

VR 交互体验中沉浸感与舒适度的平衡设计

张晓婷, 陆菁, 刘渊, 苏军强
(江南大学, 无锡 214122)

摘要: **目的** 虚拟现实技术让体验者获得亲临环境的感受, 而高沉浸感带来的眩晕往往让用户体验的舒适度大为降低, 沉浸感与舒适度是评价虚拟现实内容质量的两个重要指标。在实际开发过程中, VR 交互体验中沉浸感和舒适度的矛盾也是一直以来限制虚拟现实技术广泛应用的一个主要因素。本文从沉浸感和舒适度的概念及相关影响因素入手, 提出自然交互、稳定视觉和多通道刺激补偿综合设计的原则。**方法** 应用上述 3 种原则, 进行虚拟场景作品设计, 并与传统方法作品进行对比实验, 采用 5 点沉浸感量表和 SSQ 量表分别评价两组作品的沉浸感和舒适感。**结论** 综合设计原则对平衡沉浸感和舒适度有一定效用, 可以增强虚拟现实内容的沉浸感并有效降低虚拟现实运动症的发生率, 是一种没有副作用且可有效平衡沉浸感和舒适度的技术方案。

关键词: 虚拟现实; 沉浸感; 舒适度; 平衡设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)12-0091-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.12.012

Balance Design of Immersion and Comfort in Virtual Reality Technology

ZHANG Xiao-ting, LU Jing, LIU Yuan, SU Jun-qiang
(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

ABSTRACT: Virtual Reality (VR) technology allows users to experience the reality-like scene, while the vertigo caused by high immersion often reduces the comfort of users' experience. Immersion and comfort are two important indicators to evaluate the content quality of Virtual Reality. In the actual development process, the contradiction between immersion and comfort in VR technology has always been a major factor limiting the wide appliance of VR technology. Based on the concept of immersion and comfort and related factors, this paper puts forward the comprehensive design principles of natural interaction, stable vision, and multichannel stimulus compensation. Based on the above three principles, the virtual scene works were designed and compared with the traditional works. The immersion and the comfort of the two groups of works were evaluated by the 5 Point-Scale and SSQ Scale. The results show that the comprehensive design principles have a certain effect on balancing immersion and comfort, which can enhance the immersion of Virtual Reality content and effectively reduce the incidence of virtual reality motion sickness. It is a technical scheme without side effects and can effectively balance immersion and comfort.

KEY WORDS: Virtual Reality; immersion; comfort; balance design

近年来, 虚拟现实技术因其高沉浸感 (Immersion)、强交互性 (Interaction)、启发想象力 (Inspiration) 和智能性 (Intelligent) 的“4I”特征, 以及可以创造出生态学有效刺激呈现、及时反馈并灵活控制环境等优点, 因而得到迅猛的发展, 主要集中在医疗

康复训练、人因工程、军事以及娱乐等领域^[1]。随着一批成熟的头戴式显示设备的发布, 虚拟现实技术越来越受到消费者的欢迎, 从而涌现出许多线下体验店, 虚拟现实系统开发需求日益扩大, 相关的内容设计研究也越发受到重视。

收稿日期: 2021-02-15

基金项目: 国家社科基金艺术学青年项目 (17CG209)

作者简介: 张晓婷 (1982—), 女, 江苏人, 硕士, 江南大学副教授, 主要研究方向为虚拟现实技术。

虚拟现实技术让体验者获得亲临环境的感受,但是高沉浸感往往会带来一个比较明显的副作用,即眩晕。这让体验的舒适度大为降低,同时也是限制虚拟现实技术广泛应用的一个主要因素^[2-5]。沉浸感与舒适度是评价虚拟现实内容质量的两个重要指标,在实际开发过程中,两者存在着复杂的关系,以在虚拟现实交互体验中的运动方式选择为例,常用的运动方式有传送和平移两种,前者能很好避免晕动症的发生但是极大地破坏了沉浸感;后者则是沉浸感大大增强却容易发生晕动症,舒适度极大下降^[5]。

在虚拟现实的内容设计过程中,如何平衡沉浸感和舒适度是目前面临的一个共性问题。本文从沉浸感和晕动症的原理出发,探索虚拟现实内容设计中平衡沉浸感与舒适度的原则及融合技术,并运用到实际的案例中进行分析 and 对比其实验检验效果。

1 相关概念界定

虚拟现实即采用以计算机技术为核心的现代高技术所生成逼真的视、听、触觉一体化的、一定范围的虚拟环境,用户可以借助专门装备并以自然的方式与虚拟环境中的物体进行交互作用、相互影响,从而获得亲临对应真实环境的感受和体验^[6]。

1.1 虚拟现实中的沉浸感

虚拟现实中的沉浸感就是让人专注于当前的虚拟现实情境,感到愉悦和满足并忘记真实世界的情境感受。与真实世界的感觉越一致,沉浸感越强烈,参与、融入和代入感的程度就越高。沉浸的两个主要特征为心理享受和完全专注。沉浸体验的主要因素包括对行动迅速的反馈、行动和意识相融合、摒除杂念、自我意识消失和行动具有自身的目的等。

1.2 虚拟现实中的舒适度

本文中涉及虚拟现实中的舒适度主要指由于虚拟现实晕动症而引起的舒适度问题,而广义的舒适度还包括虚拟现实头显带来的额外重量等,但不在本研究的界定范围内。

引起舒适度降低的虚拟现实晕动症通常是由虚拟环境中视觉刺激引起的,眩晕是一种运动性或位置性幻觉,典型症状为脸色苍白、乏力、出冷汗、头晕、恶心或呕吐,因此又称虚拟现实视觉诱发运动病(Virtual Reality Visual Evoked Motion Sickness, VIMS)。目前对虚拟现实晕动症的发病原因尚不明确,其中最为突出的理论解释有感官冲突和姿势控制两种。感官冲突理论认为虚拟现实晕动症是前庭神经和体感的冲突所导致的。在虚拟环境中,用户在保持不动的情况下,即前庭接收的是静止信号,而视觉刺激产生自我运动的错觉,正是由于视觉系统和前庭系统的信息相互冲突导致了 VIMS 的发生^[7-8]。姿势控

制理论则提出虚拟环境中的视觉刺激可引起姿势的变化即身体的小位移。在虚拟现实交互体验中尽量避免晕动症的发生是保证舒适度最有效的途径。

2 平衡设计原则与方法

本文在长期 VR 交互设计体验的实践基础上,结合 Oculus 官方发布的最佳实践指南(Introduction to Best Practices),探索并总结出 VR 交互体验中平衡沉浸感与舒适度的设计原则——自然交互原则、稳定视觉原则和多通道刺激补偿原则。

2.1 自然交互原则

自然交互是指让用户能够不被打扰并从自然的、持续的反馈中获得信息,与视觉、听觉以及嗅觉等信号自然地进行隐式交流,与真实世界中的感知方式保持一致。该原则是虚拟现实高沉浸感和强交互性的保证,是虚拟现实内容设计过程中遵循的最重要的原则之一。

在自然交互原则下,保证用户可以在一定范围内任意移动并改变观看的方向,这是真实世界中最基本的交互方式,因此选择延时小于 20 ms 的头戴式显示设备并在虚拟现实随时保持头部的追踪是必要的。停止追踪用户的头部位置运动,如不响应头部运动的全场闪屏,都会极大地破坏沉浸感并造成用户的不舒适感;在真实世界中,用户可能会去观看任何角度的区域,因此虚拟场景设计也需要有观看四周的自由,在虚拟场景的细节设计时要考虑周全。传统的界面信息表达方式(如在用户前面加盖导识图像)都会破坏沉浸感,因此在内容设计时,可考虑与视觉、听觉以及嗅觉等信号自然地进行隐式交流来表达信息,如用场景中的物体来表达导识信息,或者用空间的声音来辨识方向等;关注虚拟场景的比例,当用户和周遭环境的比例发生变化时会产生视觉变化,让用户体验到周遭世界的宏大和广袤以及自己的渺小,有助于启发用户想象力,激发情绪反应。

2.2 稳定视觉原则

造成虚拟现实体验舒适度低的主要因素是虚拟现实晕动症,基于上文所述的晕动症发生原理,减少前庭与视觉系统的冲突是提高体验舒适度的有效途径,如果冲突是不可避免的,尽量不让大脑察觉这些冲突,需要在虚拟现实的内容设计过程中尽可能让用户在其所处的虚拟环境中有稳定的视觉,稳定视觉原则是虚拟现实中获得舒适度的基本保证。

在虚拟现实内容设计的过程中,与运动有关的参数设计都需要遵循稳定视觉原则,如运动的速度、加速度、减速度、停止速度和 z 轴速度等。其中加速度是导致感官视觉与前庭匹配失调的主要原因,但完全忽略加速度与真实世界的感觉是冲突的,因此根据虚

拟现实的场景寻找出最佳加速度数值，将不匹配所造成的感觉上的冲突持续时间和频率最小化是保证稳定视觉的有效途径。稳定视觉原则还包括避免垂直的线性震荡、相机的缩放和相机的运动特效等会引起视觉不稳定的因素。

2.3 多通道刺激补偿原则

心理学将人接受刺激和做出反应的信息路径称为通道，感觉通道有视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉等。据统计，人类获取信息 83%来自于视觉，11%来自于听觉，3.5%来自于嗅觉。虚拟现实中的自然交互与人类交流方式类似，获取信息的方式也应该是多通道的。目前的虚拟现实作品大多通过视觉感官单方面呈现，对其他通道的关注不足。在虚拟现实作品设计中，听觉和嗅觉对沉浸感的积极作用是不容小觑的。相关研究显示^[4]，当人们听到音乐时脑部和身体的活动模式与得到奖励而感到兴奋时是相同的，这种愉悦的感受会让大脑中的纹状体多巴胺系统分泌多巴胺，愉快的音乐可以作为对抗视觉诱发运动病的对策；而嗅觉系统是唯一的不经过丘脑就直接传输到杏仁核完成信息处理的感官系统，所以人们对气味有情感反应，且杏仁核紧靠大脑的记忆中枢，所以闻到某种气味会唤起回忆，更为重要的是，美妙的味道可以减少虚拟现实晕动症的发生^[5]。所以听觉和嗅觉的刺激与虚拟现实交互中的沉浸感与舒适度存在着紧密的内在联系。利用多通道刺激补偿原则，在虚拟交互体验中增加听觉和嗅觉的刺激不仅可以增强沉浸感，还能有效降低虚拟现实晕动症的发生，是一种没有任何副作用的平衡虚拟现实交互体验中沉浸感和舒适度的有效途径。

3 案例分析

为验证并检验上述 3 个平衡沉浸感和舒适度的原则，本文使用虚幻引擎 4 与 HTC vive 头戴式显示

设备创作虚拟现实交互体验作品。作品创造了一片水中森林，希望能够通过在虚拟世界中的体验化解都市生活中的种种焦虑与疲惫，让生活一片宁静与活力。在整个开发设计过程中，作品始终遵循自然交互原则、稳定视觉原则和多通道刺激补偿原则。最终的作品既具有较强的沉浸感也同时兼顾舒适度。

3.1 系统搭建

使用虚幻 4 引擎搭建全虚拟的环境。虚幻 4 引擎是领先的 VR 制作平台，具有优秀的即时渲染模块、完备的交互系统、易于使用的可视化脚本模块，满足 VR 高性能与高保真度的需求。系统搭建过程包括三维建模、材质纹理、灯光、动画等传统三维数字内容的创作环节^[9-11]，还包括 UV 准备、PBR 材质系统、蓝图交互等 UE4 所特有的 VR 关键环节，系统搭建流程见图 1。

3.2 沉浸感与舒适度的平衡设计

3.2.1 自然交互原则下的内容设计

使用的 HTC vive 开发工具包，包括一个重量为 0.44 kg 的头戴式显示器和手柄，见图 2；可以 360°全方位移动，单眼 1080×1200 分辨率，110°视场角，90 Hz 屏幕刷新率，延时小于 20 ms，这些技术参数保证了头部的实时追踪，保证用户可以在一定范围内任意移动并改变观看的方向。

虚拟场景的设计考虑 360° 的场景细节，做到用户在体验时观看任何角度的区域不会出现破坏沉浸感的画面，见图 3a。引用大场景比例，让用户对周遭环境产生视觉冲击，激发沉浸感，见图 3b。在导识信息表达上设计小兔子的角色，利用角色的出现位置以及角色的动作为用户导识方向，见图 3c。

3.2.2 稳定视觉原则下运动参数的设计

虚拟场景的运动方式为平移，因为让用户在虚拟环境中穿行可以增加沉浸感，也是人类感知空间位置

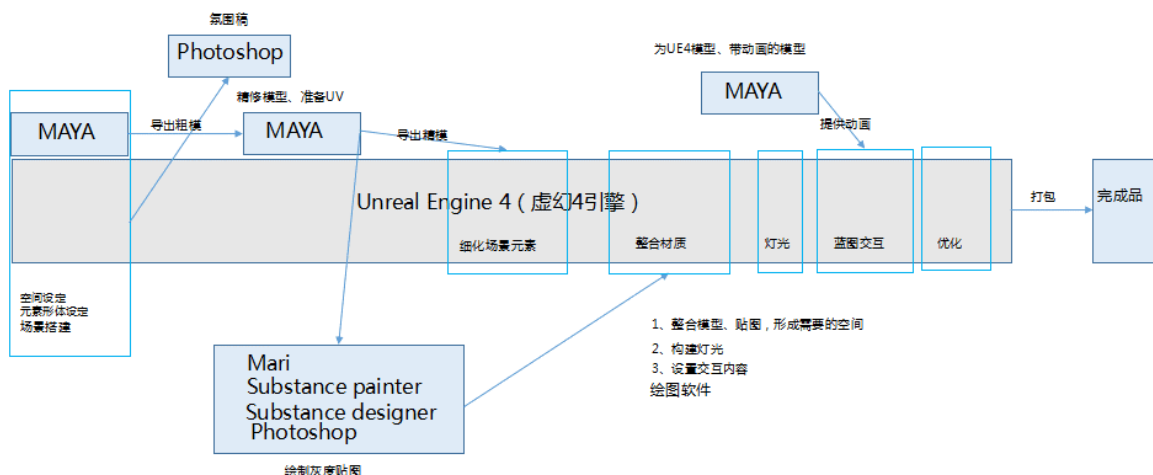
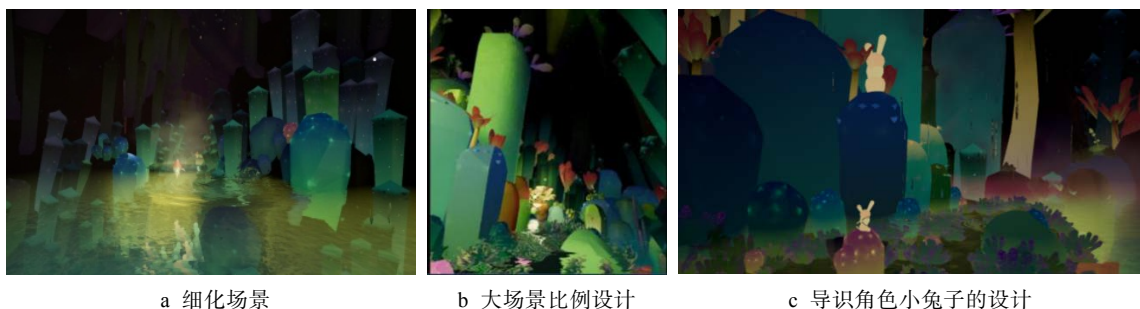


图 1 系统搭建流程
Fig.1 System building process

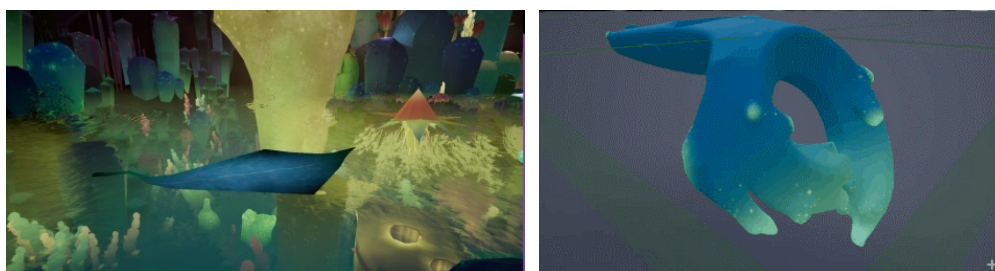


图2 HTC vive 头戴式显示器、手柄
Fig.2 HTC vive Head-mounted display and handles



a 细化场景 b 大场景比例设计 c 导识角色小兔子的设计

图3 自然交互原则下的内容设计细节
Fig.3 Content design details under the natural interaction principle



a 交通工具叶子设计 b 手柄设计

图4 稳定视觉原则下的设计细节
Fig.4 Design details under the stable vision principle

表1 档位与运动参数对应关系
Tab.1 Corresponding relation between gear and motion parameters

档位	初始速度 cm/s	最大速度 cm/s	加速度 cm/s ²	减速度 cm/s ²	停止速度 cm/s	Z轴速度 cm/s
1	16	80	40	20	70	0.3
2	40	160	80	40	140	0.6
3	80	320	160	80	280	1.2
4	240	480	240	120	420	1.8

的最基本方式。预设用户在这片水上森林中的交通工具为一片叶子，见图 4a，使用手柄的扳机键可以进行前进、后退等平移运动，手柄融入案例本身的设计，见图 4b，这与用户在真实世界中的感知方式一致；平移运动的参数设计以最大限度地保证视觉稳定为基础原则，根据场景大小以及大量的用户测试设计适用于不同人群的四档运动参数，相关的运动参数有初始速度、最大速度、加速度、减速度、停止速度和z轴速度。并避免垂直的线性震荡、相机的缩放和相机

的运动特效等一切会引起视觉不稳定的因素。档位与运动参数数值对应关系，见表 1。

其中：1 档完全没有 VR 经验且没有第一人称游戏经验的人员；2 档完全没有 VR 经验但有第一人称游戏经验的人员；3 档有 VR 经验的人员；4 档对 VR 非常熟悉的人员。

3.2.3 多通道刺激补偿原则下的听觉与嗅觉设计

嗅觉通道刺激设计：在 HTC vive 头戴式显示



图 5 多通道刺激补偿原则下的嗅觉装置设计
Fig.5 Design of olfactory devices based on the multichannel stimulus compensation

设备上安装了自行研制的气味散发装置，虚拟交互开始在相应的场景中会释放出相吻合的气味。由于作品希望化解都市生活中的种种焦虑与疲惫，所以气味由质朴的芳樟木和怡神清心的薰衣草以及明快的甜橙混合而成，有令人想要深呼吸、放松的味道。这样的气味既符合场景，增加沉浸感，又能缓解虚拟现实晕动症的发生，见图 5。

听觉通道刺激设计：在 HTC vive 头戴式显示设备上的耳机中释放与虚拟场景吻合的音乐和音效，利用符合虚拟场景的水声和鸟声作为导识信息，让体验者自然的有方向感，音量控制在 60~70 分贝。

4 评估

设计两个版本的作品进行对比实验，一个版本为综合采用自然交互原则、稳定视觉原则和多通道刺激补偿原则的作品，另一个版本为未关注上述原则的作品，以评估本文所提出的平衡沉浸感和舒适度的 3 个原则的有效性。

4.1 参与者

参与者为 32 名的年轻人（15 名女性，平均年龄 M=23.72，标准差 SD=6.62；男性 17 例，平均年龄 M=25.87，标准差 SD=6.24）。所有参与者身体健康（即没有前庭功能障碍且无慢性疾病，正常或矫正视力正常），自愿参加实验，且均被告知如果无法忍受眩晕等异常反应，可以随时中止实验。参与者均为无任何 VR 和三维游戏经历者。参与者被随机分配到两个实验组，包括自然交互原则、稳定视觉原则和多通道刺激补偿原则 3 个平衡沉浸感和舒适度的原则的体验组（以下简称体验组）和没有关注上述原则的对照组（以下简称对照组）。体验组参与者包括 9 名男性和 8 名女性，对照组的参与者包括 8 名男性和 7 名女性。

4.2 装置、刺激和设计

本研究使用 HTC vive 开发工具包，该设备包括一个重量为 0.44 kg 的头戴式显示器，可以 360°全方位移动，单眼 1080×1200 分辨率，110°视场角，90 Hz

表 2 SSQ 量表

Tab.2 SSQ scale

SSQ 症状	恶心症状 (权重)(A)	动眼神经不 适(权重)(A)	方向障碍 (权重)(C)
整体不适	1	1	0
疲劳	0	1	0
头痛	0	1	0
眼睛疲劳	0	1	0
视力难以集中	0	1	1
唾液分泌增加	1	0	0
出汗	1	0	0
恶心	1	0	1
注意力不集中	1	1	0
头胀	0	0	1
视觉模糊	0	1	1
眼花（睁眼）	0	0	1
眼花（闭眼）	0	0	1
头晕	0	0	1
胃部不适	1	0	0
打嗝	1	0	0

屏幕刷新率。

在实验辅助人员的帮助下调整好瞳距、头围等参数，将参与者的眼睛高度调整到屏幕的中心。参与者戴好 HTC vive 头戴式显示器后，坐在没有靠背但是可以围绕垂直轴旋转的专用凳子上，在特定的虚拟场景中利用扳机键进行平移交互。凳子是用来减少参与者在交互过程产生的姿势不稳状态。参与者在第一人称视角下利用扳机键进行交互平移。整个平移交互时间为 10 min。

4.3 评估方法

4.3.1 沉浸感测量评估方法

采用 5 点沉浸感量表测试评估，该评估应用心理学研究领域广泛应用的积极情感和消极情感量表（PANAS）原理。

参与者被要求填写 5 点沉浸感量表（1=沉浸感不强，5=沉浸感很强）。根据其所感知的情绪状态，用 1 到 5 的量表来评估沉浸感的程度，其中 1 表示最少，5 表示最强。

4.3.2 舒适度测量评估方法

本文的舒适度主要指在虚拟现实眩晕程度，即 VIMS。本研究采用 SSQ 量表测试评估 VIMS。SSQ 量表有 16 个小症状，分属于 3 大症状，量表内容见表 2。SSQ 量表的计算方法是 $\sum i * j$ ，其中 $i=0,1,2,3$ （小症状评分，分别对应无症状、轻微、中等和严重）； $j=$ 权重（小症状项目所对应的权重）。总分值是判断晕动症程度的依据，分值越高，则表示晕动症程度越

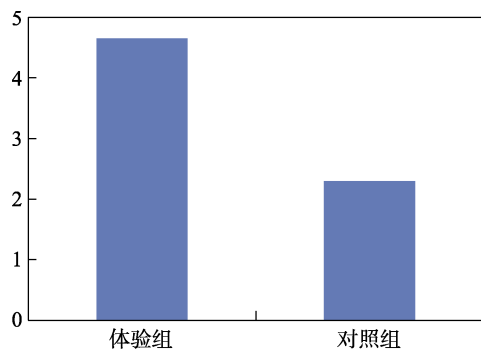


图6 沉浸感量表均值
Fig.6 Mean of immersion scale

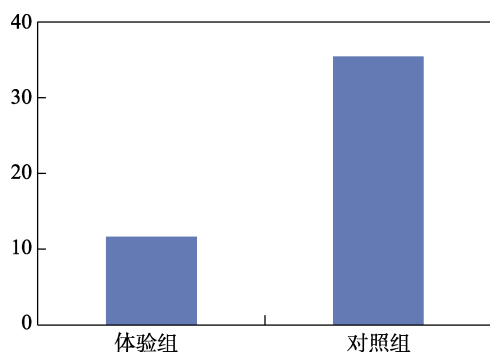


图7 SSQ量表总分均值
Fig.7 Mean of the total score of SSQ scale

高。虚拟现实晕动症往往不是在实验结束后立即发生的,因此为每一位参与者准备了3份SSQ量表,分别记录实验前、实验刚结束、实验结束后10min的数据。

4.3.3 综合评估方法

本实验随机邀请了212名不同背景、年龄、VR经验值的用户,被要求完成一项对最终开发的虚拟现实交互体验作品进行的综合测评,评测内容从自然交互、稳定视觉和多通道刺激补偿3个方面出发,具体包括整体的沉浸感等级;是否出现眩晕等不适反映;作品中的场景是否有身临其境的视觉冲击感;交通工具的选择是否与真实相符,平移速度的逐渐递增是否减缓不适感;场景中味道和音乐与音效是否给虚拟现实交互体验作品增加了沉浸感和舒适感等问题。

4.4 结果

沉浸感的量表结果显示,见图6。体验组受试者普遍认为该系统提供一个很强的沉浸环境(平均分 $m=4.65$,标准差 $sd=1.2$),在测试过程中有各种对场景宏大的惊叹声和躲避虚拟植物发出的尖叫声,让用户完全沉浸在虚拟的世界中。而对照组(平均分 $m=2.3$,标准差 $sd=1.33$)的体验则比较糟糕,受试者表示思维时常会跳出场景外,没有很强的沉浸感。

而从测量舒适度的SSQ量表结果,见图7。体验组受试者总分在12分左右(平均分 $m=11.64$,标准差 $sd=1.7$),他们在测试过程中大多数人没有十分明

显的不舒适的感觉。而对照组受试者总分高达35(平均分 $m=35.4$,标准差 $sd=1.8$),显示出体验舒适度较差。

在对最终虚拟现实交互体验作品进行的综合测评中,随机邀请212名不同背景、年龄、VR经验值的用户对评测中的问题作答,91%的用户表示作品中的场景具有较强的视觉冲击感;87%的用户表示虚拟交互中使用的交通工具与真实世界基本相符,85%的用户表示作品中的平移速度适中;95%的用户表示场景中的芳樟木和薰衣草的混合味道和音乐、音效给作品增加沉浸感;99%的用户表示沉浸感很强,仅有2%的用户表示会有眩晕的症状。因此,可以说,与同类虚拟现实交互作品相比,综合采用上述3个原则的作品的沉浸感与舒适度均得到了很大的提升和平衡。

综合以上实验结果可以得出:VR交互体验作品的开发与设计遵守自然交互原则、稳定视觉原则和多通道刺激补偿原则对平衡沉浸感和舒适度是积极有效的。

5 结语

VR交互体验中沉浸感和舒适度的矛盾也是一直以来限制虚拟现实技术广泛应用的一个主要因素。本文从沉浸感和舒适度的概念及相关影响因素入手,提出自然交互、稳定视觉和多通道刺激补偿综合设计的原则。应用上述3个原则,进行虚拟场景设计,并开展对比实验。结果表明自然交互、稳定视觉和多通道刺激补偿原则对平衡沉浸感和舒适度有效,沉浸感与舒适度均得到很大的提升,沉浸感与舒适度在同一个作品中得到有效的平衡。

综合检验的结果表明,本文提出的自然交互、稳定视觉和多通道刺激补偿原则,可以增强虚拟现实内容的沉浸感并有效降低虚拟现实运动症的发生,是一种没有任何副作用且平衡沉浸感和舒适度的有效途径。

在上述研究的基础上,未来工作将着眼于沉浸感和舒适度原则的优化和完善,侧重于感官刺激中音乐与味道的细化分类,进一步探索影响沉浸感和舒适度的因素及其相互关联的内在规律和表现形式,以虚拟场景设计理论和相关技术发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 姜荷. VR虚拟现实技术下影像表现形式的可行性分析及对电影产业格局的冲击与挑战[J]. 当代电影, 2016(5): 135.
JIANG He. The Feasibility Analysis of Imaging by VR Technique and Its Impact & Challenge to Film Industrial Pattern[J]. Contemporary Cinema, 2016(5): 135.
- [2] SAWABE T, KANBARA M, HAGITA N. Diminished Reality for Acceleration Stimulus: Motion Sickness Reduction with Vection for Autonomous Driving[C]. Virtual Reality (VR), 2017.

- [3] DOMEYER J E, CASSAVAUGH N D, BACKS R W. The Use of Adaptation to Reduce Simulator Sickness in Driving Assessment and Research[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2013, 53: 127.
- [4] KESHAVARZ B, HECHT H. Pleasant Music as a Countermeasure Against Visually Induced Motion Sickness [J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(3): 521-527.
- [5] KESHAVARZ B, STELZMANN D, PAILLARD A, et al. Visually Induced Motion Sickness Can be Alleviated by Pleasant Odors[J]. *Experimental Brain Research*, 2015, 233(5): 1353-136.
- [6] 刘光然. 虚拟现实技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
LIU Guang-ran. *Virtual Reality*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [7] BOWMAN D A, KOLLER D, HODGES L F. Travel in Immersive Virtual Environments: an Evaluation of Viewpoint Motion Control Techniques[C]. *Virtual Reality Annual International Symposium*, 1997.
- [8] SAWABE T, KANBARA M, HAGITA N. Diminished Reality for Acceleration Stimulus: Motion Sickness Reduction with Vection for Autonomous Driving[C]. *Virtual Reality (VR)*, 2017.
- [9] 包仪华, 翁冬冬. 虚拟现实: 未来影像的新型呈现方式[J]. *电影艺术*, 2017(3): 148-154.
BAO Yi-hua, WENG Dong-dong. *Virtual Reality: the Novel Way of Future Image Presentation*[J]. *Film Art*, 2017(3): 148-154.
- [10] 胡起云. UE4 游戏引擎的建筑可视化表现探析[J]. *装饰*, 2016(8): 134-135.
HU Qi-yun. *Research and Analysis of UE4 in Architecture Visualization*[J]. *Zhuangshi*, 2016(8): 134-135.
- [11] 玛丽劳瑞·瑞恩. 作为叙事的虚拟现实[J]. *北京电影学院学报*, 2016(3): 34.
Ryan. *Virtual Reality as Narrative*[J]. *Journal of Beijing Film Academy*, 2016(3): 34.

(上接第 90 页)

- [8] 余丹, Ziqing Zhuang, 程文娟, 等. 中国成年人呼吸防护用品适合性检验新型头面分栏研究[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 2009, 27(7): 400-404.
YU Dan, Ziqing Zhuang, CHENG Wen-juan, et al. Two New Anthropometric Panels of Respirator Fit Test for Chinese Adult Workers[J]. *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases*, 2009, 27(7): 400-404.
- [9] LEI Z, YANG J, ZHUANG Z. Contact Pressure Study of N95 Filtering Face-piece Respirators Using Finite Element Method[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2010, 7(6): 847-861.
- [10] DAI J, YANG J, ZHUANG Z. Sensitivity Analysis of Important Parameters Affecting Contact Pressure between a Respirator and a Headform[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2011, 41(3): 268-279.
- [11] ELLENA T, SUBIC A, MUSTAFA H, et al. The Helmet Fit Index-An Intelligent Tool for Fit Assessment and Design Customisation[J]. *Applied Ergonomics*, 2016(55): 194-207.
- [12] WANG H, YU Y, CHEN W, et al. Responsive Web Design for Chinese Head and Facial Database[C]. *International Conference on Cross-Cultural Design*, 2018.
- [13] WANG H, CHEN W, LI Y, et al. A 3D Head Model Fitting Method Using Chinese Head Anthropometric Data [C]. *International Conference on Cross-Cultural Design*, 2018.
- [14] ELLENA T, SKALS S, SUBIC A, et al. 3D Digital Headform Models of Australian Cyclists[J]. *Applied Ergonomics*, 2017(59): 11-18.
- [15] YAN Y, CHEN K, XIE Y, et al. The Effects of Weight on Comfort of Virtual Reality Devices[C]. *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, 2018.
- [16] PETROV Y A. Head-Mounted Display Systems with Nose Piece: U.S. Patent Application 14/964, 476[P]. 2017-06-15.
- [17] CHOU W C, CHEN J N, HUANG T S, et al. Head Mounted Display (HMD) Commercialized Product Practice Research[C]. *Proceedings of 5th Asian Symposium on Information Display. ASID'99*, 1999.
- [18] BALL R, SHU C, XI P, et al. A Comparison between Chinese and Caucasian Head Shapes[J]. *Applied Ergonomics*, 2010, 41(6): 832-839.
- [19] 何人可, 杨文秀, 王海宁. 中国三维人头测量研究[J]. *包装工程*, 2019, 40(8): 103-110.
HE Ren-ke, YANG Wen-xiu, WANG Hai-ning. *3D Anthropometry of Chinese Head*[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(8): 103-110.
- [20] ISO/DIS 18526-4, Eye and Face Protection-Test Methods-Part 4: Headforms[S].
- [21] ISO/TS 16976-2:2015, Respiratory Protective Devices-Human Factors-Part 2: Anthropometrics[S].
- [22] 孙利, 张鹏, 吴俭涛, 等. 基于 FBS 拓展模型的可穿戴式康复机械手设计研究[J]. *图学学报*, 2021, 42(1): 150-157.
SUN Li, ZHANG Peng, WU Jian-tao, et al. *Design of Wearable Rehabilitation Manipulator Based on FBS Extended Model*[J]. *Journal of Graphics*, 2021, 42(1): 150-157.