

基于视网膜扫描的头戴显示器研究现状

呼新荣^{1,2}, 刘英¹, 王健¹, 李淳¹, 孙强¹, 李晶^{1,2}, 刘兵^{1,2}

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着头戴显示器的轻小型化发展, 基于视网膜扫描的头戴显示器逐渐成为近年来虚拟现实领域和头戴显示器领域的一个研究热点。此类显示器通过扫描装置控制激光束进行二维扫描, 扫描图像经成像后可直接在观察者的视网膜上进行显示, 具有大视场、高亮度、结构紧凑等独特优势, 也被称为视网膜扫描显示器。鉴于国内该方向的研究较为薄弱, 结合国外视网膜扫描显示器的研究基础, 阐述了视网膜扫描显示器的工作原理, 论述了该领域的技术发展及关键技术研究现状, 总结了视网膜扫描显示器的技术发展趋势和应用前景, 为国内相关领域的研究和发展指出了方向。

关键词: 头戴显示器; 视网膜扫描显示器; 激光扫描

中图分类号: TN141; TN27 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)03-0871-08

Current progress in head-mounted display based on retinal scanning

Hu Xinrong^{1,2}, Liu Ying¹, Wang Jian¹, Li Chun¹, Sun Qiang¹, Li Jing^{1,2}, Liu Bing^{1,2}

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Recent years, along with the development of head mounted display (HMD) in lightweight and miniaturization, a new style of HMD which is based on retinal scanning is gradually becoming a research hotspot in both fields of virtual reality and helmet mounted display. With a unique scanning device to control the coherent beam generated by the laser diode (LD) and scan the beam in two dimensions to produce an image, retinal scanning display (RSD) can directly scan an image on the observer's retina, which has the advantages of large field of view, high brightness and compact structure. Based on the RSD's research reports and results of foreign countries, the basic principle and technological developments of RSD were briefly summarized. Meanwhile, the current progress and key technology in this field were emphasized. At last, a brief outlook about the future development trends and application prospect of RSD was discussed.

Key words: head-mounted display; retinal scanning display; laser scanning

收稿日期: 2013-07-04; 修订日期: 2013-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(60977001); 吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项(2011CJT0004); 吉林省科技厅项目(20100615, 20100310)

作者简介: 呼新荣(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计等方面的研究。Email: huxr062768@126.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。

Email: sunq@ciomp.an.cn

0 引言

自从 20 世纪 60 年代, Sutherland 采用阴极射线管作为微型显示图像源设计出第一台头戴显示器(Head-Mounted Display, HMD), 鉴于军事及虚拟现实领域的巨大应用潜力^[1-2], 人们不断对与之相关的图像源技术、目镜系统设计、视觉跟踪技术、模块化技术等关键技术进行研究^[3-5]。随着 HMD 研究的深入, 特别是微显示器技术、微电子器件和人眼视觉观察系统的研究日益成熟, 逐渐出现了一种新型的基于视网膜扫描的头戴显示器^[6], 也被称为视网膜扫描显示器(Retinal Scanning Displays, RSD)。

通常显示器都含有一个由微小像素结构组成的显示屏幕, 观察者可以直接观察该屏幕(例如手机、电视)或者将屏幕上的图像通过光学系统成像后用眼睛观察以获得显示图像(例如 HMD)^[7]。而 RSD 则是利用扫描器来控制调制后的细光束进行二维扫描, 扫描图像经成像后在观察者的视网膜上就形成了对图像的感知; 该过程类似阴极射线管显示器控制电子束在荧光屏上扫描产生图像的过程。相比用于 HMD 的传统微型平板显示器, RSD 的显示亮度、色彩可根据设备使用环境的不同亮暗进行调节, 用户在无障碍观察周围环境的情况下能够同时获得电子设备传输的显示信息而不遮挡视场, 能够实现虚拟信息与现实信息之间的交互显示^[8]。

文中首先对 RSD 的发展状况和工作原理进行介绍; 接着描述其设计和制作过程中存在问题的解决方法 and 研究动态; 最后简要对该领域的研究进行了展望和总结。

1 视网膜扫描显示器的发展

视网膜扫描技术的研究源于 20 世纪 80 年代初 Webb R 所设计的扫描激光检眼镜(Scanning Laser Ophthalmoscope, SLO)^[9]。SLO 采用特殊设计的扫描装置控制激光束进行二维时序扫描以实现对人眼视网膜的均匀照明, 通过对眼底反射光进行探测成像从而重构出视网膜图像, 该系统广泛应用于医学获取眼底的视网膜图像^[10-11]。Webb R 认为, 如果对扫描光束进行视频调制以加载显示信息, 只要省略掉探测光路, 用户就可以观察到显示图像。因此, SLO

可作为 RSD 的结构原型。

1986 年, 日本 Yoshinaka K 在研究显示装置过程中为缩小体积、降低能耗, 提出了利用扫描装置控制光束在视网膜上扫描以显示图像的设计, 同时指出该装置具有显示立体图像的潜在可能性, 可用于眼镜式便携显示器^[12]。由于受到光源、扫描技术和控制技术的限制, 该设计在当时并未得到足够重视。1991 年, Ashizaki K 等分析了扫描激光束用于视网膜图像显示的原理, 指出这种扫描显示技术可潜在提高显示亮度、分辨率, 同时可减小功率损耗, 具有广阔的发展前景^[13]。1992 年前后, 美国华盛顿大学人机接口技术实验室在 HMD 的研究中为减小光学元件的口径、降低图像源的成本, 研制了称之为虚拟视网膜显示器的 RSD 原理样机。该实验室的 Kollin J 认为, 扫描光束在视网膜上的聚焦过程类似望远镜光学系统的成像过程, 视网膜上聚焦点的空间位置感知完全由入射光束角度决定, 眼睛的移动不会导致感知图像的移动, 可以将经典视觉研究中采用的 Maxwellian view 系统引入 RSD 设计以改善系统的性能^[14-16]。1993 年, 美国 MicroVision 公司期望将 RSD 商品化从而生产出能够实现彩色显示、高亮度、高分辨率、宽视场、低成本的新型显示器, 购买了华盛顿大学的相关技术专利并与其合作研发与 RSD 相关的硬件及软件, 推动了 RSD 的研究。随后 Tidwell M 运用声光扫描器针对 RSD 进行了优化设计, 提高了分辨率。考虑到声光扫描器驱动电压较高, Melville D 又设计了用于彩色透射显示的新型机械共振扫描器, 降低了系统的驱动电压和功率损耗^[7]。该阶段对 RSD 的研究主要围绕优化扫描装置的性能, 减小体积和重量来展开, 扫描器多为机械共振结构和旋转多面镜结构。为提升系统性能并降低成本, MicroVision 公司研制了第一代 MEMS 双轴扫描镜替代机械共振扫描器, 并于 2001 年生产了型号为 NOMAD 的激光扫描 HMD 装置^[17]。2005 年, 日本兄弟工业公司在世博会展出了该公司生产的眼镜式 RSD 样机, 这种显示技术的发展很有希望成为下一代计算机终端使用的显示设备。

此后, 为满足 HMD 系统的轻便、舒适性和安全性需求, RSD 的研究主要朝着如何提高扫描器性能, 如何匹配出瞳使得眼睛的观察更加自由, 如何保证

系统的安全性,如何设计出满足特殊要求的特殊光学元件等方面展开。

2 视网膜扫描显示器的基本原理

视网膜扫描显示器主要由光源模块、扫描模块、光学投影模块和控制模块组成,图1给出了系统工作原理图。

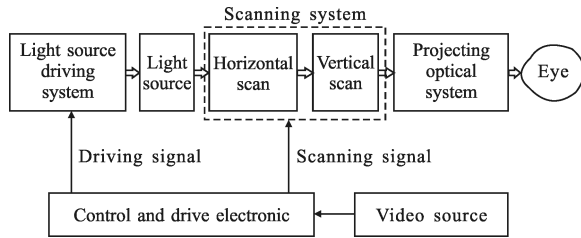


图1 RSD系统的原理框图

Fig.1 Block diagram of RSD

输入的图像信号通过一定格式的数据接口输入控制器,控制器对该信号处理后输出光源驱动信号,光源加载驱动信号并输出相应强度的光束。紧接着光束经过调制、整形后进入扫描器,扫描器在控制器输出的扫描驱动信号的作用下对光束分别在水平方向和垂直方向进行有规律的时序扫描,扫描光束的会聚点就形成了中间像面。最后,用户通过投影光学系统(目镜)观察中间像面,中间像面就成像在用户的视网膜上,由于眼的视觉作用机制形成对输入图像的视觉感知^[18]。

虽然光源每个时刻只发送一个像素,但扫描系统的工作频率非常高,人眼因存在视觉延迟无法判读出分离的扫描线,最终在视网膜上通过扫描形成光栅式的扫描图像,感觉上是清晰的静态二维图像。由于光束是按照图像信息进行调制后被扫描到用户眼睛视网膜进行显示,使得用户视觉上能够产生与输入图像信号一致的显示图像。

3 视网膜扫描显示器的关键技术

与RSD相关的设计和制造技术涵盖了光学工程、光学材料、光学涂层、电子制造技术和用户交互界面设计等多个研究领域^[19]。该节将主要从光学工程的角度对RSD设计中需要考虑的有关问题及研究现状进行论述。

3.1 光源

HMD中采用的微型图像源大都是平板显示器,图像受到光能利用率的限制其亮度通常很低而且无法调节,很难在复杂光照环境下满足使用要求^[20]。RSD中采用亮度可调的半导体激光器作为光源,能够满足昼夜不同光照条件的特殊使用要求。

光源模块是RSD的重要组成部分,为了能够显示图像,必须对光束的强度进行调制,调制方式可分为内调制和外调制两种。如果调制带宽足够,应优先考虑内调制以降低系统的复杂性。例如RSD中经常采用的半导体激光器,其发光强度可以通过控制驱动电流直接进行调制,调制频率可高达100MHz,能够满足高分辨率显示要求^[21]。外调制是在光束形成后采用一定的方式(经常采用声光调制器)进行调制,调制频率范围约为10Hz~5MHz^[22]。

按照经典的颜色叠加理论,任意的颜色都可以采用不同权重的三原色进行表示。当系统需要实现彩色显示时,光源可由三个不同基色的发光元件构成,可采用二向色镜进行色光合成,将合成后的单束光作为一个像素通过扫描装置进行扫描,通过投影光学系统和人眼成像在视网膜上完成图像显示^[9,23]。

3.2 扫描系统

视网膜扫描显示器的体积、显示分辨率和视场都与扫描系统的调制性能和驱动复杂性密切相关,扫描系统性能是制约RSD系统发展的一个关键因素。可用于扫描系统的扫描器主要有:旋转多面镜、检流计扫描镜(Galvanometer mirror)、声光扫描镜、电光扫描镜、MEMS扫描镜等^[22,24]。电光扫描和声光扫描都是利用晶体材料对光束的偏转效应完成扫描,驱动电压较高,偏转角度与波长相关因而只适合单色显示,通常偏转角度只有几度,而且成本较高,现在已经很少使用。用旋转多面镜和检流计扫描镜分别作水平高速扫描和低速垂直扫描器件是典型的二维扫描装置,但是高速转动的多面镜需要较大的驱动功率,而且存在安全隐患,无法满足HMD的应用需要^[22]。对于MEMS扫描镜的研究结果表明,可设计并制造出支持SXGA分辨率的MEMS扫描镜,其结构紧凑、功耗低,非常适合HMD等便携系统的显示应用^[25]。

二维图像的扫描最初都是由相互垂直放置的两

个单轴扫描镜,即水平扫描镜和垂直扫描镜配合来实现。水平扫描镜高速扫描形成扫描线,垂直扫描镜低速扫描使扫描线沿垂直方向平移形成图像。随着系统便携化要求的提高,又发展出双轴 MEMS 扫描镜,通过控制单个镜面同时在水平和垂直两个方向摆动可以完成二维图像的扫描,省略用于垂直扫描的慢速扫描镜,可提高系统的集成度^[25-27]。图 2 给出了单轴扫描镜和双轴扫描镜的结构示意图。

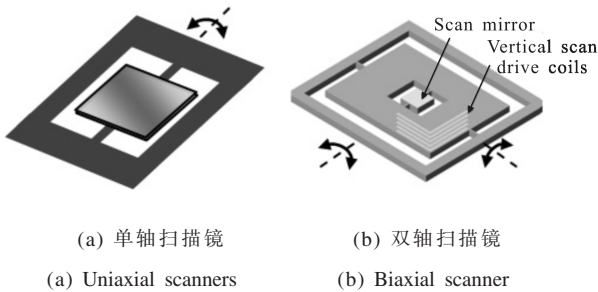


图 2 用于 RSD 的扫描微镜

Fig.2 Scanning mirror used for RSD

根据可形成扫描图像的特征划分,扫描装置的扫描方式主要有矢量扫描和光栅扫描两种。矢量扫描是由图形图像处理软件生成需要显示图形的轮廓线,根据失真度允许的范围在轮廓线上选取一定数量的点,将各点的坐标转换成与时间有关的电信号作为扫描镜的驱动信号,这种显示方式只能显示图形的轮廓,无法显示位图和视频格式。光栅扫描是以图像信号为调制信号对光束进行强度调制,采用锯齿波信号作为扫描镜的扫描驱动信号,利用镜面的反射控制光束偏转,形成均匀的光栅从而实现图像信号的显示,可以显示灰度位图或视频,通过采用复色光源还可以实现彩色扫描显示^[28]。鉴于光栅扫描的独特优势,RSD 的扫描系统通常都是采用光栅扫描方式。

扫描装置在水平方向的高速扫描通常采用类似正弦式的非线性共振扫描,导致扫描镜的中间平衡位置处镜面旋转速度最快,边缘处的速度为零。对于亮度恒定的光束,必然会使得中间图像暗而边缘图像亮,因而需要对扫描镜的驱动电路进行优化设计,使得扫描光束在整个扫描范围内按照扫描时间和像素位置进行合理分配以保证图像亮度的均匀^[29]。另外,为提高显示图像的质量,往往只使用扫描图像的中间部分,如图 3 所示。通常选择中间显示区域与整

个扫描区域的比值为 0.8~0.9^[30]。

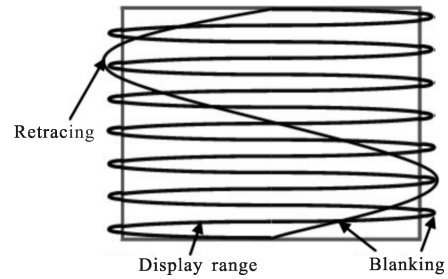


图 3 光栅扫描原理图

Fig.3 Schematic diagram of raster scanning

3.3 扫描系统的分辨率

在扫描显示系统中,为获得高分辨的显示图像,考虑扫描镜的机械惯性等因素,扫描镜镜面大都设计的很小以保证扫描镜能够高频扫描,通常镜面会对扫描光束的传播起到限制而引起衍射,这就造成了对系统显示分辨率的影响。

扫描系统的分辨率是指每条扫描线上能够分辨的最大像素的数目。传统的显示器的分辨率对应于显示器屏幕的实际像素数目,而扫描显示系统的分辨率主要取决于扫描器件的技术参数。对于像差矫正良好只受到衍射影响的光学系统,可认为衍射光斑的直径满足方程^[31-32]

$$s = \alpha \lambda \cdot f_{\#} \quad (1)$$

式中: $f_{\#} = f/D_{ex}$, f 为焦距, D_{ex} 为出瞳直径; α 是与通光孔形状和照明光束特性有关的形状因子; λ 为波长。

如图 4 所示,假设每个衍射光斑直径就是单个显示像素的直径,每个像素相对扫描镜镜面中心的张角 $\delta\theta = \alpha \cdot \lambda/D$,可得到在一个扫描方向上由扫描镜

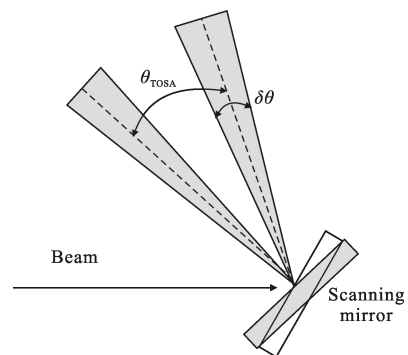


图 4 微扫描镜的发散角与总扫描角示意图

Fig.4 Diagram for total scan angle and beam divergence for scanning micro-mirror

所决定的像素数目满足方程^[33-35]:

$$N = \frac{\theta_{TOSA}}{\delta\theta} = \frac{4\theta_{MMSA} \cdot D}{\alpha\lambda} \quad (2)$$

式中: D 为扫描镜在扫描方向上的尺寸; θ_{TOSA} 为总扫描角; θ_{MMSA} 为扫描镜的角振幅。

从方程(2)可以看出扫描镜的最大分辨率与扫描角和镜面尺寸的乘积成正比,与波长和形状因子成反比。此外,在基于高斯光束的 RSD 中,分辨率还与高斯光束在镜面上的截断比、光束的入射角、光斑直径与单个像素尺寸的比值、所选择的扫描区域等有关^[30,36]。

除了分辨率以外,扫描器件的扫描频率 f_h 也是一个重要的参数。它决定了扫描显示系统是否能够以人眼可接受的频率显示出最大可分辨的像素数。表 1 中给出了波长为 $\lambda=635\text{ nm}$ 时,不同显示方式对 θD 和扫描频率的要求^[30]。

表 1 不同显示方式对 θD 和扫描频率的要求

Tab.1 θD -product and scanner frequency requirement for various display formats

Display format	VGA	SVGA	XGA	SXGA	HDTV
N_h	640	800	1 280	1 280	1 920
N_v	480	600	768	1 024	1 080
$\theta_{MMSA} \cdot D / (^\circ) \cdot \text{mm}$	7.50	9.37	12.0	15.0	22.5
f_h / kHz	16	20	25.6	34.1	36
f_v / Hz	60	60	60	60	60

3.4 投影光学系统

投影光学系统用于将显示图像成像到用户视网膜上,其结构根据不同的应用具有不同的形式,可设计成完全沉浸型或交互显示型^[18,37]。RSD 作为一种新型的头戴显示器,其投影光学系统的设计思想与 HMD 的目镜设计思想基本类似。在初级近似下,可认为 RSD 中定义的中像面对应于传统 HMD 中的显示器屏幕所在平面^[38]。

完全沉浸型,目镜设计较为简单,观察者通过目镜观察图像,但无法观察外部真实场景。交互显示型,光束通过投影光学系统后用户可以通过眼睛观察扫描图像,如图 5 所示。从扫描镜发出的会聚三色光束透过分束器被曲面反射镜反射后变成准直光束,并且总扫描角范围得到了放大,反射光束通过分束器反射进入眼睛。经过扫描镜和观察光学系统的

共同作用就会在观察者的视网膜上产生光栅式的扫描图像。外部光束也可以透过分束器进入眼睛,因此,用户可以同时观察外部环境和来自显示器的虚拟图像^[39]。

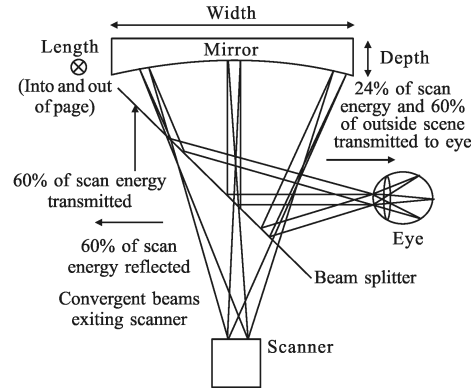


图 5 投影光学系统结构图

Fig.5 Configuration of projecting optical system

目前,折反射结构是 HMD 目镜的主要形式,RSD 系统也大多选择采用与 HMD 类似的目镜结构^[18,40]。此类光学系统的最大优点在于其极佳的光学性能,存在许多变量可以在设计中用于光学像差矫正。主要缺点是相对较低光学透过率,能量利用率较低(20%~25%)。

3.5 出瞳扩展方法

光学系统的出瞳通常定义为孔径光阑经孔径光阑后面光学系统所成的像。但是对于激光扫描显示器系统,其出瞳主要是由激光束的参数及扫描镜确定^[41]。头戴显示系统设计中,考虑到人眼瞳孔直径会随着不同光亮度而自动变化,并且在观察不同视场时眼球会旋转使视轴对准观察物体,为避免瞳孔和显示系统出瞳的失对准而造成图像丢失,显示系统的出瞳直径应保证在 10~15 mm 范围以上^[42]。

在图 6 所示的 RSD 系统中,光源发出的会聚高斯光束经扫描镜扫描后光束的束腰所在位置就形成了中间像面,该中间像面相当于传统头戴显示器中的微显示器屏幕,束腰的直径相当于微显示器的像素尺寸^[43]。光学系统的出瞳与扫描镜面共轭,并且与眼睛瞳孔位于同一平面,中间像面处不加入出瞳扩展器件(Exit Pupil Expander,EPE)的情况下,光束经过中间像面前后的会聚角 θ_i 与发散角 θ_o 相等。由于激光束的发散角 θ_o 很小,目镜出瞳直径 D_{exp} 将受到总扫描角 θ_{TOSA} ,视场角 θ_{FOV} 和镜面直径 D 的限制,通

常约为 $1\sim 3\text{ mm}^{[44]}$,远小于头戴显示系统对于出瞳直径的要求。

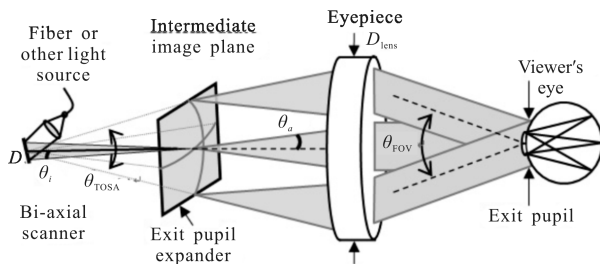


图 6 RSD 系统的光瞳扩展原理图

Fig.6 Optical schematic of RSD system including exit pupil expander

为增大目镜的出瞳直径,同时确保不会改变系统的视场角、扫描角和扫描镜直径,可在中间像面处放置 EPE 将发散角 θ_0 放大。采用衍射光学元件、透镜阵列、光纤面板或光散射器可以在不损失成像放大率和显示分辨率的前提下实现对发散角 θ_0 的放大,从而使系统出瞳直径得到扩展^[45]。衍射型和透镜阵列型 EPE 是利用光束的多级衍射在出瞳平面处产生一个紧密排列的多级次衍射出瞳阵列,由于每个级次的衍射光都包含了相同的被显示像素信息,当有一个或多个衍射级次光束进入瞳孔时就会在视网膜上获得图像的感知^[46]。

图 7 给出了显示波长为 532 nm 时,衍射型和双透镜阵列型 EPE 的出瞳阵列分布。为确保出瞳分布的均匀性,通常 EPE 的入射面都设计并加工成与中间像面的形状完全匹配的形式。

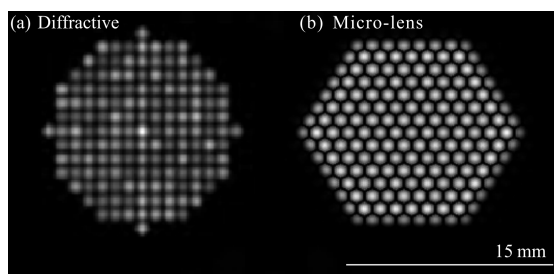


图 7 出瞳阵列分布

Fig.7 Exit pupil pattern

衍射型 EPE 适合单色光显示,对于彩色显示,每个级次的衍射角和波长成反比,不同波长的相同衍射级次无法重叠,致使目镜出瞳阵列产生严重的色差和非均匀分布。此外,衍射型 EPE 扩展出瞳的

均匀性会受到衍射级次强度分布函数、聚焦斑点尺寸、衍射周期、扫描光束轮廓等因素的影响。鉴于衍射型 EPE 的诸多缺点,可使用双透镜阵列的串联实现对目镜出瞳的扩展,通过合理控制透镜阵列的加工和装调误差,对彩色显示中的不同波长都能得到极佳的出瞳均匀性,且衍射效率可高于 90% ^[47-48]。

当 RSD 系统中不引入 EPE 时,为保证观察视场不丢失,就需要采用人眼跟踪系统保持 RSD 的出瞳准确跟踪观察者眼瞳的移动或转动,始终保持两者对准^[40,49-50],这种方法对电子设计提出了很高的要求,并且会增加头戴显示器重量。

3.6 激光扫描系统的安全性

RSD 使用激光作为光源,必须满足激光使用安全性的相关标准。美国国家标准规定的人眼最大允许曝光量(MPE)和可接受辐射极限(AELs)为分析激光扫描的安全性提供了依据^[51-52]。通常激光辐射对生物组织产生危害的参数主要包括输出能量或功率、波长、曝光时间等,按照功率大小又可分为四个级别^[53]。

人眼容易因观察激光而受到损伤,在激光引入视网膜扫描系统之初,对其安全性的研究就受到了重视^[20,54-55]。Klingbeil U 对激光扫描检眼镜安全性的分析结果表明,典型系统中照亮视网膜的激光功率水平低于人眼的 MPE,能够保证使用安全,该分析可作为激光照射视网膜安全性研究的重要基础^[56]。Erik Viire 等人采用不同的假设模型针对 RSD 系统的激光安全性进行的讨论表明系统中激光功率水平远远低于 MPE 值,即使长时间观察也不会对人眼造成影响^[57]。此外,RSD 系统采用的可调节半导体激光器可以控制激光的发光强度,采用逻辑电路设计可在扫描器异常的情况下断开光源,能够充分保证用户的使用安全。

4 结论

随着微光机电扫描器、新型调制技术、新型高效半导体激光光源和新一代光学器件(如全息波导器件、二元光学元件、自由曲面棱镜等)的普及应用和迅猛发展,视网膜扫描显示器将会继续朝着微型化、便携化方向发展。文中详细讨论了视网膜扫描显示器的工作原理、发展历史和关键技术研究现状。视网膜扫描显示器将扫描显示技术和头戴显示器光学系统设计理念相结合,凭借其在分辨率、对比度调节、亮度

调节等方面的独特技术优势,逐渐从最初的军事应用向工业辅助装配、机器人视觉系统、模拟仿真训练、教育、医疗、娱乐等众多应用领域扩展,具有重要的实用价值,值得人们对其进行更为广泛和深入的研究,相信随着研究的深入,必将带来更多更有价值的研究成果及应用。

参考文献:

- [1] Sutherland I E. A head-mounted three dimensional display [C]//Fall Joint Computer Conference, 1968, 33: 757-764.
- [2] Johnson R B, Driggers R G. Encyclopedia of Optical Engineering[M]. New York: Marcel Dekker, 2005.
- [3] Foote B. Design guidelines for advanced air-to-air helmet-mounted display systems [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays III, 1998, 3362: 94-102.
- [4] Ferrin F J. Update on optical systems for military head-mounted displays [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays IV, 1999, 3689: 178-185.
- [5] Ferrin F J. Current issues in helmet-mounted display systems for military applications [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays III, 1998, 3362: 71-79.
- [6] De Wit G C. Retinal scanning display for virtual reality[D]. Delft: Delft University of Technology, 1997.
- [7] Tidwell M, Johnston R, Melville D, et al. The virtual retinal display-a retinal scanning imaging system[C]//Proceedings of Virtual Reality World'95, 1995, 325-333.
- [8] Urey H. Optical advantages of retinal scanning displays[C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays V, 2000, 4021: 20-26.
- [9] Johnston R, Willey S. Development of a commercial retinal scanning display [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays and Symbology Design Requirements II, 1995, 2465: 2-13.
- [10] Webb R H, Hughes G W, Pomerantzeff O. Flying spot TV ophthalmoscope[J]. *Appl Opt*, 1980, 19(17): 2991-2997.
- [11] Webb R H, Hughes G W, Delori F C. Confocal scanning laser ophthalmoscope[J]. *Appl Opt*, 1987, 26(8): 1492-1499.
- [12] Yoshinaka K. Display Device, Japanese Patent: 61198892[P]. 1986-09-03.
- [13] Ashizaki K, Yamamoto M, Miyaoka S, et al. Direct Viewing Picture Image Display Apparatus, European Patent: 0473343 [P]. 1991-03-14.
- [14] Kollin J S, Tidwell M R. Optical engineering challenges of the Virtual Retinal Display[C]//SPIE, Novel Optical Systems Design and Optimization, 1995, 2537: 48-60.
- [15] Jacobs R J, Bailey I L, Bullimore M A. Artificial pupils and Maxwellian view[J]. *Appl Opt*, 1992, 31(19): 3668-3677.
- [16] Kollin J S. A retinal display for virtual-environment applications [C]//Proceedings of Society for Information Display, 1993, 24: 827-830.
- [17] Tauscher J, Davis W O, Brown D, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics [C]//SPIE, MOEMS and Miniaturized Systems IX, 2010, 7594: 75940A-1-75940A-12.
- [18] Urey H, Nestorovic N, Ng B, et al. Optical designs and system MTF for laser scanning displays [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays IV, 1999, 3689: 238-248.
- [19] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3): 199-216.
- [20] Belt R A, Knowles G R, Lange E H, et al. Miniature flat panels in rotary wing head mounted displays [C]//SPIE, Head-Mounted Displays II, 1997, 3058: 125-136.
- [21] Niesten M, Masood T, Miller J, et al. Scanning laser beam displays based on 2-D MEMS [C]//SPIE, Optics, Photonics, and Digital Technologies for Multimedia Applications, 2010, 7723: 77230U-1-77230U-10.
- [22] Holmgren D, Robinett W. Scanned laser displays for head mounted displays [R]. University of North Carolina, Department of Computer Science, Technical Report TR92-029, 1992, WWW. home page.
- [23] Niesten M, Sprague R, Miller J. Scanning laser beam displays [C]//SPIE, Photonics in Multimedia II, 2008, 7001: 70010E-1-70010E-10.
- [24] Holmgren D, Robinett W. Scanned laser displays for virtual reality: a feasibility study [J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1993, 2: 171-184.
- [25] Yalcinkaya A, Urey H, Brown D, et al. Two-axis electromagnetic microscanner for high resolution displays[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(4): 786-794.
- [26] Davis W, Sprague R, Miller J. MEMS-based pico projector display[C]//IEEE, 2008, 4244: 31-32.
- [27] Sprague R, Montague T, Brown D. Bi-axial magnetic drive for scanned beam display mirrors [C]//SPIE, MOEMS Display and Imaging Systems III, 2005, 5701: 1-13.
- [28] Miao Yongping, Liu Yongzhi. Investigation on laws of 2-D laser scanning [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(2): 27-30. (in Chinese)
- [29] Urey H, Dewitt F, Lopez P, et al. MEMS raster correction

- scanner for SXGA resolution retinal scanning display [C]// SPIE, MOEMS Display and Imaging Systems, 2003, 4985: 106–114.
- [30] Urey H, Wine D W, Osborne T D. Optical performance requirements for MEMS-scanner based microdisplays [C]// SPIE, MOEMS and Miniaturized Systems X, 2000, 4178: 176–185.
- [31] Urey H. Spot size, depth of focus, and diffraction ring intensity formulas for truncated Gaussian beams [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(3): 620–625.
- [32] Beiser L, Johnson R B. Handbook of Optics [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [33] Urey H. Torsional MEMS scanner design for high-resolution display systems [C]//SPIE, Optical Scanning II, 2002, 4773: 27–37.
- [34] Urey H, Wine D W, Lewis J R. Scanner design and resolution trade-offs for miniature scanning displays [C]// SPIE, Flat Panel Display Technology and Display Metrology, 1999, 3636: 60–68.
- [35] Patterson P, Hah D, Fujino M, et al. Scanning micromirrors: an overview [C]//SPIE, Optomechatronic Micro/Nano Components, Devices, and Systems, 2004, 5604: 195–207.
- [36] Urey H. Diffraction limited resolution and maximum contrast for scanning displays [Z]. Society for Information Display Digest of Technical Papers, 2000, 31(1): 866–869.
- [37] Stoll D. Retinal scanning leads HMD race [Z]. Photonics online, 1998.
- [38] Bayer M. Retinal scanning display: a novel HMD approach for army aviation [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays VII, 2002, 4711: 202–213.
- [39] Tidwell M. A virtual retinal display for augmenting ambient visual environments [D]. Seattle, Washington: University of Washington, 1995.
- [40] Bai Yu, Xing Tingwen, Jiang Yadong, et al. Design of head-mounted display optical system with DOE [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2753–2757. (in Chinese)
- [41] Jones R J M. Direct retinal imaging and virtual displays [C]//RTO HFM Specialists' Meeting on Human Factors in the 21st Century, Paris, France, 2001, 077: 6–1–6–8.
- [42] Rash C E, Mclean W E, Mora J C, et al. Helmet-Mounted Displays: Design Issues for Rotary-Wing Aircraft [M]. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2001.
- [43] Urey H. Diffractive exit-pupil expander for display applications[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(32): 5840–5851.
- [44] Urey H, Powell K. Microlens array-based exit pupil expander for full color display applications [C]//SPIE, Photon Management, 2004, 5456: 227–236.
- [45] Kollin J S, Johnston R S, Melville C D. Virtual retinal display with expanded exit pupil, United States patent: 5701132[P]. 1997–12–23.
- [46] Powell K, Urey H. A novel approach to exit pupil expansion for wearable displays [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays VII, 2002, 4711: 235–248.
- [47] Powell K, Lopez P, Malik A. Exit pupil expander: image quality performance enhancements and environmental testing results [C]//SPIE, Helmet-and Head-Mounted Displays VIII, 2003, 5079: 308–320.
- [48] Urey H, Powell K. Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays[J]. *Appl Opt*, 2005, 44(23): 4930–4936.
- [49] Järvenpää T, Aaltonen V. Compact near to eye display with integrated gaze tracker[C]//SPIE, Photonics in Multimedia II, 2008, 7001: 700106–1–700106–8.
- [50] Hua Hong, Gao Chunyu. A compact eyetracked optical see-through head mounted display [C]//SPIE, Stereoscopic Displays and Applications XXIII, 2012, 8288: 82881F–1 – 82881F–9.
- [51] Delori F C, Webb R H, Sliney D H. Maximum permissible exposures for ocular safety (ANSI 2000), with emphasis on ophthalmic devices [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(5): 1250–1265.
- [52] Wallhead I, Ocana R, Quinza P. Designing a laser scanning picoprojector. Part2: laser safety related issues [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(23): 5619–5626.
- [53] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(25): F79–F98.
- [54] Buckley E. Detailed eye-safety analysis of laser-based scanned-beam projection systems [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(3): 166–173.
- [55] Buckley E. Eye-safety analysis of current laser-based LCOS projection systems [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010: 1021–1057.
- [56] Klingbeil U. Safety aspects of laser scanning ophthalmoscopes [J]. *Health Physics*, 1986, 51(1): 81–93.
- [57] Viirre E, Johnston R, Pryor H, et al. Laser safety analysis of a retinal scanning display system [J]. *Journal of Laser Applications*, 1997, 9(4): 253–260.