



# 面向用户体验的透镜式裸眼 3D 设计与评估

杨文超, 吴亚东\*, 蒋宏宇, 赵思蕊

西南科技大学计算机科学与技术学院, 绵阳 621010

\* 通信作者. E-mail: wuyadong@swust.edu.cn

收稿日期: 2017-04-14; 接受日期: 2017-05-02; 网络出版日期: 2017-09-13

国家自然科学基金 (批准号: 61303127) 和四川省科技厅科技支撑计划项目 (批准号: 2017TJPT0200, 2017KZ0023, 2017GZ0186) 资助项目

**摘要** 针对透镜式裸眼 3D 显示串扰严重, 用户体验度低及其成像质量评估困难的问题, 本文提出一种断层宽度测量的裸眼图像质量评估方法, 基于该方法研究了摄机组在空间的布局方式和立体图像合成过程中多视点图像的排列顺序对裸眼内容成像质量的影响. 针对多用户、非定点观看的裸眼 3D 虚拟场景展示场合提出有助于提升用户体验效果的摄像机布局和视点排列的多种方式, 并通过交叉实验对比和应用案例的用户体验测试, 最终提出合理的选择方案建议.

**关键词** 裸眼 3D, 用户体验, 串扰, 评估, 视点排列, 相机布局

## 1 引言

裸眼 3D 显示技术近年来成为人机交互的研究热点之一, 其中透镜式裸眼 3D 显示因其不会降低画面亮度而受到广泛应用<sup>[1,2]</sup>, 如长虹 8 视点裸眼电视, Philips 公司的自动立体显示器, 日本三洋四视角立体显示装置等<sup>[3]</sup>. 然而透镜式裸眼 3D 显示器图像之间串扰严重以及成像质量难以评估的问题制约了该行业的进一步发展, 是透镜式裸眼 3D 成像技术的研究重点<sup>[4]</sup>.

在成像质量的评估方面, 传统方法依靠专业的光强度测量装置分别获得来自左右眼的图像亮度之和然后计算串扰度<sup>[5,6]</sup>, 专业设备复杂的使用方法和严厉的使用环境要求限制了其推广应用, 且其主要用于裸眼设备生产过程评估产品还原裸眼图像的能力, 而对于制作的裸眼展示内容没有舒适度方面的评估标准. 近年来出现了更多便捷有效的裸眼内容评估方法, 如 Kim 等<sup>[7]</sup> 根据 JND 模型 (just noticeable difference model) 提出基于二维图像的评估方法预测裸眼图像的串扰程度, Kim 等<sup>[8]</sup> 通过计算视觉信息熵 (visual entropy), 并以此预测评估最终的裸眼图像串扰度, 但是这些方法没有对人眼感知串扰的程度进行实验测定, 直接根据理论模型预测输出图像的串扰. Choi<sup>[9]</sup> 通过在空间拍摄图像分析其重影宽度从而量化表示图像的串扰程度, 该方法简便易实施但用于测量的图像裸眼特征不突出, 裸眼表现性不强.

**引用格式:** 杨文超, 吴亚东, 蒋宏宇, 等. 面向用户体验的透镜式裸眼 3D 设计与评估. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1381-1394, doi: 10.1360/N112016-00296  
Yang W C, Wu Y D, Jiang H Y, et al. Design and measurement of user experience oriented auto-stereoscopic 3D display based on optical lens (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1381-1394, doi: 10.1360/N112016-00296

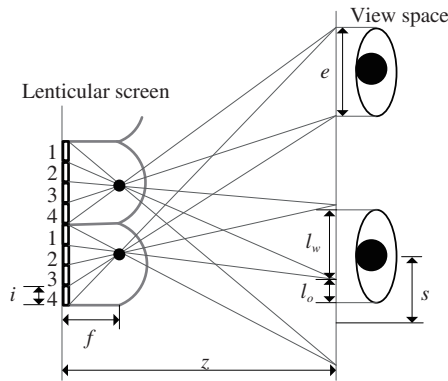


图 1 透镜式裸眼图像观看过程

Figure 1 Illustration of lenticular auto-stereoscopic display

在减少裸眼图像的串扰方面, 从硬件结构上的改进有三维立体透镜光栅代替传统光栅的方法<sup>[10]</sup>, 显示面板和透镜光栅之间增加一层条纹状挡板掩盖相邻像素间的串扰部分<sup>[11]</sup> 以及采用双层透镜光栅增加透镜的聚光性<sup>[12]</sup> 等方案, 对于减弱裸眼图像串扰确有效果但同时带来生产工艺上的困难以及成本的大幅增长. 软件设计改进相较于硬件改进容易实现且成本较低, 成为主要的研究方向. 效果最为显著的是通过检测人眼位置动态改变屏幕像素偏移从而保证用户所在位置始终接收到理想图像的方法如文献<sup>[13]</sup>, 但是这种方式只能满足单个用户观看, 不适用于逐渐流行的户外裸眼大屏广告展示场合. Wang 等<sup>[14]</sup> 将左右眼图像进行拆分, 并在显示周期不同时段分别输出左、右眼图像, 依靠人眼视觉暂留的特性, 人眼不能察觉到这种不同步, 但分时显示有降低图像刷新率的风险. Li 等<sup>[15]</sup> 根据 Fourier 变换的平移不变性方法将垂直方向相邻像素点进行加权重新计算, 从而弱化来自邻接像素点的光源干扰, 该算法过于复杂会带来不可忽视的时间消耗且不能完全消除串扰. 文献<sup>[16]</sup> 阐述了虚拟场景中展示裸眼 3D 图像的详细设计过程, 指出多视点裸眼 3D 摄像机组的排列有平行布局 (planar setup)、会聚布局 (cylindrical setup) 等多种布局方式, 在立体图像合成过程也有多种视点排列顺序, 而现有研究大多集中在如何弱化相邻像素串扰的程度, 少有研究讨论过不同摄像机排列方式以及视点合成顺序对裸眼图像质量的影响.

本文针对多用户、非定点观看的裸眼 3D 展示应用场合, 首先提出针对立体图像显示效果和用户体验的裸眼图像质量评估方法——断层宽度测量方法, 通过甜点处 (最佳观看位置, 表现为画面无重影的正确画面) 图像与断层处 (多视点图像循环交界处, 表现为重影最严重的不正确画面) 图像对比参数来表征裸眼图像质量. 然后通过设计虚拟展示应用, 研究了摄像机组布局方式和视点合成顺序对裸眼图像质量的影响, 设计交叉实验并基于断层宽度测量方法进行量化评估. 最后设计不同应用场景调研用户体验评分, 针对不同应用场合提出各自适合的布局和排列方式, 作为裸眼应用设计的通用参考.

## 2 裸眼 3D 成像质量评估方法

### 2.1 断层宽度测量的评估方法

用户在观看裸眼图像时, 如果左眼接收图像中出现了左眼视图以外的部分图像, 或者右眼接收图像中出现了右眼视图以外的部分图像, 即图像发生了串扰<sup>[17,18]</sup>, 用户体验度将会受到严重影响. 裸眼 3D 图像观看过程如图 1 所示.

设  $i$  为像素宽度,  $f$  为透镜焦距,  $e$  为人眼视窗宽度,  $z$  为人眼到屏幕距离,  $s$  为眼球中心偏离正常视窗中心的偏离值,  $l_o$  为来自正确视窗的宽度,  $l_w$  为来自相邻视窗的宽度, 根据图 1 中所示, 有如下关系:

$$\begin{cases} \frac{i}{f} = \frac{e}{z-f}, \\ e = l_o + l_w = i \left( \frac{z}{f} - 1 \right), \\ l_w = s, \quad 0 < s < e. \end{cases} \quad (1)$$

根据光路图, 确定了  $z$  和  $e$  也就能根据人眼位置得到  $s$  值, 当人眼接收到有串扰的图像时, 有  $s \neq 0$ , 即人眼不在正确视窗中心位置, 将会看到部分来自相邻视窗的图像. 此时串扰度可以表示为式 (2):

$$\eta = \frac{\sum_0^{l_w} I_w}{\sum_0^{l_o} I_o}, \quad (2)$$

$\eta$  表示计算得到的串扰度,  $I_w$  和  $I_o$  分别表示错误视窗像素亮度值和正确视窗像素亮度值. 当每个像素点亮度相同且视窗高度都相同时, 上式最终可以表述成  $l_w$  与  $l_o$  之比的形式.

当发生串扰时, 人眼接收图像将会出现重影, 串扰越严重, 重影程度也相应增大, 严重时导致观看者眩晕, 在重影最严重的位置被称为断层处. 本文提出断层宽度测量的评估方法, 通过在最佳观看距离计算断层处图像重影宽度的最大值与甜点处相同图像基准宽度的比值表示裸眼图像的成像质量. 该方法直接计算用户视觉接收图像, 选取易表现深度关系的虚拟模型 (此处选取坦克模型) 作为测试目标, 结合特定裸眼算法处理与展示设计让该虚拟目标显示在裸眼 3D 屏幕中心. 该评估参数的具体计算过程分为以下步骤:

(1) 在虚拟环境基于特定裸眼 3D 设计方法, 使得测试目标静止显示于裸眼屏幕中心, 并调整视差参数等, 让立体效果明显并且在可视区域存在无干扰的甜点画面.

(2) 分别在裸眼屏幕前方最佳观看距离寻找甜点位置拍摄无重影的清晰画面  $S$ , 寻找断层处位置拍摄干扰严重的重影画面  $S_1$ .

(3) 将  $S$  和  $S_1$  图像整体缩放到相同大小级别, 具体实现是在  $S_1$  和  $S$  中选取同样的基准参考物, 该参考物在两幅图像中均没有出现重影, 然后整体缩放两幅图像使得参考物在两幅图像中具有相同大小. 缩放后  $S$  中测试目标依然清晰, 而  $S_1$  中测试目标重影严重.

(4) 测量缩放后  $S$  中测试目标宽度为  $L_{\text{base}}$ , 测量缩放后  $S_1$  中炮管顶端宽度记为  $L_{\text{hash}}$ , 如果测量画面出现多重影, 则测量所有重影左右边缘最大宽度.

(5) 设参数  $H_x$  表示单目裸眼画面干扰程度, 根据  $L_{\text{base}}$  和  $L_{\text{hash}}$  的比值确定  $H_x$ , 如式 (3).  $H_x$  值越大说明图像干扰越严重, 人眼看到的图像越不清晰.

$$H_x = \frac{L_{\text{hash}} - L_{\text{base}}}{L_{\text{base}}}. \quad (3)$$

本文以坦克模型的炮筒顶端作为测试目标, 以坦克车身作为基准参考物, 描述的断层宽度测量方式如图 2 所示, 其中  $L$  的宽度保证了两幅图像中的坦克目标缩放到同样大小.

断层宽度测量方法通过与理想的甜点图像相对宽度计算参数表征图像干扰程度, 该干扰直接影响用户体验. 将不同设计方案得到的立体拍摄画面等比例缩放到相同基准大小, 比较 3D 画面最大重影宽度. 因为视点变化过程是离散的位置关系变化, 在图像上表现也是离散画面的切换, 这为找到可视区域断层位置和甜点位置带来方便, 只需要测试用户面向屏幕水平移动即可.

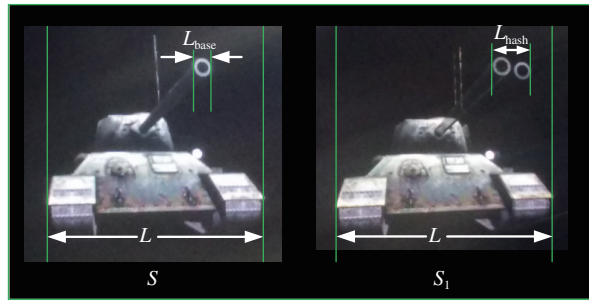


图 2 (网络版彩图) 断层宽度测定方法

Figure 2 (Color online) Fault-width-assessment method

表 1 断层图像的眩晕参数

Table 1 Sickness parameters of fault-width image

User	Vertigo 1	Vertigo 2	Vertigo 3	Vertigo 4	Vertigo 5
1	3.31	5.05	8.35	11.48	14.44
2	2.61	5.57	6.44	9.05	12.53
3	1.04	1.57	2.26	3.83	7.13
4	1.22	2.96	5.22	8.00	13.92
5	3.48	4.52	6.26	7.66	9.74
6	3.13	4.35	5.74	7.66	9.05
7	1.22	1.74	2.09	4.35	5.92
Average	2.29	3.68	5.20	7.43	10.39

## 2.2 人眼承受视差参数的测定

用户观看裸眼图像时, 通过调节视点间距可改变裸眼 3D 立体效果. 视点间距为 0, 则所有视点图像完全一样, 将会看到普通 2D 图像; 随着间距的不断增大, 3D 效果越来越明显; 如果间距过大, 左右眼图像将会出现串扰和重影, 继续增大间距则会使用户产生眩晕感. 在进一步探究提高成像质量的方法之前, 有必要探究人眼在正常视差和逆视差情况下接收视点间距的极限情况.

本文实验硬件为长虹 48 寸 8 视点裸眼 3D 屏幕, 型号为 SFD48001, 分辨率 1920×1080, 可视角度 120°. 在 Unity3D 引擎中搭建坦克目标断层宽度测量系统, 邀请 7 名志愿者参与人眼接收断层宽度极限的测试, 包括 6 名男生, 1 名女生, 其年龄分布在 20 岁到 27 岁之间. 为了避免近视对实验结果的影响, 7 名被试均为正常视力, 同时经过前筛选, 所有被试均能够正常感知立体视觉效果, 并且随着断层宽度的不断增大会出现不同程度的眩晕感. 实验测试时, 被试坐在屏幕正前方 4.5 米位置, 注视图像断层处. 先设定像机间距为零, 然后逐渐增大摄像机间距, 按照连续质量标度法将眩晕感分为 5 个等级, 要求被试在注视坦克模型的过程中找到眩晕等级依次变化增大的时刻, 停止改变摄像机间距, 测试记录此时的断层宽度填入对应的眩晕等级中. 然后, 重新将摄像机间距值设为 0, 让被试观看无眩晕风景图片调整视力状态为舒适之后, 重复该过程寻找下一个眩晕等级. 1 到 5 级眩晕分别对应轻微眩晕、轻度眩晕、中度眩晕、较严重眩晕、严重眩晕的主观感受, 最终记录下不同级别眩晕感的断层宽度测试数据如表 1 所示. 绘制数据曲线如图 3 所示.

从表 1 数据可以看出, 眩晕的严重程度从 1 级到 5 级逐渐加重, 所有测试者感受到的眩晕程度变

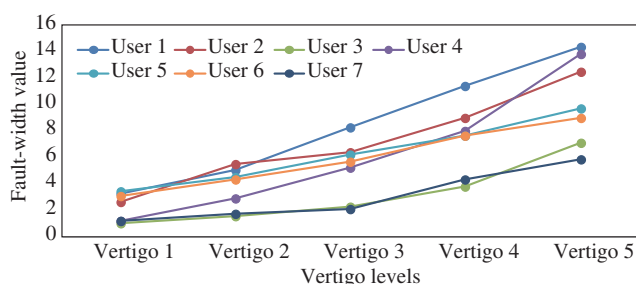


图 3 (网络版彩图) 断层图像眩晕曲线

Figure 3 (Color online) Sickness curve of fault-width image

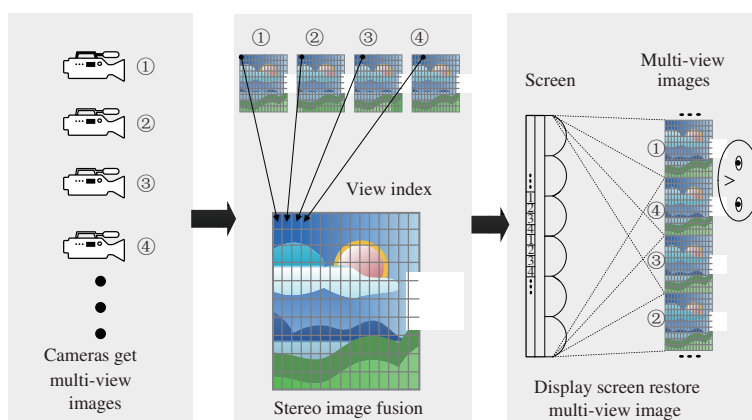


图 4 (网络版彩图) 透镜式裸眼 3D 实现流程

Figure 4 (Color online) Developing of lenticular auto-stereoscopic pictures

化都是随着断层宽度的增大而加重, 图 3 中横轴表示眩晕等级, 等级越高眩晕越严重; 纵轴表示不同眩晕等级对应的断层宽度值. 所有被试眩晕感和断层宽度数据呈现正相关, 并且随着眩晕等级增加, 断层宽度的增量有变大的趋势. 通过询问测试者, 他们普遍认为 1 级眩晕 (轻微眩晕) 是可以忍受的, 但 3 级眩晕 (中度眩晕) 及以上会使得观看过程难以继续. 因此, 良好的裸眼 3D 画面应该保证断层宽度在 1 级眩晕以内, 测定这些参数为提升裸眼体验的设计提供了数据参考.

### 3 面向用户体验的裸眼 3D 设计

为了说明面向用户体验的裸眼 3D 设计要素, 以 Unity3D 引擎设计虚拟环境裸眼 3D 展示应用为例, 将透镜式裸眼 3D 图像显示输出过程简单表示为如图 4 所示的 3 个阶段.

第 1 阶段为摄像机组获取虚拟场景多视点图像, 每一个摄像机对应一个视点; 第 2 阶段为多视点图像融合产生立体图像的过程, 按照一定排列顺序的映射矩阵将多视点图像像素点复制到立体图像上, 图像合成算法实现参考文献 [16]; 第 3 阶段为裸眼屏幕输出显示阶段, 立体图像的像素点被透镜硬件分离还原为多视点图像并投射到空间不同区域, 通常将透镜倾斜放置. 观察者站在可视空间合适位置, 左、右眼分别看到相邻的视点图像, 就能在大脑中还原深度感知信息. 如图 4 所示, 当观察者左右眼接收到的图像分别来自视点 1 和 2, 对应于摄像机 1 和 2 所拍摄到的画面, 如果两个像机位置合适, 图像经大脑合成产生立体感; 当观看者左右眼分别看到视点 4 和 1 时, 因为像机编号是从左到右依次

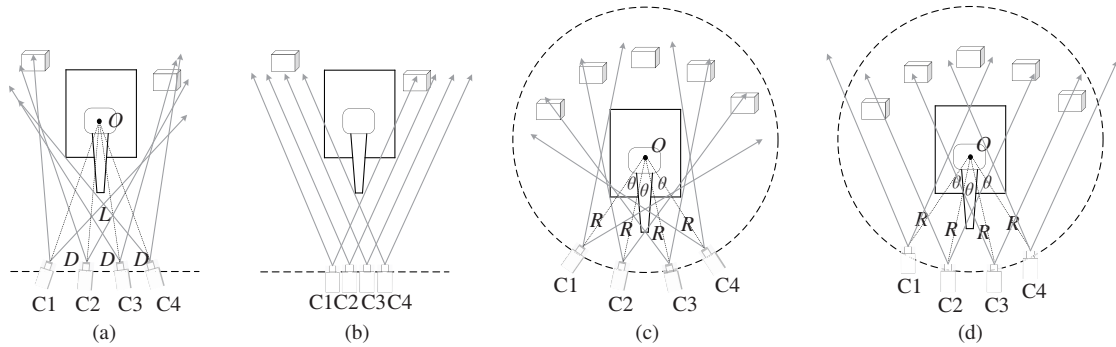


图 5 摄像机布局方式

Figure 5 Setups of cameras. (a) Planner focus; (b) planner non-focus; (c) cylindrical focus; (d) cylindrical non-focus

递增, 则此时左右眼图像颠倒, 观察者看到的是逆视画面, 不能形成立体感, 同时视点间距较大, 导致观察者产生严重眩晕感.

### 3.1 摄像机组获取多视点图像

在多视点图像获取过程, 因为多视点图像只有水平视差, 摄像机组需要保持在同一个水平面, 但是在平面内的布局方式有多种不同设计方式. 文献 [16] 指出相机布局有 Planner (平行布局), Cylindrical (会聚布局) 等多种方式, 本文重点研究了平行聚焦、平行非聚焦、会聚聚焦和会聚非聚焦 4 种像机组布局方式, 各布局方式示意图如图 5 所示.

图 5 以 4 视点简单示范摄像机布局方式, (a) 为平行聚焦布局方式, 摄像机组在一条直线上等间距分开排列, 并且设置所有摄像机聚焦到同一个点  $O$ , 将测试目标中心放置在相机组焦点  $O$  处. 在像机与  $O$  点之间的区域会表现出屏效果,  $O$  点以外的区域为入屏效果. 例如左、右眼分别看到  $C1, C2$  像机拍摄的画面, 焦点到摄像机的位置存在关系  $D1 \neq D2$ , 即左右眼画面焦距不同. (b) 为平行非聚焦布局方式, 不再使摄像机聚焦到中心点, 从而避免焦距不同的问题. (c) 为会聚聚焦布局, 所有像机分布在同圆心圆边缘上, 并且任意两个相邻像机与圆心连线所成夹角  $\theta$  相等, 该夹角大小直接影响多视点视差大小. 因像机到焦点距离都是  $R$ , 图像聚焦良好, 所以会聚聚焦布局方式得到的裸眼效果较好, 但对于远景图像, 该布局方式不同像机得到的图像差距大, 容易在移动时造成远景画面抖动, 如  $C1, C2$  看到的远处小方块不同. (d) 为会聚非聚焦排列方式, 同样让相机组排列在圆形边缘上, 但相机不再聚焦于圆心.

### 3.2 多视点图像融合为单幅立体图像

立体图像合成算法针对输出显示的立体图像每个像素点, 按照映射矩阵选取多视点图像中的一幅图像对应位置复制  $R, G, B$  值到立体图像中, 从而将多视点图像融合为单幅立体图像. 映射矩阵对应了柱透镜下图像的视点排列顺序, 并影响到最终裸眼效果, 一种简单的 8 视点亚像素映射矩阵如图 6 所示.

图 6 中, 亚像素映射矩阵每一行顺序排列, 矩阵中每个数字代表对应摄像机编号, 即多视点图像序号, 容易看出, 序号递增方向为像机从左到右排列顺序. 映射矩阵反映了多视点图像合成立体图像时的排列方式, 最基本的方式即图 6 所示顺序排列, 从图中标出位置可看出, 在视点排列循环交界处, 存在不可避免的让视点回归正常次序的逆视调整区间, 即断层现象产生位置, 视点发生跳变, 左右眼的视

<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	...
1	2	3	4	5	6	7	8	...
8	1	2	3	4	5	6	7	...
7	8	1	2	3	4	5	6	...
7	8	1	2	3	4	5	6	...
6	7	8	1	2	3	4	5	...

图 6 (网络版彩图) 8 视点亚像素映射矩阵片段

Figure 6 (Color online) Sub-pixels mapping matrix of 8 viewpoint example

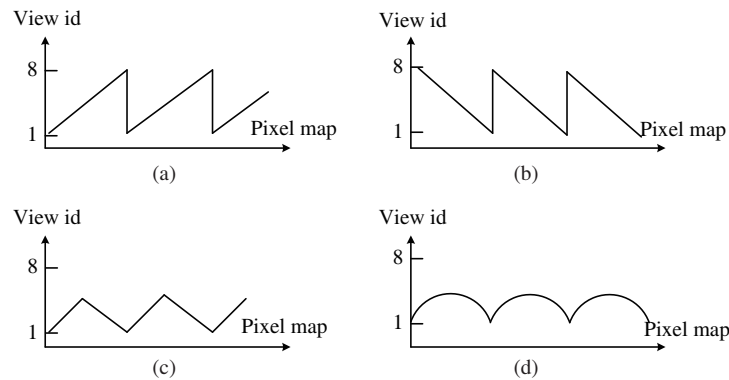


图 7 多视点排列方式

Figure 7 Multiple viewpoints arrangement. (a) Rising zigzag; (b) decline zigzag; (c) triangle wave; (d) half arc

点序列分别为 8 和 1, 此时不仅发生逆视现象, 而且像机间距过大造成裸眼图像视差远超过人眼间距. 该情况是为了将视点排序回归到正常递增顺序所必须经历的跳变, 当用户观看到断层图像时, 用户体验将会受到极大影响, 有必要研究不同视点排列顺序的裸眼输出质量. 几种视点排列方式如图 7 所示.

为了减弱“断层”的影响, 采用平缓变化的视点排列方式具有积极的作用, 图 7 中罗列了不同的视点排列方式. 其中, 上升锯齿形即基本的顺序排列方式, 会在一组排列到下一组排列交界处产生断层. 下降锯齿形与上升锯齿形顺序相反, 此时任意位置得到的画面会是逆视或断层, 无法正确形成 3D 效果. 三角波形排列一半视点顺序递增, 另一半视点顺序递减, 在递增的区域可以得到正确的裸眼画面, 在递减区域同样会接收到逆视画面, 这种排列方式避免了断层, 但会有 50% 的逆视区域, 可通过将视点递减速度加快, 从而让递增的视点序列变长. 半弧形排列是将三角波形进一步平滑处理, 使得在逆视区域视点快速下降.

图像合成时多视点排列顺序会影响到最终输出的裸眼画面质量, 为了深入研究其规律并试图找出最佳裸眼设计方案, 本文以 8 视点裸眼软硬件平台为例, 选取上升锯齿形 (12345678, 56781234)、三角波形 (34567654, 67852345)、类半弧形 (13456753) 排序方式设计裸眼算法进行实验测试.

#### 4 实验测试与评估

本文针对像机组布局方式和立体图像合成顺序进行了交叉实验测试, 在 Unity3D 引擎和长虹 SFD48001 裸眼显示平台, 设计平行聚焦布局、平行非聚焦布局、会聚聚焦布局、会聚非聚焦布局以及 5 种多视点图像排列顺序 12345678, 56781234, 34567654, 67852345, 13456753, 在 Intel Corei7 处

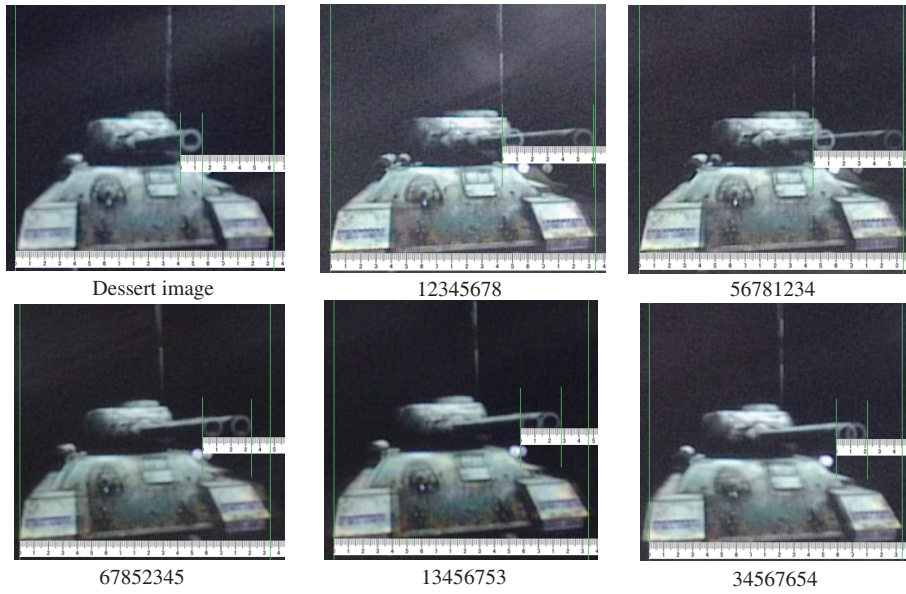


图 8 (网络版彩图) 不同视点排列顺序的断层宽度

Figure 8 (Color online) Fault-width of different viewpoints arrangement

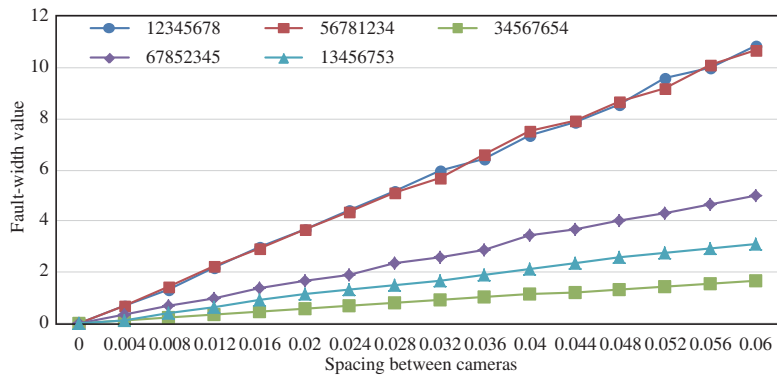


图 9 (网络版彩图) 平行非聚焦布局断层宽度

Figure 9 (Color online) Fault-width of planner-non-focus setup

理器, 8 GB 运行内存, NVIDIA GTX780 显卡主机上得到显示效果如图 8 所示。

图 8 中展示了采用不同视点排列得到的断层处图像示意, 可以看到不同的排列方式得到的断层处图像的重影是很明显的. 针对不同摄像机布局方式和视点排列顺序, 设置目标物体 (坦克) 距离摄像机组中心的距离为 1.8 units, 逐渐改变平行布局摄像机的间距, 会聚布局的摄像机间夹角值 (半径  $R = 1.8$  units), 得到的断层宽度测量值的变化曲线如图 9~12 所示。

图 9 和 10 中, 横轴表示平行设置摄像机的间距值, 纵轴表示断层宽度测量值; 图 11 和 12 中, 横轴表示会聚设置摄像机夹角值, 纵轴表示断层宽度测量值. 从图 9 和 10 的对比可以发现, 视点排列 12345678 和排列 56781324 的变化曲线基本重合, 这说明断层发生在透镜的哪个位置对最终的断层宽度值影响较小. 分析图 9~12, 可见不同摄像机布局时, 视点排列顺序对应的断层宽度值相对关系是一致的, 断层宽度值从大到小依次是 12345678 (56781234), 67852345, 13456753 和 34567654. 会聚布局在



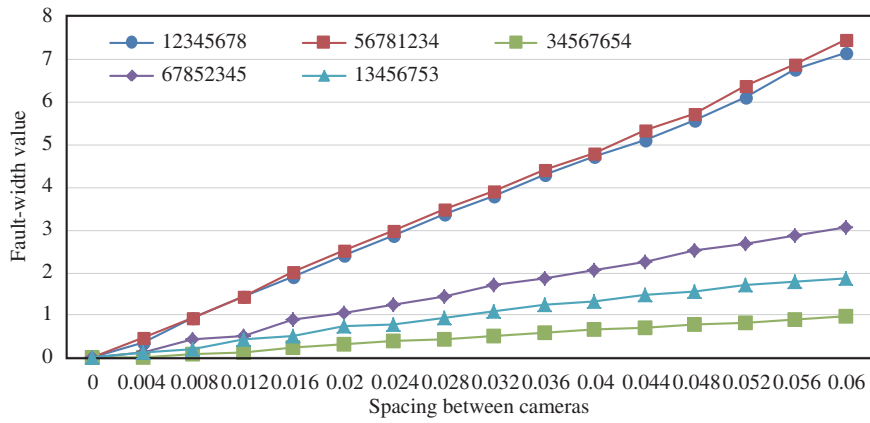


图 10 (网络版彩图) 平行聚焦布局断层宽度

Figure 10 (Color online) Fault-width of planner-focus setup

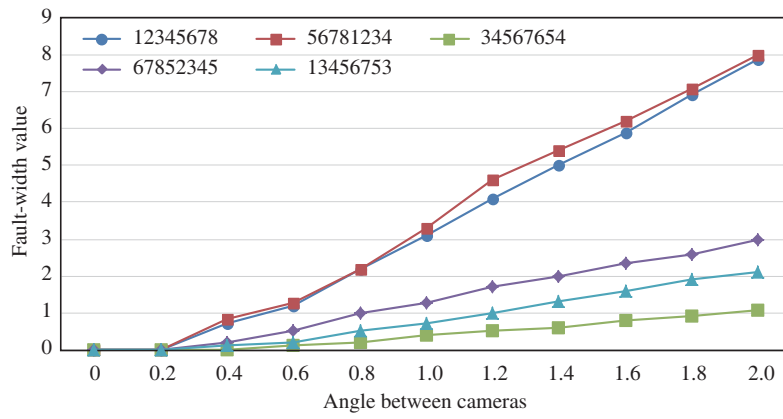


图 11 (网络版彩图) 会聚聚焦布局断层宽度

Figure 11 (Color online) Fault-width of cylindrical-non-focus setup

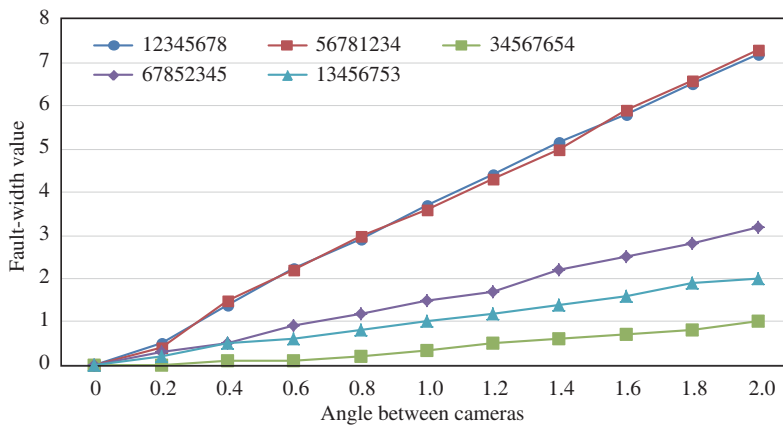


图 12 (网络版彩图) 会聚非聚焦布局断层宽度

Figure 12 (Color online) Fault-width of cylindrical-focus setup

表 2 平行设置非聚焦布局干扰测量

Table 2 Interference measurement of planar setup without focus

No.	View-point arrangement	Fault-width value	Reverse width	Actual view points
1	12345678	4.76	1	8
2	56781234	4.81	1	8
3	34567654	0.69	4	5
4	67852345	2.26	2	7
5	13456753	1.42	3	6

表 3 平行设置聚焦布局干扰测量

Table 3 Interference measurement of planar setup with focus

No.	View-point arrangement	Fault-width value	Reverse width	Actual view points
6	12345678	3.18	1	8
7	56781234	3.16	1	8
8	34567654	0.42	4	5
9	67852345	1.31	2	7
10	13456753	0.86	3	6

表 4 会聚设置聚焦布局干扰测量

Table 4 Interference measurement of cylindrical setup without focus

No.	View-point arrangement	Fault-width value	Reverse width	Actual view points
11	12345678	5.45	1	8
12	56781234	5.52	1	8
13	34567654	0.71	4	5
14	67852345	2.30	2	7
15	13456753	1.45	3	6

夹角很小时断层宽度趋近于零.

结合图 9~12 以及 2.2 小节中的人眼眩晕参数测定值, 可以获得不同视点排列顺序下的可调参数范围. 但是, 影响最终立体效果的因素还有摄像机间距、逆视宽度、实际裸眼个数等, 经过实际测试, 在平行非聚焦布局时设置相机间距为 0.026 units, 会聚布局时相邻摄像机夹角设置为  $1.5^\circ$  时, 针对测试裸眼屏幕的甜点处图像立体感较为强烈, 在这样的参数设置下对不同的摄像机布局和视点排列顺序情况进行了交叉实验测试, 得到结果如表 2~5 所示.

分析表 2~5 数据, 容易发现, 当逆视调整区宽度变小时, 得到的实际裸眼个数可以更大, 但断层宽度测定值也会变大, 表现为图像重影严重. 对比表 2 和 3, 摄像机组平行布局从非聚焦变化到聚焦之后, 整体的断层宽度值有减小, 锯齿形视点排列顺序的断层宽度值变化最为剧烈, 而三角波形排列变化最小. 对比表 4 和 5, 在会聚布局方式下, 聚焦到圆心同样会使得测量数据变小, 但变化量比平行布局小一些. 从表 2 和 4 可以看出, 在相机不聚焦的情况下, 获得相当的立体效果时平行布局的断层宽度值比会聚布局更小. 为了保证所设计的裸眼展示符合用户体验的要求, 本文在分析数据和实际体验后认为, 在影响用户体验的参数中, 应当首先保证摄像机间距或者夹角能够在甜点图像处产生较好的立体感, 然后考虑断层宽度在 1 级眩晕 (即 2.29) 内, 接着考虑逆视宽度越小越好, 因为在逆视区是

表 5 会聚设置非聚焦布局干扰测量

Table 5 Interference measurement of cylindrical setup with focus

No.	View-point arrangement	Fault-width value	Reverse width	Actual view points
16	12345678	5.42	1	8
17	56781234	5.45	1	8
18	34567654	0.65	4	5
19	67852345	2.35	2	7
20	13456753	1.51	3	6

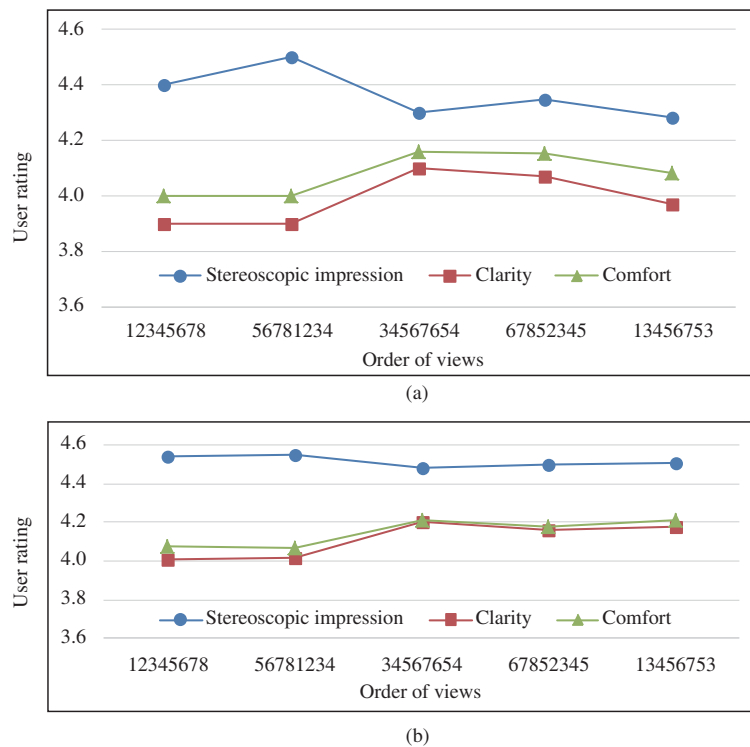


图 13 (网络版彩图) 用户体验度评分

Figure 13 (Color online) Rating of user experience. (a) Planner non-focus; (b) cylindrical focus

不会有立体感的, 最后考虑实际裸眼个数越多越好. 因此, 本文建议平行非聚焦布局设置相机间距为 0.026 units, 视点排列顺序为 67852345 较为理想; 会聚聚焦布局设置摄像机夹角为  $1.5^\circ$ , 聚焦半径为 1.8 units, 视点排列为 13456753 较为理想.

最后, 针对平行设置非聚焦像机布局 (摄像机间距 0.026 units) 与会聚设置聚焦布局 (半径 1.8 units, 夹角  $1.5^\circ$ ) 设计虚拟模型观赏场景, 场景背景设置为纯黑色, 各类展示模型 (武器、建筑、动物等) 依次出现并在场景中旋转、位移, 该过程模型能够有较为突出的立体感, 整个观赏过程时长为 1 分 20 秒. 邀请 10 名志愿者 (20~26 岁大学生, 均为视力正常或者佩戴正确眼镜后矫正为正常视力) 先后参与该场景的观赏, 并且在观赏过程中左右移动, 然后对不同设计效果按照观看画面立体感、清晰度、舒适度 3 个方面进行主观评分, 单项总分 5 分, 得到不同摄像机布局和视点排列顺序的平均得分变化曲线如图 13 所示.

在图 13 中, 横轴表示不同的视点排列顺序, 纵轴表示用户评分的平均值. 从图 13 中可以看出, 立体感方面锯齿形排列得分较高, 三角波形排列得分最低. 清晰度方面, 三角波形视点排列方式因为没有断层处画面严重重影的存在, 给用户呈现的清晰度要好一些. 舒适度体现了用户在观看裸眼画面过程出现眩晕的程度, 当断层宽度参数在人眼接收范围内, 舒适度分数较高. 立体感得分较高的视点排列方式舒适度得分却较低, 其原因就是断层宽度太大引起用户体验降低. 会聚布局的方式得到立体感整体水平比平行布局要好, 说明会聚布局的方式可以带来更好的裸眼立体效果. 结合两种布局方式的评分, 可以看出平行设置非聚焦布局以 67852345 视点排列得到的总体得分水平较高 (平均值 4.19), 会聚设置聚焦布局以 13456753 视点排列得分水平较高 (平均值 4.3), 在单个模型观赏场景, 会聚布局比平行布局方式得到的裸眼 3D 立体画面更优. 断层宽度的评估方法直接分析用户眼睛所见画面质量, 并且保证图像能够出现良好的立体效果. 通过对不同类型的模型 (武器、建筑、动物等) 的展示效果进行评估, 发现在相同设置下, 不同的展示物体具有同样的展示效果, 实验结果具有推广性.

## 5 结论

本文针对多用户, 非定点观看场合裸眼 3D 展示内容的用户体验度研究, 首先提出基于断层处图像与甜点图像相对宽度测量值评估的断层宽度测量方法, 通过实验测定了人眼接收立体图像造成眩晕感的断层宽度极限, 然后研究了裸眼图像获取过程的摄像机布局方式和图像融合过程的多视点排列顺序对最终裸眼成像质量的影响, 通过详细的实验测定了不同摄像机布局和视点排列的交叉组合断层宽度值. 通过断层宽度测量实现裸眼 3D 立体图像质量的定量分析, 并结合人眼接收图像极限参数得出会聚聚焦布局的最佳视点排列方式为 13456753; 平行非聚焦布局的最佳视点排列方式为 67852345. 最后, 结合实际应用案例的效果验证及志愿者体验评分, 验证了上述视点实验结果和规律的正确性.

由于裸眼 3D 设计过程涉及的参数较多, 本文重点考察了像机布局方式和多视点合成顺序的影响, 对于相邻像机间距, 圆弧半径等参数还未进行细致的研究, 在进行用户体验实验时, 实验次数过多容易影响主观评价效果, 后续研究将会在这些方面进一步深入.

**致谢** 感谢 Carlos 等<sup>[16]</sup> 的前期研究结果对本文引导, 感谢四川长虹集团股份有限公司提供的裸眼 3D 实验平台和软件设计指导.

## 参考文献

- 1 Feng H Z, Chen B X, Zhang Z C. Study on the effect and comfort of multi-view autostereoscopic display. *Cable Television Technol*, 2015, 11: 61-63
- 2 Zhan Z C. Design and research of naked-eye 3D mobile video equipment. Dissertation for M.S. Degree. Nanchang: Nanchang University, 2013. 25-34 [帖志成. 裸眼 3D 移动影音设备的设计与研究. 硕士学位论文. 南昌: 南昌大学, 2013. 25-34]
- 3 Kong L S, Nan J S, Xun X C. Research status quo of flat 3-D display technology. *Chinese J Optic Appl Optic*, 2009, 2: 112-118
- 4 Liu L Q. Design and implementation of auto stereoscopic 3D interactive display based on gesture. Dissertation for M.S. Degree. Beijing: Beijing University of Technology, 2014. 6-18 [刘立强. 基于体感交互的裸眼 3D 互动展示设计与实现. 硕士学位论文. 北京: 北京工业大学, 2014. 6-18]
- 5 Liang F Y, Deng S X, Yang Y Y. Research on effect assess method for glassless stereoscopic display. *J Image Graph*, 2007, 8: 1407-1411

- 6 Xie Y T, Su X H, Zhen J W, et al. Key properties of autostereoscopic display. *Chinese J Liq Cryst Disp*, 2015, 10: 888–893
- 7 Kim J, Kim T, Lee S. Quality assessment of perceptual crosstalk in autostereoscopic display. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Paris, 2014. 3484–3487
- 8 Kim T, Kim J, Kim S, et al. Perceptual crosstalk prediction on autostereoscopic 3D display. *IEEE Trans Circ Syst Video Technol*, 2017, 27: 1450–1463
- 9 Choi H J. Analysis on the 3D crosstalk in stereoscopic display. In: *Proceedings of SPIE 7848, Holography, Diffractive Optics, and Applications IV*, Beijing, 2010. 384–396
- 10 Lee C, Seo G, Han H. et al. Auto-stereoscopic 3D displays with reduced crosstalk. *Opt Press*, 2011, 19: 24762–24774
- 11 Wang Z Y, Hou C P. Crosstalk elimination in multi-view autostereoscopic display based on polarized lenticular lens array. *Chin Phys B*, 2015, 24: 309–314
- 12 Zhao W X, Wang Q H, Wang A H, et al. Autostereoscopic display based on two-layer lenticular lenses. *Opt Lett*, 2010, 35: 4127–4129
- 13 Zeng X M, Tian H, Huang Z Q. A method to minimize the crosstalk in eye-tracking auto-stereoscopic display by rearranging sub-pixels. *J Optoelectron Laser*, 2013, 1: 146–151
- 14 Wang J H, Liang H W, Fan H, et al. High-quality autostereoscopic display with spatial and sequential hybrid control. *Appl Opt*, 2013, 52: 8549–8553
- 15 Li D, Zang D, Qiao X, et al. 3D synthesis and crosstalk reduction for lenticular autostereoscopic displays. *J Display Technol*, 2015, 11: 939–946
- 16 Carlos C, Sotoca J M, Pla F, et al. Synthetic content generation for auto-stereoscopic displays. *Multimed Tool Appl*, 2014, 72: 385–415
- 17 Yu X B, Sang X Z, Chen D, et al. Autostereoscopic three-dimensional display with high dense views and the narrow structure pitch. *Chin Opt Lett*, 2014, 12: 38–46
- 18 Kasano M, Ichihashi K, Asai Y, et al. Design for reducing autostereoscopic display crosstalk using a liquid crystal gradient-index lens. *Sid Symp Digest Tech Pap*, 2014, 45: 743–746

## Design and measurement of user experience oriented auto-stereoscopic 3D display based on optical lens

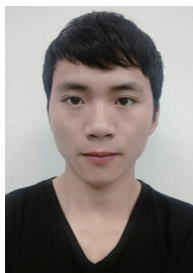
Wenchao YANG, Yadong WU\*, Hongyu JIANG & Sirui ZHAO

*School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China*

\* Corresponding author. E-mail: wuyadong@swust.edu.cn

**Abstract** In order address the issues of crosstalk, poor user experiences, and difficult assessment of image quality in auto-stereoscopic 3D displays, we propose an easy-to-implement measurement method called fault-width-assessment for auto-stereoscopic 3D applications. Based on this method, we perform a study on the influence of camera group setups and multi-view image arrangements during the image fusion process. For scenes with multiple users and a non-fixed view, we propose various schemes for camera setups and multi-view image arrangement, which contribute to improving the user experience. Finally, cross-experimental comparisons and applications of the user experience tests are implemented, which are ultimately helpful for choosing a reasonable proposal.

**Keywords** auto-stereoscopic 3D display, user experience, crosstalk, assessment, viewpoint arrangement, camera setups



**Wenchao YANG** was born in 1991. He is currently working toward a Master's degree at the Southwest University of Science and Technology, Mianyang. His research interests include human-computer interaction and virtual reality.



**Yadong WU** was born in 1979. He received his Ph.D. degree from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, in 2006. He is currently a professor at the Southwest University of Science and Technology. His research interests include digital image processing, information visualization, and human-computer interaction.



**Hongyu JIANG** was born in 1994. He is currently working toward a Master's degree at the Southwest University of Science and Technology, Mianyang. His research interests include information visualization and visual analysis.



**Sirui ZHAO** was born in 1991. He is currently working toward a Master's degree at the Southwest University of Science and Technology, Mianyang. His research interests include human-computer interaction and machine learning.