

VR 显示器中视差线索对伽马估计的影响

彭毅钧^{1,2},陈载清^{1,2,3},云利军^{1,2}

(1. 云南师范大学 信息学院,云南 昆明 650500;

2. 云南师范大学 云南省教育厅计算机视觉与智能控制技术工程研究中心,云南 昆明 650500;

3. 云南师范大学 云南省光电信息技术重点实验室,云南 昆明 650500)

摘要:虚拟现实(virtual reality, VR)头戴立体显示器能够呈现视差线索,从而产生具有深度感的沉浸式交互体验.基于显示器伽马值人眼视觉估计方案,本文开展实验探讨了VR显示器中不同视差线索对伽马值估计的影响.实验要求被试者使用Unity开发的VR显示器伽马值人眼视觉估计软件,在不同视差下对VR显示器伽马值进行估计,并将估计结果与光谱仪PR715测量结果进行对比.实验结果表明,当视差为-40弧分时,人眼视觉估计VR显示器伽马值的准确度最高,估计误差为0.045,当虚拟深度从近距离(-40弧分视差)到远距离(+120弧分视差)变化时,人眼视觉估计误差由0.045增大到0.190,当虚拟深度从远距离(-40弧分视差)到近距离(-120弧分视差)时,人眼视觉估计误差由0.045增大到0.105.实验结果表明视差线索对被试者视觉估计VR显示器伽马值产生了影响.

关键词:视差;人眼视觉估计;虚拟现实显示器;伽马值

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-8513(2024)01-0095-07

基于三维(3D)立体显示技术的虚拟现实(virtual reality, VR)头戴显示器可以将具有视差线索的双目图像投射到人眼中,让用户产生临场深度感的沉浸式体验,已在教育、医疗、数字媒体、商业等领域得到了广泛应用^[1-3].目前,立体显示技术主要是利用空间复用或时间复用等分像技术提供左右眼视差图像来产生目标的立体感,已经有大量商用的借助辅助设备的立体眼镜或头盔显示,以及不需要辅助设备的光栅式自由立体显示技术产品.然而,视觉不舒适一直是制约立体显示技术推广和普及的主要障碍^[4-7].

VR头盔显示器在出厂时会预先把伽马值调好,但与普通二维平面显示器不同的是,VR头盔有两块显示屏分别供左右眼观看,因受硬件设备、软件算法等因素影响,会导致VR头盔左右两块显示屏的伽马值出现差异,并引起左右显示屏颜色不对称^[8].当VR头盔左右显示屏颜色差别过大时,使用

者就会出现双目竞争,容易导致视觉不适和视觉疲劳等症状^[9].此外,在立体显示中,双目视差是使用者获得立体感与沉浸感的主要线索,但过大视差也会导致较为严重的视觉疲劳现象,而视差过小时,虽然可以获得较为舒适的视觉感知,却会削弱使用者的立体感与沉浸感^[10-12].

在人眼视觉估计显示器伽马值方面,已经有Gustav等^[13]采用全视觉心理物理学方法估计CRT显示器伽马值;Attila Neumann等^[14]改进了人眼观测技术,可以精确获得显示设备色调再现曲线;张子扬、李琼等^[15-16]采用了同色条纹混色法的视觉匹配方法视觉估计CRT与液晶显示器(liquid crystal display, LCD)伽马值.在视差对立体视觉影响方面,Sumio Yano等^[5]认为过大的双目视差将导致明显的视觉疲劳;也有学者^[17-19]讨论了视差及其他原因对立体视觉舒适度的影响.因为色彩校正的好坏将会直接影响显示的质量与使用者的体验,传统的伽马

收稿日期:2023-01-29.

基金项目:国家自然科学基金(61865015,61875171,62165019).

作者简介:彭毅钧(1995-),男,硕士研究生.主要从事VR立体视觉舒适度研究.

通信作者:陈载清(1978-),男,博士,教授,硕士生导师.主要从事颜色视觉与立体显示技术研究.

校正使用的设备大多非常昂贵、调整时间慢,非常不方便.作者设计了人眼视觉估计 VR 头盔伽马值的实验方案,并重点讨论视差线索对人眼视觉估计 VR 显示器伽马值的影响.

1 方法

1.1 仪器设备与实验条件

研究中使用的主要仪器如图 1 所示,在使用之前,它们都需要预热半小时以上达到稳态再进行使用:

1) 头戴式 VR 显示器:PICO NEO 2 VR 眼镜一体机 1 台(编号 1^{HJ},5.5 英寸 TFT 显示屏、分辨率 3 840 × 2 160、4 GB + 128 GB).

2) 光谱仪:Photo Research 公司生产的光谱仪 PR-715.

3) 实验者共 15 人:实验者均为在校学生,每个人的左右眼视力均在 1.2 以上,并且有着正常的色视觉;

4) 实验环境:使用光谱仪 PR-715 测量 VR 头盔伽马值需要在暗室进行,因人眼估计时需要将头盔戴上相当于暗室,因此估计实验可以在正常亮度环境下实验.

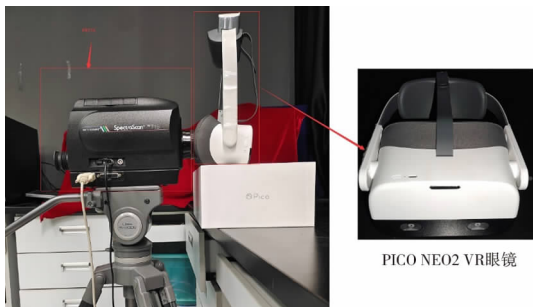


图 1 实验仪器

1.2 仪器测量伽马值

头戴式 VR 显示器伽马值的测量模型选用由 Berns 等人提出且被 CIE 所推荐的非线性变化模型——增益-偏置-伽马模型(gain-offset-gamma, GOG)^[19-21],该模型使用较少的数据就可以获得很高的测量精度.以灰色通道为例,该模型见等式(1).

$$G_{\text{ray}} = \frac{L_{\text{gray}}}{L_{\text{gray,max}}} = \left[k_{g,\text{gray}} \left(\frac{d_{\text{gray}}}{2^N - 1} \right) + k_{o,\text{gray}} \right]^{\gamma_{\text{gray}}} \quad (1)$$

其中, d_{gray} 表示 VR 头盔在灰色通道的数字驱动值, L_{gray} 表示在该数字驱动值下灰色亮度, $L_{\text{gray,max}}$ 表示灰色通道最大亮度, G_{ray} 是该数字驱动值下亮度的

归一化, $K_{g,\text{gray}}$ 、 $k_{o,\text{gray}}$ 分别表示显示器的增益与补偿, γ_{gray} 表示 VR 头盔灰色通道伽马值, N 是显卡模拟/数字转换比特数,一般 $N = 8$,且一般情况下 $k_{g,\text{gray}}$ 接近 1,而 $k_{o,\text{gray}}$ 接近 0,因此 GOG 模型等式可以简化为等式(2).

$$G_{\text{ray}} = \frac{L_{\text{gray}}}{L_{\text{gray,max}}} = \left(\frac{d_{\text{gray}}}{255} \right)^{\gamma_{\text{gray}}} \quad (2)$$

根据等式(2),使用光谱仪 PR-715 对 VR 显示器伽马值进行了测量,由于黑点对其精度会造成影响,因此采用测量结果减黑点的式(3)模型作为评价伽马准确度的标准.

$$G_{\text{ray}} = \frac{L_{\text{gray}} - L_{\text{black}}}{L_{\text{gray,max}} - L_{\text{black}}} = \left(\frac{d_{\text{gray}}}{255} \right)^{\gamma_{\text{gray}}} \quad (3)$$

其中 L_{black} 为表示数字驱动值为 0 时的灰色亮度,即黑点.根据国内外相关研究表明,每个通道选择 17 个标定点可以得到最好的预测精度^[19,22],使用 PR-715 对 4 个颜色通道等距离的 17 个点进行亮度测量,测量结束后进行归一化,并计算其伽马值,结果见表 1.

表 1 仪器测量 VR 头盔伽马值

| 颜色通道 | 左显示屏伽马值 | 右显示屏伽马值 | 左右显示屏伽马值差绝对值 |
|------|---------|---------|--------------|
| 灰色通道 | 1.906 | 1.999 | 0.093 |
| 红色通道 | 1.872 | 1.818 | 0.054 |
| 绿色通道 | 2.11 | 2.048 | 0.062 |
| 蓝色通道 | 2.022 | 1.934 | 0.088 |

对 PICO NEO 2(1[#])光谱仪测量点进行画线,得到曲线如图 2,可以看出 4 个颜色通道左右两块显示屏伽马值均有明显差异.之后又测量了其它 10 部头盔,10 部 VR 头盔左右显示屏伽马值平均差异为 0.16,最大接近 0.3.此实验证明 VR 头盔左右两块显示屏伽马值确实存在差异.

1.3 人眼视觉估计伽马值实验原理

实验选用混色条纹匹配法进行人眼视觉估计 VR 头盔伽马值的实验,此方法原理是利用混色技术在 VR 显示器上呈现 2 种同色调不同亮度的颜色,人眼对其进行融合,融合色块的感知量正理论应趋于这两种颜色亮度的中间值,测试者对匹配色块进行调节,使匹配色块尽量接近甚至等于融合色块,用等式(4)表示.

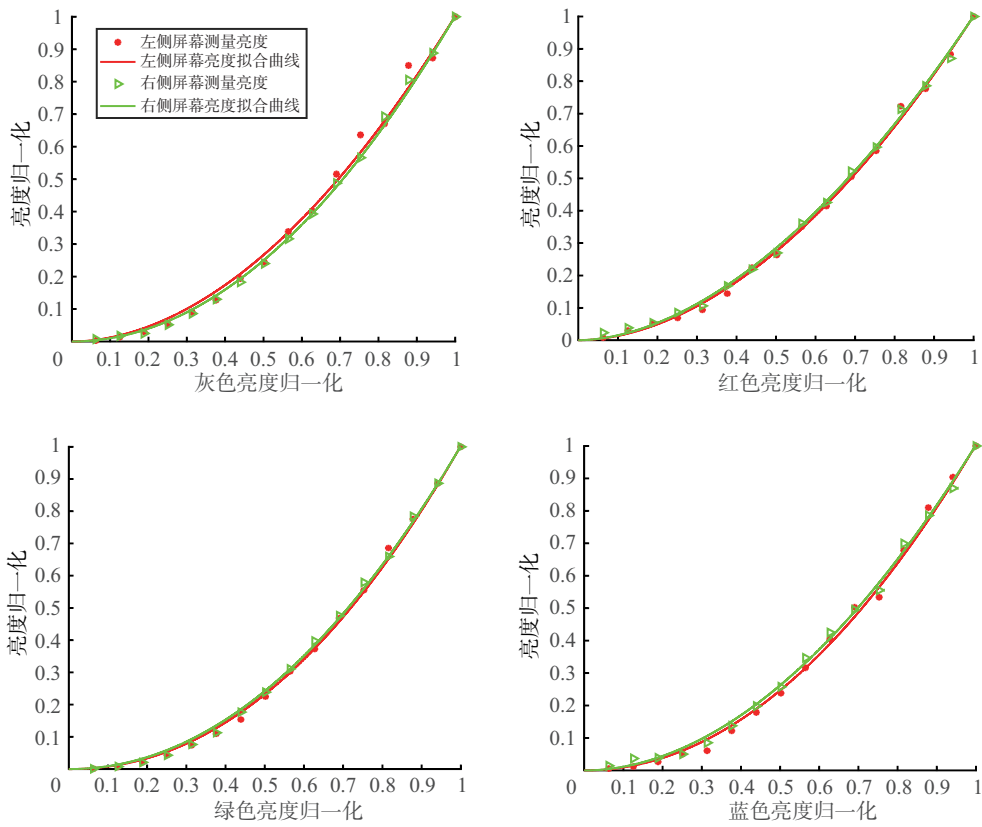


图 2 光谱仪测量的伽马曲线

$$L_{fuse} = \frac{(L_1 + L_2)}{2} = L_{estimate} \quad (4)$$

其中, L_{fuse} 是融合色块的亮度, $L_{estimate}$ 是视觉估计亮度, 将式(3) 带入式(4), 可得估算伽马值等式(5):

$$\frac{\left(\frac{d_{light}}{255}\right)^{\gamma} + \left(\frac{d_{dark}}{255}\right)^{\gamma}}{2} = \left(\frac{d_{estimate}}{255}\right)^{\gamma} \quad (5)$$

d_{light} 、 d_{dark} 分别为实验亮、暗条纹数字驱动值, 因

此仅需人眼视觉估计值即可计算估计伽马值.

1.4 实验软件与使用方法

实验软件使用 Unity3D 引擎开发, 软件主体为 $1\ 600 \times 1\ 600$ 的正方形平面, 具有默认的深度距离 (默认深度距离为 1 000, 为零视差), 背景是 2 种同色调不同亮度的混色条纹, 中心是亮度可以由被试者调节的匹配色块, 软件界面如图 3 所示.

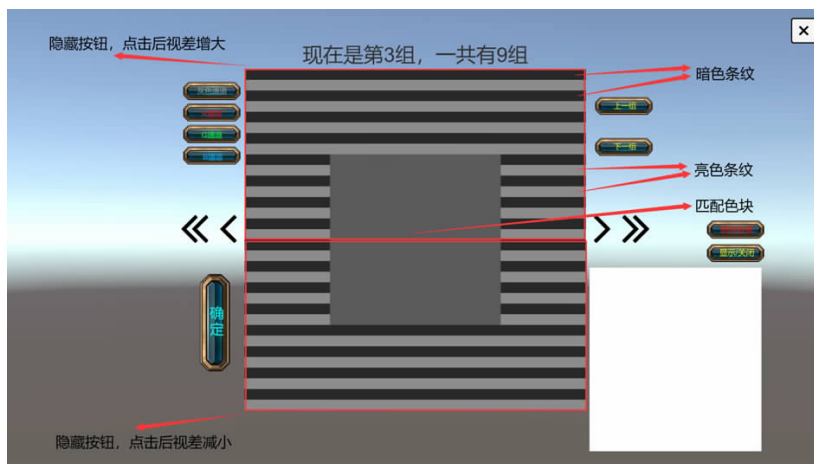


图 3 人眼视觉估计 VR 显示器伽马值的实验软件界面

为了讨论视差线索对人眼视觉估计的影响, 本实验设置了 7 个不同的视差距离, 分别为: -120、

-80、-40、0、40、80、120 弧分. 不同视差下的刺激如图 4 所示.

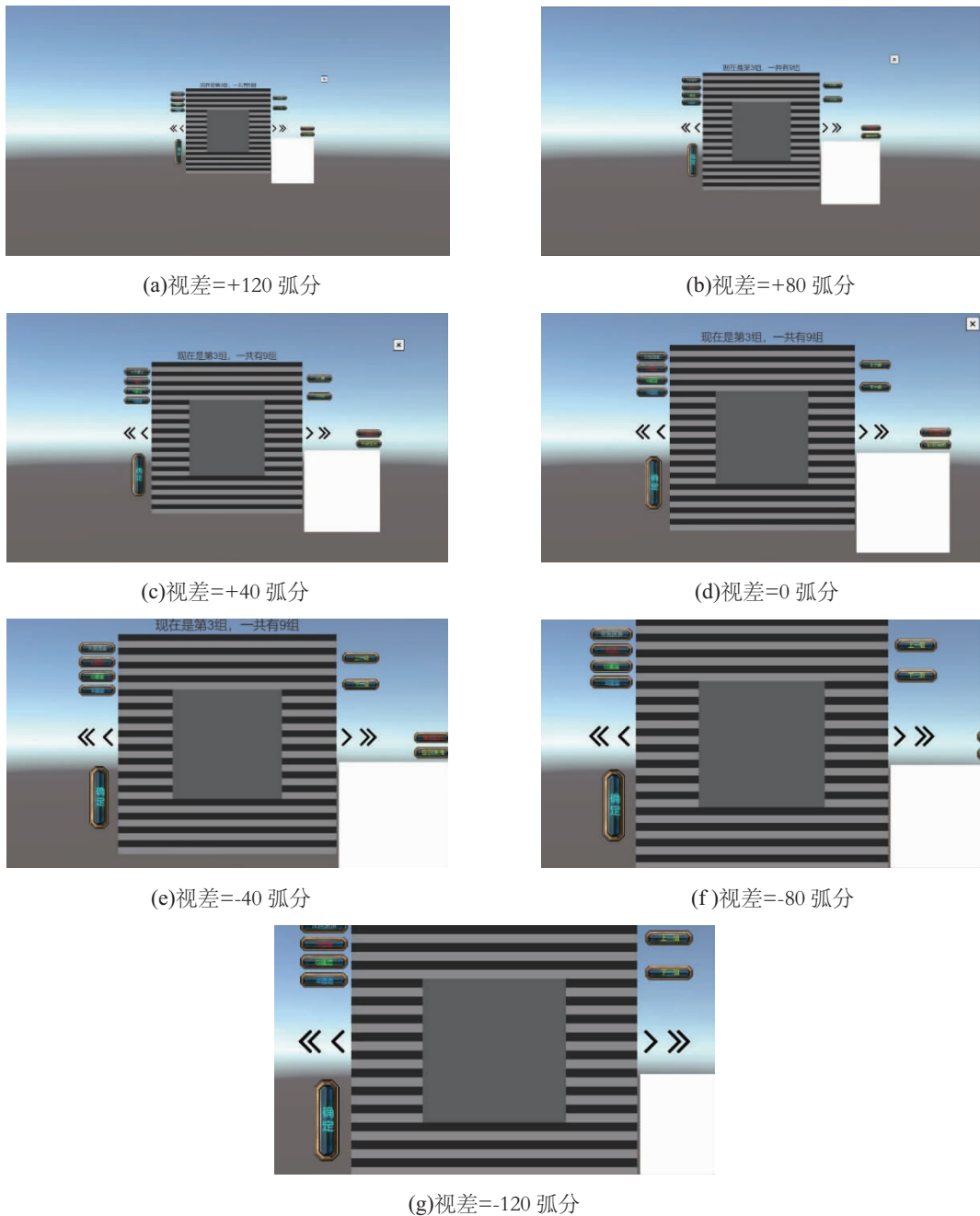


图 4 不同视差下的软件

本实验有 4 个颜色通道,每个颜色通道有 9 组暗条纹和亮条纹数字驱动值:0 和 100、20 和 120、40 和 140、60 和 160、80 和 180、100 和 200、120 和 220、140 和 240、160 和 255。被试者通过对软件左右按钮调整中间匹配色块的亮度,直至被试者认为匹配色块亮度被调整至亮暗条纹的中间亮度为止。被试者点击确定按钮即可将结果记录在右下角白板处。为防止上一组实验数据结果对下一组实验造成影响,被试者将看不到右下角白板上的实验结果。

邀请 15 位被试者进行实验,所有被试者矫正视力均为 1.2 以上,对颜色感知正常。在告知实验方法

步骤并在 VR 显示器开机稳定后进行实验,依次对 4 个颜色通道,每个通道 9 组不同亮度条纹进行了估计。

2 结果与讨论

2.1 可靠性分析

由于人眼视觉估计是被试者的主观判断,图像的质量及个体差异等多方面因素都将对主观实验结果造成影响,因此需要对不合格的数据进行过滤。我们计算了克隆巴赫系数(cronbach's alpha)来检验数据的可信度,统计学中通常使用它作为检验数据可

信度的方法. Jung Y J 等人在舒适度主观评价实验中也使用了 Cronbach's alpha 来检验数据的可信度^[23]. 一般来说, Cronbach's alpha 系数的值越大, 数据可信度越高, Cronbach's alpha 系数大于 0.7 时, 数据是可被接受的.

在表 2 中, 首先对 15 位被试者的估计结果计算 Cronbach's alpha 系数, 然后再分别对每一个被试者的数据进行 Cronbach's alpha 检验. 本实验可信度检验如表 2 和表 3 所示, 在表 2, 项数表示共有 15 名被试者进行实验, 本实验的 Cronbach's alpha 系数值为 0.998, 基于标准化项的 Cronbach's alpha 为 0.998, 计算结果均高于 0.9, 因此可认为该实验数据的可信度很高. 在表 3 中的项已删除的 Cronbach's alpha 值可以看出, 无论删除了哪一位被试者的数据后, 其 Cronbach's alpha 值仍大于 0.9. 在修正后的项与总计相关性中, 计算结果都大于 0.9, 一般情况下, 如果数据小于 0.4, 就认为该被试者的数据与其他被试者没有很强的相关性, 可以剔除. 因此在本实验的可靠性统计中, 被试者的数据都无需剔除.

2.2 人眼视觉估计结果

VR 显示器在不同视差下伽马估计的结果如表 4 和表 5 所示.

表 2 人眼估计实验可靠性统计

| Cronbach's Alpha | 基于标准化项的 Cronbach's alpha | 项数 |
|------------------|--------------------------|----|
| 0.998 | 0.998 | 15 |

表 3 人眼估计实验项总计统计量

| 被试者 | 校正的项总计相关性 | 项已删除的 Cronbach's Alpha 值 |
|-----|-----------|--------------------------|
| 1 | 0.994 | 0.998 |
| 2 | 0.993 | 0.998 |
| 3 | 0.991 | 0.998 |
| 4 | 0.997 | 0.998 |
| 5 | 0.988 | 0.998 |
| 6 | 0.992 | 0.998 |
| 7 | 0.966 | 0.998 |
| 8 | 0.994 | 0.998 |
| 9 | 0.991 | 0.998 |
| 10 | 0.993 | 0.998 |
| 11 | 0.988 | 0.998 |
| 12 | 0.988 | 0.998 |
| 13 | 0.987 | 0.998 |
| 14 | 0.992 | 0.998 |
| 15 | 0.993 | 0.998 |

表 4 VR 显示器不同视差下人眼视觉估计伽马值

| 通道 | 视差(弧分) | | | | | | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -120 | -80 | -40 | 0 | 40 | 80 | 120 |
| 灰色通道伽马估计值 | 2.088 | 2.111 | 1.988 | 2.03 | 2.165 | 2.321 | 2.238 |
| 红色通道伽马估计值 | 1.813 | 1.864 | 1.786 | 1.838 | 1.916 | 1.74 | 1.772 |
| 绿色通道伽马估计值 | 1.972 | 1.967 | 2.081 | 2.03 | 2.036 | 1.847 | 1.767 |
| 蓝色通道伽马估计值 | 1.831 | 1.908 | 1.96 | 1.905 | 2.082 | 2.126 | 1.887 |

表 5 VR 显示器不同视差下伽马估计的误差

| 通道 | 视差(弧分) | | | | | | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | -120 | -80 | -40 | 0 | 40 | 80 | 120 |
| 灰色通道误差平均值 | 0.136 | 0.159 | 0.047 | 0.077 | 0.213 | 0.369 | 0.286 |
| 红色通道误差平均值 | 0.032 | 0.027 | 0.059 | 0.027 | 0.071 | 0.105 | 0.073 |
| 绿色通道误差平均值 | 0.107 | 0.112 | 0.031 | 0.049 | 0.043 | 0.232 | 0.312 |
| 蓝色通道误差平均值 | 0.147 | 0.07 | 0.044 | 0.073 | 0.104 | 0.148 | 0.091 |
| 四通道平均误差 | 0.105 | 0.092 | 0.045 | 0.057 | 0.108 | 0.213 | 0.19 |

根据表 5 绘制误差图, 如图 5 所示. 在被试者所估计的四个颜色通道中, 其中灰色通道在 -40 弧分和 0 弧分视差时估计产生的误差最小、红色通道在 -80 弧分和 0 弧分视差时估计产生的误差最小、绿

色通道在 -40 弧分和 +40 弧分视差时估计产生的误差最小、蓝色通道在 -80 弧分和 -40 弧分视差时估计产生的误差最小. 当四个通道视差为 +80 弧分到 +120 弧分时, 被试者估计误差较大, 估计值不够

准确;当视差为 -120 弧分到 $+40$ 弧分时,被试者估计误差较小。

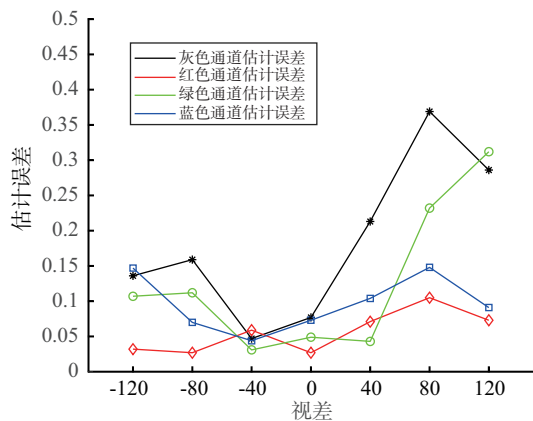


图 5 不同视差下 4 通道估计误差

从平均误差看,当视差为 -40 弧分时,被试者伽马值估计准确度最高,之后随着视差的增大,估计误差也随之增大,当视差到达 $+80$ 弧分与 $+120$ 弧分时,可能因为视差过大,人眼对颜色的敏感度降低,被试者已经难以进行准确估计,导致产生较大的估计误差。而视差在 -120 弧分与 -80 弧分时,可能因为负视差过大削弱了沉浸感且估计目标离得过近不方便操作等原因,估计误差反而略微增大。

因此,随着视差的变化,人眼视觉估计的伽马值与测量值之间的误差也随之变化,说明视差对被试者的视觉估计产生了一定影响。这些影响到底会带来多大的颜色感觉变化,我们可以使用色差来描述。根据 Snjezana 研究结果表明^[24],伽马值每变化 0.1 时,产生的误差为 3.58 个 CIELAB 色差单位,当伽马值偏差 0.3 时,产生的误差为 9.9 个 CIELAB 色差单位。

3 结语

本文通过实验研究了不同视差对 VR 显示器伽马估计产生的影响。实验表明,当视差为 -40 弧分时,被试者人眼视觉估计 VR 立体显示器伽马值的准确度最高,平均估计误差在 1.61 个 CIELAB 色差单位,之后随着 VR 立体显示器中视差由近及远时,视觉估计伽马值的误差逐渐增加,在视差为 $+120$ 弧分时估计产生的颜色误差在 6.8 个 CIELAB 色差单位,并且从 -40 弧分视差由远及近时,视觉估计伽马值误差也会增加,在视差为 -120 弧分时估计产生的颜色误差大致在 3.76 个 CIELAB 色差单位。实验结果表明视差线索对被试者视觉估计 VR 显示器伽马值产生了影响,当视差在一定的范围时视觉

估计较为准确,误差较小;当视差过大或过小时均会对被试者视觉估计造成一定影响,从而降低视觉估计 VR 显示器伽马值的准确度。

本文的实验被试者均为 25 到 30 岁的学生群体,样本较为单一,后续还需要增加不同年龄、不同职业的被试者,来提高实验的可靠性。未来还将进一步改善实验方法,精简实验流程,进一步增强实验精度。

参考文献:

- [1] 新智元. 从 VR 到元宇宙:虚拟现实 30 年[J]. 中国工业和信息化, 2022, (06): 80-84.
- [2] XIN W. Discussion on the integration of virtual reality technology and digital media technology[C]//Proceedings of 2022 the 6th International Conference on Scientific and Technological Innovation and Educational Development. HongKong: HongKong New Century Cultural Publishing House, 2022:943-945.
- [3] DANIEL Y, FRANCIS J, RASHMI S D, et al. Remote virtual reality teaching: closing an educational gap during a global pandemic[J]. Hospital pediatrics, 2021, 11(10): e258-e262.
- [4] LAMBOOIJ J M, JSSELSTEIJN W, FORTUIN M, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. Journal of imaging science and technology, 2009, 53(3): 30201-1-30201-14.
- [5] VON M S, KNOTE A, EDENHOFER S. Cyber sick but still having fun[C]//Proceedings of the 22nd ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology. 2016: 325-326.
- [6] JANG K M, SHIN W Y, KYOON L H. Electrophysiological changes in the virtual reality sickness: EEG in the VR sickness[C]//The 25th International Conference on 3D Web Technology. 2020: 1-4.
- [7] 张晓婷,陆菁,刘渊,等. VR 交互体验中沉浸感与舒适度的平衡设计[J]. 包装工程, 2021, 42(12): 91-97.
- [8] JUNG Y J, SOHN H, LEE S, et al. Quantitative measurement of binocular color fusion limit for non-spectral colors[J]. Optics express, 2011, 19(8): 7325-7338.
- [9] 张铠鸿,陈载清,陈建兵,等. 眨眼特征与颜色不对称立体图像视觉舒适度的相关性分析[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2022, 31(03): 288-295.
- [10] KOOF L, TOET A. Visual comfort of binocular and 3D displays[J]. Displays, 2004, 25(2-3): 99-108.
- [11] UKAI K, HOWARTH P A. Visual fatigue caused by viewing stereoscopic motion images: Background, theories, and observations[J]. Displays, 2008, 29(2): 106-116.

- [12] YANO S, EMOTO M, MITSUHASHI T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images[J]. Displays, 2004, 25(4): 141–150.
- [13] BRAUN G J. Visual display characterization using flicker photometry techniques[C]// Proc. of SPIE, Human Vision and Electronic Imaging VIII. 2003, 5007: 199–209.
- [14] NEUMANN A, ARTUSI A. Accurate display gamma functions based on human observation [J]. Color Research & Application, 2007, 32(4): 310–319.
- [15] 张子扬,石俊生,余鸿飞,等. 视觉估计阴极射线管显示器伽玛值精度研究[J]. 光学学报, 2009, 29(6): 1746–1750.
- [16] 李琼,石俊生,张子扬. 视觉估计显示器 gamma 在互联网网络上的应用[J]. 光子学报, 2010, 39(9): 1716–1720.
- [17] 李小方,王琼华,李大海,等. 柱透镜光栅3D显示器的视差范围与立体观看视疲劳的关系[J]. 光电子. 激光, 2012, 23(5): 873–877.
- [18] 王勤,赵悟翔,邹翠明. 基于视差和串扰的自由立体显示器视疲劳预测[J]. 光学技术, 2019, 45(5): 617–621.
- [19] 陈英华,王勤,李英. 交叉视差及观看时间对自由立体显示视觉舒适度的影响[J]. Optical Technique, 2016, 42(1): 62–64.
- [20] BERNS R S, MOTTA R J, GORZYNSKI M E. CRT colorimetry. Part I: Theory and practice [J]. Color Research & Application, 1993, 18(5): 299–314.
- [21] BERNS R S, GORZYNSKI M E, MOTTA R J. CRT colorimetry. part II: Metrology [J]. Color Research & Application, 1993, 18(5): 315–325.
- [22] BERNS R S. Methods for characterizing CRT displays [J]. Displays, 1996, 16(4): 173–182.
- [23] POST D L, CALHOUN C S. An evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors [J]. Color Research & Application, 1989, 14(4): 172–186.
- [24] JUNG Y J, SOHN H, LEE S I, et al. Predicting visual discomfort of stereoscopic images using human attention model [J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2013, 23(12): 2077–2082.
- [25] SOLTIC S, CHALMERS A N. Modeling the effects of gamma on the colors displayed on cathode ray tube monitors [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(4): 688–700.

Influences of disparity cues on gamma estimation in VR displays

PENG Yi-jun^{1,2}, CHEN Zai-qing^{1,2,3}, YUN Li-jun^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. Engineering Research Center of Computer Vision and Intelligent Control Technology, Department of Education of Yunnan Province, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Virtual Reality (VR) head mounted 3D displays can present disparity cues to create an immersive interactive experience. Based on the human vision estimation scheme for the gamma value of the display, the influences of different disparity cues on the gamma estimation in VR displays were investigated experimentally. The subjects were asked to use an experimental software developed by unity to perform the VR display gamma estimation under different disparity levels, and the estimated results were compared with those measured by the spectrometer PR715. The experimental results show that when the disparity is -40 arc-minutes, the accuracy of estimated value is the highest, and the estimation error is 0.045. When the virtual depth changes from the near distance (-40 arc-minutes) to far distance ($+120$ arc-minute), the estimation error of human vision increases from 0.045 to 0.190. When the disparity changed from -40 arc-minute to -120 arc-minute, the estimation error increased slightly from 0.045 to 0.105. These results indicate that disparity cues influence the visual gamma estimation of subjects in VR displays.

Key words: disparity; human vision estimation; VR head-mounted display; Gamma

(责任编辑 段 鹏)