

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107109

基于眼动追踪的虚拟现实运动评估初步研究*

孙雨萱 王殊轶

(上海理工大学 医疗器械与食品学院 上海 200093)

摘要: 针对虚拟现实运动中产生的晕动症,研究较少且多为主观评价的问题现状,探究了基于眼动数据的虚拟现实晕动症评估方法。利用眼动追踪技术,设计了受试者的自我评价问卷分数和移动参数建立场景评价模型,分析虚拟环境移动机制对虚拟现实晕动症状的影响与晕动症级别与眨眼频率变化的关系。结果显示不同主观晕动症程度下,眨眼频率明显不同,柱状图分析结果显示其增长率绝对值可以描述虚拟移动机制引起受试者晕动症的程度。结果证明眨眼频率数据可作为一种客观评估指标,以客观数学量化了主观晕动。另外根据数据的线性跟随变化与评价模型的显著性分析结果,还可推导出眨眼数据可作为一种实时指标,作为反馈信息指导虚拟场景运动参数变化,为今后的虚拟系统设计提供参考。

关键词: 虚拟现实;视觉诱导晕动症;眼动追踪技术;眨眼频率

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

A preliminary study on eye movement evaluation index of cybersickness

Sun Yuxuan Wang Shuyi

(College of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to solve the problem of few researchers on cybersickness and most of them are subjective, an objective method of cybersickness based on eye movement data was proposed. Used eye-tracking technology, we established an evaluation model based on the self-evaluation questionnaire scores and movement parameters of VR system, the impact of movement factors in the VR environment was explored. Then analyze the relationship between visually induced motion sickness level and the change of blink rate. Results show that the blink rate was significantly in different degrees of cybersickness, and histogram analysis showed that the absolute growth rate could describe the degree of symptoms caused by virtual motion mechanism. Experiments prove that the blink rate can be used as an objective evaluation index to quantify cybersickness by objective mathematics. In addition, according to the linear following of the data changes and the significance of the evaluation model, it is show that eye movement data can also be used as a real-time indicator, as feedback to guide the variation of motion parameters, this information provide reference for design of VR system.

Keywords: virtual reality; visually induced motion sickness; eye tracking; blink

0 引言

使用头戴式显示器(head mounted display, HMD)体验虚拟环境时,强烈的立体感和沉浸感往往会诱发不适,产生视觉诱导晕动症^[1-3](visually induced motion sickness, VIMS),即虚拟现实晕动症^[4],出现如头痛、呕吐、出汗、疲劳甚至方向障碍等状况。这种晕动疲劳是虚拟现实技术(virtual reality, VR)发展面临的主要障碍之一,开展相关研究具有重要的现实意义。Anstis等^[5]发现了人类视觉刺

激信中包含自我感知运动信息,奠定了现代视觉诱导晕动症研究的基础。Hettinger等^[6]通过对视觉诱发晕动症以及自我运动错觉症状进行比较,从而将自我运动错觉确定为视诱发晕动症的诱发原因之一。近期纽卡斯尔大学的相关研究中,Alireza等^[7]首次对临床晕动症状与VIMS这两种状况进行对比研究,指出可能出现相同的临床状况。但实验的评价方式偏向主观评价,且仍未确定具体的针对VIMS的评估指标。随着人机交互^[8](human-computer interaction, HCI)设备的研制与模态测试研究方式的不断

收稿日期:2021-06-29

* 基金项目:国家自然科学基金(11502146)、上海市教委科研创新项目(12Y2098)资助

探索,同时计算机运算性能的提升、图形学的更新发展,我们逐渐了解到在模拟界面或虚拟现实等环境下,前庭系统并未检测到运动,基于感知冲突理论^[9],高沉浸感的 VR 环境下物理运动并非真实,而是“视觉诱导”,即自我运动错觉^[10](vection),指“在虚拟现实给人带来移动感觉的认知因素”。其本身作用是会强化虚拟环境的表现力^[11],与 VR 特有的存在感^[12]、沉浸感^[13]有十分密切的关系。VR 用于医疗领域时,考虑到患者移动安全,经常使患者在身体不动的情况下观察动态场景,强制性导致自我运动错觉,VIMS 隐患不但会导致使用感下降,对于参与治疗的患者还会造成安全和健康问题,影响体验与治疗效果。我们认为对于 VIMS 的评估应该作为 VR 设计评价的重要环节之一。

VIMS 与普通晕动症存在明显差异,故仅靠量表的主观评价方式显然不足,故需要客观的评估标准。近期研究^[14]将心理生理学方法和指标引入研究,用来识别 HCI 过程中用户的情绪状态的变化与用户的意图,可实现对外围设备的控制。近年来眼动追踪技术为相关交互研究提供了更多的可能性,人眼追踪技术用于记录眼睛在视觉刺激物上移动的情况,它可以提供与明显的视觉注意相关的信息。其数据更加客观,而且有利于认知过程分析。眼球运动^[15-16]还可被用来评估精神疲劳和视觉疲劳,与虚拟现实技术的结合也提供了新的可能。但客观信号的采集、指标的选取和数据特征处理方面较为复杂多变,也需要主观方法做参考验证。

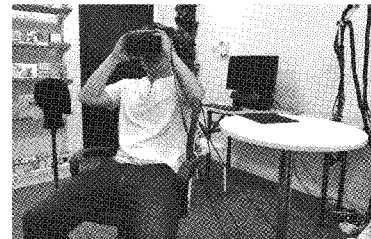
根据结合眼动追踪技术评价 VIMS 的研究目标,本文选择虚拟现实眼动仪 Dikablis HMD 设备,针对主观评估采用基于主观评价的问卷调查法,客观可用性测试采用基于设备取得的眼动指标,根据需求自行设计 5 种典型虚拟现实环境运动场景。实验过程记录受试者的情况包括:采集的眼动指标、受试者的视觉诱导晕动级别变化、测试前后的问卷分数。对问卷分数进行方差分析检验,建立与场景的 VIMS 评价模型;基于最大相关最小冗余特征选择^[17](minimal-redundancy-maximal-relevance criterion, MRMR 准则)的方法对多种眼动特征值进行筛选排序,得到能更好反映数据特点的、使评估标准最优的特征子集,并用方差检验法验证其显著性,甚至进一步探究受试者的疲劳情况。本文根据结果,选择眨眼数据作为评估指标,证明不同级别晕动状态下的眨眼指标有显著区别,通过该指标量化主观晕动感受,同时又作为一种反馈数据用与指导 VR 场景设计。

1 VIMS 实验与数据采集

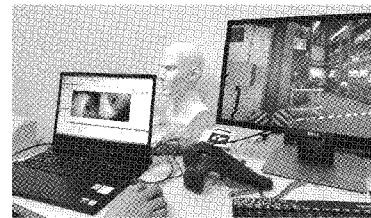
1.1 设备与场景设计

实验设备虚拟现实眼动仪 Dikablis HMD,受试者佩戴设备如图 1(a)所示。该设备是在虚拟现实设备 HTC VIVE 中集成 Dikablis 传感器,实现在虚拟场景中的眼动

追踪。采集率为 60 Hz,采集精度在 $0.1^{\circ}\sim 0.3^{\circ}$,配套的采集软件为 D-Lab 心理人因同步软件系统(德 ERGONEERS 公司),提供虚拟现实环境下的行为数据采集分析综合性同步平台,包含眼动数据模块、视频行为记录与编码、运动捕捉和工效评价等种类的数据需求。实验应用的眼动采集模块如图 1(b)所示。



(a) 受试者佩戴Dikablis HMD观察场景



(b) 实验使用的的眼动采集模块

图 1 VIMS 实验实验数据采集设备

VIMS 实验的设计原理基于早期心理实验室研究视觉刺激的运动错觉鼓^[18](vection drum)和通过光流信息获得的虚拟旋转鼓运动^[19]。利用 3D MAXs、Unity 3D 等 3D 动画^[20]软件设计思路模拟诱导晕动场景,运动方式设置为被动移动方式,即保持测试者不动,避免过大的视角变换以排除头部运动带来的测量误差。实验搭建的测试平台结构示意图如图 2 所示。设计了两组通道用于对比实验,运动方式包括两种线性移动与 3 种旋转运动,场景可以进行移动速度和旋转角度的参数设置,UI 界面可以通过功能按钮对速度和旋转角度的增加与减少操作。两种 VR 运动实验场景 HMD 视图如图 3 所示,上面的 UI 交互界面变化类型如表 1 所示。

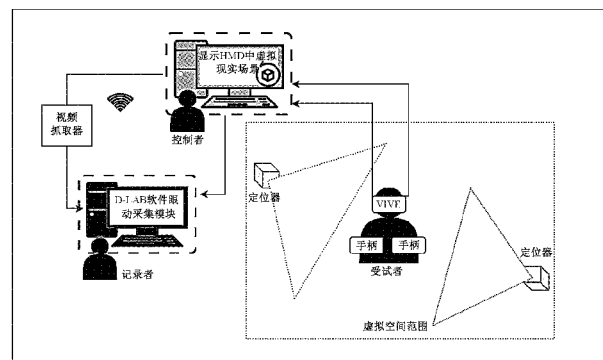
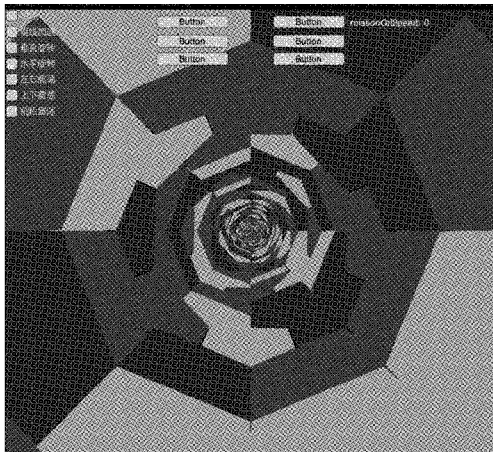
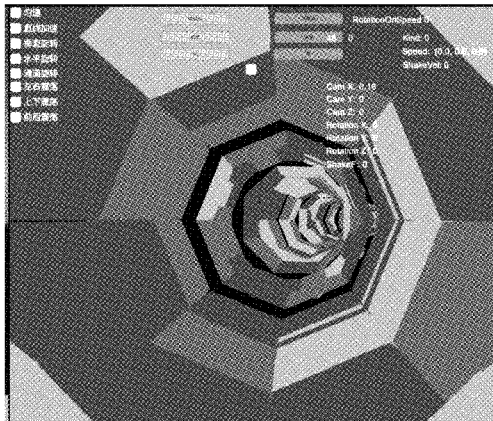


图 2 测试平台结构



(a) 直线通道



(b) 弧线通道

图 3 两种 VR 运动实验场景 HMD 视图

表 1 场景类型

场景运动类型	类型号	释义
沿直线的线性运动	1	受试者向前运动,
沿弧线的线性运动	2	受试者沿一定方向运动
进行垂直旋转	3	受试者在场景中上下环视
进行水平旋转	4	受试者在场景中左右环视
进行中心旋转	5	受试者在场景中旋转

1.2 测试任务

实验前需要进行预实验测试,实验期受试者实时报告感受到的晕动级别^[21](visually induced motion sickness level, VIMSL)变化,强度级别从小到大为 1~5 级。

受试者分别在如表 1 所示场景内进行晕动测试。进行测试前说明,期间由实验记录者改变环境的移动类型与速度。D-Lab 软件全程进行实时采集眼动数据,每次休息时间不少于 5 min。受试者要完成 3 项任务: 1) 测试前后需要完成问卷调查。2) 开始前静息 20 s,观察测试场景。等场景速度发生变化后,口头汇报当前感受到的移动错觉强度。3) 测试中感受到的眩晕强度增强时,实时报告当前的

VIMSL 级别。

本文使用的主观量表具有针对性的虚拟现实晕动症问卷^[22 23](virtual reality sickness questionnaire, VRSQ),是衍生出的评价子集中的最适用于 VR 环境的版本,如表 2 所示,各因素的分数的计算方法与严重程度指标(TS)得分的计算如式(1):

$$\begin{aligned}
 [O] &= \frac{[1]}{12} \times 100 \\
 [D] &= \frac{[2]}{15} \times 100 \\
 TS &= \frac{([1] + [2])}{2}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中:[1]为“动眼”因素的分数的和;[2]为“定向障碍”因素的分数的和。

表 2 虚拟现实晕动症问卷

因素	特征描述
[1]	整体不适感(general discomfort)
[1]	乏力(fatigue)
[1]	眼部酸涩(eyestrain)
[1]	难以集中注意力(difficult focusing)
[2]	头疼(headache)
[2]	头部充血,发胀(fullness of head)
[2]	视角模糊(blurred vision)
[2]	闭眼时感觉头晕眼花(dizzy/eyes closed)
[2]	眩晕(vertigo)

2 VIMS 评估模型建立

2.1 晕动模型描述

本文定义场景相对移动速度:指场景运动过程中,受试者所观测到的整个范围在一个单位时间内运动的百分比情况,如图 4 中虚线部分所示。对于垂直于运动方向的法平面,以受试者所看到的内容为基准划定的圆柱状表面区域,称为法向观测区。因为受试者处于静止状态观察虚拟环境,在某一单位时间内,该区域内画面相对位移百分比,定义为场景相对移动速度,它与场景、画面大小无关,可有效地反映观测者在场景中感知的运动情况。

晕动模型公式如式(2)所示,用于指导 VR 场景的移动交互参数设计。以场景相对移动速度 X 作为自变量, VIMSL 为因变量,建立场景晕动模型 Y。其中判定系数 R² 是描述趋势线拟合程度的指标。

$$Y = a \times \ln(X) + b, R^2
 \tag{2}$$

设计场景通道内部半径 10 m,根据人视觉的单眼舒适域,立体视觉的最佳视角不超过 60°,基于等边三角形原理可得到法向观测区域宽度的最大值为 20 m。设备的刷新率为 90 PFS,即速度单位为 1 时单位时间 1 s 内的画面刷新相当于实际运动前进 90 m,因此相对位移为 450%。由

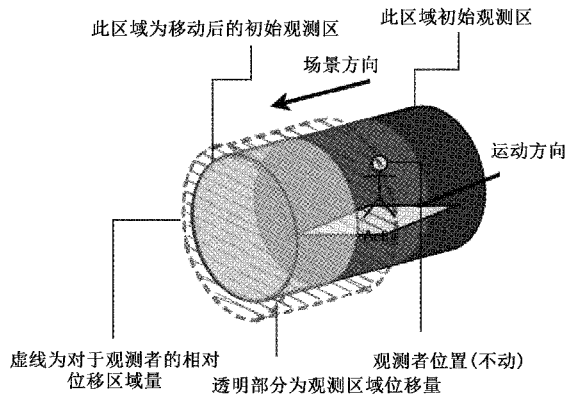


图 4 场景相对位移量

此对结果进行换算,得到对应的场景相对移动速度。

根据场景相对移动速度与 VIMSL 模型,对于两种线性运动情况:当场景相对移动速度较低时,VIMSL 小于 3 时,受试者有不明显的晕动症状,场景相对移动速度与 VIMSL 呈线性趋势;随着相对位移增大,受试者开始出现症状,VIMSL 在[3,4]区间内时,部分受试者可忍受但疲劳感在堆积,部分受试者出现明显疲劳状态,VIMSL 迅速到达最大值。模型趋势分析可知,有一定方向的曲线运动较快产生晕动症状。改变运动方向后,受试者对向后运动的容忍程度相对更低。结果证明了 VR 环境中异步运动^[24]的感官冲突感更强,更容易产生晕动症状,VR 内容设计应该减少使用被动相机。对于旋转运动,旋转会很快给受试者带来晕动,VIMSL 小于 2 函数呈线性趋势,且斜率明显大于线性运动。其中垂直运动的程度最强,受试者反应强烈。随着旋转速度的增加,晕动状态与疲劳不断增强,曲线较快持平,达到最大值。水平旋转与垂直旋转情况类似。中心旋转运动相比于其他两种旋转,晕动疲劳抗性相对较高。

2.2 量表分析

将收集的 VRSQ 分数分解为来源于不同因素的离散,对比受试者对每种移动方式的晕动疲劳抗性。共 5 组场景数据,每组观测数为 10,组内变异为随机误差,指测试者的特异性差异;组间变异是控制变量,代表某个运动参数因素的作用。结果表明:组内均方差大于组间均方差($4\ 903.9 > 1\ 002.67$),说明受试者的特异性差异对于晕动症状影响不可忽略;不同运动参数对受试者的晕动疲劳具有显著影响($F=4.89, \alpha=0.05, P=0.003\ 712 < 0.01$),证明了 VR 场景的移动方式影响晕动症状的强度。

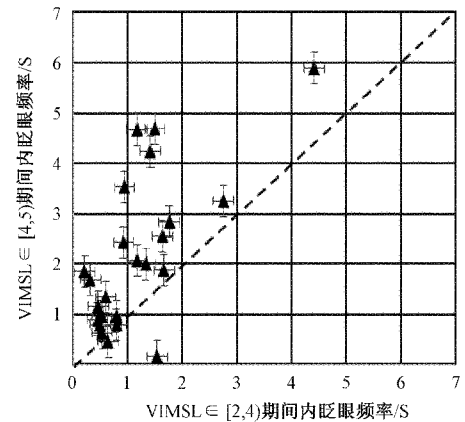
结合受试者对五种场景的主观反馈,HMD 设备又容易发生头部偏移^[23],所以旋转运动的诱发晕动的容易程度高于线性运动,其中垂直旋转场景是最快、最容易引发 VIMS,可表明越高的错觉强度越容易产生虚拟现实晕动症。

2.3 眼动特征提取与眨眼频率分析

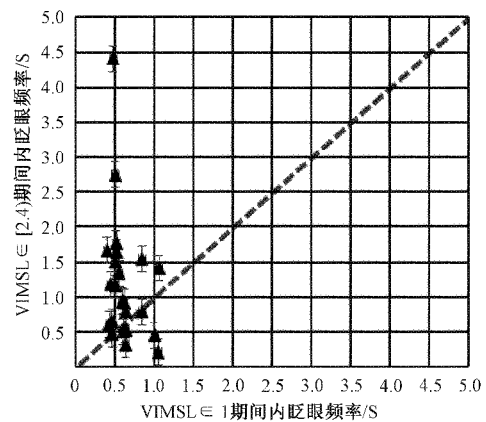
可采集的眼动数据单项多达 22 个,包含瞳孔面积、直

径、注视、扫视等等,考虑预实验中出现的系统误差,首先要进行数据筛选,导入 MATLAB 2016 Ra 软件处理。根据 mRMR 准则将全部指标进行排序,本实验选择加法整合。在集合中找到与最终输出结果相关性最大又彼此特征之间关系最小的特征,再结合方差齐次性检验和单因素方差分析,筛选显著性小于 0.05。最终筛选出眨眼频率^[26]指标,其显著性结果为 $P=0.015$ 。瞳孔变化眨眼与视觉负荷有关,也与认知关系密切^[27],眨眼频率低说明眼睛处于紧张状态,容易导致眼疲劳、眼睛干涩等。故结果本文最终选择由眨眼频率作为分析指标,定义单位时间眨眼频率 (blink rate, BR),实验对照组为静息状态内的眨眼频率。

如图 5 所示的两幅散点图,大部分的数据点位于斜线上方,这表明在 VIMS 状态下受试者的 BR 大于非 VIMS 状态的 BR。由于样本数量有限,本文采用威尔科克森符号秩检验来考察 3 种状态下的 BR 是否存在显著性差异。图中定义状态 a、b、c 如表 3 所示。状态 a 与状态 b 下 BR 值的威尔科克森符号秩检验结果为 $P=0.006$ ($\alpha=0.05, P < 0.01$)。状态 a 与状态 c 下 BR 值的威尔科克森符号秩检验结果为 $P=1.364 \times 10^{-4}$,状态 b 与状态 c 下 BR 值的威尔科克森符号秩检验结果为 $P=2.935 \times 10^{-4}$ 。 P 值越小,表明结果越显著。



(a) 状态a与状态b下BR值的威尔科克森符号秩检验



(b) 状态a与状态c下BR值的威尔科克森符号秩检验

图 5 基于威尔科克森符号秩检验的 BR 显著性判断

表 3 VIMS 状态描述与定义

VIMSML 级别	描述	状态
VIMSML=1	静息阶段	a
VIMSML ∈ [2,4)	晕动程度处于可接受范围	b
VIMSML ∈ [4,5]	晕动程度难以接受,需立刻停止	c

为了进一步分析整个晕动状态中的眨眼频率变化规律,我们将测试过程划分,数据采集过程的不同阶段在一定时间存在时间间隔,如图 6 所示的 A、B、C 和 D 段,OA 间期为测前的指导与第一次主观调查阶段。AB 间期为静息阶段,此时采集正常眨眼频率;BC 间期和 CD 间期均为测试阶段,随着场景相对移动速度的上升与下降,VIMSML 持续上升,眨眼频率跟随变化。10 名受试者眨眼频率的增长率与对应的最高 VIMSML 柱状图如图 7 所示,纵坐标为眨眼频率变化差。当移动速度初始变化时,VIMSML 增大,眨眼频率大多降低,增长率的绝对值有明显变化;当速度变化增大时,VIMS 持续增大,眨眼频率增加,增长率有明显变化。柱状图结果表明,眨眼频率的增长率与受试者对于 VR 场景移动机制的晕动程度有关,但与最高的 VIMSML 没有明显相关性。不同受试者对 VIMS 的主观感受存在个体化差异,但客观的眨眼频率变化可对应受试者的晕动感受。通过以上结果,提出一种可用于缓解与消除虚拟现实晕动症的方法,将虚拟现实晕动症状通过数据的形式表现,以便进行分析与研究。

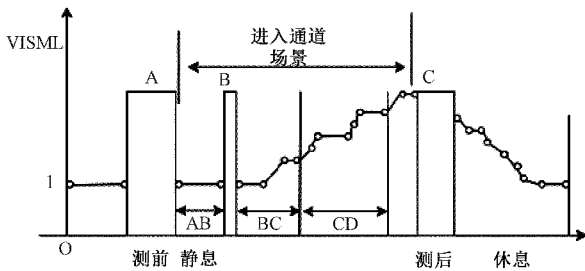


图 6 晕动症实验动眼数据采集分布

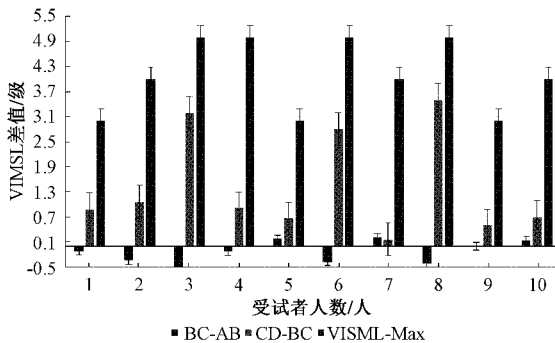


图 7 眨眼频率增长率与对应的最高视觉诱导晕动症级别

眼疲劳会随着眨眼频率降低而增加。一定时间范围内,随着运动速度的增加,眨眼频率随着 VIMSML 的增加、晕动感增强而下降,出现眩晕感。然而当受试者处于晕动

状态一定时间后,即 VIMSML 达到中级强度并继续增加大时,过程却发现眨眼频率会呈现增加趋势,但虚拟环境中症状带来的疲劳仍在累积,这说明眼部疲劳并不全部等于虚拟现实晕动症引起的疲劳负荷,可以进行更加深入的分析研究。

2.4 验证有效性

为了进一步验证分析结构的有效性,将预留的另外一组实验数据带入实验结果,比较其与晕动模型的计算结果和眨眼频率增长率变化规律的差异,进行配对 t 检验,其显著性结果大于 0.05,表明差异性不大,分析的模型规律具有适用性。

3 结 果

综上几种运动场景测试表明,不考虑受试者特异性差异,过于复杂或快速的运动(如变向、旋转、加速、减速等)会让受试者产生更多的晕动感,因为场景细节会增加眼球的运动负荷,会导致眼部以及大脑视觉疲劳,该结果可以对 VR 场景的移动机制设计提供参考。根据主客观数据模型总结:1)在虚拟现实场景中,场景移动速度影响晕动症状强度,且异步运动的感官冲突感更强,更容易产生晕动症状;2)有一定方向的线性运动和轴向的垂直运动,使受试者极快产生晕动疲劳;3)眨眼频率可以作为虚拟现实晕动症的有效指标。眨眼频率可反应受试者的疲劳变化,眨眼频率增长率可以作为评估指标评价晕动症程度,而且具有实时性、连续性的优势。

4 结 论

本文通过采集受试者的实时眼动数据,对测试前后的数据进行对比分析,建立与运动速度相关的场景评价晕动模型。同时讨论 VIMSML 与眨眼频率、眨眼频率增长率的变化规律,结合受试者的虚拟现实晕动症问卷分数,从主观和客观两个角度来研究视觉诱导引起 VR 疲劳感知的影响。

本文的研究难点与创新点均在于动眼信号的正确采集、从重合、繁多数据中选取的最合适的指标和对数据特征处理。最终根据实验结果得出了客观的结论:眨眼频率可以作为实时反馈受试者状态的数据信号,为 VR 系统人因设计评价提供新的研究参考,也为今后解决虚拟现实晕动症的问题提供理论研究。

本研究仍存在不足,尽可以作为针对 VIMS 眼动信号的初步研究,选取一种眨眼频率信号作为研究指标,今后可更多得探究其他动眼信号与 VIMS 的关系,用综合的结果评估 VR 引起的该症状。随着 VR 的广泛应用,研究由其引起的 VIMS 会成为越来越重要的问题,方便未来我们通过研究改善用户体验和提高虚拟现实技术的安全性达到更好的实用价值。

参考文献

- [1] STEPHEN R, SERGE, GINO F. Assessing the relationship between type of head movement and simulator sickness using an immersive virtual reality head mounted display: A pilot study [C]. Lecture Notes in Computer Science, 2017, 10280: 556-566.
- [2] SOMRAK A, HUMAR I, HOSSAIN M S, et al. Estimating VR sickness and user experience using different HMD technologies: An evaluation study [J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 94: 302-316.
- [3] 蔡力, 翁冬冬, 张振亮, 等. 虚实运动一致性对虚拟现实晕动症的影响 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(9): 1950-1956.
- [4] JUNG S M, OH S H, WHANGBO T K. 360 degrees stereo image-based VR motion sickness testing system [C]. 2017 International Conference on Emerging Trends & Innovation in ICT (ICED), 2017: 150-153.
- [5] ANSTIS S M, ATKINSON J, BLAKEMORE C, et al. Visual-vestibular interaction: Effects on self-motion perception and postural control [J]. Handbook of Sensory Physiology, 1978, 25: 755-804.
- [6] HETTINGER L J, BERBAUM K S, KENNEDY R S, et al. Vection and simulator sickness [J]. Military Psychology, 1990, 2(3): 171-181.
- [7] ALIREZA, MAZLOUMI, GAUVANI, et al. A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and "classic" motion sickness are they different [J]. Journal of Applied Physiology, 2018, 125(6): 1670-1680.
- [8] 谢娜, 吴苏朋. 采用图融合的多模态半协同训练视频分类算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4): 29-35.
- [9] HUA H. Enabling focus cues in head-mounted displays [J]. Proceedings of The IEEE, 2017, 105(5): 805-824.
- [10] KESHAVARZ B, PHILIPP-MULLER A E, HEMMERICH W, et al. The effect of visual motion stimulus characteristics on VECTION and visually induced motion sickness [J]. Displays, 2018, 58(JUL.): 71-81.
- [11] STEPHEN P, ALLISON R S, SCHIRA M M, et al. Future challenges for vection research: Definitions, functional significance, measures, and neural bases [J]. Frontiers in Psychology, 2015, 6(193): 193.
- [12] 田丰, 侯晓菲, 朱蕴文. 虚拟现实设计中的本体元素与测量方法研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(12): 32-39.
- [13] WEECH, SÉAMAS, KENNY S, et al. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review [J]. Frontiers in Psychology, 2019, DOI: 10.3389/fpsyg.2019.00158.
- [14] 戴廷飞, 刘邈, 叶阳阳, 等. 人机共享控制机器人系统的应用与发展 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 62-73.
- [15] KIM J, SUNIL K Y, YOO J, et al. Change of blink rate in viewing virtual reality with HMD [J]. Symmetry, 2018, 10, DOI: 10.3390/sym10090400.
- [16] 田璐萍, 嵇启春. 基于眼部信息融合的疲劳驾驶检测的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 26-29.
- [17] WANG Y, ZHAI G, CHEN S, et al. Assessment of eye fatigue caused by head-mounted displays using eye-tracking [J]. Biomedical Engineering OnLine, 2019, 18(1): 111, DOI: 10.1186/s12938-019-0731-5.
- [18] WEI M, JIE L, LUO H, et al. The effect of gender on vection perception and postural responses induced by immersive virtual rotation drum [C]. 2017 8th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER), IEEE, 2017: 473-476.
- [19] 韦妙鸾, 林佳吟, 刘汝娥, 等. 虚拟旋转鼓引发的自运动感知与视觉信息量的关系 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2018, 36(2): 138-144.
- [20] CHEN H, YANG H, YANG G H. 3D Product display based on inventor animation design [J]. Instrumentation, 2020, 7(1): 33-41.
- [21] 易琳, 贾瑞双, 刘然, 等. 虚拟现实环境中视觉诱导晕动症的评估指标 [J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(4): 437-445.
- [22] KIM H K, PARK J, CHOI Y, et al. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment [J]. Applied Ergonomics, 2018, 69: 66-73.
- [23] SEVINC V, BERKMAN M I. Psychometric evaluation of simulator sickness questionnaire and its variants as a measure of cybersickness in consumer virtual environments [J]. Applied Ergonomics, 2019, 82, DOI: 10.1016/j.apergo.2019.102958.
- [24] PETTIJOHN K A, PELTIER C, LUKOS J R, et al. Virtual and augmented reality in a simulated naval engagement: Preliminary comparisons of simulator sickness and human performance [J]. Applied Ergonomics, 2020, 89, DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103200.
- [25] RISI D, PALMISANO S. Effects of postural stability, active control, exposure duration and repeated exposures on HMD induced cybersickness [J]. Displays, 2019, 60: 9-17.
- [26] THAI K, JUNG S, LINDEMAN R W. On the use of "Active Breaks" to perform eye exercises for more

comfortable VR experiences[C]. 2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops(VRW), IEEE, 2020:468-476.

- [27] LUTZ H M, BURMEISTER C, SANTOS L, et al. Application of head-mounted devices with eye-tracking in virtual reality therapy [J]. Current Directions in Biomedical Engineering, 2017, 3(1):53-56.

作者简介

孙雨萱(通信作者), 硕士研究生, 主要研究方向为 VR 辅助医疗诊疗、人因工程设计与测试。

E-mail: xiaoxiaoniao1ly@163.com

王殊轶, 研究生导师, 副教授, 主要研究方向为人因工程研究、可用性测试、AR/VR 辅助医疗诊疗设计。

E-mail: wangshuyi@usst.edu.cn