通道相对于水平位置的角度范围为 $\theta_0 \sim \theta_0 + \theta_{\text{max}/2}$, θ_{max} 是单个显示通道视场角, θ_0 是两个通道光轴的夹角。因此,出瞳上边缘 D_{up} 随视场角 φ 的变化关系可以表示为^[4]:

$$D_{\text{up}} = d_0 \cdot \cos(\theta_0 + \varphi) / (2\cos \varphi),$$

$$\theta_0 \leq \varphi \leq \theta_0 + \theta_{\text{max}/2}. \quad (3)$$

另一方面,在视场的中心位置以及重要位置(如接缝位置)不能有较大的渐晕,以避免对图像的影响,导致出瞳直径不能过大。为了满足这些条件,上边缘可以表示为:

$$D_{\text{up}} = d_0 \cdot \cos(2\theta_0) / (2\cos \theta_0). \quad (4)$$

所以,拼接系统的出瞳直径 D_{title} 为:

$$D_{\text{title}} = d_0 \cdot \cos(2\theta_0) / \cos \theta_0. \quad (5)$$

根据图 4,拼接系统的总视场可以表达为:

$$F_{\text{Ovt}} = F_{\text{Ov}} + \theta_0. \quad (6)$$

3.2 有效出瞳距离

根据几何关系,对拼接系统有效出瞳距离 l_{eff} 可以表示为:

$$l_{\text{eff}} = l_0 - (D/2 + l_c) \sin \theta_0, \quad (7)$$

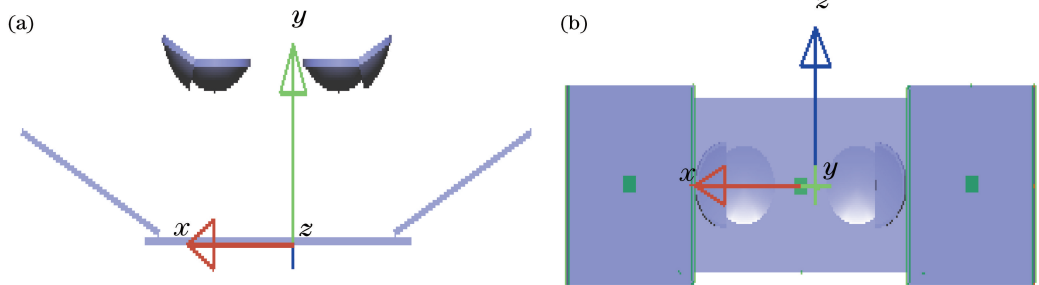


图 5 LightTools 中建立的双目模型。(a)俯视图;(b)正视图

Fig. 5 Binocular model built in LightTools. (a) Top view; (b) front view

图 6(a)是人眼注视主显示通道的情况。可以看出图中有两个光斑。较大的光斑代表主显示通道在视网膜上的强度分布。显然,在这种情况下,主显示通道的光斑更大、强度更高,占主要成分;而子通道也有一部分光被人眼接收。这说明当人眼观察主显示通道时,也能看到来自子通道的画面,而且从横坐标看出整体的水平视场角大于单个透镜。两个通道之间的强度很弱,意味着接缝可能导致图像出现断裂,但是这个宽度很小,在近眼显示中对于整体画

式中, D 是主显示通道单个镜片的孔径大小。如果单显示通道是一个光学系统,则 D 是该光学系统中第一片透镜的孔径。因为透镜被截掉一部分, l_c 要小于主通道透镜的半径。根据(7)式,可以看出拼接系统的有效出瞳距离 (l_{eff}) 小于单一通道的出瞳距离 l_0 。这表明,在拼接之后的出瞳距离将会大大减小。

3.3 杂散光问题

因为一个拼接目镜由几个显示通道组成,所以显示通道之间的光可能相互干扰,特别是靠近接缝处。另一方面,透镜表面的反射在一定程度上也会产生杂散光。这些杂散光产生鬼像,从而导致图像质量下降。对于镜片表面反射产生的杂散光,可以通过涂覆增透膜来消除。在实验过程中,没有在镜片表面涂覆薄膜。而接缝处的杂光较难避免,可能导致这里的画面模糊。

4 软件仿真和实验验证

4.1 LightTools 仿真

根据每个目镜的光轴倾斜角度,在 LightTools 中建立光学部分和外部结构的模型,如图 5 所示。外部结构和眼球模型在图中已隐藏。眼球模型设置在前面确定的出瞳位置,视网膜为接收器。这里以眼睛模型的两个角度用来表示人眼注视两个不同方向。仿真结果显示如图 6 所示。

面的影响不会太大。

人眼转动后的结果如图 6(b)所示。在这个位置上,镜片的接缝更靠近视野的中心位置。与两个通道的光强相比,接缝处的强度依然较小,但相对图 6(a)的反差大幅度下降。这意味着人眼旋转后,可以在接缝处获得明亮的连续图像。利用人眼的调节能力,接缝处的图像在可接受的范围内,不会产生明显的画面断裂,因此显示效果要好于图 6(a)。

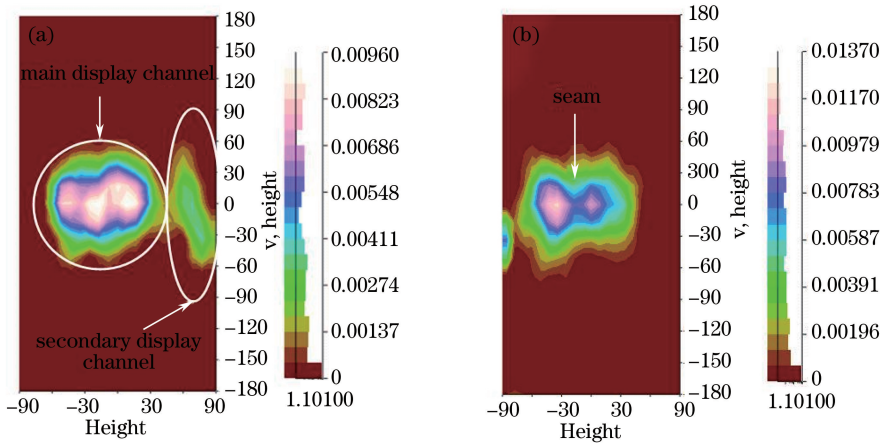


图6 单目仿真结果。(a)人眼观察主显示通道;(b)人眼转动后注视接缝

Fig. 6 Simulation results of single eye. (a) Human eye observing main display channel; (b) human eye observing seam after rotation

4.2 预畸变处理

由于单通道中光阑不与透镜重合,必然会出现畸变,且很难通过光学原理校正。因此可以利用预畸变使图像产生变形,经过透镜成像,正负畸变相互抵消最终图像的畸变。

由于透镜是自行设计的,因此可以根据光学设计软件计算畸变参数。对于旋转对称的透镜,假定显示装置上的图像中心是坐标系的原点,且装调无误差。设 $N = [x_n, y_n]^T$ 是每个像素在物空间的坐标,根据单个球面镜头畸变模型,像素的物空间坐标经过透镜成像后在像空间的坐标 $N' = [x_{n'}, y_{n'}]^T$ 可以表示为:

$$[x_{n'}, y_{n'}]^T = [1 - f(r)] \cdot [x_n, y_n]^T, \quad (8)$$

式中 $r = (x_n^2 + y_n^2)^{1/2}$, 是像素点 N 和原点之间的距离; $f(r)$ 是关于 r 的函数,代表每个像素所对应

的畸变率。因此,当每个像素点对应的畸变率已知时,根据(8)式,可以得到每个像素经过透镜成像后在像空间的坐标,从而获得畸变图像。由于畸变率的变化在全视场内是连续的,利用光学设计软件可以得到畸变数据,通过多项式插值计算畸变率曲线。 $f(r)$ 的插值结果为一个多项式,可以表示为:

$$f(r) = 0.0026r^5 - 0.0651r^4 + 0.0109r^3 + 0.3126r^2 - 0.0069r. \quad (9)$$

4.3 单目显示结果

图7是原型机的单目图像显示结果,其中主显示通道的图像可根据双目视差拍摄制作而成。经过人的大脑融合可以产生立体感,而子通道作为对场景的扩展。之后,可以根据上述方法对图像进行预畸变处理。相机放在之前确定的拼接头盔显示器出瞳位置用于获取图像。



图7 单目图像显示结果。(a)只有主通道画面;(b)包括接缝的主通道;(c)“人眼”正对接缝

Fig. 7 Displaying results of image for single eye. (a) Only the main display channel; (b) main display channel including seam; (c) "human eye" facing seam

当“眼睛”观察主显示通道,图像效果类似于传统的VR头盔显示器,如图7(a)所示。但是“眼睛”向外移动一定距离,所观察到的图像可能出现断裂。这是因为镜片有一定的厚度,所以切割后的截面有一定的宽度,导致一些光线可能无法通过这个截面。

这与先前的模拟结果是一致的。但是在头盔中,人的头部位置相对目镜一般不会有较大的移动,因此这个问题可以通过标定与图像处理解决,消除截面的影响。在“眼睛”旋转之后[图7(c)],可以观察到连续画面。接缝周围的亮度比显示画面的其他部分

低,而且出现画面模糊,这是由于两个通道相互影响导致的。但由于人眼的调节能力强于相机,实际中接缝对于画面的影响会进一步降低。因此,人眼观察到的画面会好于相机的拍摄效果。由于单透镜不能消除色差,可以用双胶合透镜拼接来解决。

5 结 论

提出一种用于 VR 的拼接式头盔显示器原型机设计。在这个原型机中,用到三个高分辨率液晶显示屏,并利用拼接的方式打破“视场角-分辨率不变量”的限制。对一些系统参数,如有效出瞳直径、视场角和有效出瞳距离进行了详细分析。单目的水平视场角达到 111.4° ,相对于单透镜的头盔显示器,能保持图像分辨率,且容易实现更大的视场角。在 LightTools 软件中对系统进行了仿真。最后,在系统中显示一个高分辨率的图像,验证在接缝处显示图像的连续性。实际结果与软件仿真结果基本一致。同时,提出了图像畸变方法。虽然存在待解决的问题,但是拼接方法仍然是一种新型、可行的、能实现大视场高分辨率头盔显示器的低成本方案。

参 考 文 献

- [1] Wang Y Q, Liu W Q, Meng X X, *et al.* Development of an immersive virtual reality head-mounted display with high performance[J]. Applied Optics, 2016, 55(25): 6969-6977.
- [2] Kress B, Starner T. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics [C]. SPIE, 2013, 8720: 87200A.
- [3] Veron H, Hezel P J, Southard D A. Head-mounted displays for virtual reality[C]. SPIE, 1994, 2218: 41-51.
- [4] Song W T, Cheng D W, Deng Z Y, *et al.* Design and assessment of a wide FOV and high-resolution optical tiled head-mounted display [J]. Applied Optics, 2015, 54(28): E15-E22.
- [5] Melzer J E. Overcoming the field-of-view/resolution invariant in head-mounted displays[C]. SPIE, 1998, 3362: 284-293.
- [6] Tyczka D R, Chatten M J, Chatten J B, *et al.* Development of a dichoptic foveal/peripheral head-mounted display with partial binocular overlap [C]. SPIE, 2011, 8041: 80410F.
- [7] Arthur K W. Effects of field of view on performance with head-mounted displays [D]. Chapel Hill: University of North Carolina at Chapel Hill, 2000.
- [8] Hoppe M, Melzer J. Optical tiling for wide field-of-view head-mounted displays[C]. SPIE, 1999, 3379: 146-153.
- [9] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-216.
- [10] Brown L G, Boger Y. S. Invited paper: Applications of the Sensics panoramic HMD[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2008, 39(1): 77-80.
- [11] Gutin M, Gutin O. Automated design and fabrication of ocular optics[C]. SPIE, 2008, 7060: 70600H.
- [12] Lu H P, Liu W Q, Kang Y S, *et al.* Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0522002.
卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0522002.
- [13] Xu M, Wang Y Q, Wang C T, *et al.* Research on dual-mode compound eye imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091102.
许盟, 王彦钦, 王长涛, 等. 双模式复眼成像系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091102.
- [14] Wang S L, Ming H, Wang A T, *et al.* Three-dimensional display based on human visual perception [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209007.
王书路, 明海, 王安廷, 等. 基于人眼视觉特性的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209007.