

头盔显示器在视空间性能评价中的眼睛转动问题研究*

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 以一款由 Erfle 目镜为目视系统的头盔显示器为例, 给出了眼睛转动时其视空间的性能评价方法、计算公式和评价结果. 评价内容包括 MTF、调节、像散、横向色差和畸变. 对眼睛转动和不转动情况下的结果进行了分析比较; 由于转动, 使得某些视场的 MTF、调节等性能指标严重变差, 成清晰像的范围明显减小; 系统的性能出现了明显的非对称性. 结果表明: 无法根据眼睛不转动情况下的系统性能来判断转动情况下的性能, 而只能通过实际的光线追迹才能获得.

关键词 应用光学; 头盔显示器; 视空间评价; 眼睛转动

中图分类号 O439; TH74 **文献标识码** A **文章编号** 1004-4213(2007)01-0068-5

0 引言

头盔系统(Head-mounted displays, HMDs)已经在军事、工业生产、医疗、计算机娱乐、立体显示、模拟训练等领域展示出它的巨大生命力和应用价值^[1-2]. 同时随着虚拟显示技术和便携式显示技术的快速发展, 头盔系统的可视性能和人因素的影响变得至关重要. 通常人们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)进行的, 没有设计人员给出 HMDs 在视空间的性能评价^[3-5]. 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. 如果视空间的度量标准可以给定系统的可用性能和感知研究的基准, 那么对光学系统在视空间的性能的定量评价就非常重要. 在视空间进行 HMDs 的性能评价, 一方面有助于在光学设计者和感知专家之间建立沟通的桥梁^[6-7], 可以提供大量有价值的信息, 使头盔系统制作之前就能较精确地知道其性能. 另一方面, 视空间的性能评价反过来也可以指导实际设计工作.

Y. Ha 等人给出了人眼注视中心视场时 HMDs 光学系统在视空间的评价^[6]. 但是, 人眼睛还会转动去观看其他视场. 因此, 同中心视场一样, 轴外视场的视空间评价同样重要. 此外, J. P. Rolland 等人还给出了瞳孔相对于 HMDs 出瞳位置“平移”时的视空间评价^[1]. 但是, 迄今为止尚未有人做过眼睛“转动”情况下的视空间评价. 这里说的“眼睛的转动”, 不只是瞳孔相对于 HMDs 的出瞳的“平移”, 而是眼睛整体的转动, 包括瞳孔以及像面的“位移”和“旋转”. 本文将针对此问题进行详细的研究, 并

以一个 HMDs 为例, 给出“眼睛转动”情况下视空间评价的详细步骤、计算公式和结果. 此外, 还对 Y. Ha 给出的 MTF 的具体评价方法进行了改进.

在视空间进行 HMDs 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视锐度会给定两个评价的标准. 依据这两个标准, 需要给出 MTF、调节、像散、横向色差、二级光谱及畸变在视空间的精确评价.

1 视空间的性能评价

以一个使用 Erfle 目镜的 HMDs 系统^[6]为例, 来说明眼睛转动情况下的视空间评价方法, 并对结果进行分析. 该 HMDs 系统的设计参量如表 1. 图 1

表 1 设计参量

Parameter	Specification
Object	LCD
大小	1.3 inch diagonal
分辨率	800×600 pixels
Erfle eyepiece	
有效焦距	61.6 mm
虚拟像距	2 m from the eye pupil
波长	Visible
FOV	30° in diagonal

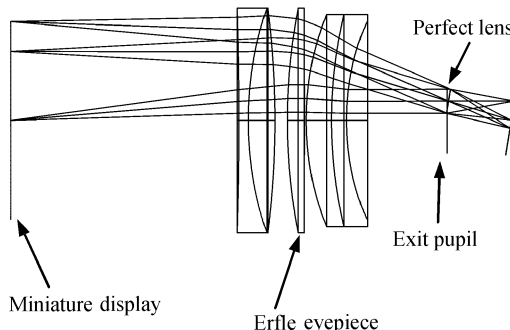


图 1 眼睛转动时的光路图

Fig. 1 The layout of the system with-eye-rotation

* 国家自然科学基金(60577015)资助

Tel: 022-23508332 Email: zh-shlong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2005-11-29

是HMDs的光路结构图(图中所示为眼睛注视+12°视场的情形). 这里将对0°和+12°两个视场进行评价和比较.

表2给出了进行视空间像质评价的具体操作方法. 首先,在目镜出瞳处放置一理想透镜,来模拟人眼. 然后转动眼睛,对不同视场的虚像点(这里取0°和水平+12°)调焦,并由微显示器至理想透镜像平面追迹光线. 要准确评价像质,需要考虑到人眼的具体结构参量,其中主要是焦距和瞳孔. 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MTF时,也是必要的. 这一点与Y. Ha等人的方法不同. Y. Ha在进行MTF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,这会使他的评价衍射MTF值与视觉系统的衍射MTF值产生偏差. 在此,将一个f=16.7 mm的理想薄透镜放置于系统的出瞳处,瞳孔设为4 mm,以此来模拟人眼. 在眼睛转动时,不但会引起瞳孔在系统出瞳内的平移,还会引起其在垂直于出瞳面的方向的位移以及旋转. 因此必须首先确定眼睛的位置,这里取瞳孔距离眼睛转动中心的距离为12 mm^[8]. 此即为表2中的步骤1,2,是以下所有评价的基础.

表2 视空间性能评价方法

步骤	操作方法
1	在HMDs系统出瞳处放置一理想透镜来能模拟人眼;焦距设为16.7 mm,瞳孔为4 mm
2	转动眼睛,对不同的视场调节,然后由微显示器至理想透镜像面追迹光线
MTF	
3	在理想透镜像平面上计算以cycles/mm为单位的MTF
4	将MTF的单位转换成cycles/arc min
调节和像散	
5	在理想透镜像平面上计算场曲,利用高斯公式将其转换成屈光度
6	计算以屈光度表示的像散,计算子午和弧矢场曲的平均值与近轴像面的差,即对应的眼睛调节量
7	据式(1)计算调节模糊和像散模糊
8	绘制调节、像散以及调节模糊和像散模糊随视场的变化曲线
横向色差和二级光谱	
9	在理想透镜像平面上计算C,d,F光的主光线的像高
10	根据式(3)、(4)计算以arc minute表示的横向色差和二级光谱,并绘制曲线

1.1 MTF

在视空间计算MTF的方法如表2步骤3、4. 首先,在理想透镜像面上计算以线对每毫米(cycles/

mm)为单位的MTF. 然后,将MTF的单位转换成线对每弧分(cycles/arc min). 图2(a)、(b)分别为眼睛注视0°和+12°时视空间的MTF曲线. 从图2(a)可以看出,眼睛注视0°视场时,在0.5 cycles/arc min(对应人眼视角分辨率1 arc minute)时0°和±12°视场(图中分别标识为0.00和±12.70 mm)的MTF均达到了0.45以上,且具有对称性. 其中,0.28 cycles/arc min对应此HMDs中心视场微显示器的分辨率(1.8 arc minute). 而当眼睛注视+12°视场(图2(b))时,视空间MTF曲线则显示了明显的非对称性. 由于眼睛注视+12°视场,因此该视场的分辨率明显提高;而0°和-12°视场的分辨率则明显下降. 由图可见,0°视场的MTF在人眼的视觉分辨率(1 arc minute)处为0.24,而-12°视场的MTF在人眼的视觉分辨率(1 arc minute)处MTF只有0.07,在微显示器的分辨率(1.8 arc minute)处也只能达到0.32了. 可以看出,

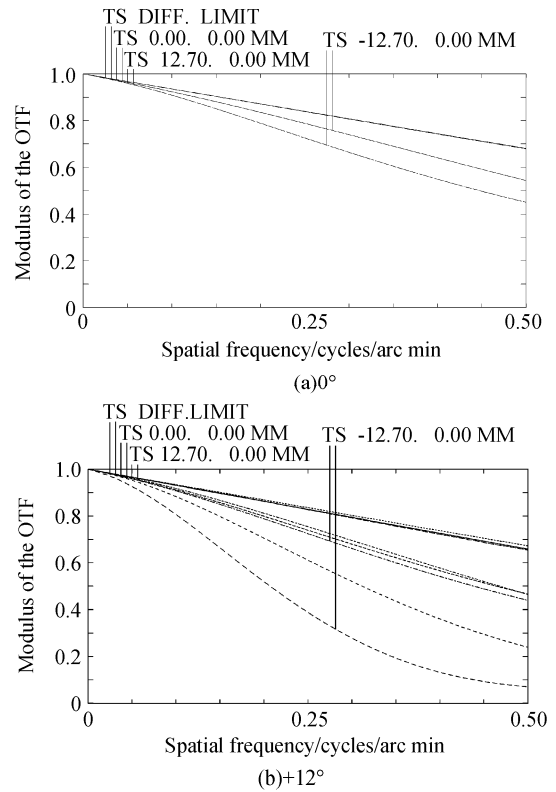


图2 眼睛注视分别为0°和+12°视场时视空间的调制传递函数(4 mm瞳孔)

Fig. 2 Polychromatic MTF in cycles/arc min focusing on 0° and +12° FOV(with a 4 mm pupil)

由于“斜视”,能“看清”的区域(0°~+12°)明显减小,只有约“正视”时(-12°~+12°)的一半,且“清晰度”明显较差. 而且,由于“斜视”,各个视场本身的子午和弧矢MTF(图2(a)、(b)中分别标识为T、S)也出现了较为明显的不对称.

1.2 调节和像散

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与投影像面的屈光度之差.当眼睛对投影像面调焦时,只要某点在视网膜上的像斑对眼睛像方节点的张角小于 1 arc minute,那么该点就会被视为一个“几何点”;这样,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”.依据景深理论^[9],还可以推导出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.

$$SD = \left| \arctan \left(\tan \theta + \frac{1}{2} |\delta| \times d \right) - \arctan \left(\tan \theta - \frac{1}{2} |\delta| \times d \right) \right| \times \frac{180 \times 60}{\pi} \quad (1)$$

式中, δ 为以屈光度(D)表示的该点与对准平面的屈光度之差, θ 为该点与瞳孔中心的连线与人眼光轴的夹角, d 为以 m 表示的瞳孔直径, SD 为以 arc minute 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”,即导致的分辨率损失.在本文中计算由于调节和像散导致的分辨率损失(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

$$D = 1/(L' + \Delta) - 1/f' \quad (2)$$

式中, L' 是理想透镜后的近轴像距, Δ 是场屈对应的离焦量, f' 是理想透镜的焦距.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,根据式(1)计算对应的调节模糊和像散模糊;最后,分别绘制“正视”和“斜视”两种情况下的像散、调节以及像散和调节模糊随视场的变化曲线.结果分别如图 3、4.图 3 为调节和调节模糊,其中,纵坐标为相对视场,横坐标分别为调节和调节模糊.图 3(a)中画出了“正视”和“斜视”两种情况下各视场对应的调节范围.“斜视”时的调节量为 0.17D,远大于“正视”时的调节量(0.06D).图中还显示出当人眼由注视 0°转动至注视 +12°视场时,人眼需调节 0.19D.图 3(b)画出了“正视”和“斜视”两种情况下各视场的由调节造成的分辨率损失(调节模糊).其中,标识为“eye”的直线对应人眼的最小分辨角(1 arc minute);标识为“LCD”的曲线是 LCD 单个像素确定的视锐度,其随视场角的增大有所减小.由图可以看出:“正视”时各点的调节模糊均小于人眼的最小分辨角,可以被视为“点像”;“斜视”时,只有 +12°~+6°视场内的点可以被视为“点像”,+6°~-1°视场内的点不可视为“点像”,但不影响图像的清晰度,

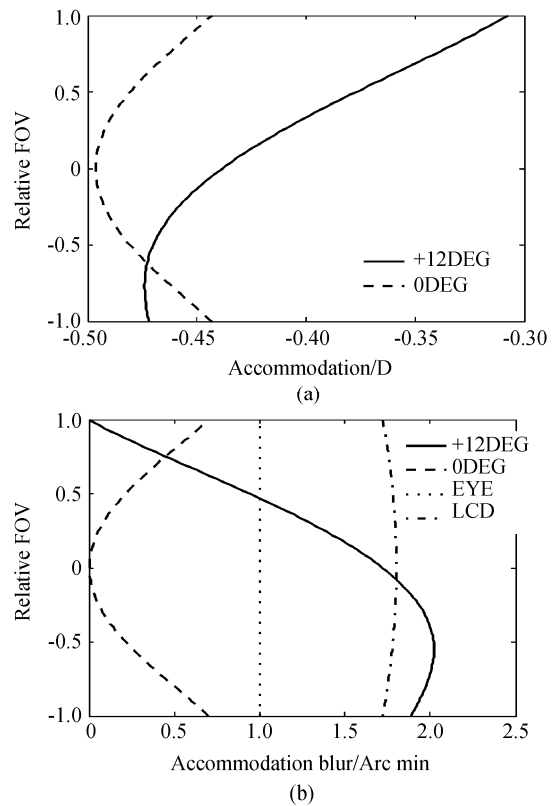


图 3 (a)调节和(b)调节模糊

Fig. 3 (a)Accommodation and (b)Accommodation blur

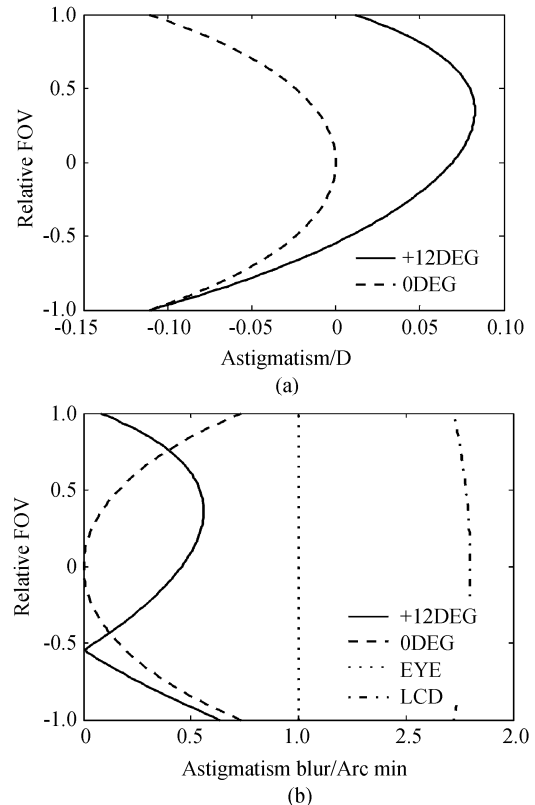


图 4 (a)像散和(b)像散模糊

Fig. 4 (a)Astigmatism and (b)Astigmatism blur

而-1°~-12°视场内的点造成的调节模糊会影响图像的清晰度.由于“斜视”,造成约一半的视场成像模糊.图 4 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. 由于“斜视”, $+12^\circ \sim -6.5^\circ$ 视场内的点的像散值由“-”变为“+”,具有了明显的非对称性. 但是,在此例中这一变化不会被察觉,因为“斜视”造成的分辨率损失(像散模糊)小于人眼的最小分辨角.

1.3 横向色差和二级光谱

横向色差和二级光谱的评价方法如表 2 步骤 9、10. 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.

$$LC = \left[\arctan \left(\frac{H_C}{L'} \right) - \arctan \left(\frac{H_F}{L'} \right) \right] \times \frac{180 \times 60}{\pi} \quad (3)$$

$$SC = \left[\arctan \left(\frac{H_d}{L'} \right) - \arctan \left(\frac{(H_C + H_F)/2}{L'} \right) \right] \times \frac{180 \times 60}{\pi} \quad (4)$$

式中, LC, SC 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. 结果中, LC, SC 是以 arc minute 表示的.

最后的横向色差和二级光谱曲线如图 5. 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:由于“斜视”,造成了横向色差和二级光谱的非对称性,有些视场增大,有些视场减小,但此例中均小于人眼最小分辨角和单个像素张角的 $1/2$.

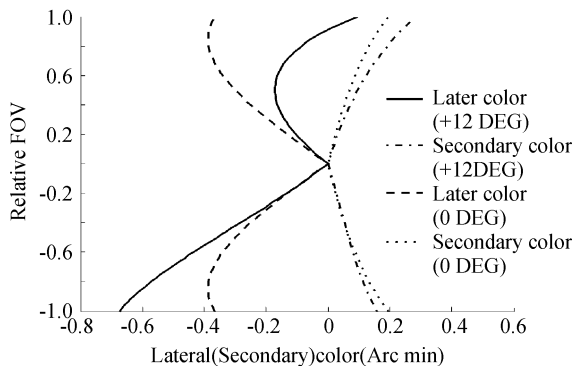


图 5 横向色差和二级光谱

Fig. 5 Lateral color and Secondary color

1.4 畸变

图 6 给出了“斜视”情况下的网格畸变,其中网格为参考光线,“×”为实际光线. 其具有了明显的非对称性失真,它是“斜视”和原系统的畸变的综合结果.

上面给出的眼睛转动问题的视空间评价方法具有普适性,可以用于所有的头盔系统在视空间的性能评价.

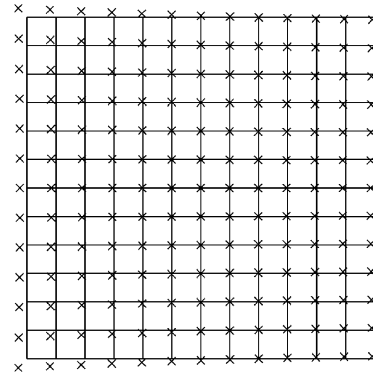


图 6 网格畸变(注视 $+12^\circ$)

Fig. 6 Grid distortion(focusing on $+12^\circ$)

2 结论

通过前面对 HMDs 系统眼睛转动情况下的视空间评价可以得出以下结论:可以通过与“正视”情况类似的方法对头盔系统进行眼睛转动情况下的视空间评价,但是首先必须确定眼睛转动后相对于系统出瞳的位置和转角,否则便无法给出准确的评价结果. 眼睛转动后的评价结果具有很大的非对称性特征,导致某些评价指标变化很大,与“正视”情况下的成像质量存在较大差异,因此若不经精确的眼睛转动情况下的视空间评价,就无法判断“斜视”时的成像质量. 这也正是眼睛转动情况下视空间评价的意义所在.

参考文献

- [1] ROLLAND J P. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display. *Opt Eng*, 2000, **39**(7): 1760~1767.
- [2] FERRIN F J. An update on optical systems for military head mounted displays[C]. *Proc of the SPIE*, 1999, **3689**: 178~185.
- [3] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, SUN Qiang, et al. Design of off-axial optical system for binary optic infrared imaging spectrometer. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 573~576. 杨新军,王肇圻,孙强,等. 基于二元光学的红外成像光谱仪离轴系统设计. *光子学报*, 2005, **34**(4): 573~576.
- [4] YANG Xin-jun, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang. Hybrid diffractive-refractive 60° - diagonal field of view optical see-through head-mounted display. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 89~92.
- [5] ZHAO Qiu-ling, WANG Zhao-qi, MU Guo-guang, et al. Hybrid refractive-diffractive eyepiece design for head-mounted display. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1495~1498.
- [6] HA Y, ROLLAND J P. Optical assessment of head-mounted displays in visual space. *Appl Opt*, 2002, **41**(25): 5282~5289.
- [7] HUA H, HA Y, ROLLAND J P. Design of an ultralight and compact projection lens. *Appl Opt*, 2003, **42**(1): 97~107.

- [8] ZHAO Qiu-ling. Study on hybrid refractive/diffractive optical system for head-mounted display[Ph. D Dissertation]. Tianjin: Nankai University, 2004. 40~42.
赵秋玲. 折/衍混合头盔显示光学系统研究[博士学位论文]. 天津:南开大学, 2004. 40~42.
- [9] ZHANG Yi-mo. Applied optics. Beijing: China Machine Press, 1988. 119~125.
张以谟. 应用光学. 北京:机械工业出版社, 1988. 119~125.

Study of the Rotation of Eye in Optical Assessment of Head-Mounted Displays in Visual Space

ZHAO Shun-long, WANG Zhao-qi

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Key Laboratory of Opt-electronic Information Science and Technology, EMC, Tianjin 300071*)

Received date: 2005-11-29

Abstract Optical assessment of Head-mounted displays (HMDs) in visual space is of significance to predict its usability. The rotation of the eye is an important and complex part. As an example, a head-mounted displays system based on an Erfle eyepiece is assessed in visual space with the rotation of the eye. The method, the formulas and the results are provided. The MTF, accommodation, astigmatism, lateral color and distortion are assessed. The situations with-eye-rotation and without-eye-rotation are analyzed; due to rotation, the performance in certain field decreases, such as MTF and accommodation. The field where a clear image can be produced significantly minishes. The performance of the HMDs appears distinct asymmetrical. It can be concluded that the performance with-eye-rotation cannot be obtained form the performance without-eye-rotation. And it can be obtained only by practical ray tracing. So the assessment with-eye-rotation is indispensable to the assessment of HMDs in visual space.

Key words Applied optics; Head-mounted displays; Optical assessment in visual space; Rotation of the eye



ZHAO Shun-long was born in 1976, and received his B. S. degree from Hebei University in 1999 and his M. S. degree from Hebei University in 2003. At present, he is a doctor student in the Institute of Modern Optics, Nankai University. His research interests include head-mounted displays, binary optics, and optical design.