

基于拼接的大视场虚拟现实头戴显示装置

陆驰豪^{1,2}, 李海峰^{1,2*}, 高涛^{3,4}, 徐良^{1,2}, 李海丽^{1,2}

¹浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

²浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027;

³浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

⁴浙江大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027

摘要 虚拟现实技术是头戴显示技术的一个重要分支。为了提高虚拟现实头戴显示装置的视场角, 获得更高的沉浸感, 设计了一种基于视场拼接原理的大视场虚拟现实头戴显示装置。利用 4 套横向视场角为 80° , 且完全相同的目视光学系统, 通过拼接实现大视场虚拟现实头戴显示。本装置的双目横向视场角为 162° , 其中每个单目系统的横向视场角为 126° , 双目重叠视场角为 90° 。

关键词 几何光学; 头戴显示器; 显示; 畸变校正

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0612002

Virtual Reality Head-Mounted Display with Large Field of View Based on Stitching

Lu Chihao^{1,2}, Li Haifeng^{1,2*}, Gao Tao^{3,4}, Xu Liang^{1,2}, Li Haili^{1,2}

¹State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

²College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

³State Key Lab of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

⁴College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Virtual reality is an important head-mounted display (HMD) technology trend. A large field of view (FOV) virtual reality HMD device is designed based on the principle of FOV stitching for a wide FOV angle and a good sense of immersion. It is realized by stitching four sets of visual optical systems with a same horizontal FOV angle of 80° . This device achieves a binocular transverse FOV angle of 162° , where the transverse FOV angle of each monocular system is 126° and the overlapping FOV angle of the binocular system is 90° .

Key words geometric optics; heads-up displays; displays; distortion correction

OCIS codes 080.2740; 120.2820; 120.2040; 150.1488

1 引 言

随着计算机图形学与显示技术的快速发展, 虚拟现实技术在近几年逐渐流行起来。鉴于其技术特点, 它常被应用于沉浸式视频游戏、虚拟现实电影、视频会议、虚拟教学、外科手术训练等场合^[1]。沉浸感被认为是虚拟现实技术的关键, 也是评判虚拟现实技术优秀与否的重要指标。增大虚拟现实头戴显示(HMD)装置的视场角(FOV)可以显著增强虚拟现实技术的沉浸感, 因此也是虚拟现实领域重要的

研究方向^[2]。单透镜成像光学系统已被应用于 Oculus Rift 及其他市面上主流的虚拟现实设备。随着视场增大, 虚拟现实设备的成像质量下降明显, 因此这类设备的视场角无法做得很大^[3], 如 Oculus Rift 的横向视场为 110° , 且其调制传递函数(MTF)仅在较小的视场内较高。目前, 增大视场角的主流方法是优化设计虚拟现实头戴显示装置的光学系统^[3-4]以及光学系统的拼接。前者为了保证光学系统在大视场下的成像质量, 往往需要较为复杂的光学面型或较多的成像透镜, 从而在一定程度上影响

收稿日期: 2018-12-10; 修回日期: 2019-01-17; 录用日期: 2019-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1001502)

* E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn

了头戴显示器的自重及体积。而后者往往对多个子光学系统的组装及拼接处的成像效果提出了较高要求^[5]。本文的头戴显示装置基于光学系统的拼接方案,仅利用4套相同的双透镜成像光学子系统完成拼接,既降低了单个光学系统的复杂度,又能保证拼接的组装要求不至于太高,并最终实现了162°的横向视场和86°的纵向视场。

2 光学系统设计方案

2.1 光学系统的整体设计方案

将整个虚拟现实头戴显示装置的光学系统拆分为如图1所示的子系统,并为每个子系统分配其所需要达到的横向设计视场。

由图1可以看出,整个头戴显示装置由4套完

全相同的单目子光学系统 $S_1 \sim S_4$ 构成,因此只需要设计一套单目子光学系统,之后通过光学系统之间的拼接即可构成整个头戴显示光学系统。

对于头戴显示装置来说,系统总长、成像质量、镜片自重、出瞳距离都是需要着重考虑的因素。鉴于以上原因,本子光学系统采用菲涅耳透镜与非球面透镜相结合的设计方案。采用菲涅耳透镜的目的一是为了减小系统总长,二是为了便于后续子系统之间的拼接;选用非球面透镜则是为了在控制光学系统镜片数量的同时提高成像质量。显示器选择的是分辨率为1080 pixel(横向) \times 1200 pixel(纵向)、尺寸为50.11 mm \times 55.68 mm的AMOLED。

头戴显示装置的整体结构如图2所示。

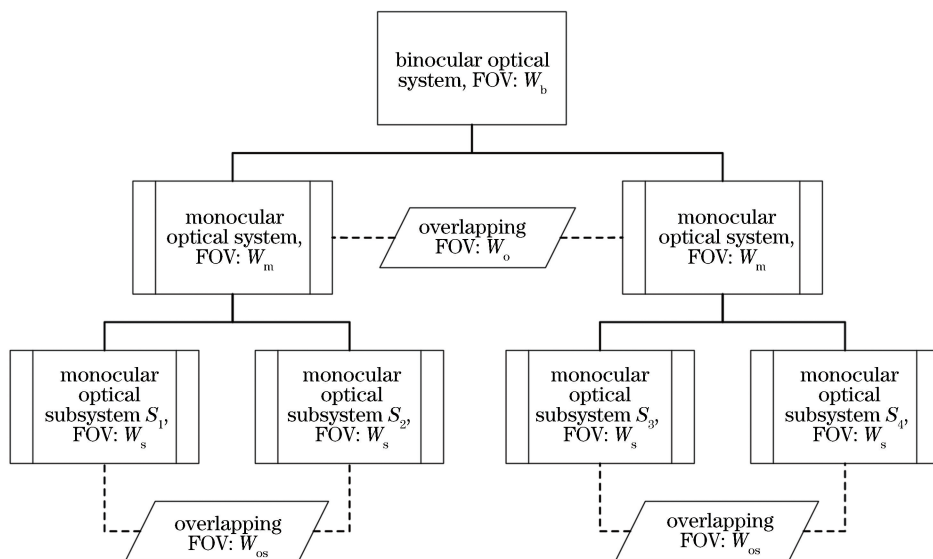


图1 虚拟现实 HMD 装置系统划分图

Fig. 1 Division of virtual reality HMD device

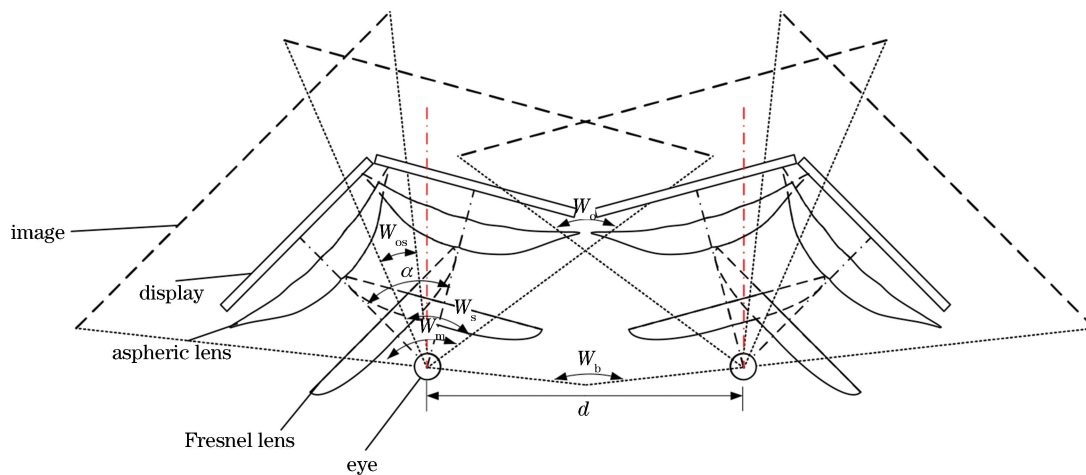


图2 虚拟现实 HMD 装置整体结构

Fig. 2 Framework of virtual reality HMD device

在图 2 中,单个光学系统由沿着视线方向依次排列的非涅耳透镜、非球面透镜、显示屏构成。显示屏通过光学系统成远平面上正立放大的虚像。点划线代表双目正前方向。可以看到,在本设计中,子系统的像在空间中有重叠,可保证最终所观察到的场景不会出现拼接缝隙。图 2 中各个视场角的意义如图 1 所述, d 表示人眼瞳距, α 表示两套子光学系统中轴线的夹角。

由图 2 所示的几何关系不难得到各个系统视场角及重叠视场角之间的关系为

$$\begin{cases} W_m = 2W_s - W_{os} \\ W_b = 2W_m - W_o = 2 \cdot (2W_s - W_{os}) - W_o \end{cases}, (1)$$

式中: W_m 为单目光学系统的横向视场角; W_s 为单目子光学系统的横向视场角; W_{os} 为两个单目子光学系统拼接时的重叠视场角; W_b 为双目光学系统的视场角; W_o 为两个单目光学系统在拼接为双目光学系统时的重叠视场角。

2.2 单目子光学系统设计

对于本装置,上述各项参数设计如下:

$$\begin{cases} W_s = 80^\circ \\ W_{os} = 34^\circ \\ W_m = 2W_s - W_{os} = 126^\circ \\ W_o = 90^\circ \\ W_b = 2W_m - W_o = 162^\circ \\ \alpha = 46^\circ \end{cases}. (2)$$

如上文所述,整个头戴显示装置由 4 套完全相同的子系统构成,所以只需要设计一套横向视场角为 80° 的光学系统即可。光学系统的具体参数如表 1 所示,其光学结构如图 3 所示,其中:1 为光学系统的孔径光阑;6 为光学系统的像面,即显示屏所处的位置;表面 3 为非涅耳面,以非球面为基底;表面 2、4、5 均为非球面。光轴为 z 轴,非球面顶点为坐标原点。非球面的方程为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_2r^2 + a_4r^4 + a_6r^6 + a_8r^8, (3)$$

式中: r 为非球面上任意一点到光轴的距离; c 为非球面顶点处的曲率(即半径的倒数); k 为二次曲面的圆锥系数; $a_2 \sim a_8$ 为高阶项系数。

非球面及非涅耳面的参数如表 2 所示,这些面的 k 均为 0。

该光学系统的总长(从面 1 到面 6 的距离)为 66.11 mm,出瞳直径为 4 mm,出瞳距为 15 mm,理

表 1 单目子光学系统的初始结构参数

Table 1 Initial structure parameters of monocular optical subsystem

Surface	Radius / mm	Thickness / mm	Glass (index Nd; abbe; Vd)
0(OBJ)	Infinity	-3000	
1(STO)	Infinity	15	
2	99.1654	8.1950	PMMA(1.49;57.44)
3	521.3778	17.1257	
4	-41.2608	12.3331	PMMA(1.49;57.44)
5	-38.6707	13.4537	
6(IMA)	Infinity	-	

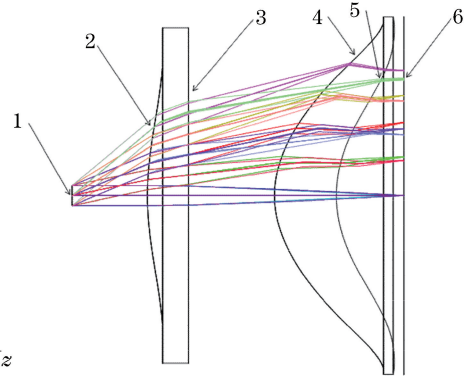


图 3 单目子光学系统光学结构图

Fig. 3 Optical structure of monocular optical subsystem

表 2 非球面高次项系数

Table 2 High-order coefficient parameter of aspheric surface

Surface	$\alpha_2/10^{-2}$	$\alpha_4/10^{-6}$	$\alpha_6/10^{-9}$	$\alpha_8/10^{-12}$
2	0.33	-7.33	2.49	-0.74
3	-1.08	-15.10	5.35	-3.56
4	3.67	-6.89	11.30	-6.26
5	3.27	3.02	-16.10	8.29

想垂轴放大率为 78.82,设计视场为 80° (横向) \times 86° (纵向)。需要注意的是,为了模拟人在观察时眼球的运动,将出瞳中心偏移光轴的距离作为变量,设计了多个结构,并对每一个结构都进行了优化,以保证眼球运动时,该光学系统的成像质量。图 4 为出瞳在不同结构下的位置,在任何一个结构下,出瞳直径均为 4 mm(与眼瞳直径相符),出瞳中心偏移光轴的距离为 0~5 mm,这近似等于眼球运动的极限范围。

当入瞳中心位于光轴上时,该光学系统的畸变网格如图 5 所示。需要注意的是,由于是反向设计,

因此显示器所成的像为光学系统的物,显示器本身为光学系统的像。

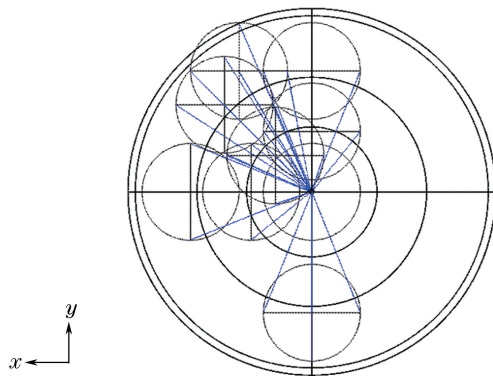


图 4 单目子光学系统出瞳漂移位置

Fig. 4 Exit pupil drift position of monocular optical subsystem

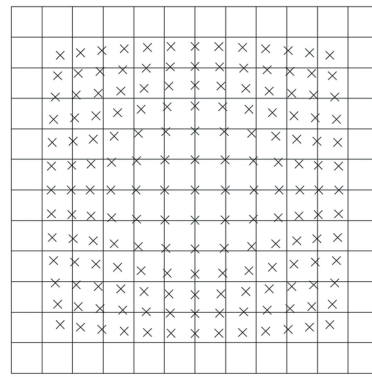


图 5 单目子光学系统畸变网格图

Fig. 5 Grid graph of distortion of monocular optical subsystem

的变换存在畸变,且非简单的等比例缩放关系。为简化计算,可以将映射关系的建立分为以下两个步骤:1)建立空间点到显示屏像面的映射关系,2)建立显示屏像面到物面的映射关系,如图 6 所示。

3 渲染方案

3.1 整体渲染方案

在渲染过程中,需要知道空间中的点到显示屏物面的映射关系。实际的光学系统从物面到其像面

3.2 空间点到像平面的映射关系

空间点到显示屏像面的映射关系如图 7 所示。在图 7 中, O_1 、 O_2 分别为左右眼在空间的位置,

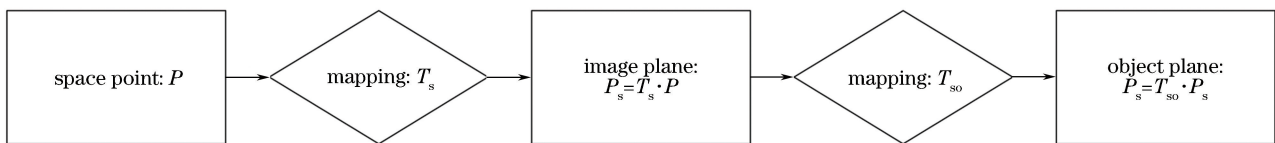


图 6 建立从空间点到物面映射的流程图

Fig. 6 Flow chart of establishment of mapping from space point to object plane

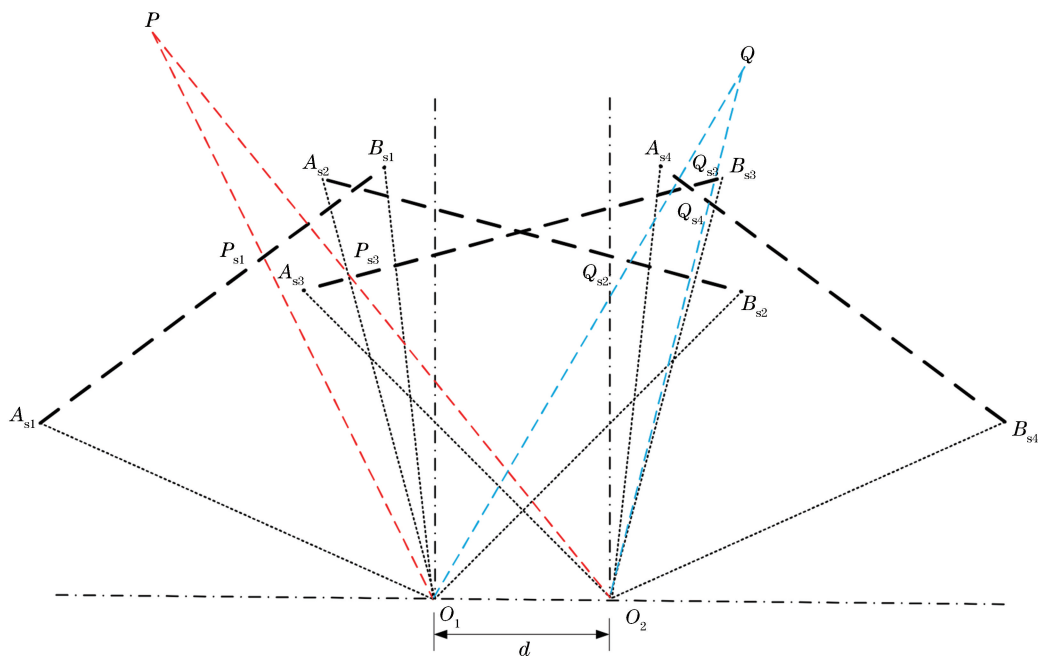


图 7 空间点与像平面的映射关系

Fig. 7 Mapping relationship between space point and image plane

两者之间的距离即瞳距 d 。图中平面 $A_{si}B_{si}$ (序号 $i=1,2,3,4$) 即显示屏的像平面。将空间点 P 分别与 O_1, O_2 相连, 连线 PO_1 与显示屏 1 的像面相交于点 P_{s1} , 与显示屏 2 的像面无交点, 连线 PO_2 与显示屏 3 的像面相交于点 P_{s3} , 与显示屏 4 的像面无交点。这表明, 空间点 P 只在像平面 $A_{si}B_{si}$ ($i=1,3$) 上出现, 且分别对应点 P_{s1} 和 P_{s3} 。同理, 空间点 Q 分别映射到 4 个像平面上的点为 Q_{si} ($i=2,3,4$)。

不难发现, 上述映射关系即计算机图形学中的透视投影^[6], 如图 8 所示。

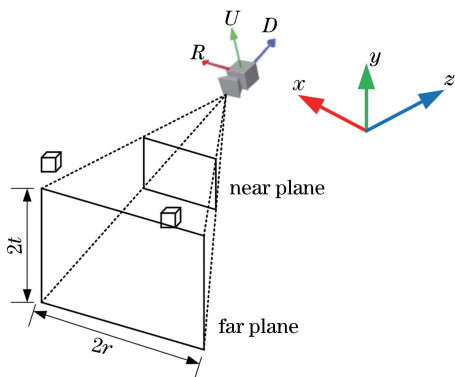


图 8 透视投影

Fig. 8 Perspective projection

透视投影所做的其实就是创建一个定义了可视空间(夹在远近平面之间的部分空间)的大观察箱, 任何在这个观察箱以外的物体最后都不会出现在裁剪空间内, 并且将会受到裁剪。而在观察箱内的物体则会被投影到一个平行于观察点(即图 8 中摄像机) xy 坐标平面的投影平面上(如图 8 中的远、近平面)。

上述映射关系^[6]为

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{M}_{\text{projection}} \cdot \mathbf{M}_{\text{view}} \cdot \mathbf{P}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{P} 为空间点在其空间坐标系中的坐标; \mathbf{P}_s 为空间点 P 映射到显示屏像平面的点在其所在像平面坐标系下的坐标; $\mathbf{M}_{\text{projection}}$ 为透视投影矩阵; \mathbf{M}_{view} 为观察矩阵。 $\mathbf{P}, \mathbf{M}_{\text{view}}, \mathbf{M}_{\text{projection}}$ 的表达式分别为

$$\mathbf{P} = [x \ y \ z \ w]^T = [x \ y \ z \ 1]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_{\text{view}} = \begin{bmatrix} R_x & R_y & R_z & 0 \\ U_x & U_y & U_z & 0 \\ D_x & D_y & D_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -S_x \\ 0 & 1 & 0 & -S_y \\ 0 & 0 & 1 & -S_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_{\text{projection}} = \begin{bmatrix} \frac{n}{r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{n}{t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

空间点的 w 分量用在坐标点变换到裁剪空间之后做透视除法, 用来判断哪些点会被裁剪^[6], 即将顶点的每个分量除以它的 w 分量, 若有分量落在区间 $[-1, 1]$ 之外, 就将它裁去。 $\mathbf{R}(R_x, R_y, R_z)$ 、 $\mathbf{U}(U_x, U_y, U_z)$ 、 $\mathbf{D}(D_x, D_y, D_z)$ 分别为观察点(即图 8 中摄像机)的右、上、前方向向量; S_x, S_y, S_z 为点 S 在三个方向上的分量; n, f 分别为图 8 中近、远平面到摄像机的距离; t, r 分别为图 8 中远平面的半高与半宽。

3.3 像平面到物平面的映射关系

对于理想的光学系统而言, 从物平面到像平面的映射为简单的等比例放大关系。对于本装置而言, 存在由光学系统引入的畸变。因此, 从像平面到物平面的映射可以看作是畸变校正加等比例变换的过程。

畸变分为径向畸变和切向畸变两类。切向畸变通常由安装误差造成, 由于其对本光学系统的影响不大, 因而可以忽略这一畸变。径向畸变是沿着光学系统半径方向分布的畸变, 通常分为桶形畸变(负畸变)和枕形畸变(正畸变)两种, 如图 9 所示。

径向畸变的数学模型可以用畸变中心点周围的泰勒级数展开式的前几项进行描述, 通常使用前两项^[7], 即

$$\begin{cases} u' = u + u[k_1(u^2 + v^2) + k_2(u^2 + v^2)^2] \\ v' = v + v[k_1(u^2 + v^2) + k_2(u^2 + v^2)^2] \end{cases}, \quad (8)$$

式中: (u, v) 为无畸变时的坐标; (u'', v'') 为存在畸变时的坐标, 以畸变中心为坐标原点; k_1, k_2 为畸变参数, 可以用相机拍摄像面的方法来确定畸变参数的值。那么利用这两个畸变参数, 就可得到畸变校正的公式为

$$\begin{cases} u = u'' + u''[k_1(u''^2 + v''^2) + k_2(u''^2 + v''^2)^2] \\ v = v'' + v''[k_1(u''^2 + v''^2) + k_2(u''^2 + v''^2)^2] \end{cases}, \quad (9)$$

式中: (u'', v'') 为进行畸变校正后的坐标。显然, 当畸变校正后的坐标满足(9)式时, 其通过光学系统所成实际像即为对应无畸变时的理想像。

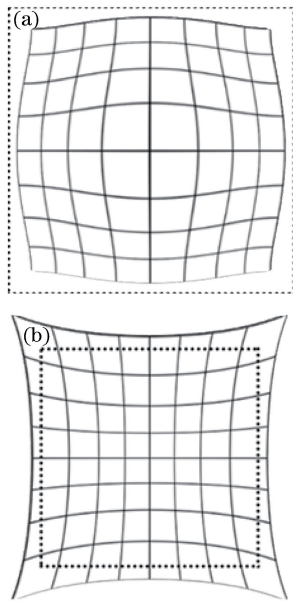


图 9 透镜几何畸变定义图。(a)桶形畸变;(b)枕形畸变

Fig. 9 Definition of lens geometric distortion.

(a) Barrel distortion; (b) pillow distortion

像平面上的点 $P_s(x_s, y_s)$ 和物平面上的点 $P_o(x_o, y_o)$ 的映射关系(即畸变校正关系)为

$$\begin{cases} \frac{1}{\beta}x_s = x_o + x_o[k_1(x_o^2 + y_o^2) + k_2(x_o^2 + y_o^2)^2] \\ \frac{1}{\beta}y_s = y_o + y_o[k_1(x_o^2 + y_o^2) + k_2(x_o^2 + y_o^2)^2] \end{cases}, \quad (10)$$

式中: β 为光学系统的理想垂轴放大率。

4 结果与分析

所设计的虚拟现实头盔如图 10 所示。本装置

的各项参数如表 3 及(2)式所示。

渲染过程中各平面上的图像如图 11 所示。

表 3 虚拟现实头盔参数表

Table 3 Parameters of virtual reality HMD

Parameter	Value
Resolution of AMOLED/(pixel×pixel)	1080×1200
Distortion parameter $k_1/10^{-6}$	1.17111
Distortion parameter $k_2/10^{-13}$	-9.8186
Magnification β	78.82

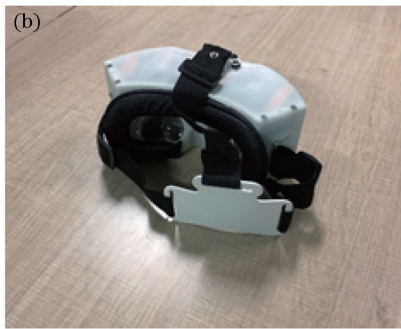
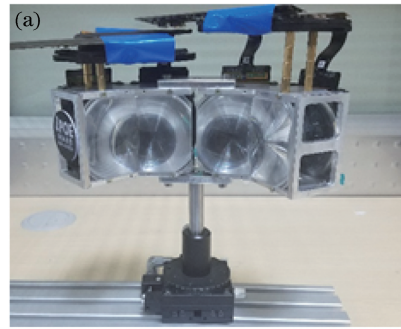


图 10 虚拟现实 HMD 装置。(a)光学镜组;(b)整机

Fig. 10 Photos of virtual reality HMD device.

(a) Optical lens; (b) whole device

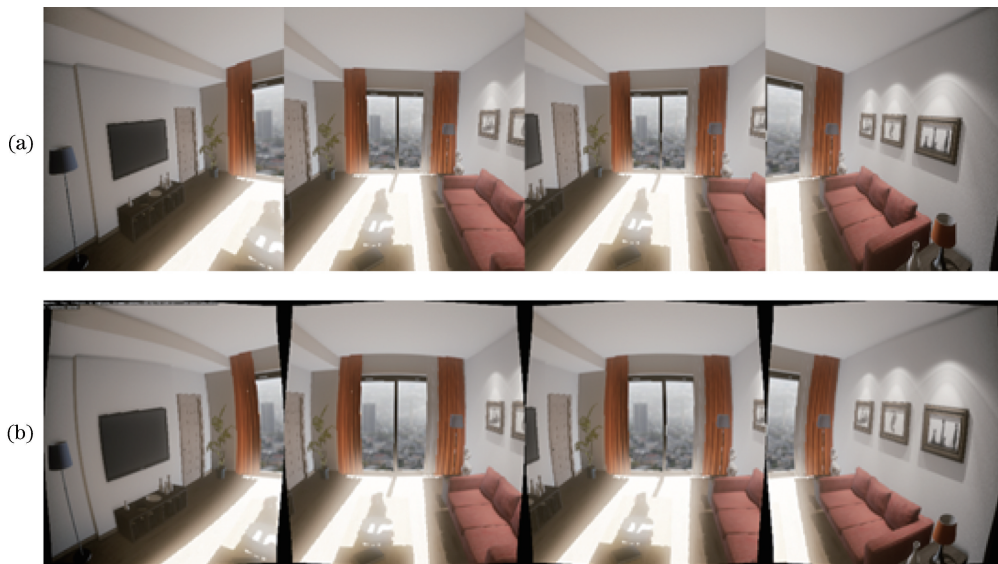


图 11 渲染过程中各平面上的图像。(a)像面图像;(b)物面图像

Fig. 11 Photos on each plane during rendering. (a) Photos of image plane; (b) photos of object plane

将电荷耦合器件(CCD)置于图7中的 O_1 、 O_2 位置,用以模拟人眼。由于所设计的无法达到本装置的设计视场,因此无法在一幅照片中拍全整个场景。CCD在不同角度采集到的图片如图12所示。

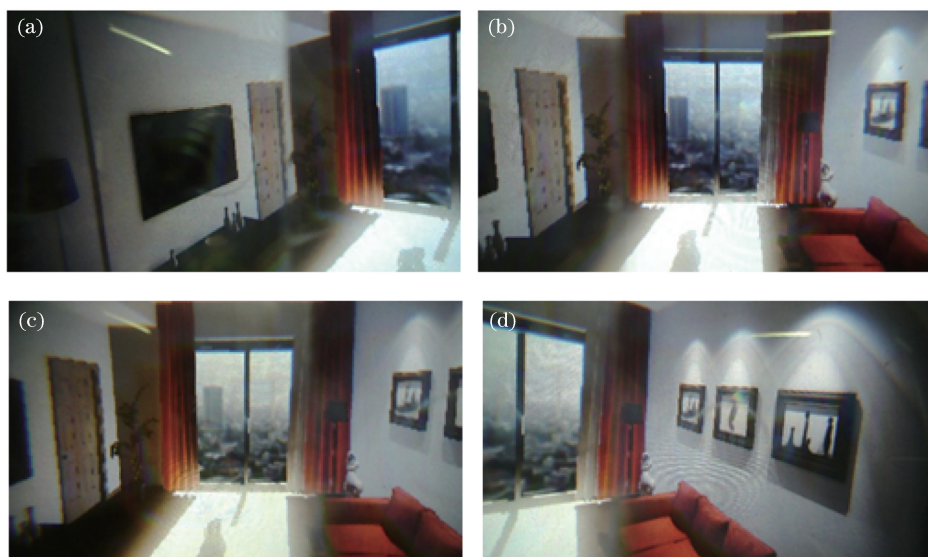


图12 CCD在不同角度拍摄的图像。(a)左眼部分场景,CCD转向左侧;(b)左眼部分场景,CCD面向正前方;
(c)右眼部分场景,CCD面向正前方;(d)右眼部分场景,CCD转向右侧

Fig. 12 Photos from CCD, taken at different angles. (a) Part of scene from left eye, with CCD turning to left; (b) part of scene from left eye, with CCD straight ahead; (c) part of scene from right eye, with CCD straight ahead; (d) part of scene from right eye, with CCD turning to right

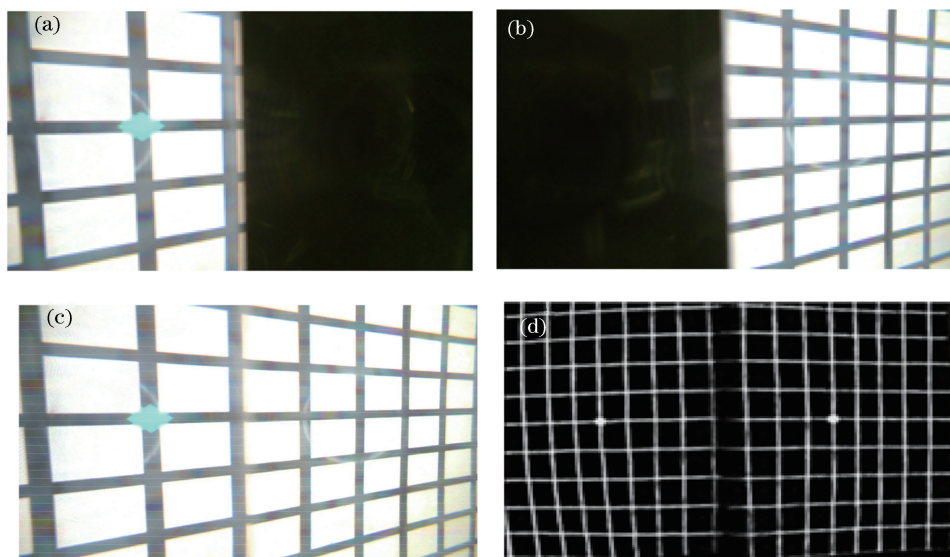


图13 拼接效果图。(a)本装置拼接效果,仅点亮左屏;(b)本装置拼接效果,仅点亮右屏;
(c)本装置拼接效果;(d)类似装置拼接效果

Fig. 13 Stitching effect. (a) Stitching effect of proposed device with left screen lit; (b) stitching effect of proposed device with right screen lit; (c) stitching effect of proposed device; (d) stitching effect of similar device

如果忽略不同显示屏色彩上的差异,可以发现拼接处的过渡质量较好,不存在明显的拼接缝隙,如图13所示。

由于4块显示屏的色彩表现存在一定差异,因此在拼接处两侧图像的颜色会有一些变化。

以网格图作为基准衡量本装置的拼接效果,并将其与类似的装置^[8]进行对比,结果如图13所示。

5 结 论

本课题组设计制作了一种基于拼接方法的超大

视场($162^{\circ} \times 86^{\circ}$)沉浸式虚拟现实头戴显示装置。由于采用了子光学系统的视场拼接方法,因此,每个子光学系统的设计难度大大降低,成像质量得以提高。本装置的子光学系统采用非球面与非涅耳面相结合的设计方式,并且严格控制镜片数量,使得头盔的轻便性得到了保证。在渲染方案中,对每个子系统的畸变都进行了校正,保证了观察图像与实际图像的一致性,并达到了较高的图像拼接效果。本装置为进一步提高虚拟现实头戴显示的沉浸感提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Havig P, McIntire J, Geiselman E. Virtual reality in a cave: limitations and the need for HMDs [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8041: 804107.
- [2] Nemire K. Evaluating an immersive virtual environment prototyping and simulation system [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3012: 408-416.
- [3] 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.
- [4] Meng X X, Liu W Q, Zhang D L, *et al.* Design of wide field-of-view head-mounted display optical system with double freeform surfaces [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0418004.
- 孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0418004.
- [5] Lu H P, Liu W Q, Kang Y S, *et al.* Design of compact optical system in wide-angle head mounted display [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 979-987.
- 卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 超大视场头盔显示光学系统设计 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 979-987.
- [6] Kessenich J, Sellers G, Shreiner D. Open GL programming guide [M]. Wang R, Transl. 9th ed. Beijing: China Machine Press, 2018: 163-167.
- John Kessenich, Graham Sellers, Dave Shreiner. OpenGL 编程指南 [M]. 王锐, 译. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 163-167.
- [7] Lee S, Hua H. A robust camera-based method for optical distortion calibration of head-mounted displays [J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(10): 845-853.
- [8] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, *et al.* Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling [J]. Optics Letters, 2011, 36(11): 2098-2100.