

8-14-2020

Impact of Consistency Between Visually Perceived Movement and Real Movement on Cybersickness

Cai Li

1.School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;2. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China;

Dongdong Weng

1.School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;2. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China;

Zhenliang Zhang

1.School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;2. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China;

Xingyao Yu

1.School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;;2. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Impact of Consistency Between Visually Perceived Movement and Real Movement on Cybersickness

Abstract

Abstract: The cybersickness is still a huge obstacle for virtual reality (VR) system. Current researches on cybersickness are mostly based on static or dynamic simulators, while studies in the real movement state is rare. An evaluating system which employed a head-mounted display (HMD) with a running vehicle was proposed to study the *cybersickness in the real movement state*. In this system, users sitting in the vehicle could see virtual scenes which was consistent with the real motion through the HMD. Subjective and objective evaluating experiments were proposed to analyze the different levels of the cybersickness caused by visual-vestibular conflict. The results show that the consistency of real movement and visually perceived movement have a great impact on cybersickness. Cybersickness gets worse when the consistency decreases. Serious cybersickness may lead to extreme situation where the discomfort may not be afforded by users.

Keywords

cybersickness, real movement, visual-vestibular conflict, head-mounted display

Recommended Citation

Cai Li, Weng Dongdong, Zhang Zhenliang, Yu Xingyao. Impact of Consistency Between Visually Perceived Movement and Real Movement on Cybersickness[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(9): 1950-1956.

虚实运动一致性对虚拟现实晕动症的影响

蔡力^{1,2}, 翁冬冬^{1,2}, 张振亮^{1,2}, 余兴尧^{1,2}

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 北京市混合显示与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081)

摘要: 晕动症是制约虚拟现实技术发展的重要因素之一, 目前关于虚拟现实晕动症的研究大多基于静态或者运动仿真平台, 极少在真实运动状态下进行研究。为了研究真实运动状态下的晕动症, 设计了一套虚拟现实系统并对虚拟现实晕动症进行评测。系统使用头盔显示器和一辆可以实时采集运动状态的车辆, 让参与者在实验过程中看到与真实运动状态一致的虚拟场景。通过主观和客观的对比实验对参与者在视觉和前庭感知冲突的条件下产生的晕动症程度进行了评价。实验结果表明, 运动状态与视觉状态是否一致对虚拟现实晕动症有很大的影响, 用户在使用系统时的晕动症程度会随着真实运动状态与视觉一致性的减小而提升, 在极端条件下可产生用户无法承受的生理不适状况。

关键词: 虚拟现实晕动症; 真实运动状态; 视觉前庭冲突; 头盔显示

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 09-1950-07

Impact of Consistency Between Visually Perceived Movement and Real Movement on Cybersickness

Cai Li^{1,2}, Weng Dongdong^{1,2}, Zhang Zhenliang^{1,2}, Yu Xingyao^{1,2}

(1.School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2.Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The cybersickness is still a huge obstacle for virtual reality (VR) system. Current researches on cybersickness are mostly based on static or dynamic simulators, while studies in the real movement state is rare. An evaluating system which employed a head-mounted display (HMD) with a running vehicle was proposed to study the *cybersickness in the real movement state*. In this system, users sitting in the vehicle could see virtual scenes which was consistent with the real motion through the HMD. Subjective and objective evaluating experiments were proposed to analyze the different levels of the cybersickness caused by visual-vestibular conflict. The results show that the consistency of real movement and visually perceived movement have a great impact on cybersickness. Cybersickness gets worse when the consistency decreases. Serious cybersickness may lead to extreme situation where the discomfort may not be afforded by users.

Keywords: cybersickness; real movement; visual-vestibular conflict; head-mounted display

引言

虚拟现实技术因具有灵活的环境控制、可以创

造出生态学有效刺激呈现和及时的反馈等其他传统设备不具备的优点, 在近几年得到了快速的发展, 并且已经在训练、康复和临床治疗等各种领域中得到广泛的应用^[1-2]。但是, 虚拟现实技术的发展也带来了许多的问题。其中, 最主要的问题就是虚拟现实晕动症。大量的使用者在体验虚拟现实设备后都产生过类似晕车、晕船的症状, 这种症状被称为晕屏症或模拟器晕动症^[3-4]。在文中我们统称



收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-07-11;
基金项目: 国家自然科学基金(61370134), 国家科技支撑计划(2015BAK01B05);
作者简介: 蔡力(1988-), 男, 山西, 硕士, 研究方向为虚拟现实; 翁冬冬(1979-), 男, 北京, 博士, 副研究员, 研究方向为虚拟现实系统; 张振亮(1990-), 男, 河北, 博士, 研究方向为人工智能。

<http://www.china-simulation.com>

• 1950 •

为虚拟现实晕动症。

虚拟现实晕动症严重地制约了虚拟现实技术的发展, 因为虚拟现实晕动症会带来许多令人不适的症状, 包括: 恶心、皮肤苍白、出冷汗、呕吐、头晕、头痛、唾液分泌增多、疲劳等^[3]。

由于大多数的虚拟现实应用需要与虚拟环境产生相互作用, 因此在虚拟现实晕动症研究中, 虚实运动不一致引发的虚拟现实晕动症是研究的热点^[3]。研究者们通过搭建静态或者动态的仿真平台对虚拟现实晕动症进行了大量的研究。仿真平台可以模拟运动时的位姿数据, 包括: 角度, 振动等, 但是却无法真正的模拟真实的运动状态。

本文利用了具有真实运动状态的车辆搭建了一套虚拟现实系统, 并且利用该系统对虚实运动状态不一致引发的晕动症进行了研究, 探索了虚实运动一致性与虚拟现实晕动症之间的关系。

1 相关工作

针对虚实运动不一致产生的虚拟现实晕动症, 人们做了很多研究, 如 Chun-Shu Wei^[5]利用放置在一个六自由度运动平台上的汽车和 360° 环幕投影设备搭建了一个虚实运动仿真平台, 利用这个平台诱发虚拟现实晕动症, 并使用脑电设备对晕动症进行了评价。

Xiao Dong^[6]等使用虚拟驾驶游戏对实验者的姿势稳定性和虚拟现实晕动症进行了评测。他们让两位实验者作为司机和乘客进行虚拟环境下的驾驶游戏, 并对实验者进行隔离, 降低行为感染的风险。实验中记录了实验者的头部和躯干运动数据, 并使用 SSQ 量表来研究行为控制和虚拟现实晕动症之间的关系。

Baris Aykent^[7]等分别使用静态驾驶模拟器和动态驾驶模拟器对晕动症程度进行评测, 通过观测参与者的头部运动情况, 并结合 SSQ 量表进行分析, 发现参与者的晕动症程度在动态驾驶模拟器中明显低于在静态驾驶模拟器中的程度, 研究了虚实运动状态一致性与虚拟现实晕动症之间的关系。

Nadia W. Mullen^[8]等研究了真实驾驶环境和静态驾驶模拟器产生的虚拟现实晕动症之间的关系, 他们利用神经心理学的测量方法(视觉集中区域、注意力、视觉搜索时间)对晕动症进行了评价, 实验结果表明在模拟驾驶中容易产生晕动症的参与者在真实驾驶中有更好的表现。

W.T. Lo^[9]等人研究了在静态条件下虚拟场景的旋转对虚拟现实晕动症的影响。他们将 16 位男性参与者分成 4 组进行实验, 每一组实验都使用相同的虚拟场景但是旋转方向不同, 实验使用 SSQ 量表作为评价方法。实验结果表明, 相比没有任何旋转的虚拟场景, 虚实运动不一致程度更高的旋转虚拟场景会引起强烈的虚拟现实晕动症。

Hettinger^[10]等人研究了视动错觉与晕动症的关系, 他们认为视动错觉会引起视觉-前庭冲突, 增加晕动症的严重程度。Bruce Bridgeman^[11]等人研究了光学矫正技术对前庭-视觉冲突引起的虚拟现实晕动症的影响。他们认为光学矫正技术可以减少虚拟现实晕动症的发生。

虽然前人对虚实运动一致性引发的虚拟现实晕动症进行了大量研究, 但是研究平台仅包括静态和运动仿真平台, 不能很好地模拟真实的运动状态。本文使用具有真实运动状态的车辆和头盔显示器搭建了一个虚拟现实研究系统, 并利用这个系统对虚实运动一致性引发的晕动症进行了研究。

2 实验设计

2.1 实验理论

目前虚拟现实晕动症生物学产生的原因尚未确立, 在虚拟现实晕动症研究中普遍被接受的理论是视觉和前庭冲突理论。这个理论认为, 如果外部环境的刺激被不同的感知器官感知的结果不同, 就会引起晕动症。视觉与前庭的冲突程度与虚拟现实晕动症程度密切相关^[4]。在引起视觉-前庭冲突的所有原因中, 虚实运动状态的不一致是主要原因, 因此, 本文针对虚实运动状态一致性与虚拟现实晕动症之间的关系进行了研究。

2.2 实验过程设计及实验步骤

2.2.1 系统搭建

本实验使用能够提供真实运动状态的车辆作为实验平台,相对于静态平台和运动仿真平台,车辆可以让实验者体验到最具真实感的运动状态,包括加速度,速度和方向的实时变化和不同路面状况。实验系统通过实时采集车辆的速度和方向与虚拟环境中的运动状态进行同步来保证虚实运动的一致。为了确保虚实运动状态的一致性,数据采集的延迟时间小于 20 ms。系统整体结构如图 1 所示。

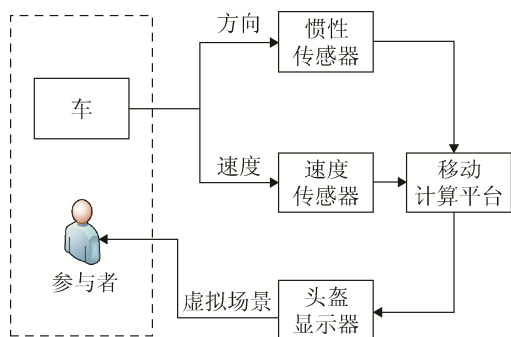


图 1 系统结构图

为了使虚拟场景可以适用于弯道、直道、上下坡道等各种行车路线和路面情况,并保证实验参与者不会受到虚拟参照物的影响。本实验采用了如图 2 所示的无规则排布的陨石群构建的虚拟场景。

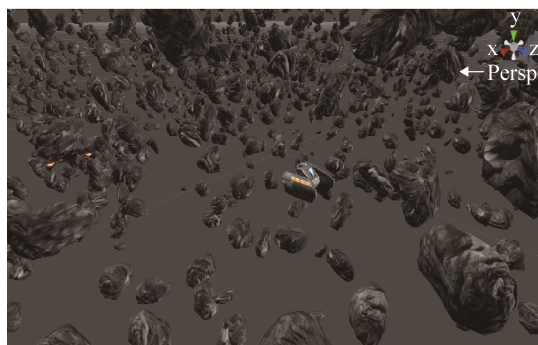


图 2 虚拟场景

本实验分别使用了一辆汽车和一辆三轮车作为运动平台,汽车可以进行高速度状态的实验(60 km/s),三轮车可以进行低速度状态的实验(10 km/s),实验现场如图 3 所示。



图 3 汽车实验现场图

系统的显示设备采用 Oculus Rift 头盔显示器,具有非常高的沉浸感和优秀的视觉体验。系统使用的速度传感器是根据霍尔效应制作的磁场传感器,通过配合强磁铁,在车轮转动过程中可以获得速度的脉冲信号,速度采集的过程是使用 51 单片机将脉冲信号转化为速度信号并传送至移动计算平台,(单位为: m/s)。系统的方向传感器使用 MTX 模块。MTX 是一种微型的 MEMS 惯性传感器,可以实时地获取物体的旋转欧拉角。

虚实运动同步需要将采集到的速度和方向信息实时地传输到计算机,并通过虚拟场景显示。本系统使用 Unity3d 软件作为系统的软件平台,通过多线程读取采集到的速度和方向与虚拟场景同步。实验结束后保存速度和方向信息作为运动不一致实验的数据源。

2.2.2 实验方法

选择 20 名年龄在 20~25 岁之间(AVE:21.8, SD:1.69)的实验参与者来完成实验,可以排除年龄对实验结果的干扰。实验者中男性 15 名,女性 5 名,实验会对不同性别的参与者的实验结果进行对比。对实验参与者要求是:身体健康,没有抽烟酗酒行为,没有前庭障碍,实验前后没有药物使用。在实验过程中要求每一位参与者都安静地坐在车里和椅子上,并将注意力集中在头盔显示设备上,以确保实验的准确性。图 4 所示为实验流程图。

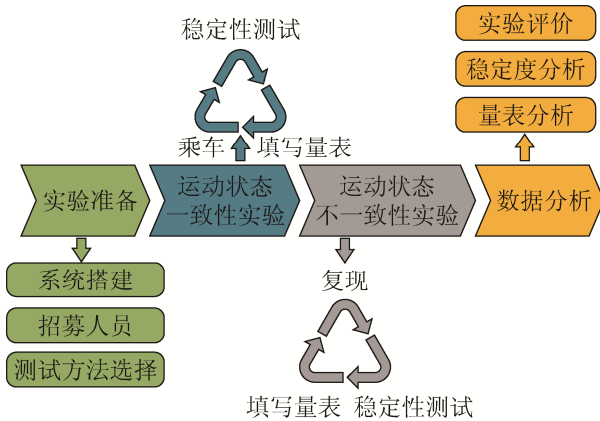


图 4 实验流程图

实验流程分为 4 个部分: 实验准备阶段、运动状态一致实验阶段、运动状态不一致实验阶段和数据分析阶段。实验准备阶段包括系统搭建、人员招募和测试方法选择, 在运动状态一致的实验阶段中, 参与者佩戴 Oculus Rift 坐在行驶的车中。实验时间为 10 min。实验结束后, 对实验参与者进行姿态稳定性测试, 并按照实验结束时间 0 min, 10 min 填写 SSQ 量表。运动状态不一致的实验阶段在参与者进行充分休息、并且没有晕动症症状后开始进行, 参与者佩戴 Oculus Rift 头盔坐在静止的椅子上, 虚拟场景的运动状态与运动一致性实验中的运动状态完全相同。实验结束后, 对参与者进行姿势稳定性测试。并按照实验结束时间 0 min, 10 min 来填写 SSQ 量表。数据分析阶段包括对实验的评价、主观量表分析和客观姿势稳定性分析 3 个方面。

2.2.3 测量方法

实验后采用主观与客观两种评价方式对实验结果进行评价, 包括 SSQ 量表和姿势稳定性测试。

SSQ 量表有 16 个小症状, 这 16 个小症状分属于 3 大症状, SSQ 量表内容如表 1 所示。

SSQ 量表的计算方法是各个小项的评分乘以与它相对应权重的和, 各个小项的评分有 0, 1, 2, 3, 分别对应无症状、轻微、中等和严重。通过 SSQ 量表, 可以单独对恶心、动眼神经不适和方向障碍三大症状进行评价。最后 SSQ 量表的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高。

表 1 SSQ 量表

SSQ 症状	恶心症状 (权重)(A)	动眼神经不适 (权重)(B)	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

虚拟现实晕动症往往不是在实验结束后立即发生的, 因此本实验为每一位参与者准备了 5 份 SSQ 量表, 分别记录实验前和两组实验刚结束、实验结束后 10 min 共计 5 组数据。

姿势稳定性测试是评估晕动症程度的有效方法^[12-13], 本实验要求每一位参与者分别在实验前、运动一致实验后、运动不一致实验后进行姿势稳定性测试, 测试选择闭眼单脚站立姿势作为保持测试稳定性的姿势。实验参与者保持稳定的时间作为晕动症程度的评价指标。测试姿势如图 5 所示。



图 5 姿势稳定性测试

3 实验结果分析

本实验的评测方法分为主观和客观评测方法，主观评测方法使用 SSQ 量表，客观评测方法使用姿势稳定性测试。

3.1 主观分析

图 6 是运动状态一致的实验与运动状态不一致的实验的 SSQ 量表总分，从图 6 可以看到，运动不一致实验的得分明显高于运动一致实验的得分。这个结果说明运动状态不一致的实验产生的虚拟现实晕动症症状比运动状态一致的实验更加强烈。说明视觉与前庭冲突是产生虚拟现实晕动症的主要因素。

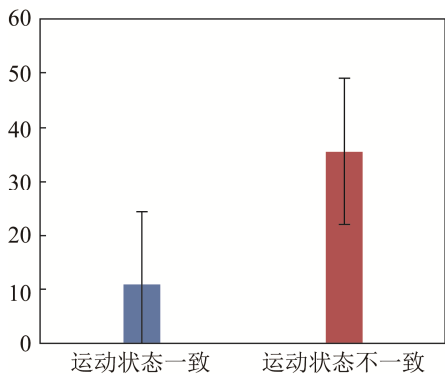


图 6 实验后的量表总分

图 7 表示两组实验的三大症状(恶心、动眼神经不适、方向障碍)得分情况，从图 7 可以看出在两组实验中方向障碍的症状得分高于其他两大症状。说明在虚实运动状态不一致产生的虚拟现实晕动症中，症状最明显的是方向障碍。

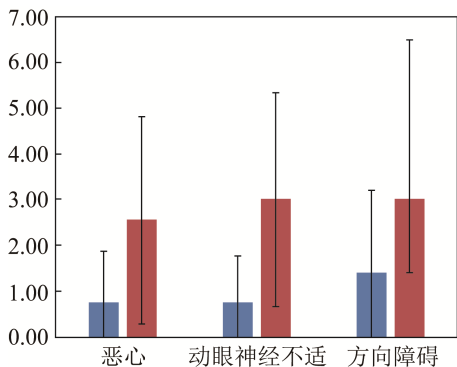


图 7 两组实验的三大症状得分

图 8 表示运动状态一致的实验后 10 min 与运动状态不一致的实验后 10 min 的三大症状得分情况分布，结合图 7 与图 8 可以看出，随着时间的推移，三大症状的得分都在不断地降低，动眼神经不适的症状在两组实验刚结束的时候得分不是最高，而在实验结束后 10 min 的得分最高。实验结果说明在退出虚拟环境后，动眼神经不适的症状随着时间的变化恢复得最慢。

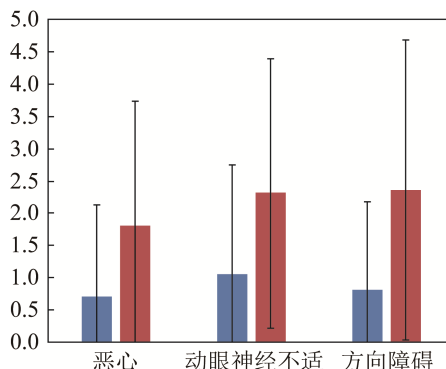


图 8 两组实验后 10 min 的三大症状得分

图 9 表示两组实验量表得分随时间的变化，图 10 表示不同性别的实验参与者量表总得分(5 名男性，5 名女性)。从图 8 和图 9 中可以看出，从虚拟环境中退出后，虚拟现实晕动症的症状会随着时间的推进而减弱。晕动症程度越高，症状减弱程度越明显。这说明虚拟现实晕动症的症状在外界刺激停止后开始减弱。从图 10 中可以看出，女性参与者的在两组实验中的晕动症产生程度明显大于男性参与者。说明性别差异会对虚拟现实晕动症产生影响。

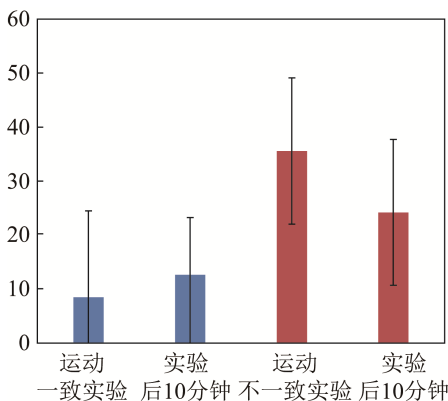


图 9 量表总得分随时间的变化

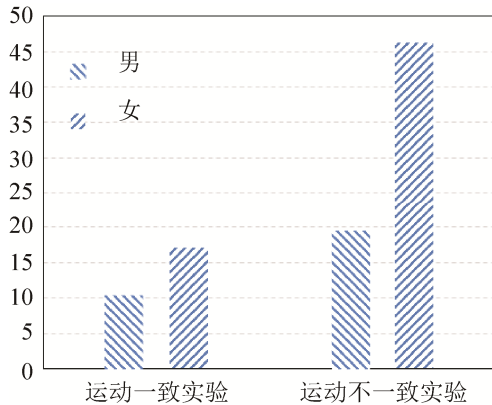


图 10 不同性别的实验参与者量表得分

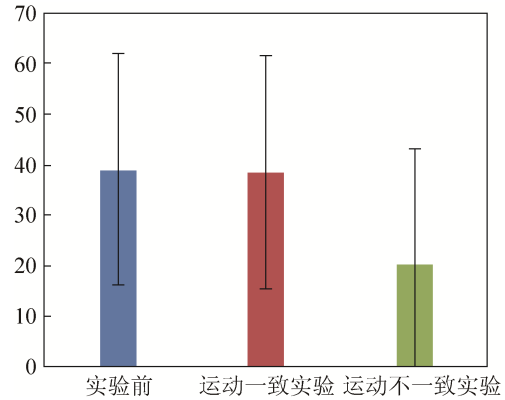


图 11 姿势稳定性测试时间

从上面的实验结果可以看出,虚拟现实晕动症的程度会随着虚实运动状态不一致程度的提升而提升。在其他条件一致的情况下,由虚实运动状态的不一致而产生的虚拟现实晕动症症状中,最严重的是方向障碍的相关症状。产生这个现象可能的原因是人体对方向的敏感程度高于速度等其它因素。在退出虚拟环境后,随着时间的推移,虚拟现实晕动症程度会逐渐降低,症状恢复最慢的是动眼神经不适的相关症状。产生这个现象可能的原因是外界刺激消失后,人体在进行自我恢复的过程中,像头痛等属于动眼神经不适的症状会加重,其他的症状都在不断地减轻。本实验参与者均为在校大学生,年龄在 20~25 岁(AVE:21.8, SD:1.69)之间,可以排除年龄对虚拟现实晕动症的影响,通过对不同性别的实验参与者进行观察,发现性别差异会对虚拟现实晕动症产生影响。

3.2 客观分析

每一个参与者在实验后都要进行姿势稳定性测试,测试结果如图 11~12 所示。

从图 11、图 12 中可以看出,实验之前和运动一致实验后的稳定性测试时间变化不是很明显,而运动不一致实验后的测试时间有明显的降低,并且个别参与者在实验前和运动一致实验后的测试时间会出现差异。上述结果说明运动状态不一致程度会影响实验者的姿势稳定性。并且不同的实验者会产生不同的影响。

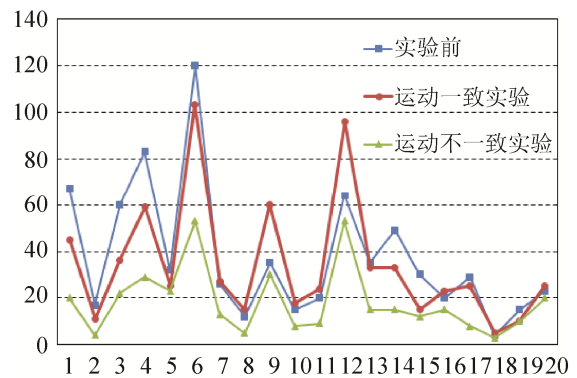


图 12 实验者的姿势稳定性测试时间趋势

从上面的实验结果可以看出,保持姿势稳定性的时间与虚拟现实晕动症程度有一定的相关性。当有轻微的虚拟现实晕动症产生时,保持姿势稳定性的时间并没有很大的变化。当虚拟现实晕动症程度严重时,保持姿势稳定的时间会明显变短。并且 20% 的参与者对虚拟现实晕动症的敏感程度会有所差别。这说明个体差异会影响虚拟现实晕动症的严重程度。

4 结论

本文利用具有真实运动状态的运动平台搭建了一套可以进行虚拟现实晕动症测试的实验系统。系统实现了虚拟场景构建、多线程串口数据采集、数据计算和坐标变换、数据保存和读取等功能。

在可用性方面,本实验系统的操作方法比较复杂,需要对操作人员进行培训。今后,会不断地对实验系统进行优化,提高操作的自动化水平,提升实验效率。

虚拟现实晕动症的研究在国外已经有了大量积累,但是在国内仍然处于起步阶段。本文结论对虚拟现实晕动症的相关研究提供了参考价值。今后,本课题组会针对其他引起虚拟现实晕动症的因素进行研究,不断探索虚拟现实晕动症产生的原因并提出缓解晕动症的有效解决方案。

参考文献:

- [1] Walker A D. The role of head movements in simulator sickness generated by a virtual environment [D]. USA: Clemson University, 2008.
 - [2] Nolin P, Stipanovic A, Henry M, et al. ClinicaVR: Classroom-CPT, A virtual reality tool for assessing attention and inhibition in children and adolescents [J]. Computers in Human Behavior (S0747-5632), 2016, 59: 327-333.
 - [3] Stanney K M, Kennedy R S, Drexler J M. Cybersickness is not simulator sickness [C]// Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society annual meeting. USA: SAGE Publications, 1997, 41(2): 1138-1142.
 - [4] Rebenitsch L R. Cybersickness prioritization and modeling [D]. USA: Michigan State University, 2015.
 - [5] Wei C S, Ko L W, Chuang S W, et al. EEG-based evaluation system for motion sickness estimation [C]// International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering. USA: IEEE, 2011: 100-103.
 - [6] Dong X, Yoshida K, Stoffregen T A. Control of a virtual vehicle influences postural activity and motion sickness [J]. Journal of Experimental Psychology Applied (S1076-898X), 2011, 17(2): 128-138.
 - [7] Aykent B, Merienne F, Guillet C, et al. Motion sickness evaluation and comparison for a static driving simulator and a dynamic driving simulator [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering (S0954-4062), 2014, 228(7): 818-829.
 - [8] Mullen N W, Weaver B, Rieneau J A, et al. Driving Performance and Susceptibility to Simulator Sickness: Are They Related? [J]. American Journal of Occupational Therapy (S0272-9490), 2010, 64(2): 288-295.
 - [9] Lo W T, So R H. Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes [J]. Applied Ergonomics (S0003-6870), 2001, 32(1): 1-14.
 - [10] Hettinger LJ, Berbaum KS, Kennedy WP. Vection and Simulator Sickness [J]. Military Psychology (S0899-5605), 1990, 2(3): 171-181.
 - [11] Bridgeman B, Blaesi S, Campusano R. Optical correction reduces simulator sickness in a driving environment [J]. Human Factors (S0018-7208), 2014, 56(8): 1472-1481.
 - [12] Bos J E, Ledegang W D, Lubeck A J, et al. Cinerama sickness and postural instability [J]. Ergonomics (S0014-0139), 2013, 56(9): 1430-1436.
 - [13] Macaudo G, Bertolini G, Palla A, et al. Binding body and self in visuo-vestibular conflicts [J]. European Journal of Neuroscience (S0953-816X), 2014, 41(6): 810-817.
-
- (上接第 1949 页)
- [4] 刘浩. 基于质点-弹簧模型的实时三维布料模拟系统 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
 - [5] 王威, 周诚, 杨云, 等. 基于改进弹簧-质点模型的柔性绳索仿真 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(11): 2230-2236.
 - [6] 孙霄峰, 高帅, 尹勇, 等. 渔船模拟器中中层拖网的建模与仿真 [J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(3): 284-288.
 - [7] 刘鑫. 航海模拟器视景中缆绳的绘制 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
 - [8] 吴长林. 航海模拟器中缆绳作业的仿真研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
 - [9] 冯广慧. 基于弹簧-质点模型的快速布料仿真研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
 - [10] 赵士涛. 船舶系泊操纵中缆绳作业过程的仿真 [D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
 - [11] Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [J]. Proceedings of Graphics Interface (S0713-5424), 1995, 33(3): 147-155.
 - [12] Choi and Ko. Stable but responsive cloth [J]. ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH) (S0730-0301), 2002, 21(3): 604-611.
 - [13] R Bridson, R redkiw, J Anderson. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation [J]. ACM Transactions on Graphics (ACM SIGGRAPH) (S0730-0301), 2002, 21(3): 594-603.
 - [14] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
 - [15] 李伟. 船舶结构与设备 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2008.