

俯仰视角影响下的虚拟现实头部旋转增益研究

谢泽华, 傅月瑶, 何煜, 胥森哲, 任洋甫, 于歌, 张松海

引用本文

谢泽华, 傅月瑶, 何煜, 胥森哲, 任洋甫, 于歌, 张松海. 俯仰视角影响下的虚拟现实头部旋转增益研究[J]. 计算机科学, 2025, 52(4): 212-221.

XIE Zehua, FU Yueyao, HE Yu, XU Senzhe, REN Yangfu, YU Ge, ZHANG Songhai. Research on Virtual Reality Head Rotation Gain Under the Influence of Pitch Angle [J]. Computer Science, 2025, 52(4): 212-221.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于拆分联邦学习的元宇宙视线交互中的隐私主动保护方法研究](#)

Study on Active Privacy Protection Method in Metaverse Gaze Communication Based on SplitFederated Learning

计算机科学, 2025, 52(3): 95-103. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240500038>

[教育元宇宙视域下虚拟交互式师范生教学技能训练模式的创新构建](#)

Virtual Interactive Teaching Skills Training Mode for Normal Students in Educational MetaversePerspective

计算机科学, 2024, 51(10): 144-152. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240400120>

[基于边缘计算和WebRTC的元宇宙教育通信技术方案研究与实现](#)

Research and Implementation of Metaverse Educational Communication Technology Scheme Based on Edge Computing and WebRTC

计算机科学, 2024, 51(10): 94-104. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.231200082>

[智能教育中可计算感知技术:系统性综述](#)

Computational Perception Technologies in Intelligent Education:Systematic Review

计算机科学, 2024, 51(10): 10-16. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.240400112>

[虚拟现实在体育仿真中的应用综述:2003年以来的新进展](#)

Overview of Application of Virtual Reality in Sports Simulation:New Developments Since 2003

计算机科学, 2023, 50(6A): 220500168-10. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220500168>

俯仰视角影响下的虚拟现实头部旋转增益研究

谢泽华^{1,2} 傅月瑶³ 何煜⁴ 胥森哲⁵ 任洋甫^{1,2,3} 于歌⁴ 张松海^{1,2,3}

1 青海大学计算机技术与应用学院 西宁 810016

2 青海省智能计算与应用实验室 西宁 810016

3 清华大学计算机科学与技术系 北京 100084

4 中国科学院空间应用工程与技术中心 北京 100094

5 清华大学数学科学中心 北京 100084

(xiezehua@163.com)

摘要 在虚拟现实,增加头部旋转增益,可显著提高用户的探索效率。由于空间限制,用户常需进行大幅头部旋转以观察整个场景,这会一定程度上牺牲舒适性。应用头部旋转增益能够在小幅旋转头部的前提下实现虚拟场景的大角度旋转,使用户能更轻松地观察整个场景。在虚拟现实场景探索过程中,用户经常需要抬头或低头,但目前对于在俯视或仰视状态下的头部旋转阈值方面的研究不足。因此,重点关注用户在仰视、俯视及平视状态下的头部旋转增益差异,并探究加入俯仰角后用户舒适的头部旋转阈值范围。通过设计虚拟场景引导用户在不同的俯仰角度进行头部旋转,并通过心理物理学实验收集用户反馈,对比各个状态下的头部旋转增益。研究表明,引入俯仰角后用户对旋转阈值的感知发生了显著变化,不同俯仰角度下舒适的头部旋转阈值具有显著差异。

关键词:虚拟现实;重定向行走;旋转增益;俯仰角下的头部旋转

中图分类号 TP391.41

Research on Virtual Reality Head Rotation Gain Under the Influence of Pitch Angle

XIE Zehua^{1,2}, FU Yueyao³, HE Yu⁴, XU Senzhe⁵, REN Yangfu^{1,2,3}, YU Ge⁴ and ZHANG Songhai^{1,2,3}

1 School of Computer Technology and Applications, Qinghai University, Xining 810016, China

2 Qinghai Provincial Intelligent Computing and Application Laboratory, Xining 810016, China

3 Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

4 Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

5 Mathematical Sciences Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Increasing head rotation gain in virtual reality significantly enhances user exploration efficiency. Due to spatial constraints, users often need to perform extensive head rotations to observe the entire scene, which may sacrifice comfort. Therefore, applying head rotation gain enables wide-angle rotations in virtual scenarios, allowing users to comprehensively view the environment. We note that in exploring virtual reality scenes, users frequently need to look up or down, yet current research lacks sufficient focus on head rotation thresholds in looking up or down positions. Consequently, this paper focuses on the differences in head rotation gain among looking up, looking down, and looking straight, as well as exploring the comfortable head rotation threshold ranges after incorporating pitch angles. By designing virtual scenes that guide users to rotate their heads at various pitch angles and collecting feedback through psychophysical experiments, this study compares head rotation gains across different states. The results indicate that introducing pitch angles significantly affects users' perception of rotation thresholds, with notable differences in comfortable rotation thresholds at various pitch angles.

到稿日期:2024-07-08 返修日期:2024-09-18

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0905104);国家自然科学基金(62132012);北京市科技计划项目(Z221100007722001);清华-腾讯互联网创新技术联合实验室

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China(2023YFF0905104), Natural Science Foundation of China(62132012), Beijing Municipal Science and Technology Project(Z221100007722001) and Tsinghua-Tencent Joint Laboratory for Internet Innovation Technology.

通信作者:任洋甫(ryf21@mails.tsinghua.edu.cn)

Keywords Virtual reality, Redirected walking, Rotation gain, Head rotation at pitch angle

虚拟现实技术被广泛应用于游戏、培训、康复等多种场景,提供了沉浸式的虚拟环境,极大地丰富了用户的体验,使用户能更自由地探索虚拟世界。在虚拟现实,自然行走是一种常见的运动方式,它能够将在真实世界中的行走距离精确映射到虚拟环境中,实现一比一的真实对应,从而提供了高度的一致性和自然感。真实世界的空间限制,使得在虚拟世界中的自由探索受到了限制。

重定向行走技术通过在虚拟世界中进行微妙的调整,引导用户不自觉地远离真实世界的边界和障碍物,从而解决场景受限的问题。常见的重定向行走技术使用户在真实世界中以不易察觉的曲线行进,而在虚拟世界直行,实现在有限的物理空间内探索更广阔的虚拟环境;此外,还可以实现真实世界小角度转向与虚拟世界的大视角转向,优化空间利用,改进虚拟场景中的观看体验。

当前许多研究集中于坐姿下用户在水平观看场景时的头部旋转阈值,对仰视或俯视状态下的阈值探讨较少。然而,无论在日常生活还是虚拟现实环境中,通过不同的俯仰角度全面观察场景是一种常见且必要的行为。因此,有必要深入对比研究仰视、俯视和平视状态下的头部旋转阈值。

本文的主要研究内容如下:

- 1)探究用户在仰视或俯视时,头部旋转增益的检测阈值是否与水平状态时存在差异;
- 2)探究头部旋转增益的检测阈值在不同俯视或仰视角度时的差异以及变化趋势;
- 3)探究不同性别用户在仰视、俯视或平视状态时头部旋转增益的检测阈值的差异。

研究发现,在俯视和仰视状态下的头部旋转增益阈值与平视状态存在显著差异。阈值的变化范围在不同的角度下显示出不同的稳定性,特别是在一些特定角度下,用户的感知差异尤为显著。随着角度的变化,感知差异有所减小,用户对阈值的响应趋向一致。研究发现,在俯视和仰视状态下,性别对感知影响显著,其中男性在极端角度的感知可变性较女性更大。因此,在设计虚拟现实应用时考虑不同视角下头部旋转阈值是十分重要的,这对于提升用户在虚拟环境中的体验具有重要作用。

1 研究现状

1.1 行走重定向技术及应用

在虚拟现实,用户通过佩戴头戴式显示设备(Head Mounted Display, HMD)和操作手持控制器,可以自由探索虚拟环境^[1]。但受到现实空间和硬件设备的约束,用户往往难以完整地探索比现实空间更广阔的虚拟场景。针对这一问题,研究者们提出了多种解决方案,包括传送、原地行走和重定向行走(Redirected Walking, RDW)。在传送技术方面, Kelly等^[2]研究了运动预测如何影响空间更新性能,探讨了运动预测的重要性是否因运动尺度和环境尺度产生差异。But-

tussi等^[3]对75名用户的实验评估显示,传送技术在减轻晕动病症状和提升舒适度方面优于使用操纵杆或倾斜身体移动的方法。在原地行走方面, Hanson等^[4]开发了一种基于步行速度的生物力学算法,并介绍了一个经过训练可以区分行走和站立的卷积神经网络模型。Nilsson等^[5]研究并对比了两种新手势,即交替弯曲膝盖的“擦拭手势”和抬起脚跟的“敲击手势”,发现后者更自然,疲劳感也更低。

重定向行走是在虚拟环境中操纵视觉感知来调整用户的移动行为,从而引导用户远离物理空间边界的技术。Razzaque等^[6]详细地描述了重定向行走,将其定义为虚拟环境的一种新的交互式运动技术,可实现用户在比虚拟场景小很多的物理空间中探索完整虚拟场景的功能,并使用立体图像和3D空间化音频实现了该技术。Steinicke等^[7-8]量化了人类在不知情的情况下会在多大程度上被重定向到与视觉感知路径不同的物理路径。Sun等^[9]提出的重定向行走技术适用于小型物理环境,并且可以处理静态或动态障碍。

1.2 行走重定向技术算法研究

行走重定向技术的研究主要包括增益测定和算法设计。在算法设计方面,研究人员尝试结合不同的重定向增益方法来引导用户的行走路线。Razzaque等^[10]提出了3种广义式重定向行走策略,即引导至中心(Steer-to-Center, S2C)、引导环绕(Steer-to-Orbit, S2O)和引导至多目标(Steer-to-Multiple, S2M),通过这些策略在用户接近物理边界时引导其返回空间中心或内部。在重定向行走的重置方面, Xu等^[11]提出了一种新的减少重定向行走重置的方法,通过一系列标准姿势分析用户可能的移动方向和位置,提高路径规划的准确性。

针对多用户场景, Xu等^[12]提出了一种新的多用户重定向行走方法,显著减少了重置次数,增强了沉浸感。Fan等^[13]利用用户的历史步行数据,优化了实时无限制重定向行走的效果。David等^[14]和 Sharif等^[15]设计了能够扩展物理空间探索范围的虚拟路径。Hodgson等^[16]提出了结合多目标和中心引导的重定向行走策略(Steer-to-Multiple + Centers, S2MC)。Xu等^[17]提出了利用曲率增益进行导航和避开障碍的重定向行走算法,有效减少了方向调整,提升了沉浸体验;而且受洛伦兹收缩现象启发, Xu等^[18]提出了“空间压缩方法”,根据用户速度调整虚拟空间,使得高速时虚拟空间显著压缩,低速时最小化压缩,提高了在小型物理空间中探索广阔虚拟场景的效率。

1.3 行走重定向技术阈值检测

增益测定涉及确定用户在不同情境下对施加增益的感知阈值,常通过实验刺激用户并收集反馈,利用心理测量函数来确定增益阈值。Steinicke等^[19]和 Freitag等^[20]定义并通过实验确定了平移增益、旋转增益和曲率增益的阈值。Esmaili等^[21]通过研究用户对手部运动的感知,并估计虚拟现实不同类型手部动作的检测阈值,扩展了对重定向手部技术的研究。Ogawa等^[22]指出使用更加仿真的模型能有效减少虚拟

与物理运动间的差异,且能在不改变原有重置技术的情况下改善手部重映射的效果。Cho 等^[23]通过实验发现,在后向和侧向移动中,非前向的平移和曲率检测阈值较前向的曲率增益阈值范围更大。Luo 等^[24]提出“步行望远镜”技术,发现通过缩小头戴式显示器视野,能扩大平移增益的阈值范围。Xu 等^[25]研究了在用户行走过程中头部往复旋转时应用的双向旋转增益差异,在用户不易察觉的情况下有效地改变其物理方向。Kjenstad 等^[26]测定了在用户不知情的情况下实现重定向步行的旋转增益阈值和曲率增益阈值,他们发现旋转增益的增益水平存在统计学上的显著差异,曲率增益的增益水平显著性并不明显。Kim 等^[27]探索了空间配置如何反映在确定相对平移增益的阈值范围中。该技术以不同的宽度和深度比例缩放用户在虚拟现实中的移动,可以根据目标虚拟空间的配置自适应地重新缩放用户的虚拟空间,并使用统一的坐标系,从而能够在虚拟场景中使用物理对象。Gan 等^[28]设计了 8 个视觉密度、空间大小和真实感各异的虚拟场景,评估了这些因素对用户旋转增益感知阈值的影响。结果显示,房间场景和自然景观场景之间的旋转增益感知检测阈值存在显著差异,尤其是在旋转增益阈值的下限处差异更加明显。Van 等^[29]研究了增益的动态变化对重定向行走的影响,确定了不同情况下的增益变化函数,这些函数明显优于使用静态的增益。增益的动态变化可以显著增加重定向行走的运动范围和速度,但用户仍然感觉在正常步行。此外,他们还讨论了用户在步行时因素的权重,以及这些因素在不同函数中的差异。

在用户坐姿下的旋转增益研究中,Wang 等^[30]发现坐姿下的增益范围较站姿更小,并指出两种姿态下存在显著的旋转增益差异。Jaekl 等^[31]通过要求用户调整旋转增益直至虚拟场景感觉稳定,来测定坐姿下的检测阈值。Jerald 等^[32]在坐姿下观察 2D 场景时,分析了屏幕相对于头部旋转方向的最大旋转幅度。Bruder 等^[33]进一步通过实验分析了坐姿条件下的旋转增益的阈值范围。Zhang 等^[34]发现,在虚拟场景中观看 360°视频相比观看计算机生成的环境,平移增益的检测阈值更接近主观平等点(PSE)。Kim 等^[35-36]探讨了虚拟空间大小对平移增益阈值的影响。Schmitz 等^[37]通过实验发现较低的增益值可能会降低 VR 的沉浸感。Brument 等^[38]研究了旋转速度对旋转增益的影响,通过用户研究比较了不同旋转速度下的感知阈值,得出旋转增益在较低的旋转速度下不易被察觉,并且用户在低旋转速度下进行平移运动时会更难察觉出旋转增益。

2 实验设计

本研究的目的是测量用户在坐姿状态下,仰视、俯视和平视的头部旋转阈值,并对比分析在不同俯仰角度下的阈值差异。实验中设置一个 2AFC 任务,取随机增益值,并根据增益值调整头戴显示器中头部绕 y 轴旋转的灵敏度,即对头部左右旋转的角度进行放大或缩小。改变头戴式显示器的头部旋转灵敏度,需要给场景中的摄像机物体挂载一个脚本。改变

旋转灵敏度的伪代码如算法 1 所示。

算法 1 施加旋转增益

```

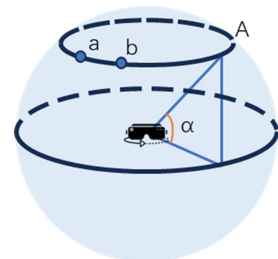
1. private void Update()
2. {
3.   headRotation←获取头戴式显示器的旋转数值;
4.   v3←将 headRotation 转换成欧拉角;
5.   if(y 轴旋转角<180)
6.   {
7.     v3←y 轴旋转角和 gain 乘积;
8.   }
9.   else
10.  {
11.    v3←y 轴旋转角-360°的差然后和 gain 乘积;
12.  }
13. 头戴式显示器的旋转数值←加入旋转增益的 v3 并进行转换
14. }

```

算法 1 的思路是将每一帧的头戴式显示器的旋转数值读取下来,然后在 y 轴的旋转数值中加入旋转增益,形成一个新的旋转数值,再将新的值写回头戴式显示器,这样就可以改变用户左右转头的旋转灵敏度。

实验中设定了 7 个观察角度:俯视 -45°,俯视 -30°,俯视 -15°;平视 0°;仰视 15°,仰视 30°,仰视 45°。旋转增益值的范围为 0.5~1.5,步长为 0.1,每个增益值重复 6 次。每个用户需要完成 6 组实验,每组包含 7 个角度与 11 个增益值的随机组合。每组实验完成后,会要求用户进行充分的休息,并且填写 SSQ 量表,如果身体不适,可以中途停止实验。

为了保证用户头部在固定角度上进行左右旋转,实验中设置了特殊的虚拟场景辅助用户保持视角。如图 1(a)所示,用户位于球心位置(头显位置),通过保持视线始终对准圆环上的两点(a 点和 b 点),可以确保在俯仰时头部旋转角度(α 角)保持不变。



(a)俯仰角转头角度示例



(b)平视的实验场景

图 1 实验场景与角度的原理

Fig. 1 Principle of experimental scenes and angles

每个观察角度都对应一个虚拟的圆环,圆环上设有引导物,如红色胶囊形状物,以引导用户的视线。如图 1(b)所示,在平视、俯视和仰视状态下,用户首先需要定位圆环,然后沿圆环指示的方向左右转动头部以寻找引导物,从而保证头部旋转角度的一致性。加入俯仰角之后的虚拟场景如图 2 所示,现实与虚拟场景的对应关系如图 3 所示。

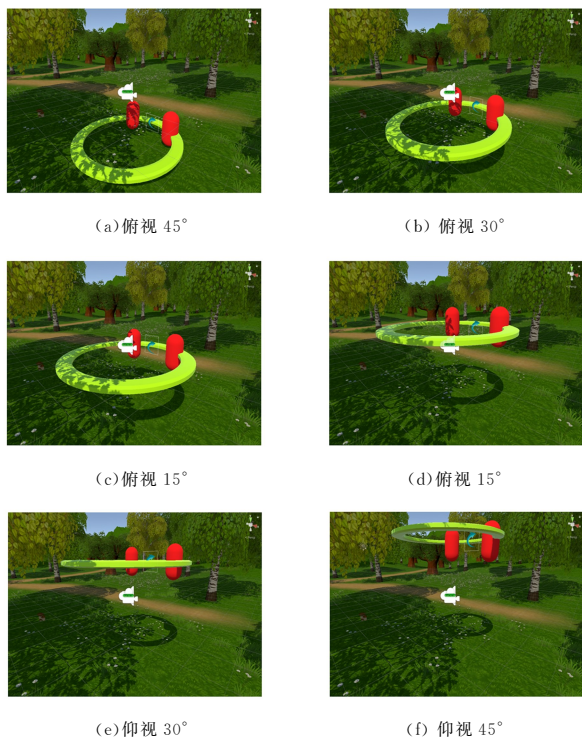


图 2 不同俯仰角度的虚拟场景

Fig. 2 Virtual scenes with different pitch angles

2.1 确定观察角度

为了更好地量化俯视和仰视的角度,对俯仰角度进行了细分。首先进行了预实验,以确定俯视和仰视的具体角度及引导物的最佳摆放位置。

2.1.1 仰视和俯视的实际角度

在预实验中,邀请了 8 名用户(4 名女性和 4 名男性)佩戴 VR 眼镜,要求他们保持上半身静止,通过头部的上下运动来测试俯仰角度。在确保舒适度的情况下,每名用户进行了 10 次头部俯仰运动,通过头戴显示器的接口记录下每名用户头部俯仰的角度范围。分析数据得出,用户在仰视时最舒适的角度达到 48.6° ,而在俯视时则为 52.3° 。基于以上分析,最终确定了实验的角度设置:俯视 -45° ,俯视 -30° ,俯视 -15° ;平视 0° ;仰视 15° ,俯视 30° ,俯视 45° 。

2.1.2 引导物的摆放位置

当用户为坐姿时,他们在不向左右两侧扭转身体的情况下可以转头的最大物理角度是小于 90° 的^[39],所以本文预计用户舒适的角度会更小。为了量化这个角度,本文进行了一项预实验。实验要求 8 名用户在同样的姿态条件下进行头部的左右旋转测试。每名用户进行 3 组,每组 10 次实验,每次测试都随机设定一个增益值(范围从 $0.5 \sim 1.5$)。实验中,用户需要左右转头让视线中心对准两侧放置的红色引导物,当引导物由红色变成白色时记录下角度。根据实验数据计算,最舒适的引导物放置点确定为用户左右各 25.6° 处。

2.2 实验过程

图 4 给出了完整的实验流程。实验开始时,系统会随机选择 7 个角度之一,将对应虚拟场景展示给用户。用户首先需要根据场景指示抬头或低头至指定角度,然后沿箭头指示在黄色圆环上旋转头部,直到发现一个红色引导物。当该引导物变为白色时,用户须将头部沿着黄色圆环向相反方向移动,直至发现另一个红色引导物并使其变白。此后,用户需将视角恢复至正前方,并回答一个关于旋转速度相对于现实的感受的问题“速度比现实更快或更慢?”,选择“更快”或“更慢”。此设置无“适中”选项,以减少偏见和随机应答的可能性,选择完成后用户点击确认,进行下一次实验。

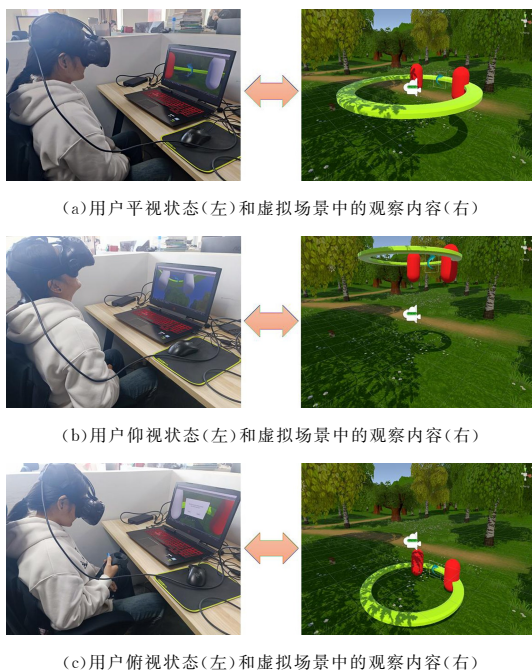


图 3 平视、俯视与仰视下的真实与虚拟场景的对比

Fig. 3 Comparison of real and virtual scenes under head up, overhead and overhead views

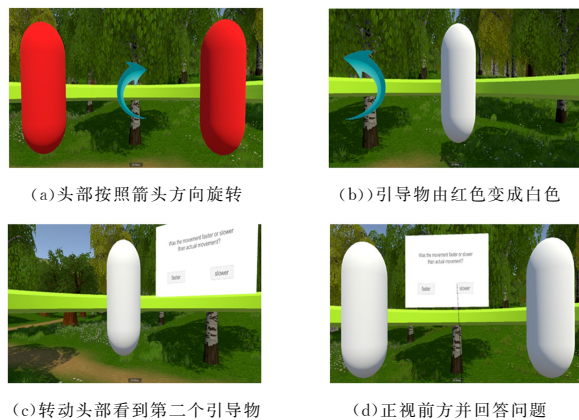


图 4 第一人称视角的实验流程(电子版为彩图)

Fig. 4 Experimental process of first person perspective

在招募用户前,已明确告知实验可能会出现眩晕、恶心等不良反应。此外,还通过问卷收集用户的基本信息,如年龄、性别以及 VR 使用经验等。实验开始时,用户还被要求填写模拟器晕眩量表(Simulator Sickness Questionnaire, SSQ)。然后,向用户详细解释实验目的和过程,协助用户佩戴头显设备。为使用户熟悉实验流程,在实验开始前会进行 5 次练习,让用户熟悉整个过程,并告知正确答案。实验设计安排两名用户轮流参与实验。每个用户完成一轮实验后,将有充分的休息时间并填写 SSQ 问卷,此时另一位用户将继续实验。真实实验场景如图 5 所示。



图 5 真实场景中平视、俯视和仰视

Fig. 5 Looking up, down and up in real scenes

整个实验过程中,如果用户出现眩晕、恶心等不良反应,可以立即休息并摘下头戴式显示器。用户如果无法承受实验中途的不良反应,可以选择退出,但仍将按照承诺期限发放补偿。用户一共需要完成 6 组实验,一共需要 60 min。

3 实验设备

本实验使用的主要实验设备是 HTC Vive 基础版头戴显示设备以及手柄控制器。HTC Vive 头显的单眼分辨率为 1080×1200 像素,屏幕刷新率为 90 Hz,视场角为 110° 。本实验使用的计算机显卡是 NVIDIA GeForce GTX 1060, CPU 是 Intel Core i7-7700HQ,内存为 16 GB。以 Unity 2022.2.21f1c1 版本作为 VR 场景的开发工具,还有 Steam 平台的 SteamVR 作为 HTC VIVE 的软件支持,使头显和手柄在 Unity 上运行。

4 实验用户

实验邀请了 20 名用户,年龄从 18 岁到 24 岁,包括

10 名男性和 10 名女性。所有被试都是高校的学生,他们在视力上均为正常或经矫正后达到正常水平,且均无严重的身体或心理健康问题,确保适合进行此项研究。其中有 4 名用户参加过虚拟现实实验,另外 16 名是首次接触。所有参与者均成功完成了本研究的所有实验流程。

5 实验结果

5.1 阈值检测

实验一共收集了 9240 条数据(7 个角度 \times 11 个阈值 \times 重复 6 次 \times 20 个用户),并记录了每次实验用户的回答选项。为了模拟用户对不同刺激水平的反应,使用心理测量函数与最大似然估计进行拟合,使用 R 语言 0.1.5.1 版本的 Quickpsy 函数来执行数据分析。其中,心理测量函数如下:

$$\psi(x; \gamma, \lambda, \alpha, \beta) = \gamma + (1 - \gamma - \lambda) \times F(x; \alpha, \beta) \quad (1)$$

其中, γ 表示猜测率, λ 表示失误率。用户以 50% 的概率做出正确选择的增益称为主观平等点(PSE),这意味着一般情况下,一半的用户能做出正确的选择。检测阈值是参与者有 25% 和 75% 的可能性给出正确响应的增益,两者之间的操作被认为是用户无法察觉的。使用 S 形的累积正态分布函数来获取阈值:

$$F(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{\beta^2(x-\alpha)^2}{2}\right) \quad (2)$$

其中, α 代表 PSE, β 代表标准差。拟合概率小于 0.05 的 3 名参与者被认为拟合不佳,并被排除在数据分析之外。本文计算了 25%、PSE 和 75% 时的增益阈值,且分别在 25%、PSE 和 75% 的情况下,用双因素方差分析来检测性别、俯视仰视对阈值是否存在显著性差异。

图 6 展示的是拟合的曲线,表 1 和表 2 为 -45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° 和 45° 角度下 25%、PSE 和 75% 时的增益阈值。由于数据量太大,将 7 个角度的数据用 2 个表格分开展示。

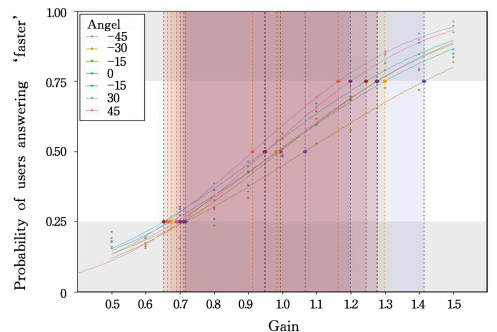


图 6 回答“更快”时,7 个角度的心理测量曲线与标记概率点

0.25, 0.50, 0.75

Fig. 6 Psychological measurement curves from 7 angles correspond to the marked probability points of 0.25, 0.50 and 0.75 when answering “faster”

表1 $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ$ 和 0° 角度下的心理测量曲线阈值:25%、PSE和75%

Table 1 Threshold values for psychological measurement curves at angles of $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ,$ and 0° :25%,PSE and 75%

User	-45°			-30°			-15°			0°			
	25%	PSE	75%	25%	PSE	75%	25%	PSE	75%	25%	PSE	75%	
Female	1	0.84	0.92	1.00	0.94	1.11	1.28	0.93	1.04	1.14	0.82	0.95	1.07
	2	0.53	0.99	1.46	0.90	1.25	1.59	0.69	1.12	1.56	-0.18	0.95	2.08
	3	0.81	0.94	1.07	1.10	1.24	1.38	0.90	1.15	1.40	0.92	1.15	1.37
	4	0.65	0.90	1.14	0.30	1.34	2.37	0.42	0.92	1.41	0.90	0.91	0.91
	5	0.67	0.76	0.86	0.98	1.43	1.88	0.65	0.92	1.19	0.84	1.15	1.46
	6	0.63	0.98	1.32	0.44	1.08	1.72	0.17	0.71	1.25	0.44	0.90	1.36
	7	0.84	1.15	1.47	0.91	1.19	1.46	0.88	1.12	1.36	0.92	1.06	1.20
	8	0.83	1.24	1.64	0.93	0.98	1.04	0.92	0.96	1.00	0.35	0.98	1.62
	9	0.45	0.89	1.32	0.79	0.88	0.96	0.84	0.95	1.05	-0.13	0.71	1.55
	10	0.58	1.08	1.57	-1.44	-0.16	1.13	0.21	0.80	1.39	-0.03	0.75	1.53
Male	1	0.83	1.04	1.25	0.82	0.97	1.12	0.63	0.88	1.13	0.81	0.99	1.17
	2	0.81	1.35	1.90	0.93	1.18	1.43	0.63	1.03	1.43	0.77	0.98	1.20
	3	0.57	1.70	2.82	0.33	1.27	2.21	0.19	1.08	1.97	1.05	1.60	2.16
	4	0.48	0.91	1.35	0.02	1.96	3.89	0.50	0.97	1.44	0.33	0.90	1.46
	5	0.91	1.15	1.38	0.83	1.08	1.34	0.87	1.10	1.32	0.89	1.19	1.49
	6	1.01	1.21	1.40	1.02	1.46	1.90	1.03	1.32	1.62	0.83	1.25	1.66
	7	0.61	0.83	1.05	0.39	1.10	1.82	0.90	0.95	1.01	0.88	0.94	0.99
	8	0.78	0.88	0.98	0.60	0.81	1.01	0.57	0.74	0.91	0.44	0.64	0.83
	9	0.44	0.69	0.94	0.24	0.54	0.84	0.46	0.70	0.95	0.38	0.62	0.87
	10	0.73	0.93	1.14	0.88	1.29	1.70	0.74	1.02	1.30	0.91	1.09	1.27
Male avg	0.72	1.01	1.30	0.68	1.06	1.45	0.71	1.01	1.31	0.70	0.99	1.27	
Female avg	0.80	0.96	1.12	0.84	1.04	1.24	0.80	0.98	1.16	0.83	1.01	1.19	
All avg	0.69	0.98	1.28	0.72	1.07	1.41	0.71	0.99	1.28	0.67	0.99	1.30	

表2 $15^\circ, 30^\circ$ 和 45° 角度下的心理测量曲线阈值:25%、PSE和75%

Table 2 Threshold values for psychological measurement curves at angles of $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ,$ and 0° :25%,PSE and 75%

User	15°			30°			45°			
	25%	PSE	75%	25%	PSE	75%	25%	PSE	75%	
Female	1	0.91	0.98	1.06	0.79	0.90	1.01	0.64	0.83	1.01
	2	0.30	0.84	1.39	0.03	0.78	1.53	-0.17	0.58	1.32
	3	0.86	1.07	1.28	0.95	1.09	1.23	0.82	1.00	1.18
	4	0.63	0.80	0.97	0.57	0.83	1.08	0.62	0.93	1.24
	5	0.49	0.82	1.15	0.62	0.76	0.89	0.55	0.69	0.82
	6	0.50	0.80	1.10	0.63	0.85	1.07	0.59	0.89	1.19
	7	0.92	1.14	1.36	0.64	0.85	1.06	0.58	0.91	1.25
	8	-0.41	0.80	2.01	0.72	1.07	1.43	0.72	1.09	1.46
	9	0.67	0.92	1.17	0.66	0.88	1.09	0.68	0.85	1.02
	10	0.02	0.74	1.45	0.50	0.94	1.38	0.12	0.79	1.46
Male	1	0.71	0.89	1.08	0.81	0.93	1.06	0.80	0.93	1.06
	2	0.68	1.06	1.43	0.80	0.98	1.17	0.74	1.26	1.78
	3	0.90	1.27	1.65	0.38	1.09	1.80	0.84	1.25	1.65
	4	0.44	0.75	1.06	0.37	0.68	0.98	0.64	0.92	1.21
	5	0.82	1.06	1.30	0.87	1.05	1.23	0.82	1.13	1.44
	6	0.94	1.22	1.49	1.01	1.23	1.44	0.84	1.14	1.44
	7	0.91	1.00	1.10	0.53	0.91	1.30	0.38	0.79	1.19
	8	0.51	0.81	1.12	0.73	0.88	1.03	0.85	0.97	1.09
	9	0.48	0.68	0.87	0.48	0.64	0.80	0.23	0.57	0.91
	10	0.92	1.10	1.28	0.77	1.01	1.25	0.67	0.92	1.17
Male avg	0.71	0.98	1.26	0.67	0.94	1.20	0.66	0.98	1.29	
Female avg	0.77	0.95	1.13	0.77	0.92	1.07	0.75	0.92	1.09	
All avg	0.65	0.95	1.25	0.66	0.91	1.17	0.62	0.92	1.23	

从心理测量函数中可以发现,除了 -30° 的阈值 PSE 为 1.07 外,其余 6 个角度的 PSE 均小于 1,表明大多数用户无论是俯视、仰视,还是平视,都倾向于低估头部旋转。分析表中数据可得,俯视 -45° 时 25%和 75%阈值分别为 0.69 和 1.28,俯视 -30° 时 25%和 75%阈值分别为 0.72 和 1.41,俯视 -15° 时 25%和 75%阈值分别为 0.71 和 1.28,平视 0° 时 25%和 75%阈值分别为 0.67 和 1.30,仰视 15° 时 25%和 75%阈值分别为 0.65 和 1.25,仰视 30° 时 25%和 75%阈值分

别为 0.66 和 1.17,仰视 45° 时 25%和 75%阈值分别为 0.62 和 1.23。可以发现,俯视 3 个角度的阈值范围普遍高于仰视的 3 个角度,用户俯视普遍比仰视更高估头部旋转阈值。

在 25%阈值下,性别($F(1,18)=3.5684, p=0.06$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1,18)=0.25714, p=0.95$)对阈值没有显著性差异。在 PSE 阈值下,性别($F(1,18)=2.22, p=0.1$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1,18)=14.11, p<<0.001$)具有很强的显著性差异。在 75%阈值下,性别($F(1,$

18)=0.6941, $p=0.40$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1, 18)=2.38, p=0.03$)对阈值有显著性差异,表明加入了俯仰角之后,不同性别的头部旋转阈值不存在差异,角度对头部旋转阈值存在显著差异。对俯视的3个角度进行显著性分析,性别($F(1, 18)=1.1747, p=0.08$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1, 18)=2.21, p=0.002$)对阈值有显著性差异,表明在俯视时,不同性别之间的头部旋转阈值不存在差异,俯视的3个角度之间的头部旋转阈值存在差异。对仰视的3个角度进行显著性分析,性别($F(1, 18)=0.13, p=0.71$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1, 18)=3.47, p=0.003$)对阈值有显著性差异,表明仰视时,不同性别之间的头部旋转阈值不存在差异,仰视的3个角度之间的头部旋转阈值存在差异。

5.2 角度差异和阈值的变化趋势分析

为了进一步分析验证阈值的变化是否会受到角度和性别的影响,根据用户7个角度下不同阈值的变化趋势,绘制出整体用户、男性和女性分别在25%、PSE(50%)以及75%阈值下的结果,如图7—图9所示。图中,绿色曲线是75%的阈值,红色曲线是PSE(50%)的阈值,蓝色曲线是25%的阈值;浅绿色显示的区域表示25%至75%的阈值范围。

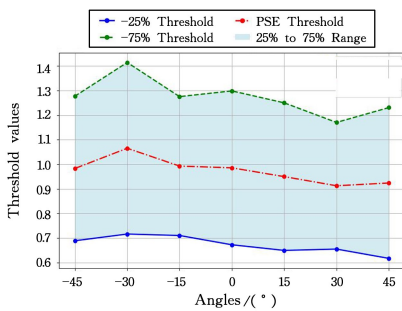


图7 全体用户的阈值变化趋势(电子版为彩图)

Fig. 7 Trend of threshold changes for all users

从图7可以得出,PSE阈值从-45°到45°呈现出显著的变化趋势。具体而言,PSE阈值在-45°至0°时波动较大,尤其在-30°处达到高峰,然后在0°到45°逐渐平稳;25%和75%阈值的曲线也显示出同样的变化趋势。同时,从总体趋势图中可以观察到,从-45°到0°的区间宽度较不稳定,尤其在-30°处达到最宽,表明在这个角度下总体用户的阈值范围最大;从0°到45°区间宽度逐渐变窄,阈值范围逐渐减小。

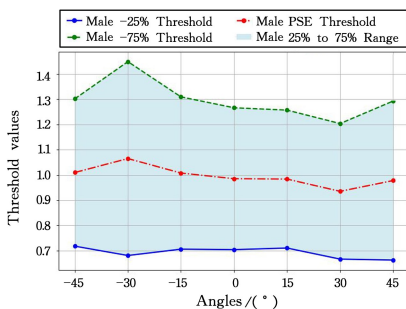


图8 男性用户的阈值变化趋势(电子版为彩图)

Fig. 8 Trend of threshold changes for male users

从图8可以得出,男性用户从-45°到-30°的PSE阈值显著上升,在-30°处达到最高,然后在-15°处有所下降,-15°至15°区间趋于稳定,30°处有所下降,45°处有所上升。

同时,俯视角下(-45°至0°)区间较宽,特别是在-30°处,这与总体趋势相似;从0°至45°,区间相对较窄,表示在仰视过程中男性用户的阈值范围减小。

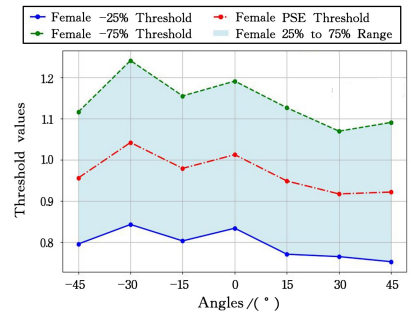


图9 女性用户的阈值变化趋势(电子版为彩图)

Fig. 9 Trend of threshold changes for female users

从图9可以得出,女性在-45°到-30°的PSE阈值同样显著上升,最高点在-30°处,随后至0°趋于平稳,0°至45°呈现下降趋势。根据女性数据分析得出,女性在俯视角下的区间宽度变化与男性相似,且同样在-30°处显示出较宽的区间。从0°至45°,女性的区间变化趋势与男性相似,但整体上区间较男性略窄,表明女性在这些角度下的阈值范围可能略小于男性。

5.3 SSQ分析

本研究利用SSQ量表来评估参与者的晕动症状况^[40],每个用户共参与6组实验,实验开始前填写一份SSQ量表作为对照,每完成一组实验后让用户再次填写SSQ量表。20位用户都顺利地完成了所有实验,没有在实验中途中止的情况。我们计算了每位用户的SSQ总严重程度(Total Severity, TS)评分,并以性别和实验次数为因素进行双因素方差分析。分析结果显示,性别因素($F(1, 18)=4.83014, p=0.03$)对SSQ分数有显著性影响,而实验次数($F(1, 18)=0.47073, p=0.80$)未对SSQ分数产生显著性影响。通过比较6次实验中男女的TS评分平均值,发现男性的平均TS评分在每次实验后均高于女性,如图10所示,这表明在加入俯仰角的实验条件下,男性相较于女性更易受晕动症的影响。

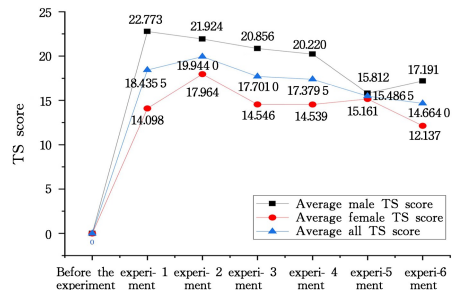


图10 男性、女性及总体TS评分的平均值折线图

Fig. 10 Line chart of average TS scores for males, females and overall

5.4 响应时间分析

通过分析每次实验的响应时间,发现阈值为1时,响应时间的均值最大,且出现了最大的异常值。随着阈值远离1,响应时间的均值和异常值的最大值均呈现出整体减小的趋势,表明在更极端的阈值条件下,用户能够更快地做出判断。

为了进一步分析影响响应时间的因素,使用多因素方差分析,以性别、11个阈值、7个角度作为分析因子。分析结果显示,性别($F(1,18)=1.9335, p=0.16$)和角度($F(2,18)=2.4121, p=0.08$)对响应时间没有显著性差异。然而,阈值($F(10,180)=4.7072, p<0.001$)对响应时间有显著性差异,表明阈值是响应时间的重要影响因素。

6 讨论

6.1 阈值检测

在阈值检测方面,除了在一 30° 时主观等效点(PSE)阈值为1.07外,其余6个角度的PSE阈值均小于1,说明无论是俯视、仰视还是平视,大多数用户都会低估头部旋转。在PSE阈值下,性别($F(1,18)=2.22, p=0.1$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1,18)=14.11, p<0.001$)具有很强的显著性差异。在75%阈值下,性别($F(1,18)=0.6941, p=0.40$)对阈值没有显著性差异,角度($F(1,18)=2.38, p=0.03$)对阈值有显著性差异。以上表明,用户在俯视和仰视时的头部旋转阈值与平视相比的确存在差异。因此,本文认为在用户的俯仰角度上进行阈值的划分,在用户抬头或低头一定角度时适用不同的头部旋转阈值方案,可以达到方便探索虚拟场景的目的。例如,在虚拟场景中观看 360° 全景视频,视频被放置在一个球体中,用户在球心位置左右环顾,同时还需要在抬头或者低头的情况下左右环顾,在俯视或仰视中加入头部旋转阈值方案可以更加方便地让用户观看到整个全景视频。用户在坐姿状态下进行大角度的抬头和低头环顾虚拟场景时,由于人的生理结构限制,会比平视时环顾的角度范围小,所以在俯视或仰视中加入头部旋转阈值方案可以更加方便地让用户观看到整个虚拟场景。

用户反馈仰视 15° 和俯视 15° 与平视的差距不大,本文认为是角度的取值问题导致的,未来可以从角度方向进行进一步的分析。性别方面,研究发现性别因素对头部旋转阈值的影响较小。根据用户的反馈情况来看,接触电子游戏时间长或经常接触球类运动(如羽毛球、乒乓球)的用户对阈值的变化会更加敏感,判断会更加准确,响应速度也更快。特别是经常接触游戏的用户,由于在游戏中需要保持更高的专注力,并且此类用户相较于其他用户而言对虚拟的场景更加熟悉,所以他们对旋转灵敏度的变化表现得更加敏感。关于头戴式显示器自身重量的问题,只有小部分用户表示在做最后两组实验时脖子会有疲劳感,并不会影响左右头部旋转对阈值的判断。

6.2 角度差异和阈值的变化趋势

通过比较不同性别用户在不同视角下的阈值差异,发现对于全体用户来说,仰视角度(0° 至 45°)的阈值变化相对于俯视角度(-45° 至 0°)更为平稳,尤其是在25%和75%阈值间的填充区域较窄,变化幅度较小。在男性和女性之间,无论是仰视还是俯视,变化趋势均相似,但男性在俯视状态下的阈值波动较大,特别是在一 30° 的位置。在仰视状态下,所有数据集的阈值变化呈现渐进式且相对平稳的趋势,没有出现剧烈波动。而在俯视状态下,在一 30° 时25%和75%阈值间的填充区域较宽,特别是在一 30° 到一 15° 的区间内,PSE阈值

显著下降,这一现象在所有数据集中均有体现,表明在俯视图时一 30° 对阈值判断的影响最大。

进一步分析发现,在俯视角下,男性和女性的判断差异较大,男性在一 30° 和 45° 的阈值区间稍宽于女性,表明男性在这些角度下的阈值敏感性较低。在仰视角下,男性和女性的阈值区间均变窄,表明阈值判断敏感性增加,但女性的区间通常比男性略窄,说明女性在这些角度下的阈值范围小且更敏感。无论是男性还是女性,一 30° 均是阈值变化最显著的角度,这与总体数据分析结果一致。

总体而言,男性和女性在多数角度上的阈值变化趋势展现出一致性。有研究表明,人眼在休息状态下自然会向下看,角度约为一 30° 到一 15° 。实验结果显示,在俯视 15° 至俯视 30° 的视角范围内,人眼感觉最为舒适且疲劳感最低。如图7所示,当用户从 0° 至俯视一 30° 时,其对阈值的估计逐渐增加,表明用户在舒适的视角范围内对阈值的感知敏感度最低。实验中对数据的分析都表明在一 30° 处阈值变化最显著,这一角度无论对男性还是女性而言都是阈值变化的关键点,这与我们所查到的资料一致。在仰视(0° 至 45°)和俯视(-45° 至 0°)的情况下,男性和女性的阈值变化趋势均表现出一致性,其中俯视角度的阈值变化更为显著,特别是在一 30° 到一 15° 区间。尽管整体趋势相似,但男性和女性在一些角度的阈值大小上仍然存在差异,这可能与不同用户的生理或心理因素有关。

6.3 晕动症

实验结果显示,性别($F(1,18)=4.83014, p=0.03$)对SSQ分数有显著性影响,而实验次数($F(1,18)=0.47073, p=0.80$)对SSQ分数没有显著性影响。结合6次实验男女的TS评分平均值(结合表2)可知男性的TS评分平均值普遍高于女性,表明在加入俯仰角的条件下,男性比女性更容易受到晕动症的影响。然而,本文认为实验的样本量以及样本范围还需扩充,尤其是年龄方面,当前20名用户的年龄范围是18岁到24岁,均为在校学生,在样本量和样本范围上还存在局限性。

另外,根据用户的反馈,晕眩和恶心等不适感在实验初期由于不熟悉虚拟现实环境而较为强烈,但随着实验的进行,参与者逐渐适应了实验场景和流程,相关的不适感也有所减轻。这一点从图表中实验次数增加与TS评分逐渐降低的趋势中可以验证。因此,应用开发者可以在正式探索虚拟场景之前加入体验场景,让用户提前适应阈值的变化,以减轻初期可能出现的不适,优化用户体验。

6.4 响应时间

通过分析箱线图数据及多因素方差分析结果,发现性别($F(1,18)=1.9335, p=0.16$)和角度($F(2,18)=2.4121, p=0.08$)对响应时间没有显著性差异,阈值($F(10,180)=4.7072, p<0.001$)对响应时间有显著性差异,表明响应时间的快慢受到阈值差异的显著影响。根据用户的反馈,在远离1的阈值下(阈值1代表头部旋转灵敏度与现实一致),更容易判断出头部旋转的速度是更快还是更慢。相反,在阈值接近1时,由于头部旋转灵敏度与现实的头部旋转非常接近,需要更多时间判断速度的变化。

7 结论

本文研究的目的是探究不同俯仰角度对头部旋转阈值的影响。实验发现,俯仰角度的变化显著影响阈值,在俯视角度下,男性和女性的判断差异较大,男性在 -30° 和 45° 的阈值敏感性稍低于女性。在仰视角度下,男性和女性的阈值区间均变窄,女性在仰视角度下的阈值范围比男性更小且更敏感。实验还发现,男性和女性在俯视 -30° 时,阈值变化最显著,且阈值范围最大,可能与用户在 -15° 至 -30° 的俯视观察角度时头部舒适感最好、疲劳感最低有关。实验还发现,俯视、仰视和平视时,用户大多倾向于低估头部旋转阈值,但用户在俯视时比仰视时会普遍高估头部旋转阈值。不同的俯视和仰视角度间旋转阈值的差异较小,这可能与俯仰角的设定有关。研究还发现,在考虑俯仰角的情况下,男性比女性更易受到晕动症的影响。随着时间的推移,用户逐渐适应虚拟环境,晕动症症状得到缓解。在极端旋转阈值条件下,用户能更迅速地做出反应。

结束语 本实验的用户样本量有限且年龄范围较窄,对结果的普遍适用性有一定影响。仰视和俯视的角度划分可能不够细致,也限制了实验结果的全面性。本研究仅讨论了坐姿状态下俯仰角的头部旋转增益,没有研究其他状态下的俯仰角头部旋转增益,未来将继续探索这个领域。此外,本文未考虑场景复杂性对俯仰角头部旋转增益的影响,不同场景的光流、物体的数量、室内室外环境等因素都可能影响不同俯仰角下用户头部旋转增益阈值的变化,未来计划设计更精细的虚拟场景,以深入分析这些变量对头部旋转增益的具体影响。后续还将考虑用户头部左右旋转时俯仰角发生变化的情况,因为用户在左右旋转头部时俯仰角度发生变化也是一种经常出现的情形,所以此情况也十分具有研究价值。

参考文献

- [1] WANG M, LYU X Q, LI Y J, et al. Vr content creation and exploration with deep learning: A survey[J]. Computational Visual Media, 2020, 6(1): 3-28.
- [2] KELLY J W, OSTRANDER A G, LIM A F, et al. Teleporting through virtual environments: Effects of path scale and environment scale on spatial updating[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2020, 26(5): 1841-1850.
- [3] BUTTUSSI F, CHITTARO L. Locomotion in place in virtual reality: A comparative evaluation of joystick, teleport, and leaning[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 27(1): 125-136.
- [4] HANSON S, PARIS R A, ADAMS H A, et al. Improving walking in place methods with individualization and deep networks [C]//Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. 2019: 367-376.
- [5] NILSSON N C, SERAFIN S, LAURSEN M H, et al. Tapping-in-place: Increasing the naturalness of immersive walking-in-place locomotion through novel gestural input[C]//Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces. 2013: 31-38.
- [6] RAZZAQUE S, KOHN Z, WHITTON M C. Redirected walking [C]//Proceedings of the 22nd Annual Conference of the European Association for Computer Graphics. 2001
- [7] STEINICKE F, BRUDER G, JERALD J, et al. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2010, 16(1): 17-27.
- [8] STEINICKE F, BRUDER G, JERALD J, et al. Analyses of human sensitivity to redirected walking[C]//Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. 2008: 149-156.
- [9] SUN Q, PATNEY A, WEI L Y, et al. Towards virtual reality infinite walking: Dynamic saccadic redirection[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(4): 67.
- [10] RAZZAQUE S. Redirected walking [M]. University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [11] XU S Z, LV T, HE G, et al. Optimal pose guided redirected walking with pose score precomputation[C]//2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2022: 655-663.
- [12] XU S Z, LIU J H, WANG M, et al. Multi-user redirected walking in separate physical spaces for online vr scenarios[J]. arXiv: 2210.05356, 2023.
- [13] FAN C W, XU S Z, YU P, et al. Redirected walking based on historical user walking data[C]//2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2023: 53-62.
- [14] DAVID E, CRISTÓBAL C, LILI T, et al. A psychophysically calibrated controller for navigating through large environments in a limited free-walking space[C]//Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. 2008: 157-164.
- [15] SHARIF R, ZACHARIAH K, MARY C W. Redirected walking [C]//Proceedings of EUROGRAPHICS. 2001: 105-106.
- [16] HODGSON E, BACHMANN E. Comparing four approaches to generalized redirected walking: Simulation and live user data[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2013, 19(4): 634-643.
- [17] XU S Z, LIU J H, YU G, et al. Efficiently Bypassing Obstacles to Reach Specified Locations: A Curvature Gain-Based Redirected Walking Strategy[J/OL]. <http://iccv.org/2024/papers/s2p2-422-tvcg.pdf>.
- [18] XU S Z, HUANG K, FAN C W, et al. Spatial Contraction Based on Velocity Variation for Natural Walking in Virtual Reality[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(5): 2444-2453.
- [19] STEINICKE F, BRUDER G, KOHLI L, et al. Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback[C]//Proceedings of the 2008 International Conference on Cyberworlds. 2008: 217-223.
- [20] FREITAG S, WEYERS B, KUHLEN T W. Examining rotation gain in cave-like virtual environments[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2016, 22(4): 1462-1471.
- [21] ESMAEILI S, BENDA B, RAGAN E D. Detection of scaled hand interactions in virtual reality: The effects of motion direc-

- tion and task complexity[C]// Proceedings of the 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). 2020;453-462.
- [22] OGAWA N, NARUMI T, HIROSE M. Effect of avatar appearance on detection thresholds for remapped hand movements[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2020, 27(7):3182-3197.
- [23] CHO Y H, MIN D H, HUH J S, et al. Walking outside the box: Estimation of detection thresholds for non-forward steps[C]// Proceedings of the 2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. 2021;448-454.
- [24] LUO E X, TANG K Y, XU S Z, et al. Walking Telescope: Exploring the Zooming Effect in Expanding Detection Threshold Range for Translation Gain[C]// International Conference on Computational Visual Media. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024;252-273.
- [25] XU S Z, CHEN F X Y, GONG R, et al. BiRD: Using Bidirectional Rotation Gain Differences to Redirect Users during Back-and-forth Head Turns in Walking[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2024, 30(5):2693-2702.
- [26] KJENSTAD E M, RINGSBY H K, GAEB R J, et al. Experiencing Rotation and Curvature Gain for Redirected Walking in Virtual Reality [C] // Proceedings of the 15th International Workshop on Immersive Mixed and Virtual Environment Systems. 2023;1-6.
- [27] KIM D, KIM S, SHIN J, et al. The effects of spatial configuration on relative translation gain thresholds in redirected walking [J]. Virtual Reality, 2023, 27(2):1233-1250.
- [28] GAN Q W, XU S Z, GONG R, et al. Effects of Scene Visual Characteristics on the Perception of Rotation Gains[C]// 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW). IEEE, 2024;1084-1085.
- [29] VAN GEMERT T, HORNBAEK K, BERGSTRÖM J. Step on it: asymmetric gain functions improve starting and stopping in virtual reality walking [J]. Virtual Reality, 2023, 27(2):777-795.
- [30] WANG C, ZHANG S H, ZHANG Y Z, et al. On Rotation Gains Within and Beyond Perceptual Limitations for Seated VR[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2022, 29(7):3380-3391.
- [31] JAEKL P, JENKIN M, HARRIS L R. Perceiving a stable world during active rotational and translational head movements[J]. Experimental brain research, 2005, 163(3):388-399.
- [32] JERALD J, PECK T, STEINICKE F, et al. Sensitivity to scene motion for phases of head yaws[C]// Proceedings of the 5th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization. 2008;155-162.
- [33] BRUDER G, INTERRANTE V, PHILLIPS L, et al. Steinicke. Redirecting walking and driving for natural navigation in immersive virtual environments[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2012, 18(4):538-545.
- [34] ZHANG J, LANGBEHN E, KRUPKE D, et al. Detection thresholds for rotation and translation gains in 360° video-based telepresence systems[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 24(4):1671-1680.
- [35] KIM D, KIM J, EUN SHIN J, et al. Effects of virtual room size and objects on relative translation gain thresholds in redirected walking[J]. arXiv:2201.04274, 2022.
- [36] KIM D, SHIN J E, LEE J, et al. Adjusting relative translation gains according to space size in redirected walking for mixed reality mutual space generation[C]// 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). 2021;653-660.
- [37] SCHMITZ P, HILDEBRANDT J, VALDEZ A C, et al. You spin my head right round: Threshold of limited immersion for rotation gains in redirected walking[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2018, 24(4):1623-1632.
- [38] BRUMENT H, MARCHAL M, MARCHAL M, et al. Studying the influence of translational and rotational motion on the perception of rotation gains in virtual environments[C]// Proceedings of the 2021 ACM Symposium on Spatial User Interaction. 2021;1-12.
- [39] LANGBEHN E, WITTIG J, KATZAKIS N, et al. Turn your head half round: Vr rotation techniques for situations with physically limited turning angle[C]// Proceedings of Mensch and Computer 2019. 2019;235-243.
- [40] KENNEDY R S, LANE N E, BERBAUM K S, et al. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness [J]. The International Journal of Aviation Psychology, 1993, 3(3):203-220.



XIE Zehua, born in 1998, postgraduate. His main research interests include computer graphics and virtual reality.



REN Yangfu, born in 1988, postgraduate, lecturer, is a member of CCF (No. 62198M). His main research interests include computer graphics and virtual reality.