

文章编号: 0253-2239(2006)05-0730-6

投影式头盔物镜设计在视空间的性能评价*

赵顺龙 王肇圻

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 对一款折-衍混合投影式头盔(Head-mounted projective displays, HMPDs)物镜进行了精确的视空间评价, 并给出了详细的评价步骤和评价结果。在对调制传递函数(MTF)进行评价时, 充分考虑了人眼的焦距和瞳孔对评价结果的影响, 给出了调节和像散所造成的分辨力损失的计算公式。评价结果显示: 对于 3 mm 瞳孔, 该系统中心视场调制传递函数在 0.5 cycles/(')达到了 0.55, 达到了人眼的最小分辨角(1')。当眼睛注视投影像面中心时, 轴外点最大需要 0.35D 的调节量, 由此造成的分辨力损失最大为 3.5'。由于像散造成的分辨力损失最大只有 1.1'。横向色差和二级光谱最大值分别只有 0.57' 和 0.17', 均小于人眼的最小分辨角。这些结果证明此设计满足投影式头盔物镜的使用需要。该方法适用于所有的头盔系统在视空间的性能评价。

关键词: 应用光学; 投影式头盔系统; 视空间评价; 光学设计

中图分类号: O439; TH74 文献标识码: A

Optical Assessment of a Projection Lens Design for Head-Mounted Projective Displays in Visual Space

Zhao Shunlong Wang Zhaoqi

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract: A detailed assessment including the assessment procedure and the result in visual space of a projection lens design for head-mounted projective displays is presented. The influences of the focal length and the pupil size of the eye on the modulated transfer function (MTF) are sufficiently considered. The formulae to compute the loss in resolution due to accommodation shifts and astigmatism are given. The results show that for a 3 mm pupil size, the MTF is 0.55 at 0.5 cycles/('), matching the visual acuity of the human visual system (1'). When the eyes gaze at the center of the projected image, the accommodation shifts of points in the full field of view are less than 0.35D. And the loss in resolution due to accommodation shifts is less than 3.5'. The maximum loss in resolution due to astigmatism is only 1.1'. The maximum value of the lateral color and secondary color are only 0.57' and 0.17', less than the visual acuity of the human visual system. The results demonstrate that the lens can fulfill the usability in head-mounted projective displays. That technique can be applied to all the HMDs.

Key words: applied optics; head-mounted projective displays; optical assessment in visual space; optical design

1 引 言

基于投影物镜系统的投影式头盔显示器(HMPDs)是一种新型头盔显示系统(简称头盔系统)^[1~5],与基于目镜系统的传统头盔系统有本质区别。投影式头盔比以目镜为基础的头盔可获得更小的体积和重量、更大的视场以及更小的光学畸变。

并具有在增强现实环境下给出真实物体和虚拟物体的正确“闭塞”的能力、把虚拟的信息限制在特定空间的能力和多用户环境下的互不干扰的能力等。

头盔系统的可视性能和人因素的影响至关重要。通常是从虚像到微显示器进行光线追迹的,因此性能评价一般也是在微显示器空间(物空间)进行

* 国家自然科学基金(60577015)资助课题。

作者简介: 赵顺龙(1976~),男,河北唐县人,南开大学博士研究生,主要从事光学设计及头盔显示系统方面的研究。

E-mail: zh_shlong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-07-07; 收到修改稿日期: 2005-10-12

的,很少给出头盔显示系统在视空间的性能评价^[6~9]。虽然可以通过理想系统的公式来估算视空间的像差,但这并不是实际光线追迹的精确结果,误差较大。在视空间进行头盔显示系统的性能评价,有助于在光学设计者和感知专家之间建立沟通的桥梁^[10],可以提供大量有价值的信息,在头盔系统制作之前就能较精确地知道其性能。

在视空间进行头盔显示系统的性能评价,需要由微显示器至人眼进行光线追迹,而不是像一般目镜系统设计那样反向追迹。在计算时,人眼本身的视锐度以及微显示器限定的人眼的视锐度会给定两个评价的标准。依据这两个标准,需要给出调制传递函数、调节、像散、横向色差、二级光谱及畸变在视空间的精确评价。在视空间,调制传递函数需表示为线对每弧分[cycles/(')]而不是线对每毫米(cycles/mm);调节和像散需表示为人眼的屈光度,并给出它们导致的分辨力损失^[11];横向色差和二级光谱则要表示为弧分(')。此外,系统在视空间的畸变与其在微显示器空间的畸变大小相等,符号相反。

本文对 Yonggang Ha 等^[10,12]给出的头盔显示系统光学系统在视空间的评价方法进行了改进,在此基础上对为投影式头盔设计的一款折-衍混合投影物镜进行精确的视空间评价,给出了详细的评价步骤和评价结果。

2 投影式头盔折-衍混合物镜设计

我们曾经根据投影式头盔在交互环境和可视化训练中的使用需要,针对 1.3 英寸微显示器,设计了一款 56°视场的 5 片镜折-衍混合物镜系统。表 1 给出了具体设计参量和像差特性,其系统结构如图 1 所示。

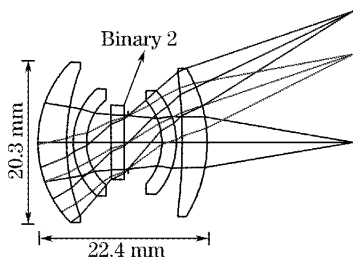


图 1 投影式头盔系统折-衍混合物镜结构

Fig. 1 Layout of the hybrid refractive-diffractive projection lens of HMPDs

由表 1 可见,此折-衍系统的出瞳直径为 10 mm,出瞳距离达到 25 mm。系统视场为 56°,f 数为 3.14。系统的最大畸变只有 0.65%;横向色

差也只有 5.3 μm 。在 25 lp/mm 时,中心视场调制传递函数达 0.70,边缘视场也达到了 0.41。物空间(微显示器空间)的空间频率 25 lp/mm 对应的微显示器分辨率为 1280 \times 960。因此该系统可以很好地显示 1280 \times 960 分辨率的图像。该系统重量仅为 9.8g,直径仅为 20.3 mm。

表 1 设计参量

Table 1 Design specification

Parameter	Specification
Object	LCD
Size	1.3 inch diagonal
Display Mode	SXGA
Projection Lens:	
Effective focal length	31 mm
Exit pupil diameter	10 mm
Eye relief	25 mm
Distance of projection	2 m
Wavelength range	Visible
Field of view (FOV)	56°
Feature size of diffractive surface	3.8 / μm
Performance:	
Maximum distortion	-0.65%
Lateral color	<5.3 / μm
Field curvature	<0.32 mm
Modulation transfer function (MTF)	0.70 (on-axis)
(at 25 lp/mm)	0.41(FOV=28°)

3 视空间的像质评价

表 2 给出了进行视空间像质评价的具体操作方法。由于原系统设计时是从投影像至微显示器进行光线追迹的,因此,要对系统进行精确的视空间评价,就必须首先翻转系统,在出瞳处放置一理想透镜,来模拟人眼,然后由微显示器至理想透镜像平面追迹光线。追迹光路图如图 2 所示,其中由于比例的关系,未画出返射型屏幕。要准确评价像质,需要

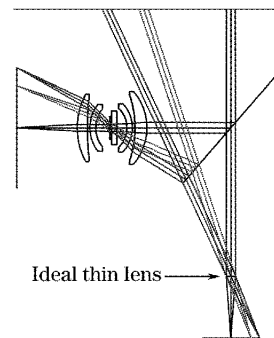


图 2 反向追迹光路图

Fig. 2 Layout of the reversal tracing rays

考虑到人眼的具体结构参量,主要是焦距和瞳孔。由于衍射会明显影响光线在人眼里的成像质量,因此需要根据人眼的焦距和实际的照明情况设定理想薄透镜的焦距和瞳孔大小。在评价调制传递函数时,这也是必要的。这一点与 Yonggang Ha 等^[10,12]的方法不同。Yonggang Ha 在进行调制传递函数的评价时未将理想透镜的焦距设为人眼的焦距值,而是远大于这一数值,这使它的评价系统的衍射调制传递函数值与视觉系统的衍射调制传递函数值产生偏差。在此,我们将一个 $f=17\text{ mm}$ 的理想薄透镜放置于系统的出瞳处,瞳孔设为 3 mm ,以此来模拟人眼。此即为表 2 中的步骤 1,2,是以下所有评价的基础。下面将对调制传递函数、像散、调节、横向色差分别进行讨论。

表 2 视空间性能评价方法

Table 2 Optical assessment in the visual space

Step	Description
1	Reverse the original optical system, and insert a perfect lens in the exit pupil to stimulate the human eye. Set the focal length of the perfect lens as 17 mm and the aperture size as 3 mm . Bring the image into focus
2	Trace rays from the miniature display to the image plane of the perfect lens
MTF	
3	Compute the MTF in cycles/mm on the image plane of the perfect lens
4	Convert the MTF in cycles/mm to cycles/(')
Accommodation Shift and Astigmatism	
5	Compute the field curvature on the image plane of the perfect lens, and convert all values to diopters by Gaussian Formula
6	Compute the astigmatism; the accommodation shift, i. e. the difference between the average of the sagittal and tangential field curvatures and the diopter of the paraxial image plane
7	Compute the accommodation blur and astigmatism blur by formulas (1) or (2).
8	Draw plots of accommodation shift, astigmatism, accommodation blur and astigmatism blur as a function of the FOV
Lateral Color and Secondary Color	
9	Compute the image height of the chief ray of the C, d, F light on the paraxial image plane
10	Compute the lateral color and secondary color in arc min by formulas (4) and (5), and draw a plot accordingly

3.1 调制传递函数

在视空间计算调制传递函数的方法如表 2 步骤 3,4 所示。首先,在理想透镜像面上计算以线对每毫米(cycles/mm)为单位的调制传递函数。然后,将调制传递函数的单位转换成线对每弧分[cycles/(')]。视空间的调制传递函数曲线如图 3 所示,从图 3 可看出,在 0.5 cycles/(') 时中心视场调制传递函数达到了 0.55 ,大视场也达到了 0.21 ;而在 0.24 cycles/(') 时,中心视场调制传递函数达到了 0.78 ,大视场也达到了 0.55 。在本文给出的物镜设计中,液晶显示器(LCD)的一个像素对人眼的张角为 $2.1'$ [即 0.24 cycles/(')],而人眼的视角分辨力为 $1'$ [即 0.5 cycles/(')]。这说明此折衍混合投影头盔物镜系统在视空间的分辨力达到了人眼的视角分辨力。

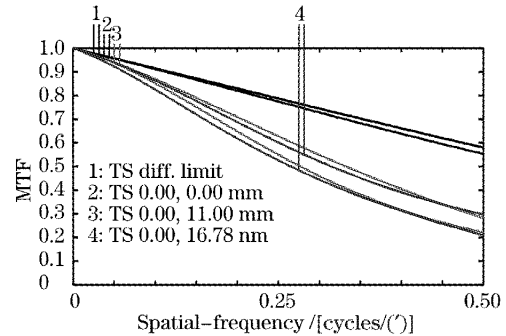


图 3 视空间的调制传递函数(3 mm 瞳孔)

Fig. 3 Polychromatic MTF in the visual space with a 3 mm pupil

3.2 调节和像散

在微显示器空间,视场内某点的像散可以表示为其子午和弧矢像点的距离;而在视空间,需要将像散表示为眼睛的屈光度值。当眼睛对投影像面调焦时,眼睛调节量表示为视场内各点的子午和弧矢像点中点与投影像面的屈光度之差。

由于人眼的最小分辨角为 $1'$,所以,张角小于 $1'$ 的物体在眼睛看来就是一个“几何点”。这样,当眼睛对投影像面调焦时,只要某点的离焦量在人眼的焦深以内,那么该点就会被视为一个“几何点”;对应地,在投影像处会确定一个景深,处于景深范围内的“像点”都会被视为一个“几何点”。在本设计中,液晶显示器的一个像素对人眼的张角为 $2.1'$,即液晶显示器将人眼的视锐度限制在 $2.1'$ 。在此投影式头盔中,人眼能分辨的最小细节为 $2.1'$ 。这样,对应于 $2.1'$ 的视锐度,也会有一个焦深和景深。在景深范围内或离焦量在此焦深以内的点,会被视为一个张角小于 $2.1'$ 的“点”,我们可以称之为一个“像素点”。对此投影式头盔而言,在此范围内的点可以认为其成像是清晰的。依据景深理论^[13],我们可以利

用以下公式来计算视场内某点在视网膜上的像斑对眼睛像方节点的张角,即像斑大小。

$$S = |\delta| \times d \times \frac{180 \times 60}{\pi}, \quad (1)$$

$$S \approx |\delta| \times 10, \quad (2)$$

其中 δ 为以屈光度(D)表示的该点与对准平面的折光度之差, d 为以 m 为单位的瞳孔直径, S 为以 ($'$) 表示的景像平面(或对准平面)上的“像斑”直径,可以称之为“模糊”,即导致的分辨力损失。当 $d = 3 \text{ mm}$ 时,(1)式简化为(2)式的形式。在本文中计算由于调节和像散导致的分辨力损失(调节模糊和像散模糊)时, δ 即为调节量或像散值的一半。

表 2 的步骤 5~8 给出了在视空间计算调节量和像散的方法。首先,在理想透镜像面上计算其场曲,利用高斯公式可以将其表示为屈光度:

$$D = \frac{1}{L' + \Delta} - \frac{1}{f'}, \quad (3)$$

式中 L' 为理想透镜后的近轴像距, Δ 为场曲对应的离焦量, f' 为理想透镜的焦距。再求得子午和弧矢像点的屈光度之差(像散),以及屈光度的平均值和近轴像面对应的屈光度之差(眼睛调节量)。然后,

根据(1)式或(2)式计算对应的调节模糊和像散模糊;最后,绘制像散、调节量以及像散和调节模糊随视场的变化曲线。结果分别如图 4、图 5 所示,图 4 为调节和调节模糊,其中,纵坐标为相对视场,横坐标分别为调节量和调节模糊。图 4(a)中画出了 C(656 nm)、d(587 nm)、F(486 nm)三种光线对应的调节量。其中, $\pm 0.1D$ 处的两条直线之间是人眼的最小分辨角($1'$)对应的景深范围, $\pm 0.2D$ 处的两条直线之间是液晶显示器确定的视锐度($2.1'$)对应的景深范围。图 4(b)画出了 C、d、F 三种光线由调节造成的分辨力损失(调节模糊)。其中, $1'$ 和 $2.1'$ 处的两条直线分别对应人眼的最小分辨角和液晶显示器所确定的视锐度。由图 4(a)可以看出:视场内的大部分点都在人眼最小分辨角($1'$)所确定的景深以外,但 d、F 光的全部视场和 C 光 $0 \sim 0.55$ 视场内的点对应的眼睛调节量都在液晶显示器所确定的视锐度($2.1'$)对应的景深范围内。而图 4(b)清楚的显示:以上范围内的点的调节模糊都小于 $2.1'$,而 C 光对应的最大分辨力损失也小于 $3.5'$ 。

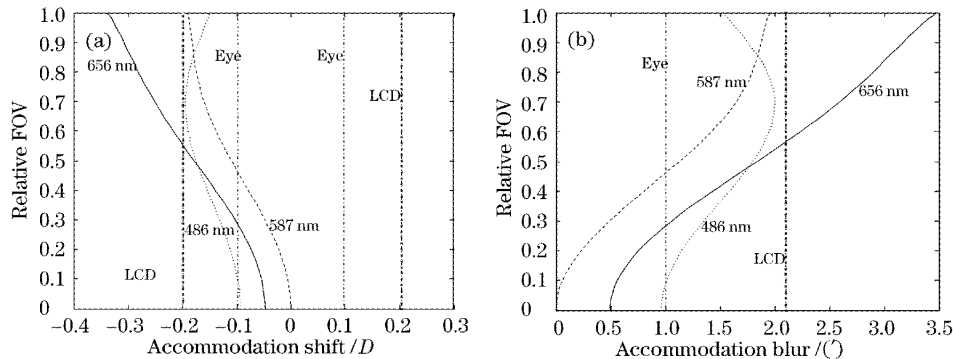


图 4 (a)调节和(b)调节模糊

Fig. 4 (a) Accommodation shift and (b) accommodation blur

图 5 为像散和像散模糊。其中,纵坐标为相对视场,横坐标分别为像散和像散模糊。图 5(a)中画

出了 C、d、F 三种光线对应的像散。图 5(b)画出了 C、d、F 三种光线由于像散造成的分辨力损失(像散

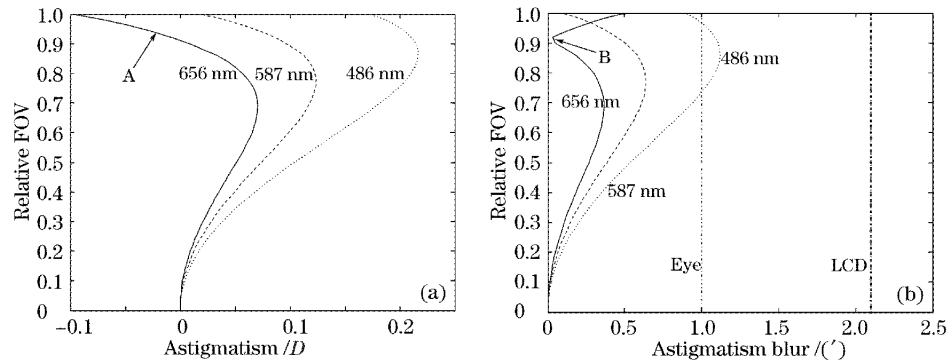


图 5 (a)像散和(b)像散模糊

Fig. 5 (a) Astigmatism and (b) astigmatism blur

模糊)。其中 $1'$ 和 $2.1'$ 处的两条直线分别对应人眼的最小分辨角和液晶显示器所确定的视锐度。图 5(a) 显示像散值在 $-0.1D \sim 0.22D$ 之间变化。从图 5(b) 中可以看出, 只有 F 光的 $0.73 \sim 0.97$ 视场内的点对应的分辨力损失大于 $1'$, 且最大仅为 $1.1'$, 远小于液晶显示器的单个像素 ($2.1'$)。在此, 我们假定眼睛调节到视网膜上的像斑为圆形弥散斑的位置, 另外, 图 5(b) 中的 B 点对应图 5(a) 中的 A 点,

即像散为 0 的点, B 点对应的像散模糊也应为 0, 图中不为 0 只是由于作图原因造成的。

3.3 横向色差和二级光谱

横向色差和二级光谱的视空间评价方法如表 2 步骤 9、10 所示。先在理想透镜近轴像面上计算 C、d、F 光的主光线的像高, 再利用以下公式计算横向色差和二级光谱, 并作图。

$$L_c = \left[\arctan\left(\frac{H_c}{L}\right) - \arctan\left(\frac{H_f}{L'}\right) \right] \times \frac{180 \times 60}{\pi}, \quad (4)$$

$$S_c = \left\{ \arctan\left(\frac{H_d}{L}\right) - \arctan\left[\frac{(H_c + H_f)/2}{L'}\right] \right\} \times \frac{180 \times 60}{\pi}, \quad (5)$$

其中 L_c, S_c 分别为横向色差和二级光谱, 选择 C、F 光来计算横向色差, d 光作参考波长来计算二级光谱。 H_c, H_d, H_f 分别为 C、d、F 光主光线在理想透镜像面上的像高, 而 L' 为近轴像距。

最后的横向色差和二级光谱曲线如图 6 所示。其中, 纵坐标为相对视场, 横坐标为横向色差和二级光谱。由图可见, 最大横向色差为 $0.57'$, 小于人眼的最小分辨角 $1'$, 同样远小于 $1/2$ 个液晶显示器像素对应的张角 ($\sim 1'$); 最大二级光谱仅为 $0.17'$, 远小于 $1'$ 。可见, 此系统的横向色差和二级光谱均满足使用要求。

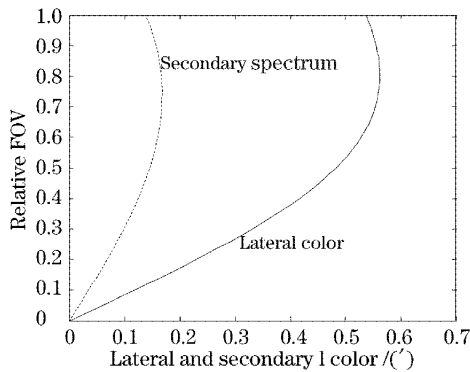


图 6 横向色差和二级光谱

Fig. 6 Lateral color and secondary spectrum

虽然以上的分析都是针对一款投影物镜进行的, 但是经改良的视空间评价方法适用于所有的头盔系统在视空间的性能评价。当然, 不同的系统对于调制传递函数、像散等光学性能的具体要求有所不同。

我们对系统进行了公差分析, 在半径偏差 $N = 2$ 个光圈, 局部偏差 $\Delta N = 0.5$ 光圈, 厚度公差为 ± 0.02 mm, 偏心量为 0.02 mm, 倾斜为 $3'$, 使用后焦距补偿的情况下, 系统原来的平均调制传递函数为

$0.33 [0.5 \text{ cycles}/(')] \text{ 时}$, 评估的调制传递函数为 0.29 , 变化量 0.04 。蒙特卡罗分析显示, 90% 的镜头的平均调制传递函数 ≥ 0.30 , 符合设计要求。

4 结 论

以上对折-衍混合投影式头盔物镜进行了精确的视空间评价, 评价结果显示: 对于 3 mm 瞳孔, 该系统中心视场调制传递函数在 $0.5 \text{ cycles}/(')$ 达到了 0.55 , 达到了人眼的最小分辨角。当眼睛注视投影面中心时, 轴外点由于调节量的不同造成的分辨力损失最大为 $3.5'$ 。实际上, 当眼睛转动时, 可以达到 $2D$ 的调节量, 远大于系统需要的 $0.35D$ 的调节量。在整个视场内, 由于像散造成的分辨力损失最大只有 $1.2'$ 。横向色差和二级光谱在整个视场内均小于人眼的最小分辨角。这些数据证明此设计满足投影式头盔投影物镜的设计需要。对投影式头盔或头盔显示系统的视空间评价作为对物空间评价的补充, 可以更清楚地了解其工作性能, 特别是针对佩戴者的感官性能。它可以使设计者在设计过程中充分考虑人因素的影响, 更能“以人为本”地进行设计。

参 考 文 献

- 1 James L. Ferguson. Optical system for head mounted display using retro-reflector and method of displaying an image[P]. U. S. Patent 5,621,572 (15 April 1997)
- 2 Hong Hua, Chunyu Gao, Frank Biocca *et al.*. An ultra-light and compact design and implementation of head-mounted projective displays[C]. *Proc. IEEE-VR 2001* (IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 2001), 175~182
- 3 Hong Hua, Chunyu Gao, Leonard Brown *et al.*. A testbed for precise registration, natural occlusion, and interaction in an augmented environment using a head-mounted projective display (HMPD)[C]. *Proc. IEEE VR 2002* (IEEE Computer Society, Los Alamitos, Calif., 2002), 81~89
- 4 Hong Hua, Chunyu Gao, Leonard Brown *et al.*. Using a head-

- mounted projective display in interactive augmented environments [C]. *Proc. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2001* (Association for Computing Machinery, New York, 2001). 217~223
- 5 Hong Hua, Axelle Girardot, Chunyu Gao *et al.*. Engineering of head-mounted projective display[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(22): 3814~3824
- 6 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle 70° eyepieces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 85~88 (in Chinese)
张慧娟,王肇圻,傅汝廉等. 折/衍混合超广角视场目镜系统的设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(1): 85~88
- 7 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of the hybrid refractive-diffractive singlet in the eyepiece[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 236~239 (in Chinese)
张慧娟,王肇圻,李凤友等. 折/衍混合单透镜在目镜中的应用研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 236~239
- 8 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Lu Zhenwu. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for lightweight night vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1393~1396 (in Chinese)
- 张慧娟,王肇圻,卢振武. 折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(10): 1393~1396
- 9 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Zhao Qiuling *et al.*. Hybrid diffractive-refractive optical system design of head-mounted display for augmented reality[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 121~124 (in Chinese)
张慧娟,王肇圻,赵秋玲等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, **24**(1): 121~124
- 10 Yonggang Ha, Jannick Rolland. Optical assessment of head-mounted displays in visual space[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(25): 5282~5289
- 11 Jannick P. Rolland. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(7): 1760~1767
- 12 Hong Hua, Yonggang Ha, Jannick P. Rolland. Design of an ultralight and compact projection lens[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(1): 97~107
- 13 Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 119~125 (in Chinese)
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 119~125

中国光学学会第六次会员代表大会在京召开

中国光学学会第六次会员代表大会于2006年4月22日在北京举行。来自全国光学界的200多名会员代表参加了本次大会。大会由中国光学学会秘书长曹健林主持,中国光学学会第五届理事会理事长母国光院士致开幕词,中国科协宋南平书记致贺词。中国光学界元老,中国科学院、中国工程院两院院士,中国光学学会名誉理事长王大珩先生出席开幕式并作了重要讲话。

会议审议并通过了中国光学学会第五届理事会的工作报告和财务报告,修改并通过了《中国光学学会章程》以及《关于中国光学学会会费的决定》。选举产生了中国光学学会第六届理事会。周炳琨院士当选第六届理事会理事长,曹健林、徐至展、刘旭、谢树森同志当选为副理事长,倪国强同志当选为秘书长。新一届理事会共有理事114名,其中常务理事22名。

本次大会在全国光学界得到广泛的关注与重视。参会代表中有中国光学界的知名人士,活跃在全国教学、科研与产业领域的骨干力量,以及专业委员会和地方光学学会的领导和积极分子,其中有11名院士。《光学学报》、《中国激光》、*Chinese Optics Letters* 作为中国光学学会主办的刊物,也派人参加本次会员代表大会。大会收到了包括中国科学院、中国工程院在内的15家单位发来的贺信。科技部、信息产业部等10家单位派专人到会祝贺。还有30家单位为大会敬献了花篮等表示祝贺。本次会员代表大会取得了圆满成功。