

文章编号: 0253-2239(2004)01-121-4

## 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计\*

张慧娟<sup>1,2</sup> 王肇圻<sup>1</sup> 赵秋玲<sup>1</sup> 李凤友<sup>2</sup> 曹召良<sup>2</sup> 陈波<sup>2</sup> 卢振武<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>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)  
(<sup>2</sup>长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 利用衍射光学元件独有的负色散性质和可实现光波面任意相位调制的特点, 在光学系统中引入衍射面, 设计了出瞳距离为 26 mm, 出瞳直径为 12 mm, 视场角为  $20^\circ(\text{H}) \times 15.4^\circ(\text{V})$  的用于增强现实的折/衍混合穿透式双通道头盔显示器的光学系统。设计的系统内、外两个光通道的光能量利用率分别达到 1/4 和 1/2。系统分辨率适合采用分辨率为  $800 \times 600$ 、像元尺寸为  $33 \mu\text{m}$  的图像源。设计结果, 系统镜头直径小于 46 mm, 满足用于双目显示的要求。设计结果表明, 该系统不仅在结构上满足使用者因素的要求, 而且成像质量接近衍射极限, 具有很高的分辨率, 色差和畸变非常小。设计结果完全满足用于增强现实的要求。

**关键词:** 应用光学; 光学设计; 增强现实; 折/衍混合系统

中图分类号: TH74 文献标识码: A

## Hybrid Diffractive-Refractive Optical System Design of Head-Mounted Display for Augmented Reality

Zhang Huijuan<sup>1,2</sup> Wang Zhaoqi<sup>1</sup> Zhao Qiuling<sup>1</sup> Li Fengyou<sup>2</sup>  
Cao Zhaoliang<sup>2</sup> Chen Bo<sup>2</sup> Lu Zhenwu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *The Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

<sup>2</sup> *State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*

(Received 27 May 2002; revised November 2002)

**Abstract:** By introducing diffractive surface, with the particular negative dispersive and the power of realizing random-phase modulation, in optical system, a hybrid diffractive-refractive optical system of see-through head-mounted display for augmented reality with 26 mm eye relief, 12 mm exit pupil and  $20^\circ(\text{H}) \times 15.4^\circ(\text{V})$  field-of-view is designed. The utilization ratios of energy of real world and virtual world are 1/4 and 1/2, respectively. The resolution of display, determined by the system resolution power, is  $800 \times 600$  and the pixel size is  $33 \mu\text{m}$ . The diameter of this system is less than 46 mm, and it applies the binocular. This head-mounted display not only satisfies the demands of user's factors in structure, but also with high resolution, very small chromatic aberration and distortion, and the system satisfied the need of augmented reality.

**Key words:** applied optics; optical design; augmented reality; hybrid diffractive-refractive system

## 1 引言

近年来,以浸没、交互和想象为基本特征的虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术在技术研究领域十分活跃。它利用各种先进的硬件技术及软件工具,设计出合理的硬件、软件及交互手段,使参与者能交互式的

\* 长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室资助课题。

E-mail: hjzhang@eyou.com

收稿日期: 2002-05-27; 收到修改稿日期: 2002-11-13

观察和操纵系统生成的虚拟世界。虚拟现实技术使人完全沉浸在计算机创造的虚拟世界中,而与真实的环境完全隔开。虚拟现实技术已成功用于军事、航空航天、娱乐、医疗等多个领域。增强现实(Augmented Reality, AR)是虚拟现实的一个分支<sup>[1,2]</sup>,它是将计算机生成的虚拟物体或场景融合到实际环境中,从而实现对现实的“增强”。在增强现实的环境中,使用者不仅可以看到周围真实环境,又可看到计算机产生的增强信息。增强现实在虚拟现实与真实世界之间架起了一座桥梁。增强现实的信息既可以在真实环境中与真实环境共存的虚拟物体,也可以是关于存在的真实物体的符号或文字等信息。

增强现实技术在医学、工业、娱乐、军事等领域都有巨大的应用潜力<sup>[3,4]</sup>。医生能够使用增强现实作为手术的可视化和训练的辅助手段。工业中,机器的制造、组装、测试和维护工作非常复杂。虽然,自动化技术已代替了很大一部分劳动力。但是,仍有很多工作,如需要灵巧操作、与经验和灵感相关联、需要实时的对所出现的问题做出处理等,由于太复杂或设备太昂贵而不能使用自动化,仍然要靠人力来完成。利用虚拟现实技术,使劳动者在工作过程中,不需要查阅已有的手册或图表,而是利用叠加在实际设备上的虚拟信息,大大地减少了劳动者的劳动量,从而提高了劳动效率。某些危险工作,如核反应堆的测试等,利用虚拟现实技术可进行远程操作。而虚拟演播室是一个典型的、应用前途很大的增强现实系统。

衍射光学元件具有独特的负色散特点。在光学系统中引入衍射面,用折/衍单透镜代替用于消色差的双胶合透镜,可大大的降低系统的重量<sup>[5~11]</sup>,这正是头盔显示器所希望的。衍射光学元件与传统的折射元件组成的折/衍混合光学系统,同时利用了光在传播中的折射和衍射两种特性,增加了光学设计过程中的自由度,能够突破传统光学系统的诸多局限,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。

本文在传统光学系统中引入衍射面,设计了工作波段为可见光波段,用于增强现实的折/衍混合头盔显示器的光学系统。系统的出瞳距离和出瞳直径分别为26 mm和12 mm,使其在使用过程中,允许使用者佩戴眼镜或防毒面具,以及使得使用者由于运动或其他原因而偏离光轴时,仍能看到虚拟和现实的世界。系统的直径小于46 mm,可用于双目头盔的使用。设计结果表明,该系统成像质量接近衍射

极限,具有很高的分辨率,同时色差和畸变非常小,满足用于增强现实的头盔显示器的要求。

## 2 设计方案和设计目标

### 2.1 设计方案

增强现实的头盔显示系统在完成实际对象与虚拟对象的融合时,一般采用两种技术方案<sup>[12]</sup>:视频穿透式(video see-through)和光学穿透式(optical see-through)。视频穿透式头盔显示器是利用摄像机对外部环境进行同步拍摄,从摄像机得到的视频与场景生成器生成的图形图像组合在一起,进行图像融合,融合后的图像送给头盔显示系统,使用者就得到叠加在外部场景上的虚拟世界的图像。这种方案的优点是:可以直接使用传统的单通道头盔显示器,不需要重新设计光学系统。缺点是:视频混合须处理真实与虚拟两路图像,两种信息流之间的延迟一般在几十毫秒,因而要保证实际图像和虚拟对象正确同步,否则会造成时间变形;使用者对真实世界的观察是由摄像机提供的,多数情况下摄像机不会与用户的眼睛精确定位,这样便在真实的视觉与摄像机之间形成偏差;为了保证摄像机尽可能的与人眼视点相重合,摄像机应置于使用者的头部,这将增加头部的重量,给使用者带来不适。光学穿透式头盔显示器是通过光学组合器放置在使用者眼睛前面来工作的,最简单的光学组合器为半透半反镜,使用者透过它可看到真实世界和虚拟场景,两者在组合器中合成进入人眼。这种方案的优点是:基本不增加头部重量;光学混合比视频混合简单便宜,光学方法只有一个视频流需要考虑,实际世界通过组合器直接观察,时间延迟通常只有几纳秒;如果头盔显示器的电源切断,使用者仍能得知外部情况,剪安全性强;没有视觉偏差。缺点是:需对现有头盔显示器的光学系统进行重新设计;对跟踪、注册和定位系统的依赖性较强。

根据以上分析,考虑到由于头盔显示器佩戴在使用者头部,因而在设计时不仅要满足光学性能的要求,更多的还要考虑人的因素。我们选用第二种方案,设计用于增强现实的穿透式双通道头盔显示器。

### 2.2 设计目标

头盔显示器的设计过程需考虑视场角、出瞳距离、出瞳直径、光能利用率和重量等因素,不仅要满足特定的光学性能要求,同时尽量减少使用者在使用过程中的不适。

1) 视场角:通常,人的裸眼水平视场角为  $200^\circ$ , 垂直视场角为  $100^\circ$ 。但对中心  $20^\circ$  的视场最敏感, 因而在设计时应保证中心  $20^\circ$  视场的像质。另外, 图像源多数为液晶显示器(LCD)或阴极射线管显示器(CRT), 其输出图像的宽高比为  $4:3$ , 所以水平视场角与垂直视场角的正切比值应为  $4:3$ 。头盔显示器的光学设计应保证水平视场和垂直视场的比值。

2) 出瞳距离和出瞳直径:为了保证使用者佩戴方便, 头盔显示器的出瞳距离应大于  $15\text{ mm}$ , 考虑到某些使用者佩戴眼镜或防毒面具, 出瞳距离应大于  $20\text{ mm}$ 。人眼瞳孔在正常状态下的直径约为  $2\text{ mm}$ 。考虑到使用过程中由于运动或其他原因而使眼球偏离系统光轴, 头盔显示器的出瞳直径应大于  $8\text{ mm}$ 。但是, 出瞳距离和出瞳直径过大, 将使系统轴外像差的校正变得困难。

3) 重量:头盔显示器在使用过程中长时间的佩戴在使用者的头部, 因而重量要轻是设计头盔显示器必须和着重考虑的。在我们的设计中图像源采用液晶显示器, 系统中引入了衍射面。利用衍射面的特性, 降低系统的重量和尺寸, 已被广泛证明。

4) 瞳距:对于双目头盔显示器, 设计时还要考

虑系统的瞳距。人眼的瞳距一般在  $54\sim 72\text{ mm}$  之间, 考虑到系统边缘的机械框架, 光学系统的直径应小于  $46\text{ mm}$ 。

5) 光能利用率:对于增强现实的穿透式双通道头盔显示器来说, 设计时要考虑到外界光和图像源发出的光两个通道的光能利用率。目前唯一商用的用于增强现实的头盔显示器为 i-o Display Systems 公司生产的 i-glasses, 光学结构示意图如图 1(a) 所示。其组合器含有两个半反半透面, 图像源发出的光和外界光在组合器处合成进入人眼。另外, 光路在组合器处折叠, 使光学结构更加紧凑, 减少了系统的总长。但是, 从图 1(a) 可以看出, 外界光通过两个半反半透面进入人眼, 忽略由于吸收等其他光能损失时, 外界光到达人眼的光能利用率为  $1/4$ 。这样导致戴上头盔显示器后, 看到的真实场景很暗, 给观察外部场景带来困难。而图像源发出的光要三次经过半反半透面, 其光能利用率为  $1/8$ 。需增加图像源的亮度来弥补图像源光能的损失。由于双通道成像, 不能通过调整半反半透面的反射透射比来解决光能的利用率。增大一个通道的光能利用率, 必然要影响到另一个通道的光能利用率。

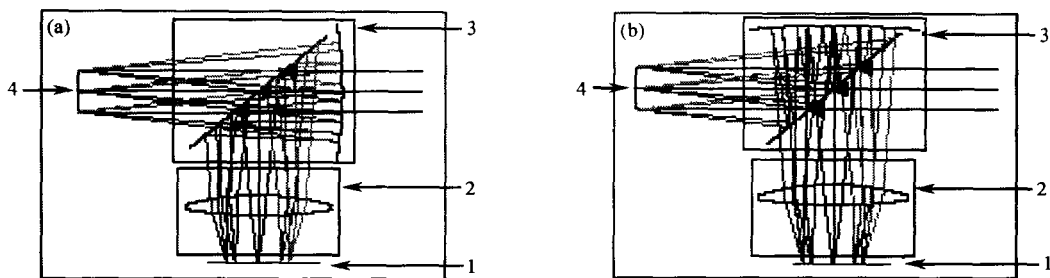


Fig. 1 The sketch map of optical system. 1; image source; 2; relay lens; 3; combinator; 4; exit pupil

我们采用如图 1(b) 所示的光学结构<sup>[13]</sup>, 其组合器只含一个半反半透面。这样外界光和图像源发出的光通过半反半透面的次数分别是一次和两次, 光能的利用率分别为  $1/2$  和  $1/4$ 。光路仍在组合器处折叠, 结构紧凑, 尺寸小。

Table 1 The parameters of the head-mounted display for augmented reality

Optical waves /nm	486, 588, 656
The size of image source /mm	$26, 4 \times 19, 6$
Field of view /( $^\circ$ )	$20 \times 15, 4$
Eye relief /mm	26
Diameter of exit pupil /mm	12
The energy utilization ratio of real world	$1/2$
The energy utilization ratio of image source	$1/4$
System diameter /mm	$< 46$

综上所述, 表 1 给出了本文设计的用于增强现实的头盔显示器的光学系统参量。

### 3 设计结果和分析

根据表 1 给出的设计要求, 采用 Zemax 软件, 设计了用于增强现实的穿透式双通道头盔显示器的光学系统, 以实现对现实世界和用于增强现实的虚拟图像的叠加。图 2(a) 给出了设计的头盔显示器光学系统的结构图。其中继透镜组只含两块透镜, 靠近组合器的透镜面向图像源的面为衍射面。整个光学系统的总重量仅为  $26\text{ g}$ , 对使用者头部的压力很小。镜头直径为  $41\text{ mm}$ , 可用于双目头盔显示器。图 2(b) 为该系统的调制传递函数, 可看出成像接近

衍射极限。在整个出瞳内成像质量都很高。不仅适用于本文所用分辨率为  $800 \times 600$  的图像源,而且对其他同尺寸的更高分辨率的图像源也具有很高的成像质量。图 2(c)为系统的场曲和畸变曲线,系统的

最大场曲和像散分别为  $0.1 \text{ mm}$  和  $17 \mu\text{m}$ ,而畸变很小,最大值仅为  $0.05\%$ 。图 2(d)为系统的垂轴色差曲线,系统的色差很小,最大值仅为  $0.5 \mu\text{m}$ 。该光学系统完全满足增强现实显示的要求。

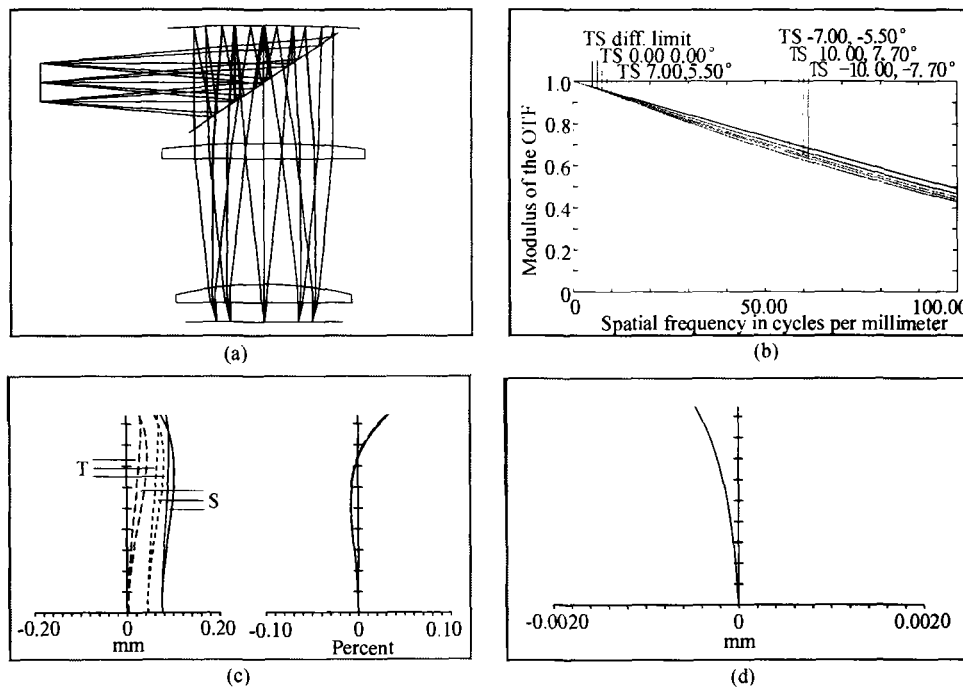


Fig. 2 (a) 3-D layout; (b) The modulation transfer function; (c) Field curvature and distortion; (d) Lateral color

结论 本文利用衍射元件的负色散和可对波面进行任意整形的特点,在传统光学系统中引入衍射面,设计了用于增强现实的折/衍混合穿透式双通道头盔显示器的光学系统。设计结果表明系统的重量很小,满足双目头盔的要求,同时质量接近衍射极限,具有很高的分辨率,对虚拟和现实的世界都有很高的成像质量。且对更高分辨率的像源也有很好的成像质量。设计的光学系统满足用于增强现实的要求。

### 参 考 文 献

- 1 Thomas P C. Introduction to augmented and virtual reality. *Proc. SPIE*, 1994, **2351**:272~281
- 2 Katsuaki F, Hisashi A, Yoshiyuki M. Color and high resolution head-mounted display. *Proc. SPIE*, 1994, **2177**:317~325
- 3 Andrew P, Rick K. Augmented reality for mining teleoperation. *Proc. SPIE*, 1994, **2351**:119~129
- 4 Nelson R, Corby J, Christopher A N. Augmented reality telemanipulation system for nuclear reactor inspection. *Proc. SPIE*, 1994, **2351**:360~365
- 5 Frank J F. An update on optical system for military head mounted displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3689**:178~185
- 6 Bunkenburg J, Feritz T A. Innovative diffractive eyepiece

- for helmet-mounted display. *Proc. SPIE*, 1998, **3430**: 41~49
- 7 Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13):2253~2258
- 8 Missing M D, Morris G M. Diffractive optics applied to eyepiece design. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14):2452~2461
- 9 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle  $70^\circ$  eyepieces. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1):85~88 (in Chinese)
- 10 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of the hybrid refractive-diffractive singlet in the eyepiece. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2): 236~239 (in Chinese)
- 11 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in  $3.2 \sim 4.5 \mu\text{m}$ . *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(2):121~125 (in Chinese)
- 12 Rolland J P, Holloway R L, Fuchs H. A comparison of optical and video see-through head-mounted displays. *Proc. SPIE*, 1994, **2351**:293~307
- 13 Ha Yonggang, Zhou Ya, Wang Yongtian *et al.*. Head mounted display for augmented reality visualization. *Optical Technique* (光学技术), 2000, **26**(4):350~353 (in Chinese)