

# 虚拟环境中的视觉感知

李书印 万明习 李新肖 刘凯文

(西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

**摘要** 通过对现实世界、平面图象的视觉成象方式的比较, 指出虚拟环境成象方式是二者相结合的产物. 在论述虚拟环境所提供的视差对三维深度感知重要性的同时, 结合视觉生理特点, 分析总结了虚拟环境所具有的缺陷, 即违背了视标所发出的入瞳光线的散开度与双眼所处的状态应该相辅相成这一规律, 指出了虚拟环境给人造成头晕、眼睛疲劳等不良反应的根源是虚拟对象容易使双眼的辐辏和调节功能发生冲突. 最后列举并分析了刷新延迟、分辨率、瞳距等各种可能给观察者带来不良反应的诸多因素.

**关键词** 虚拟环境 视觉生理学 视差 三维深度感知

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)11-0906-05

## Visual Perception in Virtual Environment

LI Shu-yin, WAN Ming-xi, LI Xin-xiao, LIU Kai-wen

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

**Abstract** This paper proposes that the way of imaging on retina in virtual environment(VE) is the combination of both the imaging way of the real world and that of planar images. Since the binocular parallax is important for the three-dimension depth perception, we found that the problem with conventional VE in vision lies in the inconsistency of divergent degree of light with the binocular status. It is also emphasized that the reason of that conventional VE easily causes some persons dizziness and eyestrain is because virtual objects usually make binocular vergence and accommodation conflict. At last, this paper lists and analyzes some factors which might bring discomfort such as delayed effects, resolution, interpupillary distance and so on.

**Keywords** Virtual environment, Visual physiology, Parallax, Three-dimension depth perception

## 0 引言

虚拟环境(Virtual Environment), 也称虚拟现实(Virtual Reality, 简称VR), 最早由 Ivan Sutherland<sup>[1]</sup>于1965年提出, 它是继多媒体之后又一个在计算机界引起广泛关注的研究热点, 也是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机系统. 它借助头盔显示器(HMD)、立体声耳机、数据手套、数据衣、力反馈系统等特殊装置, 通过更加接近自然的视觉、听觉、嗅觉、触觉等方式作用于用户, 使之产生身临其境的感觉. 它现已广泛应用于飞行模拟训练、科学可视化、建筑设计、飞机船舶制造、化学分子实验等诸多领域. 由于头盔显示器实现了具有深度感的三维场景显示;

而立体声耳机可以使人判断出声音传来的方位; 数据手套、数据衣则能够将人的姿势数据传入计算机, 并可以通过力反馈系统给人以作用于虚拟物体的力的感觉等等, 因此这一全新的人机交互方式为它的未来展示了极其美好的应用前景. 世界各国, 尤其是美国、欧洲、日本, 都竞相研究和开发该技术. 近几年, 虚拟现实技术已开始向多计算机系统和分布式技术、高速网络下的远程通讯技术、多用户交互技术等方向发展, 并日趋完善. 可以肯定, 虚拟环境在不远的将来, 必将深入到现实生活的方方面面, 给我们的日常生活、娱乐、工作和学习带来巨大的变革.

然而, 虚拟环境终究是虚拟的、不真实的, 加之现有技术尚处于发展阶段, 远未达到尽善尽美的地步, 它不可能替代真实世界给人的感受<sup>[2,3]</sup>, 如, 由于

头盔显示器的图象分辨率低, 且延迟时间较长, 因此破坏了其沉浸感; 而人耳轮廓的千差万别又使立体声的实现更加困难; 跟踪器的范围及其精度也降低了交互的有效性; 另外, 还有力反馈和触觉反馈装置也只能有限地模拟一些相对简单的力和触觉等等. 在虚拟环境的研究征途中, 有些技术难题的解决, 如跟踪器的性能等的提高, 只要等待一段时间即可望解决; 而有些问题, 如占摄取外界信息 80% 以上的视觉适应性问题, 则似乎是一条永远难以逾越的鸿沟. 鉴于已有不少关于虚拟环境的显示方式存在使人头晕、眼睛发胀, 甚至恶心等问题的报道<sup>[3~6]</sup>, 因此本文拟从视觉生理方面入手, 来讨论、分析虚拟环境存在的视觉问题, 从而为问题的进一步解决提供一定的方向和依据.

## 1 眼屈光系统简介<sup>[7,8]</sup>

人类的视觉系统具有非常复杂的结构, 这种结构特点为人眼对事物的感知提供了极其细微的分辨能力. 眼屈光系统包括角膜、房水、晶状体、玻璃体、瞳孔以及视网膜等.

正常情况下, 人的双眼具有辐辏和调节两种功能. 如为看清物体, 改变眼的屈光力的现象就是调节作用; 而辐辏也叫集合, 是指注视近处目标时, 双眼同时内收的现象. 二者既关系密切、互相协同、联合运动——调节随辐辏的增加而增加, 亦随辐辏的减小而减小, 同时又各自保持较微弱程度的独立性, 即存在相对调节和相对辐辏. 当望远时, 辐辏作用降低, 两眼球相应外旋, 并对准远处视标, 此时由于射入眼睛的远处物体光线散开度较小, 趋于平行光线, 因此伴随着调节作用的放松, 远处视景可以清晰成象于视网膜之上, 此时晶状体呈扁平状(如图 1); 当双眼看近处物体时, 由于两眼球内旋, 辐辏作用增加, 同时调节作用增强, 此时虽然入瞳的近处物体光线散开度较大, 但因屈光度增加, 因此仍能清晰成象于视网膜上, 且此时晶状体变凸(如图 2), 因而相对调节是指固定辐辏作用时所能运用的调节作用; 相对辐辏则是指在调节固定的情况下所能运用的辐辏作用, 而且这二者的变化幅度都比较小. 在正常用眼情况下, 这种相对调节或相对辐辏现象不易发生, 但当眼前增加了某种光学元件, 如透镜、棱镜等时, 则常常发生这种现象. 这种现象改变了正常的视觉生理机能, 会导致调节和辐辏关系的不和谐, 甚至相互冲突.

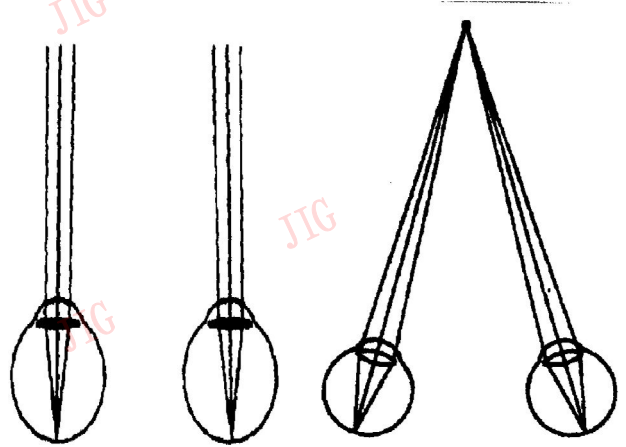


图 1 眼球望远时的状态 图 2 眼球近视时的状态

## 2 现实世界的视觉感知

通过双眼调节和辐辏的关系可以看出, 视标的远近变化与双眼状态的改变相辅相成. 更进一步地说, 视标所发出光线的散开度与眼物距(眼睛与物体之间的距离)相一致, 同时也与双眼所处的状态相一致, 即若光线的散开度越小, 相应调节作用越弱, 则辐辏作用也应该越低, 这又说明眼睛与物体的距离越远; 反之, 若光线的散开度越大, 调节越强, 则辐辏作用越高, 眼物距也越近. 至于位于视标以远或以近的各个物体, 由于它们发出的入瞳光线的散开度各不相同, 虽然双目主视对象不是这些物体, 但它们仍然以其该有的模糊度(或清晰度)成象于视网膜上. 图 3 显示了双眼按某一固定距离凝视物体 A 时, 近处物体 B 的成象情况. 此时的 B 物体很可能并未恰好聚焦于视网膜之上, 而是聚焦于视网膜之后.

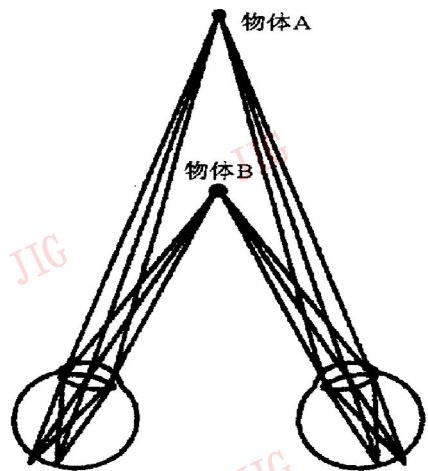


图 3 眼球望远处物体时近处物体的成象情况

由于双眼之间有一定的距离, 所以三维现实世界映射于双眼后, 会产生双眼单视和生理性复视现象, 即在左右眼视网膜上的成象是有一定细微差别的, 这

就谓之视差,加之人类是通过视神经的融象功能来感知周围环境的,因此这种左右眼中带有视差的图象经视神经中枢的融合反射,以及通过视觉心理反应便产生了三维立体世界.我们就可以根据经验轻易地判断出哪件物体在前,哪件在后,以及它们之间的大致距离.一般眼物距越近,则视差越大,三维感也越强;而眼物距越远,则视差越小,三维感也就越弱.

综上所述,现实世界是真正的三维立体世界,映入双眼后它具有以下3个主要特征:

(1) 为双眼提供了两幅具有位差的图象,映入双眼后即形成立体视觉所需的视差.这是最重要的特征;

(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) 三维世界中的非主视对象所发出的光线都分别以其各自不同的散开度射入眼睛,并以其该有的清晰度或模糊度成象于视网膜上.这是作用最微弱的一项特征.

### 3 平面图象的视觉感知

对平面图象的感知,人们似乎并不陌生,从电影、电视、风景照、挂历到计算机图象等等,无不都是三维场景的二维显示.为了增加计算机图象的真实感,还采用了如光照及浓淡处理、遮挡与消隐处理、透视投影等技术,但无论是计算机生成的图象还是拍摄录制的影象,人们仍然可以清楚地发现,图象场景中,远近不同的物体仍然处于同一平面内,而没有现实世界中那种强烈的远近深度感.图象与现实世界的这一差别的根源主要在于平面图象对双眼没有发生生理性复视现象,即没有视差存在.同时,由于较近的眼睛与平面图象之间的距离固定了双眼的辐辏角,使人们可以轻易地判断出图象中的远近物体都与眼睛保持着相同的距离(如图4).加之图象各点发出的入瞳光线散开度几

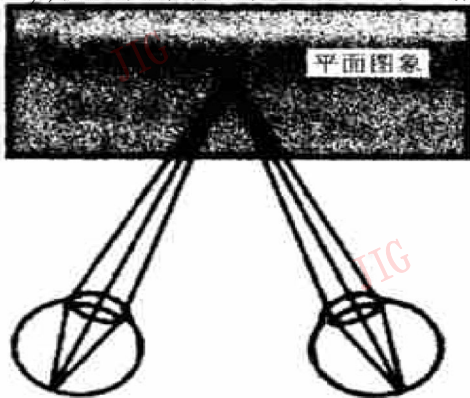


图4 平面图象成象状态

乎一样,故都以相同的清晰度成象,所以图象的平面感很强,如看计算机屏幕、电视、图片时,一般都有这种感觉,但对于观看电影等大幅面图象时,由于眼与图象距离较远,一般5m以上(医学上认为5m以外的物体发出的光线可以近似地认为是从无穷远处发出的),甚至更远,此时双眼辐辏角趋于零,入瞳光线趋于平行,因而双眼辐辏作用对距离的感知变得较弱,而视觉心理作用却使得三维深度感增加,故能获得较强真实感.若能使视野更加宽广,以接近于现实中的情况,无疑对视觉心理的影响会更加良好,因此人们更喜欢看宽银幕电影,而非遮幅式影片.

这里有一点需要指出,就是用双眼看平面图象与用单眼看现实三维世界感觉是不同的,虽然单眼看三维世界与平面图象一样也是没有视差,但一方面远近物体成象于视网膜的清晰度各不一样,更重要的是双眼的联动关系导致了被遮挡的眼睛仍然与视物的眼睛一起相应运动,所以深度感仍然比较明显地存在.对此,我们可以做个试验,就是用单眼看平面图象,最好是运动的图象,如电视节目、计算机游戏三维场景,仔细用心体会,会发现比用双眼看有较明显的三维深度感存在.之所以会发生这种现象,更多的是因视觉心理在起作用,并且也带动了一睁一闭双眼的辐辏运动.当然,对于运动的图象来说,这种三维深度感也有运动线索在起着一定的辅助作用.

从以上分析,即可知平面图象映入双眼的成象特征.当将平面图象视为现实世界中的一个对象时,它完全符合前面第2节总结的3个特征.但将其视为一个独立的对象时,双眼的辐辏与调节作用也同样相辅相成(如图4所示),其完全符合正常的视觉生理,仅仅是其三维场景的平面特性仍对视觉心理产生一定的影响.

## 4 虚拟环境的视觉感知

### 4.1 虚拟环境的视觉成象特点

虚拟环境视觉技术为了提供深度信息和增加真实感,人们采用了多种模拟现实世界的方式,如光照效果、消隐、纹理梯度、运动视差等等,但最重要的、有别于普通的二维显示技术的是,虚拟环境技术分别给左右眼提供了两幅带有位差的、不完全一样的平面图象.这点完全符合了上述第2节中论述的现实世界映入双眼的第一个特征,且这种双目视差是构成立体深度信息的一个至关重要的方面.由计算机生成的两幅

图象, 无论是运动的, 还是静止的, 对于某一时刻来说, 由于左右两帧图象的差别是按照一定的、满足视觉融象功能(Panum 融象区) 的规则来生成的, 因此映射入双眼视网膜的两幅图象在由视神经中枢融合后, 便产生了三维深度感知, 由此即可以判定物体的前后左右位置, 由此可见, 虚拟现实显示技术较常规的基于平面的三维显示技术有了实质性的突破, 但由于为眼睛提供信息的是平面图象, 同时又是两幅, 这种方式无疑将双眼的调节与辐辏分离开来, 因此注定了虚拟环境技术的成象特点是介于现实世界与平面图象之间. 也就是说, 虚拟环境显示方式势必具有违背视觉生理的与生俱来的先天特性.

虽然虚拟环境系统生成的两幅图象在映入视网膜之后, 也可产生立体感的视差, 且如同现实世界一样, 视线也可以聚焦于虚拟环境中的任意虚拟对象上, 但是具有明显深度感的、前后位置各不相同的各个虚拟对象, 不但没有发出与其所处位置相对应的散开度的光线, 而且和平面图象一样, 各对象发出的入瞳光线的散开度却相互几乎一致(如图 5 所示).

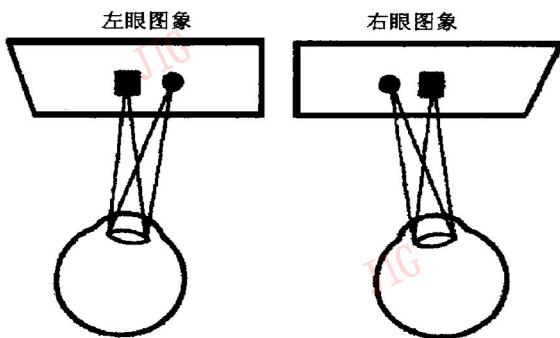


图 5 虚拟物体发出的光线

虽然图中的方形物体很远, 圆形物体很近, 但它们却都以几乎相同的清晰度成象于视网膜上. 这一点完全违背了第 2 节中总结的现实世界反映于视觉的第二、第三特征, 尤其是第二特征, 亦即违背了正常的视觉生理. 特别是在观看虚拟环境中位置较远的虚拟物体时, 需要降低辐辏作用, 因而与辐辏作用有着密切联动关系的调节作用亦应随之放松, 然而为了成象清晰, 该虚拟物体所发出的散开度较大的光线却要求调节作用增加(如图 6 所示); 或在观看虚拟环境中位置较近的物体, 需要增加辐辏作用时, 具有较小散开度的光线却要求睫状肌减小其调节作用, 由于这两种情况都增加了相对调节作用, 因此当这种相对调节的幅度超过了一定的限度时, 则势必使视觉机能产生更加强烈的不良反应, 即双眼调节和辐辏作用会由不和谐发展至相互冲突. 前一种情况常常见于 HMD 式

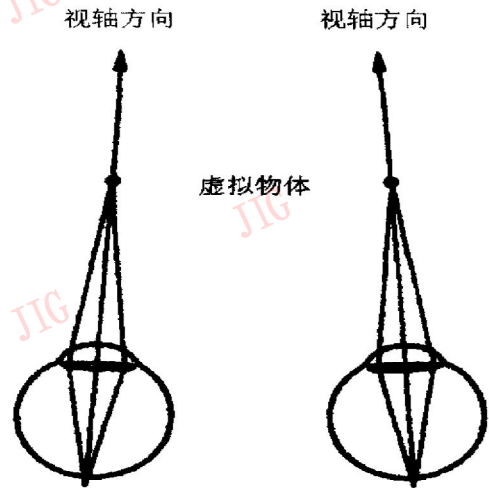


图 6 虚拟物体违背视觉生理示例

VR 之中, 后一种情况在 CAVE 式 VR 系统中更容易发生. 由于现在的系统对眼睛均是采用基于调节固定的观看方式, 而屈光度可变的眼镜尚未普遍应用, 因而基于辐辏固定的观看方式还没有出现. 鉴于人与人之间存在着个体差异, 因此不同的人戴上头盔显示器或液晶开关眼镜一段时间后, 便会感觉出不同程度的头晕、视觉疲劳, 甚至出现眼胀、恶心等现象. 至于这种造成双眼调节与辐辏冲突的显示方式, 是否是引起观察者头晕、眼疲劳等现象的根源, Mon-Williams 等<sup>[9]</sup>通过严格的试验已给出了肯定的答案.

#### 4.2 虚拟环境显示中的其它视觉问题

现阶段, 头盔显示器的刷新频率较低, 延迟时间长, 且画面的不连续感还较明显, 这也会给相对较敏感的人造成类似晕车的头晕、恶心等不良反应. 同时, 由于分辨率不高, 视野又较窄, 且双目显示屏往往因不能完全重合, 而导致屏幕边缘与场景物体发生遮挡现象, 并造成双眼竞争, 故沉浸感受到限制. 这一切, 在给人带来新鲜感的同时, 也带来了一系列异样的心理感受, 进而可能引发观察者的不适感. 再者由于头盔显示器的显示方式光路复杂, 具有违背视觉生理及视觉心理的特点, 因此可以预测, 在分辨率与视野问题已经得到解决, 同时刷新频率也发展到 24 帧/s 以上, 甚至更高, 即无丝毫闪烁感之后, 当观察者为了观察周围场景而转动头部时, 虚拟环境中原本应该静止不动的对象(如应用于建筑设计中的虚拟大厦), 却会出现微弱程度的变形及晃动现象. 这一点同样也是一种很可能会引起不良反应, 且需要克服但却难以克服的现象.

另外, 由于虚拟环境给双眼提供了不同的两幅图象, 这两幅图象的相对距离决定了双眼的辐辏程度. 当望无穷远时, 理论上双眼视轴应该平行, 但实

实际上,在正常生理状态下,因视觉感光细胞本身具有一定的分辨力,故两眼是偏于轻微内斜的,即视轴很难达到真正的平行状态.但由于现实中不同人的瞳距是不相同的,所以一旦出现了使观察者视轴平行甚至超过了平行,交点出现在脑后时,也将容易引发头晕、眼疲劳等现象.对此,笔者曾做过试验,年龄越大,越容易出现不适感,而年轻一些的(如中小學生),因晶状体弹性好,调节力强,所以适应性好,不良感觉出现得较晚,或根本就不出现.

### 4.3 总结

从以上分析可知,现实世界是真三维世界,平面图象是纯二维世界,其三维渲染仅属于模拟现实的效果处理,而虚拟环境则由于是平面图象与现实世界两种显示方式相互交叉而诞生的一种显示方式,故其三维效果也是处于二者之间,只是更加接近,却又不可能真正达到现实世界的一种虚幻现象.虽然真三维世界给双眼提供了带有视差的图象,但并不是说,提供了视差就能生成与现实同样感觉的三维世界,还要与视野中各物体所处的状态相吻合,对于视觉来说,就是要保证调节与辐辏的协调一致.虚拟环境仅提供了视差,却无法提供适当的视觉机制,故它不应该算是真三维显示.由此可见,以现有的立体显示技术,欲在视觉感知方面达到真实世界的反应,几乎是不可能的,只能逐渐逼近,日趋完善.

## 5 结束语

虚拟环境技术的出现是计算机图形技术发展的必然结果.它不仅涉及到与图形学密切相关的用户界面技术、三维动画技术、多媒体技术等,更延伸到了人机工程、医学工程等领域,并进一步要求人机交互的协调与和谐.虽然虚拟环境技术在视觉方面暂时还存在难以克服的缺陷,但是通过对上述可能造成不良反应的各个因素的分析,我们深信,问题将不断获得解决,虚拟环境显示方式也必将越来越完善,虚拟现实技术仍将具有极其广阔的应用前景,仍将在更多的领域大显身手.

### 参考文献

- 1 Sutherland I E. The ultimate display. In: proceedings of IFIP Congress. Arlington, VA: Federation of Information Processing Societies, 1965: 506~ 508.
- 2 Brooks F P, Jr. What's real about virtual reality? <http://www.vetl.uh.edu/web-page/Keynote/Keynote.htm>.
- 3 Donald R L, Eugenia M K, Bruce W K *et al.* Side effects and aftereffects of immersion in virtual environments. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society, 1994, 2: 1154~ 1157.
- 4 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: 1511~ 1515.
- 5 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): 1034~ 1049.
- 6 Tetsuya M, Tatsuo U. Cause of fatigue and its improvement in stereoscopic displays. Proceedings of the Society for Information Display, 1990, 31(3): 249~ 254.
- 7 汪芳润. 近视眼. 上海: 上海医科大学出版社, 1996.
- 8 徐广第. 眼科屈光学. 北京: 军事医学科学出版社, 1995.
- 9 Mon-Williams M, Wann J P. Binocular virtual reality displays: When problems do and don't occur. Human Factors, 1998, 40(1): 42~ 49.



**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. 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. 主要从事生物运动估计及其应用、医学超声和嗓音学与声带振动、医学可视化等领域的应用基础研究和应用研究. 发表学术论文80余篇, 教材3部.



**李新肖** 1970年生, 现为西安交通大学电信学院博士生. 研究方向包括医学信息可视化、基于图象的三维绘制、交互实时绘制等.

**刘凯文** 1973年生, 现为西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程系硕士研究生. 研究兴趣是计算机图象及处理等.