

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

采用回射屏的折/衍射头盔投影显示器设计

刘 迎^{1,2}, 林 琳^{1,2}, 张慧娟¹

- (1. 天津大学 理学院应用物理系, 天津 300072;
2. 天津大学 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 设计了有效焦距为 35 mm, 出瞳距离为 23 mm, 出瞳直径为 12 mm, 视场角为 50° 的透视式头盔投影显示器。该系统由一组双高斯透镜, 一个半透半反镜和一个回射屏组成。回射屏的使用使双目设计的视场有效提高, 畸变明显降低; 二元面的引入, 使系统在尺寸和重量上有明显的减少, 像质进一步提高。该系统投影镜头部分重量仅为 10.8 g。最大镜头直径为 23.6 mm, 完全满足双目设计的要求。目视系统中需重点校正的像散和垂轴色差的最大值分别为 0.12 mm 和 7.89 μm , 最大畸变 $< 0.5\%$ 。系统最小角分辨率为 0.46 mrad, 小于人眼的最小角分辨率, 解决了普通透视式头盔显示器双目设计时宽视场实现难的问题。

关键词: 光学设计; 透视式头盔投影显示器; 折/衍混合系统; 回射屏

中图分类号: TN873.92; TH703 **文献标识码:** A

Hybrid diffractive/refractive system design of head-mounted projective display using retro-reflective screen

LIU Ying, LIN Lin, ZHANG Hui-juan

- (1. *Department of Applied Physics, College of science, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
2. *Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science, EMC, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: A head-mounted projective display that consists of a pair of double-gauss lens, a beam splitter, and a retro-reflective screen was designed, in which the feature parameters are 30 mm effective focal length, 23 mm exit pupil, 12 mm exit pupil size and 50° FOV (field of view). The system uses a retro-reflective screen to increase effectively the FOV of binocular design, and reduce the distortion. It also adopts a diffractive optical element (DOE) to reduce the size and weight of the system, and improve the imaging quality. The total weight and the maximal diameter of projective lens are 10.8 g and 23.6 mm, the astigmatic and lateral color are 0.12 mm and 7.89 μm , and the distortion is less than 0.5%. The minimum angular resolution of this system is 0.46 mrad which is less than that of human eyes.

Key words: optical design; see-through head-mounted projective display; hybrid diffractive / refractive system; retro-reflective screen

收稿日期: 2005-11-12; 修订日期: 2006-04-17.

基金项目:

1 引言

增强现实 (Augment Reality, AR) 技术是在虚拟现实 (Virtual Reality, VR) 基础上发展起来的,通过计算机系统提供的信息来增加用户对现实世界感知的技术。在增强现实的环境中,使用者可以在看到周围真实环境的同时看到计算机产生的增强信息^[1]。

增强现实系统主要通过透视式头盔显示器 (Head-Mounted Display, HMD) 来实现虚拟物体和现实环境的融合。目前透视式 HMD 在实现虚拟物体和现实环境混合显示时主要采用两种技术:视频穿透和光学穿透。由于视频穿透技术在真实环境的复现时受到很多因素的限制,而光学穿透技术是对真实环境的“无损”显示^[2],所以多数情况下采用光学穿透技术。随着增强现实技术的发展,对光学透视式 HMD 的研究也日益受到国内外学者的广泛关注和重视,并有了快速的发展。

衍射光学元件是近年来一个研究热点,它以负色散及对波面进行任意整形的特点,在改善成像质量、减小系统的体积和重量以及降低成本等方面具有传统光学系统无可比拟的优势^[3]。光学设计人员逐渐将这一技术应用到 HMD 的设计中去,如文献^[4]在普通 HMD 基础上引入衍射面,在保持系统光焦度不变的同时,使系统结构得到简化,总重量比原来下降了 47%,而成像质量较原来得到改善。

随着光学透视式 HMD 的广泛利用,它的一些问题日趋明显。其中较重要的是宽视场的设计导致大畸变以及大视场时双目显示实现难问题^[5]。普通的 HMD 很难同时满足畸变和视场的要求,一般是牺牲视场来满足畸变。按照传统方法设计双目对称 HMD,当出瞳距离为 23 mm,出瞳直径为 12 mm 时,要保证系统畸变和尺寸同时达到设计要求,视场最大只能达到 28°。

为解决上述问题,获得满足宽视场的双目系统,本文设计了一种新型的透视式头盔投影显示器 (Head-Mounted Projective Display, HMPD)。该系统以微液晶显示器为图像源,由一组双高斯透镜,一个半透半反镜和一个回射屏组成。双高斯透镜中包含一个二元面和一个非球面。设计结

果讨论了各种像差的表现情况,其中目视系统中需重点校正的像散和垂轴色差的最大值分别为 0.12 mm 和 7.89 μm ,最大畸变 $< 0.5\%$;计算了系统的最小角分辨率;最后给出了特殊面型的结构参量。

2 系统结构和设计目标

2.1 系统结构

在普通光学透视式 HMD 中,使用者眼前放置着两片半透半反的光学组合器,其中一片是凹面的。双目设计时,需要在每个眼睛前都要放置一个这样的凹面半透半反镜。双目设计要求光学系统的直径小于 46 mm,随着视场的增大,这片凹面镜的直径很快达到了这一限制。图 1 给出出瞳距离为 23 mm,出瞳直径为 12 mm 时,普通双目 HMD 的结构,视场为 28°。

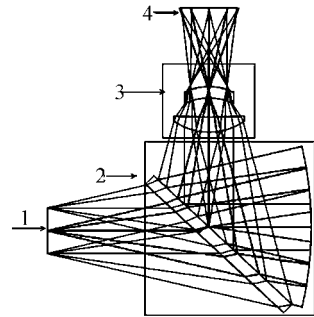


图 1 HMD 结构

Fig. 1 3D layout of HMD

本文设计用回射屏代替普通透视式 HMD 中的凹面半透半反镜。回射屏是一种特殊的半透半反镜,它是在基板上涂上特定涂料,使光线在回射屏上反射时,不遵循平面镜反射规律,而是近乎沿原路返回^[6]。目前常用的是玻璃微珠涂料,它在近乎 180° 光线入射角度下都具有良好的回向反射性能^[6]。此项技术在交通标志、广告装饰、野外救援、全息摄影等领域得到了广泛的应用。近几年来国内科研人员对玻璃微珠的回向反射进行了比较全面的研究。图 2 为镜面反射,漫反射和回向反射的表现情况。

由于回射屏的特殊性质,使用回射屏不会对系统引入额外像差;设计双目 HMPD 时,由于回射屏是平面,又具有特殊的性质,所以两只眼睛可共用一个回射屏,仅需限制投影透镜的直径不超

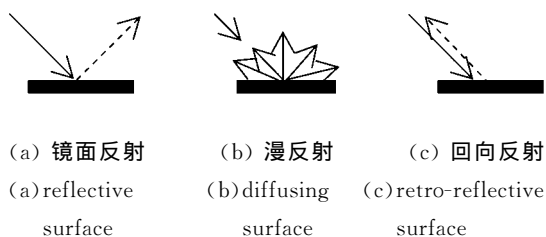


图 2

Fig. 2 Behavior of reflective surfaces

过 46 mm 即可满足双目设计,这大大方便了视场的扩大。

图 3 给出透视式 HMPD 的成像图。由计算机生成的虚拟图像显示在微显示器上,虚拟图像通过投影透镜折射后,再由与光轴成 45°角的分光镜反射到回射屏上面,回射屏将入射光线沿与入射相反的方向反射回去,进入人眼中;而来自真实环境的光线则直接通过回射屏和分光镜进入人眼,从而实现虚拟图像与真实环境的叠加。

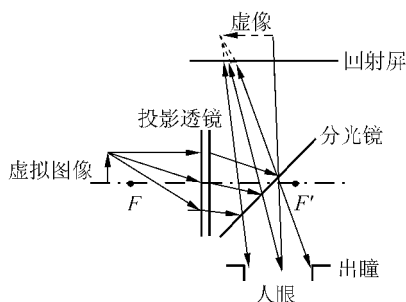


图 3 HMPD 成像图

Fig. 3 Imaging concept of HMPD

2.2 设计目标

和设计 HMD 时一样,设计 HMPD 时也需要考虑视场角、出瞳距离、出瞳直径和重量等指标,不仅要满足特定的光学性能要求,同时要尽量减少使用者在使用过程中的不适^[3]。

(1) 视场角:使用分光器时视场最大只能到 90°,当入射角超过 ±35°时,回射屏所用的反射材料的反射效率会大大降低,故视场应控制在 70°以下,本设计将视场定为 50°。

(2) 出瞳距离:考虑到使用者可能会佩戴各种眼镜、眼罩等,故出瞳距离选择 23 mm。

(3) 出瞳直径:尽管人的瞳孔在一般情况下是 3~5 mm,但在使用过程中由于运动或其他原因会使眼球偏离系统光轴,出瞳直径应大于 8

mm,本设计选取 12 mm。

(4) 重量:考虑到使用者要长时间佩戴显示器,所以重量是 HMPD 非常重要的一项指标。在本文设计中,图像源采用的是微液晶显示器,系统中引入二元面使系统重量大大减轻^[3,4,7]。

表 1 光学系统的设计参量

Tab. 1 Parameters of optical system

有效焦距 / mm	35
出瞳直径 / mm	12
出瞳距离 / mm	23
视场 / (°)	50
设计波长 / nm	486, 587, 656
畸变 / %	< 5
瞳距 / mm	< 46

3 设计结果及分析

根据设计要求,采用 zemax 软件,在系统中引入二元面和非球面,经过反复优化,设计了透视式 HMPD 光学系统。图 4 给出 HMPD 中投影透镜部分的结构图,它含四片透镜,面 2 为非球面,面 5 为二元面,其光学结构参数如表 2 所示。投影镜头重量仅为 10.8 g,对头部压力非常小;镜头最大直径为 23.6 mm,满足双目 HMPD 设计的要求。图 5 为 HMPD 的结构图。

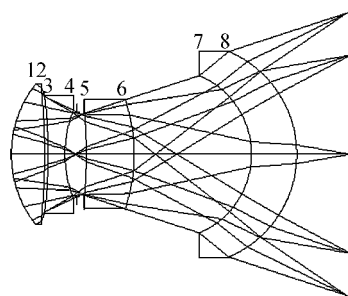


图 4 投影镜头结构

Fig. 4 2D layout of projective lens

图 6(a)给出视场角为 0°,36°,50°时对应的系统在子午方向(EY)和弧矢方向(EX)的垂轴像差曲线。对应于各视场垂轴像差的最大值为 17.5 μm、25.8 μm 和 67.8 μm。

图 6(b)为系统的场曲和畸变曲线。由场曲曲线可以看出系统最大场曲和像散分别为

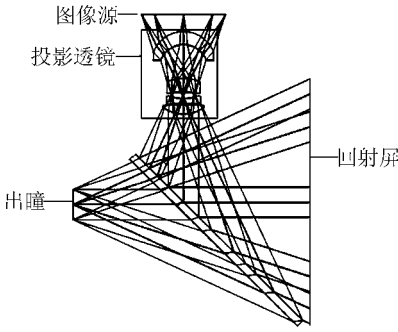


图 5 系统结构

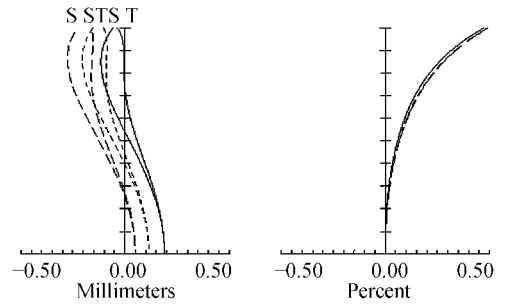
Fig. 5 3D layout of system

0.27 mm和 0.12 mm;系统的畸变很小,最大值 < 0.5 %。

图 6(c)为系统的垂轴色差曲线,系统的垂轴色差很小,最大值仅为 7.89 μm。

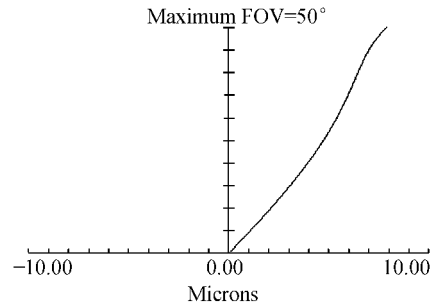
图 6(d)给出出瞳大小为 12 mm 时系统的调制传递函数(MTF)曲线,在 60 lp/mm 时仍有相当的调制度,对于人眼正常瞳孔尺寸 3~5 mm,分辨率将更好。调制度为 0.3 时,0°视场的空间分辨率为 65 lp/mm。

对于像面位于无穷远的光学系统,其角分辨率可由下式计算得到



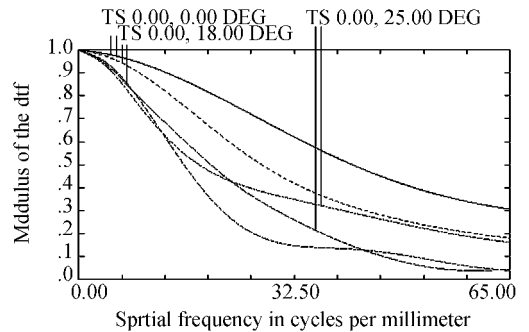
(b)场曲和畸变

(b)Field curvature and distortion



(c)垂轴色差

(c)Lateral color

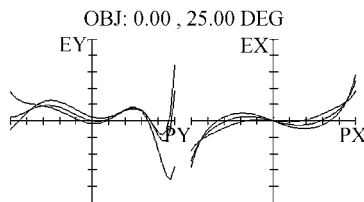
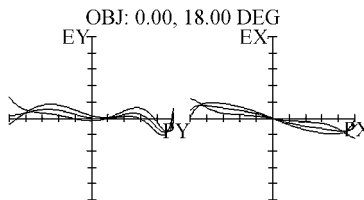
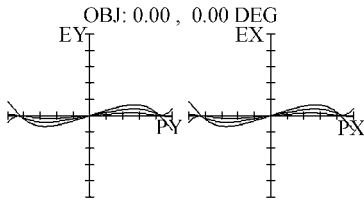


(d)调制传递函数曲线

(d)Curve of modulation transfer function

图 6

Fig. 6



最大刻度: ±100 μm (Maximum scal: ±100 μm)

(a)垂轴像差

(a) Transverse ray fan plot

$$\theta = \min \left[\frac{2 \tan(\omega/2)}{h}, \frac{2 \tan(v/2)}{p} \right], \quad (1)$$

其中 h, p 为图像源两个正交方向上的像素数(一般宽高比为 3:4), ω, v 为两个正交方向上的视场角,单位为弧度。根据 0°视场的空间分辨率为 65 lp/mm 和式(1)求得系统的最小角分辨率为 0.46 mrad,此值小于人眼的最小角分辨率 0.5 mrad。

设计中使用的二元面采用 zemax 软件提供

的 binary2 面。其面型参数为 $A_1 = 3\ 861.9$, $A_2 = -7\ 186.7$, $A_3 = -256\ 212$ 。标准半径 R 为 20 mm。图 7 给出设计中所使用二元面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)。经计算共有 24 个环带,最小带宽为 $131\ \mu\text{m}$,现有的制作工艺完全满足上述二元面的加工制作^[8]。

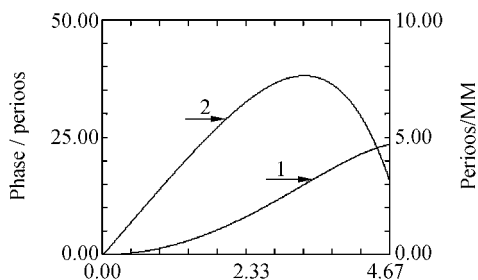


图 7 二元面的相位函数曲线(线 1)和环带密度曲线(线 2)

Fig. 7 Phase (line 1) and ring line density (line 2) curves of diffractive surface

设计中使用的非球面采用 zemax 软件提供的偶次非球面(Even Asphere),该面的曲率 $c = 0.019\ \text{mm}^{-1}$,二次曲面系数 $k = 0$ 。其余面型参数为 $\alpha_1 = 1.7 \times 10^{-4}$, $\alpha_2 = 6 \times 10^{-5}$, $\alpha_3 = -4.86 \times 10^{-7}$, $\alpha_4 = 2.83 \times 10^{-9}$ 。

参考文献:

- [1] 哈涌刚,周雅,王涌天,等.用于增强现实的头盔显示器的设计[J].光学技术,2000,26(4):350-353.
HA Y G, ZHOU Y, WANG Y T, et al. Head-mounted display for augmented reality visualization [J]. *Optical Technique*, 2000, 26(4): 350-353. (in Chinese).
- [2] 周雅,闫达远.增强现实系统现实技术探讨[J].计算机工程与应用,2003,15:35-38.
ZHOU Y, YAN D Y. Discussion on display technology for augmented reality [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 15: 35-38. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHANG H J, WANG ZH Q, ZHAO Q L, 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)
- [4] 杨新军,王肇圻,孙强,等.折/衍混合透视型头盔显示器光学系统设计[J].光电工程,2005,32(1):9-12.
YANG X J, WANG ZH Q, SUN Q, et al. Design of the optical system for a see-through refractive/diffractively-brid helmet mounted display [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(1): 9-12. (in Chinese)
- [5] HONG H, GIRARDOT A, et al. Engineering of head-mounted projective displays [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(22): 3814-3823.
- [6] 陈炎明,何玉明.影响玻璃微珠回向反射性能的主要因素分析[J].光子学报,2003,32(5):629-633. (in Chi-

表 2 投影镜头的光学结构参数

Tab.2 Parameters of optical structure for projective lens

Surface	Radius/ mm	Thickness/ mm	Glass
1	13.00	3.83	LAK31
Even Asphere	-58.70	0.40	
3	-57.78	1.93	F ₂
4	13.38	1.40	
STO	∞	1.07	
Binary 2	-49.64	5.50	LAK31
7	-19.11	13.47	
8	-9.80	5.20	SK15
9	-12.81	6.27	

4 总 结

本文利用回射屏具有的优点,解决了普通光学透视式头盔显示器在大视场下双目设计难的问题。设计了一种宽视场折/衍混合光学透视式头盔投影显示器,系统的核心部分——投影透镜由四片元件组成,其中包含一个二元面和一个非球面。该系统的视场为 50° ,出瞳距离和出瞳直径分别为 23 mm 和 12 mm;最小角分辨率为 0.46 mrad,小于人眼的最小角分辨率;且体积小,重量轻,在结构和成像质量方面都满足双目透视式头盔投影显示器的要求。

nese)

CHEN Y M, HE Y M. Study on the key factors deteriorating the retroreflective capability of glass microspheres [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 629-633.

- [7] 王肇圻, 张轶楠, 傅汝廉, 等. 折/衍混合 Petzval 光电摄像物镜设计[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(1): 1-4.
WANG ZH Q, ZHANG Y N, FU R L, *et al.* Design of hybrid refractive/diffractive petzval objective in visible band [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 1-4. (in Chinese)
- [8] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999, 181-184.
JIN G F, YANG Y B, WU M X. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999; 181-184. (in Chinese)

作者简介: 刘 迎 (1956—), 男, 天津人, 天津大学理学院应用物理系, 教授, 博导, 现主要从事统计光学和生物医学光子学研究;

张慧娟 (1973—), 女, 河北人, 天津大学理学院应用物理系, 副教授, 博士学位, 主要研究方向为衍射光学和光学设计。E-mail: hjzhang@tju.edu.cn