

2-15-2019

Evaluation and Modeling of Visual Fatigue in 3D Display Based on ECG

Danli Wang

1. Beijing Key Lab of Human-Computer Interaction, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;;2.State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;;

Xinpan Yang

1. Beijing Key Lab of Human-Computer Interaction, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;;

Yue Kang

2.State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;;3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China;

Haichen Hu

1. Beijing Key Lab of Human-Computer Interaction, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, 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 Original Article 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.

Evaluation and Modeling of Visual Fatigue in 3D Display Based on ECG

Abstract

Abstract: *This study investigates and models the correlation between visual fatigue and ECG data by collecting the ECG data of the participants during watching 3D movies, combining with the subjective scores, the reaction time, and the questionnaires before and after the experiment.* ECG data of 12 subjects were analyzed in both time and frequency domain. The results showed that subjective score and HR increased with the duration of viewing, while PNN50 decreased. Linear model of subjective score is established, and the R^2 of model is 0.930. Subjective questionnaires show significant changes in overall visual fatigue, dry eyes and nausea symptoms after the experiment ($p < 0.05$).

Keywords

stereoscopic display, visual fatigue, HRV, time and frequency domain analysis, modeling

Recommended Citation

Wang Danli, Yang Xinpan, Yue Kang, Hu Haichen. Evaluation and Modeling of Visual Fatigue in 3D Display Based on ECG[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 212-217.

基于 ECG 的立体 3D 显示视疲劳的评估和建模

王丹力^{1,2*}, 杨心盼¹, 岳康^{2,3}, 胡海琛¹

(1. 中国科学院软件研究所北京人机交互实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100040)

摘要: 通过采集被试在观看 3D 电影过程中的心电数据, 结合主观打分及实验前后问卷、反应时数据来研究观看过程中视疲劳和心电指标的变化规律, 找到能够反映视疲劳的心电指标并对视疲劳进行建模。实验分析了 12 个被试数据, 从时域和频域两个方面对心电信号进行分析。分析结果发现, 主观打分和心率 (HR) 随着观看时间持续而增大, PNN50 随观看时长增加变小。对主观打分进行线性建模, 得到模型 R^2 为 0.930。此外, 主观问卷表明在实验后总体视疲劳, 眼睛干涩, 感到恶心等症均发生显著变化 ($p < 0.05$)。

关键词: 立体显示; 视疲劳; 心率变异性; 时频域分析; 建模

中图分类号: TN911.7 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 02-0212-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17DEA-003

Evaluation and Modeling of Visual Fatigue in 3D Display Based on ECG

Wang Danli^{1,2*}, Yang Xinpan¹, Yue Kang^{2,3}, Hu Haichen¹

(1. Beijing Key Lab of Human-Computer Interaction, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040, China)

Abstract: This study investigates and models the correlation between visual fatigue and ECG data by collecting the ECG data of the participants during watching 3D movies, combining with the subjective scores, the reaction time, and the questionnaires before and after the experiment. ECG data of 12 subjects were analyzed in both time and frequency domain. The results showed that subjective score and HR increased with the duration of viewing, while PNN50 decreased. Linear model of subjective score is established, and the R^2 of model is 0.930. Subjective questionnaires show significant changes in overall visual fatigue, dry eyes and nausea symptoms after the experiment ($p < 0.05$).

Keywords: stereoscopic display; visual fatigue; HRV; time and frequency domain analysis; modeling

引言

随着立体显示技术的发展, 立体显示产品在很多行业得到了广泛应用, 以其能够给用户带来更多

的沉浸感和临场感而深受欢迎。然而, 由于立体显示技术本身的成像原理和人的视觉工作机制存在冲突, 造成了 3D 显示不可忽视的副作用。例如, 长时间观看立体图像或视频会使观看者感到眼睛疲劳, 头晕, 呕吐等不适。甚至有研究表明, 观看立体显示或许会对人们的健康产生长远影响或者不可逆的损害^[1]。这些健康隐患的存在使得人们不便长期观看立体显示, 更不利于一些特殊人群如小孩观看^[2]。



收稿日期: 2016-10-10 修回日期: 2017-01-05;
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401202),
国家自然科学基金(61872363, 61672507, 61272325,
61562063);
作者简介: 王丹力(1966-), 女, 内蒙古呼和浩特, 博士, 研究员, 研究方向为人机交互技术、儿童交互技术与设计方法、虚拟现实、可用性和用户体验等。

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

这些问题不仅严重影响用户体验, 也制约了三维显示技术的发展以及相关产品的应用普及。为了避免这些问题, 需要建立一种有效的视疲劳评估模型, 用于主动缓解观看视疲劳产生的影响。目前视疲劳主要的评估方法包括 2 种: 主观评价和客观测量。前者是让被试在观看后表述观看不适感的程度或者完成一些特殊设计的问卷^[3]; 后者主要是测量和视疲劳相关的一些生理指标。2 种测量方法各有优缺点, 其中主观方法受个体差异的影响较大, 没有统一的量化标准, 但采集方便, 分析较为简单; 客观测量数据较为准确, 能够反映被试的生理心理变化, 但测量起来麻烦, 数据分析较为复杂。在实际评估时, 往往将两者结合起来使用。目前已经提出多种视疲劳的主客观评估方法, 其中主观分析主要是通过问卷获得被试的疲劳状态, 常见的问卷症状包括: 眼干、聚焦苦难、头疼、恶心、视力模糊等。客观分析常用的生理指标包括眼动, 心电, 脑电等。其中常用的眼动指标主要包括眨眼, 闭眼时长, 凝视时间等^[4]; 脑电指标主要包括不同频段的功率谱, 重心频率以及疲劳因子等^[5-6]; 心电指标较为常用, 心电数据常用的分析方法包括两种: 时域分析和频域分析, 两种分析方法各有优点, 从不同角度去刻画心电指标随视疲劳的变化。

先前的研究表明, 被试的观看过程中的视疲劳和交感神经, 副交感神经活动之间的不平衡相关。在安静状态下, 心率变化主要受副交感神经活动的调节, 而在运动或者情绪紧张时, 交感神经兴奋占优势, 并且交感神经和副交感神经活动主要负责心脏活动, 说明了心电信号可以作为评估视疲劳的潜在指标^[7-8]。心电信号中的心率和心率变异性常常用来作为评估观看视疲劳的生理指标^[9]。心率随着观看视疲劳的增大而增加, 和视疲劳具有较好的一致性, 可以用来作为视疲劳评估的指标^[10-11]。心率变异性用来反映人体的自主平衡作为一种非侵入式指标, 有较高的敏感性, 可以重复测量^[12]。心率变异性的分析方法分为时域分析和频域分析两种, 时域指标主要包括

SDNN, RMSSD, PNN50 等指标, 频域指标主要包括 VLF, LF, HF, VHF 等。这些指标都可以用来评估 3D 视疲劳。然而, 目前大多数研究都是分析观看 3D 视频前后这些生理指标或者问卷症状的变化, 很少有研究是对整个观看过程进行连续评估, 也没有给出相应的连续评估模型, 关于心电指标的选取也是说法不一。

基于以上所述, 我们提出了一种使用心电指标评估连续观看 3D 视频过程中的视疲劳模型。首先找到被试在观看过程中视疲劳的变化规律, 分析心电信号, 找到能够反映视疲劳的心电指标, 使用心电指标对主观打分进行建模。

1 实验设计

整个实验在实验室进行, 实验时间上午 09:30-11:30, 下午 03:30-05:30。调整实验室内的温度和湿度使被试感到自然舒适, 实验环境如图 1 所示。选取《变形金刚 4》3D 中文版 29 分钟开始的 52 分钟作为实验刺激, 使用 LG 3D 液晶显示器播放, 椅子距离屏幕 3 倍屏幕距离, 被试在实验开始前应调整坐姿, 使得观看起来更加舒服。

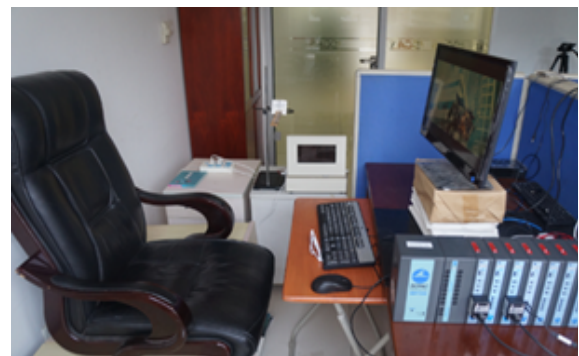


图 1 实验环境图

Fig. 1 Environment of the experiment

实验一共采集 15 例被试数据, 最后 12 例可用, 男女比例 1: 1, 其中 3 例由于心电数据采集不完整而丢弃。实验开始前检查被试的视力和立体视是否符合要求, 视力要求正常或者矫正后正常, 立体视 ≤ 200 。整个实验流程如图 2 所示。

首先在实验开始前给被试讲解实验流程, 让被试熟悉打分软件和反应时装置的使用。休息 3 min, 然后填写测前问卷, 测前问卷包括 14 个视疲劳症状, 使用反应时测量仪器测量被试反应时, 然后观看 52 min 的 3D 电影, 观看过程中使用 BIOPAC 公司的 MP150 多道仪实时记录被试的心电数据, 在观看过程中被试可以通过鼠标进行连续打分, 主观打分采用 10 度量表(从十分不疲劳到十分疲劳), 如果被试感觉疲劳增大就按鼠标左键加 1, 反之右键减 1, 当然被试也可以连续点击进行打分。观看结束后, 被试需要再次测量反应时和填写主观问卷, 测后问卷与测前问卷问题相比增加了一些开放性问题, 主要想记录被试在观看过程中的感受以及身体状态变化。整个实验过程通过两台摄像机进行记录, 其中一台主要记录被试的身体姿态, 另一台记录被试的面部表情。实验过程中主试也可以观察记录被试的状态变化。

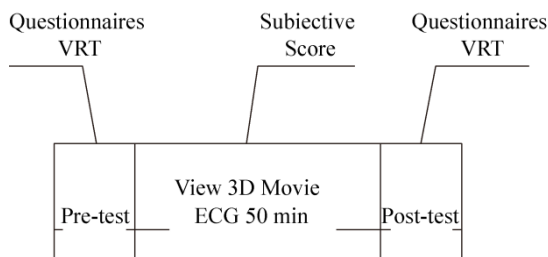


图 2 实验流程图
Fig. 2 Procedure of experiment

2 数据分析和建模

2.1 主观数据

主观数据主要包括主观打分和主观问卷, 其中主观打分根据软件记录的数据以 5 min 均值作为一个时间段进行线性平滑, 每 5 min 取一个值, 最后对所有的被试打分求平均, 得到的主观打分曲线如图 3 所示。

从图 3 中可以看出随着观看时间增加, 被试的主观打分呈线性增加, 说明了被试在观看过程中视疲劳随观看时间的持续而增加。

主观问卷使用常用的统计学分析方法进行分

析, 主要是求得所有被试在测试前后对应症状得分的平均值, 通过 SPSS 配对 T 检验分析前后变化的显著性。主观问卷结果如图 4 所示。

分析结果表明, 14 个症状中总体视疲劳, 眼睛干涩, 眼睛酸胀, 眼睛疼痛, 感到恶心出现显著变化, 实验后相比于实验前有显著增大, P 值小于 0.05。其他指标如感到头疼, 感到眩晕, 视力变模糊都有明显增大, 但是变化不显著。而眼痒, 畏光, 流泪, 眼睛有异物感, 聚焦困难, 出现复视也都有轻微增加。通过问卷也可以说明, 实验后相对于实验前被试的视疲劳加重, 与主观打分结果相一致。

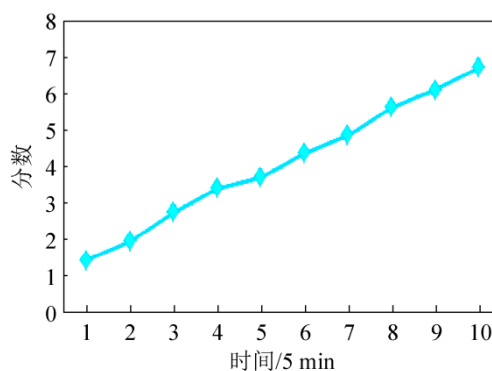


图 3 主观打分
Fig. 3 Subjective score

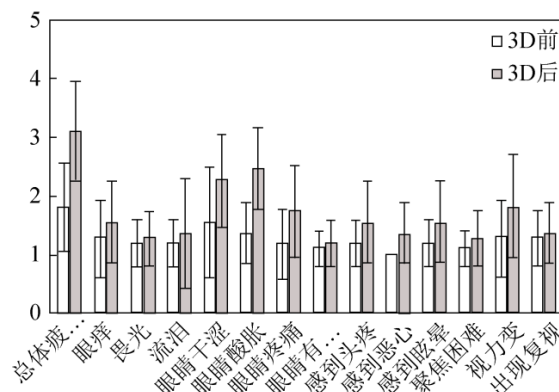


图 4 主观问卷
Fig. 4 Statistical results of questionnaires

2.2 客观数据

客观数据主要包括反应时和心电数据。测量反应时主要是考察被试观看前后视疲劳对反应的影响。对所有被试测试前后反应时求平均值, 使用 SPSS 进行 T 检验分析变化的显著性, 反应时数

据如图 5 所示。

统计分析结果表明, 观看 3D 电影后被试的反应时间变长, 反应变慢。也说明了随着观看视疲劳的增加, 被试的反应能力会受到一定程度的影响。

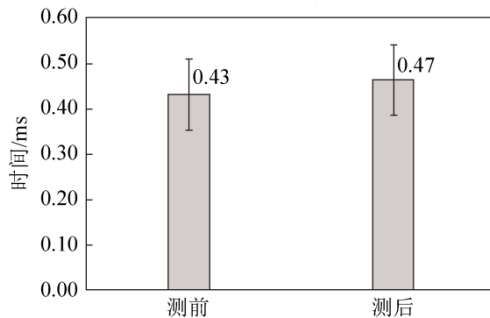


图 5 反应时数据

Fig. 5 Reacting times before and after watching task

心电数据由于存在干扰, 在分析前需要进行预处理, 主要是通过带通滤波去除基线漂移, 噪声以及 50 Hz 交流电带来的干扰。在本实验中使用 0.05~45 Hz 的带通滤波。为了避免实验前后由于被试调整坐姿带来的影响, 整个实验采集 52 min 的心电数据, 数据分析时只使用中间 50 min 数据, 这样可以避免前后因被试适应坐姿带来的干扰, 得到更有效的数据, 然后将数据每 5 min 作为一个时间段进行分析。数据预处理完之后使用 MP150 多道仪自带的的分析软件 Acknowledge 软件进行分析, 从时域和频域两个方面进行分析。时域分析主要提出 HR (心率), SDNN (RR 间期标准差), PNN50 (RR 间期差值超过 50 ms 的间期数所占的比率) 指标, 频域分析主要提取 LF (低频功率), HF (高频功率) 两个指标。最后一共得到 6 个指标, 分别是 HR, SDNN, PNN50, LF (0.04 Hz~0.15 Hz), HF (0.15~0.4 Hz), LF/(LF+HF)。对所有被试求出相应的心电指标, 求平均值, 画出每个指标的变化曲线。

图 6 表明随着观看时间的持续, 观看视疲劳的增加, 被试心率变化波动上升, 其中在第 5~7 个时间段被试心率变化较快, 主要和被试在观看过程中视疲劳累积有关, 当被试视疲劳累积到一定程度之后会出现迅速增大, 从而影响自主平衡导致心率变

化较快, 与电影情节也有一定的关系。

图 7 表明随着观看时间的持续, 被试 RR 间期标准差波动上升, 其中在第 5~6 个时间段变化较快, 和心率的变化规律存在一致, 从第 7 段开始变化趋于平缓。

从图 8 可以看出, 在时间段 1~5 时 PNN50 变化比较平缓, 从时间段 5~7 下降较快, 斜率较大, 从时间段 7~10 变化平缓, 有上升趋势, 但整体而言 PNN50 随着时间持续波动下降。

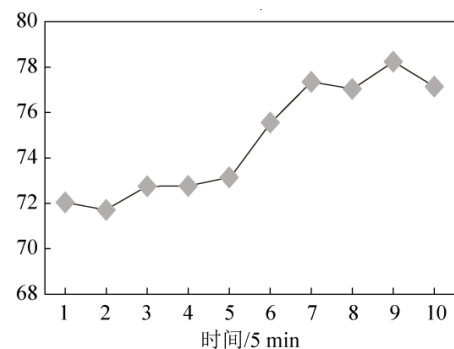


图 6 心率曲线

Fig. 6 Time-domain HR curve

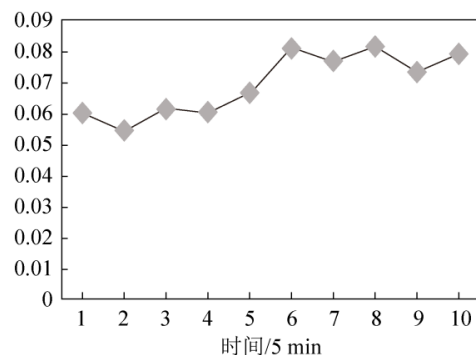


图 7 RR 间期标准差曲线

Fig. 7 Time-domain SDNN curve

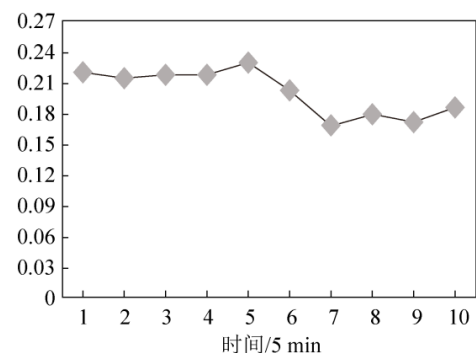


图 8 PNN50 曲线

Fig. 8 Time-domain PNN50 curve

图 9~11 是通过分析心率变异性频域得到的指标, 其中 LF 表示低频成分, 和交感神经活动有关, HF 表示高频成分, 和副交感神经活动相关, 而比值 $LF/(LF+HF)$ 代表了交感神经活动和副交感神经活动的平衡性, 一般表示人体自主平衡调节能力。

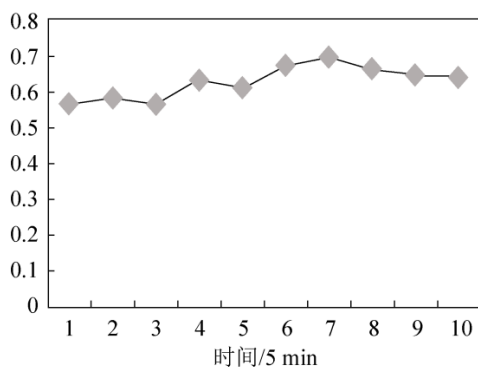


图 9 LF 曲线

Fig. 9 Time-domain LF curve

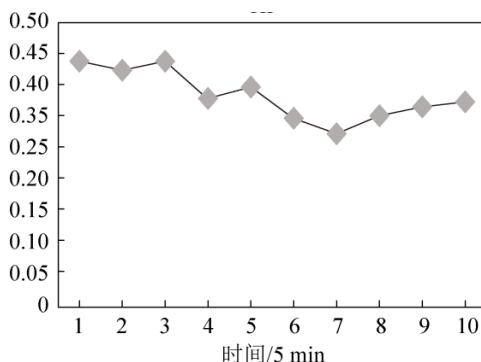


图 10 HF 曲线

Fig. 10 Time-domain HF curve

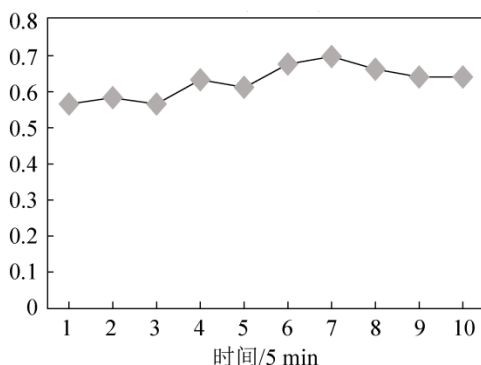


图 11 LF/(LF+HF) 曲线

Fig. 11 Time-domain LF/(LF+HF) curve

从图 9~11 可以看出随着时间的持续, 被试观

看视疲劳的增加, LF 逐渐增大最后趋于平稳, 表明交感神经兴奋, HF 逐渐减小最后也是趋于平稳, 表明了副交感神经降低, $LF/(LF+HF)$ 增大, 表明心率调节的平衡向交感神经倾斜。由于眼睛疲劳程度增加, 人观看 3D 电影感到更加困难, 为了持续观看, 必须付出更多的和视觉加工相关的精力, 从而导致交感神经活动增大, 体现为 LF 和 $LF/(LF+HF)$ 的显著上升。

2.3 数据建模

通过对得到的六种指标进行统计分析, 找到各指标与主观打分之间的相关性, 使用多元线性回归进行建模, 通过逐步进入法排除各指标之间的相关性干扰, 最后得到 2 个和主观打分十分相关的指标 HR 和 PNN50, 使用这两个指标对主观打分进行建模, 在建模之前需要对数据进行归一化处理, 以排除量纲不同而带来的参数系数较大变化。模型的表达式为:

$$SS' = 1.268 \times HR + 0.521 \times PNN50 - 0.365$$

为了验证模型的表现, 使用了 3 种指标进行验证, 包括皮尔逊相关系数, 斯皮尔曼等级相关系数, 均方根误差。3 个指标得到的结果分别是: 0.964, 0.930, 0.01。说明了模型具有较好的性能。模型参数信息如表 1 所示。

表 1 模型参数

Tab. 1 Parameters of model

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig
	B	标准差			
常量	-0.365	0.211		-1.730	0.127
HR	1.268	0.211	1.462	5.995	0.001
PNN50	.521	0.219	0.580	2.376	0.049

总的来说, 通过分析被试在连续观看 3D 电影过程中的心电数据, 结合连续主观打分及实验前后问卷, 反应时数据来研究观看过程中视疲劳及心电指标的变化规律。实验结果表明随着观看时间的持续主观打分逐渐增加, 说明被试观看疲劳度增加。实验后反应时相对于实验前有显著增加, 说明被试在观看 3D 电影之后, 反应变慢。实验后

问卷症状相对于实验前都有增大, 其中在总体视疲劳, 眼睛干涩, 眼睛酸胀, 眼睛疼痛, 感到恶心这几个症状上变化较为显著, P 值小于 0.05, 这也从另一个方面说明了观看 3D 电影确实给被试带来了视觉不适。通过心电信号的时频域分析可以得到, 随着观看时间的持续, 被试 HR 增大, PNN50 减少, 并且在第 5~7 时间段曲线斜率较大, 变化较快, 可能是由于随着疲劳的累积, 当达到一定程度后, 疲劳度会迅速增加, 最后趋于平稳。频域上 LF 和 LF/(LF+HF) 随观看时间持续逐渐增大, HF 减小, 说明了随着被试视疲劳增加, 交感神经活跃度增大, 副交感神经活跃度减小, 心率调节的平衡向交感神经倾斜, 自主平衡受到破坏。最后通过统计学分析方法分析心电各指标与主观打分之间的相关性, 找到能够有效的反映视疲劳的心电指标 HR 和 PNN50 并建立模型, 通过验证模型, 发现模型具有较好的准确性。

3 结论

本文为研究立体显示观看疲劳度提供了一种连续评估的有效方法, 并找到了两个随疲劳变化较为显著的心电指标, 由于心电测量的非侵入, 简单, 稳定等特性, 使得基于心电的视疲劳评估较为常用。

由于实验条件的限制, 本实验还存在一些不足之处, 比如被试数量有限, 应该分析更多数据, 才能得到更一般, 适应性更好的结论。同时尽管在实验前对被试有严格的要求, 但也无法确保被试状态的一致, 比如睡眠质量, 抑郁程度等。在今后的工作中将改进实验方法, 采集更多数据, 进一步探讨并找到 3D 视疲劳的有效的评估方法和模型。

参考文献:

[1] Chi C F, Lin F T. A comparison of seven visual fatigue assessment techniques in three data-acquisitions VDT tasks[J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* (S0018-7208), 1998,

40(4): 577-590.
 [2] Rouse M W, Borsting E J, Lynn Mitchell G, et al. Validity and reliability of the revised convergence insufficiency symptom survey in adults[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics* (S0275-5408), 2004, 24(5): 384-390.
 [3] Lambooi M, IJsselsteijn, W A, Heynderickx I. Visual discomfort of 3D TV: Assessment methods and modeling[J]. *Displays* (S0141-9382), 2011, 32(4): 209-218.
 [4] Kim D, Choi S, Park S, et al. Stereoscopic visual fatigue measurement based on fusional response curve and eye-blinks[C]. 2011 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP). Tokyo, IEEE, 2011: 1-6.
 [5] Bang J W, Heo H, Choi J S, et al. Assessment of eye fatigue caused by 3D displays based on multimodal measurements[J]. *Sensors* (S1424-8220), 2014, 14(9): 16467-16485.
 [6] Chen C, Li K, Wu Q, et al. EEG-based detection and evaluation of fatigue caused by watching 3DTV[J]. *Displays* (S0141-9382), 2013, 34(2): 81-88.
 [7] Chen C Y, Ke M D, Wu P J, et al. The influence of polarized 3D display on autonomic nervous activities[J]. *Displays* (S0141-9382), 2014, 35(4): 196-201.
 [8] Acharya U R, Joseph K P, Kannathal N, et al. Heart rate variability: a review[J]. *Medical and biological engineering and computing* (S1814-8085), 2006, 44(12): 1031-1051.
 [9] Lambooi M, Fortuin M, Heynderickx I, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of Imaging Science and Technology* (S1062-3701), 2009, 53(3): 30201.
 [10] Wang D, Yang X, Xie Y, et al. P-33: A Comprehensive Evaluation of Visual Fatigue on Viewing Small Autostereoscopic Display[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers* (S0097-966X), 2015, 46(1): 1259-1262.
 [11] Yang X, Wang D, Hu H, et al. P-31: Visual Fatigue Assessment and Modeling Based on ECG and EOG Caused by 2D and 3D Displays[J]. *Sid Symposium Digest of Technical Papers* (S0097-966X), 2016, 47(1): 1237-1240.
 [12] Park S, Won M J, Mun S, et al. Does visual fatigue from 3D displays affect autonomic regulation and heart rhythm?[J]. *International Journal of Psychophysiology* (S0167-8760), 2014, 92(1): 42-48.