

# 基于视觉生理的虚拟环境显示

李书印 万明习 行鸿彦

(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

**摘要** 为解决虚拟环境造成沉浸者不适之问题, 提出了满足视觉生理要求的和较完善的虚拟环境视觉系统设计方案, 即基于视觉内部机理和基于外部硬件新技术的两种方案。根据对虚拟环境的研究需要, 在基于视觉机理的解决方案中, 首次提出了明视深度这一新术语, 并详细阐述了明视深度的概念、原理及测量方法, 从而为有效地避免头晕、眼胀等不良反应而进行的视觉系统设计, 增加了新的理论依据; 在基于硬件技术的解决方案中, 还结合眼球跟踪系统、液晶微电脑眼镜等新技术, 分析了其应用原理及优缺点。最后讨论了人类视觉的自适应能力。

**关键词** 虚拟环境 视觉生理 视差

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-896X(2001)02-0172-06

## Virtual Environment Displays Based on Visual Physiology

LI Shu-yin, WAN Ming-xi, XING Hong-yan

(School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** Virtual environment (VE) is always involved in some visual deficit. In order to avoid causing visual problem by VE, two approaches for design of display system are presented, which are based separately on the inner mechanism of vision and on new technique of system hardware. In the first approach, for further study on VE, a new term named "the depth of field in vision", which is the max scenes depth imaging clearly on retina when the eye status mainly for vergence and accommodation is fixed, is presented for the first time and is illustrated detailedly with its concept, principle and measurement method. This offers a new theory infrastructure for display system design to make immersion more comfortable against dizziness, eyestrain etc. In the second approach, the principle, application as well as their advantage or disadvantage of some new techniques in VE such as eye tracking system, liquid crystal glasses with microcomputer are analyzed. The adaptive capability of human vision is also concerned at the end of the paper.

**Keywords** Virtual environment, Visual physiology, Binocular parallax

## 0 引言

虚拟环境(Virtual Environment)技术提供了以人为核心的人机交互模式。它使用户沉浸于由计算机创建的三维虚拟场景中, 而且为用户提供了趋于自然的交互手段。随着虚拟环境技术应用领域的日益广泛, 如战场仿真、建筑设计、飞行模拟、科学研究等, 有关其缺点的报道也越来越多<sup>[1, 2]</sup>, 比较典型的一点就是虚拟环境的显示方式存在使人头晕、眼睛发胀甚至恶心等问题<sup>[3, 4]</sup>。对此, 作者曾进行过深入

的分析<sup>[5]</sup>, 并总结出了现实世界在映入双眼后所具有的如下3个特征:

(1) 为双眼提供了具有位差的两幅图象, 映入双眼后会形成立体视觉所必需的视差;

(2) 视标所发出光线的散开度与眼物距以及双眼所处的状态相辅相成;

(3) 各非主视对象以其该有的清晰度或模糊度成象于视网膜上。

其中, 特征1是虚拟世界同样也具有, 与现实世界没有什么不同, 而特征3尽管所说的非主视对象绝大部分成象于视网膜的中心凹处以外, 且会使

双眼产生生理性复视现象,但由于对视觉生理的违背程度极弱,且对视觉心理产生的影响也很小,故也可以忽略不计.这样,如何使虚拟环境在视觉中的反映尽量满足特征 2 便成了问题得以解决的关键.对此,本文提出了两种解决方案,并首次提出了“明视深度”这一新概念.

## 1 基于视觉内部机理的解决方案

由于虚拟环境与现实世界之间尚存在着难以克服的差别,即虚拟环境中的虚拟对象容易使双眼协调配合的辐辏和调节功能发生冲突,因此人们只能设法缩小这种差距.

### 1.1 明视深度概念的提出

视网膜作为完成视觉功能的重要组织,其中含有大量的锥体和杆体细胞.当物体发出的光线正好聚焦于视网膜上时,无疑此时成象最清晰;当物体一直向前或向后运动,而眼睛的状态保持不变时,光线便会聚焦于视网膜之前或视网膜之后,此时图象会变得越来越模糊,但由于图象并不是从清晰突然变模糊的,而是有一个逐渐变化的过程,加之视觉感光细胞本身具有一定限度的分辨力,因此清晰不是绝对的,而是有一定限度、一定范围的(这里对“清晰”的界定是以日常经验作为衡量标准).由此说明,未能刚好聚焦于视网膜之上,而是聚焦于视网膜之前或之后的图象未必就是不清晰的图象.事实证明,聚焦于视网膜前后一定范围内的图象均可以看作是清晰的图象.其实,摄影术中的“景深”概念与视网膜细胞的分辨力也有着极其密切的关系,虽然它们表面上是调焦的结果,可是实际上照相机与眼睛的成象原理是一样的,不同的仅仅是,照相机是通过调节镜头与胶片的距离来调节焦距,而眼睛是通过改变晶状体的屈光度来调节焦距,这种屈光度的改变本身就是双眼调节作用的体现,它同时又与双眼的辐辏作用密切相关.这里需要提出一个适用于眼睛的、与景深概念类似却又有所不同的术语,即本文称之为“明视深度”的术语.大家知道,当双眼固视 2m 处的物体时,1m 处的物体很可能会聚焦于视网膜稍后,而 5m 处的物体则很可能会聚焦于视网膜稍前,但两者均会清晰成象,并在双眼中呈现生理性复视现象.而实际上,眼科学中“近点”的定义原本为能看清的最近点,其内在含义即为能最大限度地成象于视网膜之后,并保持清晰的点,如图 1(a)所示;“远点”

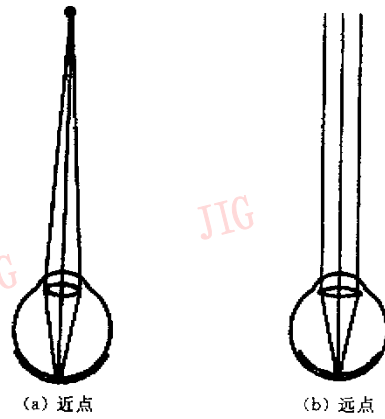


图 1 近点及远点示意图

的定义为能看清的最远点,其内在含义则为能最大限度地成象于视网膜之前,并保持清晰的点,如图 1(b)所示.

在眼球状态可调的情况下,与最大限度保持清晰聚焦于视网膜前及视网膜后这段区域相对应的三维场景深度即为人们能看清的全部世界,也即远点与近点之间的世界.而明视深度则是在眼球状态固定时,即固视某一物体时,其前后仍能清晰成象的最大三维场景深度(如图 2 所示).虽然此时伴随着非主视物体在双眼中的生理性复视现象,但这点无关紧要,它仅仅是双眼成象的必然结果.

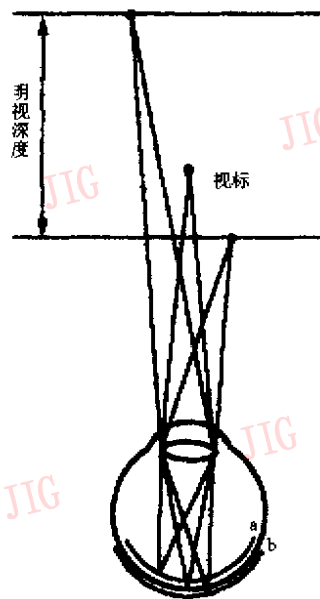


图 2 明视深度示意图

这里需要说明的是,随着固视物体远近的不同,最大限度地清晰成象于视网膜之前或之后的程度也是不同的,因为它受晶状体屈光度的直接影响,即屈光度越小,清晰成象于视网膜前后的程度越大,明视

深度也越深,反之亦然。

### 1.2 明视深度的测量

图3是笔者设计的明视深度测量仪器原理示意图,设计仪器总长为5m,A、B之间的距离可调,但要求保证与双眼的瞳距相等,其上方的两个圆孔是双眼的观察孔;AD和BC代表两条滑轨,由于E点代表视标的圆辊铰连,且该圆辊可前后移动,因而C、D两点的位置及其距离由A、B和E3点来决定;C、D两点的上方设置了完全相同的两个图案框,供双眼合象用,而且这两个图案框始终保持并排放置,同时还可在两条滑轨上自由移动,即它们与视点的距离及它们彼此之间的距离可调。另外,两观察孔上还配有小角度三棱镜镜片,这是为测量范围超过5m时而设置的,而且通过三棱镜的基底朝内对称放置的方式可进一步散开视轴和增加望远距离,但在5m的范围内,三棱镜的基底要朝上或朝下放置,以便它不对视线发生相对的改变作用。

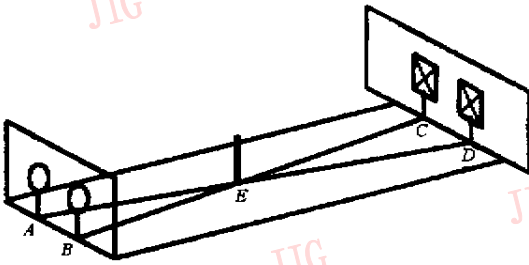


图3 明视深度测量仪器原理示意图

测量时,首先按瞳距调整好A、B间距离,让眼睛对准观察孔,同时确定视标圆辊的位置,再不断前后调整两图案框与视点的距离,并让双眼注视圆辊,且注意力也放在圆辊上,同时感觉图案框的清晰程度,并记录下图案清晰的临界范围及其与眼睛的距离,然后改变视标圆辊的位置,重复上述步骤,并记录下数据。当测量范围超出5m时,将三棱镜基底相对内旋,以便测量更远距离的明视深度数据,测量步骤同前,但计算时需要将三棱镜的度数换算进去。

### 1.3 明视深度理论分析

由于远处物体发出的光线散开度较小,视角也很小,且远处不同物体之间的入瞳光线散开度相差不大,故望远时,明视深度非常大;另外,由于视近时光线散开度较大,且不同物体的入瞳光线散开度差距也较明显,故看近处时,明视深度较小。其大致走势如图4所示,图中的两条曲线是对应眼物距变化时的前后极限清晰范围,而两条直线则分别是两条曲线的渐近线,这样,明视深度即是指与眼物距坐标

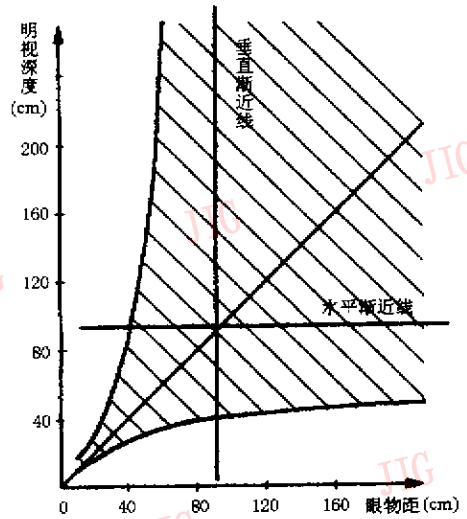


图4 眼物距与明视深度的关系

对应的两条曲线内(图4阴影部分)的平行于纵坐标轴方向的线段或射线。由图4可见,当眼物距较小时,明视深度也较小,但随着眼物距的匀速增加,明视深度则急剧增加。当眼物距超过某一临界值(如90cm)时,明视深度变化率达到最大,并开始降低。表1给出了部分参考数据。

表1

眼物距 (cm)	明视深度 (cm)	说明
10	10 ~ 18	明视深度很小
40	25 ~ 90	明视深度有所增加
65	36 ~ 15 000	明视深度剧增
80	39 ~ 10 <sup>5</sup>	明视深度继续剧增
90	40 ~ ∞	明视深度最大
∞	90 ~ ∞	明视深度有所减小

注:本数据是笔者对几个受试者测得的大致数据,仅供参考。鉴于“明视深度”这一术语在眼科学中尚未曾出现过,在这里出于对虚拟环境的研究需要,被首次提出,其实用数据还有待于今后进一步测量。

表1数据中隐含了这样一个事实,即往往刚好聚焦于视网膜之上的物体并不是双眼凝视的视标,而是视标之前或之后的某一物体,且注视的物体又未能刚好聚焦于视网膜之上,而视觉的这一特征正是明视深度概念提出的基础,至于视标的位置与明视深度的关系,由表1中的数据可以看出,它与照相机的景深参数分布是一致的,即如果固视90cm处的物体时,最近能看清40cm处的物体,而固视40cm处的物体时,最远能看清90cm处的物体。

参考该数据,即可将发出相同光线散开度的虚

拟场景显示屏置于距眼睛约 80cm 处(可通过凸透镜改变光路的聚光作用,将近处物象拉向远处的光学方法来实现),即相当于调节固定,这样既可以获得较大的明视深度(其范围为眼前约 39cm 处至 1km 远),又有适中的视差存在。由于无论双眼辐辏是定位于 39cm 处的物体,还是 1km 远的物体,该范围内的虚拟场景都是按 80cm 处虚拟物体的光线散开度而进入眼睛的,且均能清晰成象于视网膜上,因而无需调节或只发生极其微弱的、视生理容易接受的相对调节,这是因为对于心理上认为清晰的图象,视神经系统是不会刻意运用调节作用的。若要增加立体感,则需要增加视差,即需要在光学上缩短显示屏与眼睛之间的距离,这样明视深度亦随之减小,同时应该尽量使虚拟环境中最远与最近的物体限制在明视深度以内,这样既能获得最大程度的三维深度感知,又能最大限度地满足视觉生理要求。一旦虚拟物体位于明视深度以外,则会因成象模糊,而改变调节作用,从而发生超出视生理接受能力的现象,造成双眼调节与辐辏的冲突,时间稍微一长,便容易使人感觉不适。当然不能为了增加立体感,而使虚拟物体距离眼睛太近,或者距离眼睛太近的时间过长,否则会因调节过大,而发生视觉疲劳现象。当然这点不是虚拟环境的弊端,而是正常视觉生理本身的特性。

从以上分析可以看出,立体感与明视深度是一对矛盾,若立体感越强,则明视深度越小,也容易造成观察者的不适,若明视深度越大,则立体感越弱,这种情况虽然容易使人适应,但虚拟环境三维感不强,由此可见,根据具体的情况需要,来找到合适的显示参数,对创造一个比较完善的虚拟环境至关重要。而且若能够适时进行多参数之间的切换,则会使虚拟环境显得更加真实、理想。

#### 1.4 其他因素

立体视锐也称两眼视差角,其可由双眼视角最小的可辨阈来决定。由于当望无穷远时,两眼视轴夹角趋于零,因而无立体感可言。从一瞳距为 60mm 的受试者的测试结果来看,若眼物距达到约 1 200m 以上时,便超出了立体视觉半径,则此时另一物体即使在无穷远处,也分不出两者的远近<sup>[6]</sup>,因此设计虚拟环境显示方案时,应充分考虑这一特性,以减小其复杂度;另外,依据正常的视觉生理状态,当望无穷远时,由于大多数人的双眼视轴并不是完全相互平行的,而是双眼呈一定的内斜状态存在,因此,在设计虚拟场景时,要注意不要让双眼视轴达到平行状态,

否则容易引发头晕等不适感。同时还要注意考虑瞳距在这里所起的作用,因为不同的人,其瞳距是不一样的。

## 2 基于外部硬件的解决方案

眼球跟踪器或视觉跟踪系统不仅可以用红外或其他的光学方法来跟踪眼球的运动,以便对眼睛注视的虚拟物体进行某些操作或控制,比如为了协调分辨率与计算速度之间的关系,可令注视的虚拟物体以高分辨率显示,而其周围以低分辨率显示,而且这些技术的出现与日趋成熟,也为解决虚拟环境中虚拟物体发出的入瞳光线的散开度与眼物距之间的协调提供了一种新的可能和技术手段,例如,当视点由一虚拟物体对象转向另一物体对象时,这种跟踪设备即能识别出来这种变化,并将其实时传给计算机系统,以便计算机系统立刻作出相应反应。为了满足视觉生理的要求,计算机系统有以下 3 种反应方式可行:

(1) 通过不断调整两幅图象中主视物体的相对位置及图象位差,来确保视觉生理的要求。

如图 5 所示,若使物体 A 位于显示器中心,则当双目固视物体 A 时,可得到最大的立体视野,由此确定双眼辐辏角及合适的凸透镜的屈光度,以保证虚拟物体发出的入瞳光线散开度与眼物距(指眼睛与虚拟物体之间在光学上的距离)相符,然而此时位于物体 A 以远或以近的物体,如物体 B,却不满足该

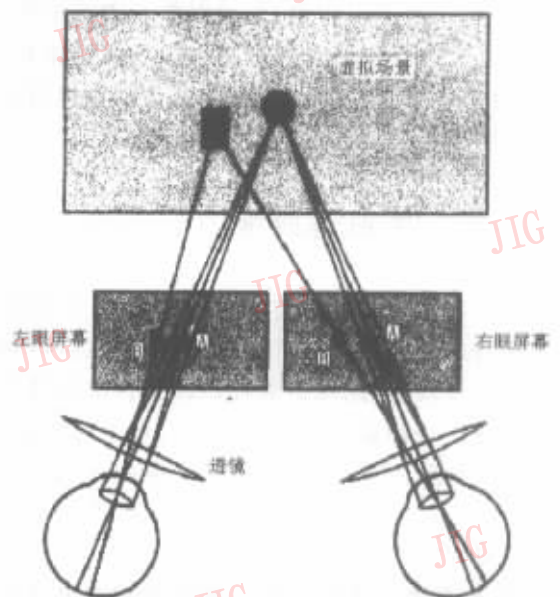


图 5 基于辐辏固定的调整方法

种辐辏角,从而与凸透镜的屈光度不协调,因此当双目由物体 A 转向物体 B 时,再令计算机生成以物体 B 为中心的图象,如此可以保证虚拟环境始终满足基于辐辏固定的视觉生理要求.该方式的优点是可以一直控制双目显示器在视觉中的完全重合,来获得最大的立体视野,而缺点是对于立体象对的调整可能会使连续的虚拟空间发生大变形或视点突变感;

(2)使双目显示器的位置可调,通过动态地控制其相对距离,来满足调节与辐辏的关系;

仍以图 5 为例,当双目由物体 A 转向物体 B 时,计算机控制系统开始通过调节两个显示器的相对位置,来达到视觉生理要求,其特点是视点跟着视标走,始终保持固定的距离,而缺点是视野的大小直接受物体在图象中所处位置的影响,同时因双眼屏幕不重合,而可能产生的屏幕边缘对物体的遮挡效果,也会严重影响观察者对深度感的正确判断<sup>[7]</sup>.

该方法与方法 1 一样,也是基于辐辏固定的调整方法;

(3)可变焦的、由微电脑芯片控制的液晶眼镜的出现,为虚拟环境的视觉问题提供了一种基于调节固定的解决方案,即通过变焦的方式动态地改变虚拟环境与眼睛之间的距离来进一步保证主视虚拟物体入瞳光线的散开度与双眼的辐辏作用相一致.

上述 3 种调整方法各有特色,其对虚拟环境的真实感与沉浸性的影响如何,还有待于更进一步的研究,但有一点可以肯定,与运用单一方式相比,上述 3 种方式的有机结合一定使虚拟环境更加真实、舒适,再结合明视深度的合理运用,定会使虚拟场景显示更加尽善尽美.

### 3 基于人类自适应能力的特性

人作为一种高级生命,本身便具有一种极强的适应能力.由于虚拟环境中作业的过程也是一种逐步适应的过程,因此观察者可以在这种虚拟环境中为自己建立一种新的与以往不同的经验,进而习惯和适应这种新的环境.这一点从大量的近(远)视患者那里已经得到了证实,如,由于近(远)视眼镜本身改变了原来世界的光路,因此人们配戴初期大都感觉不适,且眼前的世界有晃动现象,但经过几天的适应后,都能自然地习惯和接受这一新的状态.这点也证明了本文前面提出的“明视深度”概念及原理的实

用性及可信性.

在虚拟环境中,无论显示系统设计得多么合理,当观察者为了观察周围场景而转动头部时,原本应该静止不动的对象必然会出现微弱程度的变形、晃动现象,这一现象就是光路改变的结果,也是虚拟环境的固有特性,笔者认为这点光靠技术是解决不了的,而克服它的唯一办法就是依靠人类极强的适应能力,即多在虚拟环境中锻炼,便会习惯和适应,也就会在心理上认可这一“晃动”的状态,并自然地将其转化为静止状态.

当然,能良好感受虚拟环境的人必须具有正常的辐辏与调节功能以及双眼单视和生理性复视功能,还要有健康的视觉感觉通路和运动通路,以及正常的裸眼或矫正视力.

### 4 结束语

虚拟环境技术主要有 CAVE 式、HMD 式,其中, HMD 式 VR 的显示方式因其光学器件较多,相对较复杂,且容易引起不良反映,而 CAVE 式 VR 则较简单,它是通过液晶开关眼镜来观看大屏幕,相对容易适应一些.对于常规的视觉系统,10min 左右便可能出现不良反应,对此 Simon 等已经研究设计出了沉浸于虚拟环境中长达 30min 而不出现不良反映的 HMD 系统<sup>[8]</sup>,从而大大增加了人机交互的协调与和谐.如今虽然虚拟环境技术在视觉方面还存在许多难以克服的问题和缺陷,但是基于对视觉生理的充分理解和把握,以及随着高新技术的不断完善与应用,加上人类极强的适应能力,我们深信,虚拟环境显示技术将越来越完善,其走向大众、走向家庭是发展的必然趋势和结果.

### 参 考 文 献

- 1 Brooks F P. What 's real about virtual reality? [http://www.veli.uh.edu/web\\_page/Keynote/Keynote.htm](http://www.veli.uh.edu/web_page/Keynote/Keynote.htm).
- 2 Eugenia M K, Richard D G. Simulator sickness and related findings in a virtual environment. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 1998, 2:15111515.
- 3 Wolfgang J, Herbert H, Hannegret K. Preferred position of visual displays relative to the eyes: A field study of visual strain and individual differences. Ergonomics, 1998, 41(7):10341049.
- 4 Tetsuya M, Tatsuo U. Cause of fatigue and its improvement in stereoscopic displays. Proceedings of the Society for Information Display, 1990, 31(3):249254.
- 5 李书印,万明习,李新肖等.虚拟环境中的视觉感知.中国图象

图形学报 2000, 5A(11):906910.

- 6 徐广第著. 眼科屈光学. 北京: 军事医学科学出版社, 1995.
- 7 Ware C, Gobrecht C, Paton M A. Dynamic adjustment of stereo display parameters. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part A: systems and humans, 1998, 28(1):5665.
- 8 Simon R, Mark M-W, John P W. Binocular vision in a bi-ocular world: New-generation head-mounted displays avoid causing visual deficit. Displays, 1994, 15(4):255260.

李书印 1967 年生, 西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程专业博士生. 现主要从事医学可视化、虚拟现实技术、神经网络应用等方面的研究工作. 已发表论文近 10 篇, 专利 3 项.

万明习 教授, 博士生导师, 现为西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程系主任. 主要在生物运动估计及其应用, 医学超声和嗓音学与声带振动, 医学可视化等领域从事应用基础研究和应用研究. 发表学术论文 80 余篇, 教材 3 部.

行鸿彦 1962 年生, 1983 年获电子工程学士学位, 1990 年获电子仪器硕士学位, 现为西安交通大学电信学院生物医学工程系博士研究生. 主要研究方向是医学信号采集与处理、小波分析及图象应用、医学仪器等. 已发表论文 8 篇.