

# 基于显著区域的立体图像舒适视差范围研究

胡佳洁\*\*, 李素梅\*, 常永莉, 侯春萍

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 视差是影响立体内容视觉舒适度的主要因素之一。结合视觉显著特性,通过大量主观实验研究视差因素对立体图像舒适度的影响,得到舒适视差的定量范围。首先,利用立体显著区域提取算法获得显著立体图像,并用眼动仪验证其合理性;然后,采用像素平移法对显著立体图像进行视差变换,得到实验素材,进行主观实验;最后,处理实验数据,得到舒适视差的定量范围。结果表明,人眼对水平视差和垂直视差的舒适度响应差异很大,水平视差舒适范围为 $(-0.379^\circ, 0.644^\circ)$ ,而可接受的垂直视差范围为 $(-0.10^\circ, 0.11^\circ)$ 。验证实验的正确率在 90% 以上,表明所得舒适视差范围很好地反映了立体图像的主观舒适度,能为立体内容的制作提供更符合人眼视觉特性的定量标准。

**关键词** 成像系统; 视觉舒适度; 主观评价; 显著区域; 视差; 定量范围

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0811001

## Comfortable Disparity Range of Stereo Image Based on Salient Region

Hu Jiajie\*\*, Li Sumei\*, Chang Yongli, Hou Chunping

School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Disparity is one of the main factors which affect the visual comfort of stereo content. Combined with the visual attention mechanism, the influence of disparity factor on visual comfort of three-dimensional (3D) image is studied through a large number of subjective experiments and a quantitative range is obtained. First, the salient stereo image is obtained through a stereo salient region extraction algorithm, and an eye tracker is used to verify its rationality. Then, the pixel shifting method is used for disparity conversion on the salient stereo image. A large number of subjective experiments are carried out with the converted images. Finally, the comfort disparity range is obtained after process of the experimental data. The experimental results show that the human visual system responds very differently to horizontal disparity and vertical disparity, and the comfortable range of horizontal disparity is  $(-0.379^\circ, 0.644^\circ)$ , while the comfortable range of vertical disparity is  $(-0.10^\circ, 0.11^\circ)$ . The correct rate of verification experiment is over 90%, which indicates the obtained comfortable disparity ranges reflect the comfort of stereo image well, and can provide a quantitative standard for the making of 3D contents.

**Key words** imaging systems; degree of visual comfort; subjective evaluation; salient region; disparity; quantitative range

**OCIS codes** 110.3000; 100.6890; 120.2040; 330.1400

## 1 引 言

视差型立体显示是当前主流的立体显示技术<sup>[1]</sup>,显示内容的水平视差和垂直视差对视觉舒适度有重要影响。水平视差能为立体图像带来立体感,水平视差过小会降低立体内容的深度和立体感,过大则易给观看者带来复视、恶心等不舒适症状<sup>[2]</sup>。在理想情况下,垂直视差应为 0,但在实际应用中难

以避免垂直视差,完全消除垂直视差复杂费时,且尚无明确的标准指出将垂直视差校正到何种范围内不会破坏视觉舒适度。在视差因素影响视觉舒适度的研究中:文献[3]指出,在观看立体内容时,过大的双目视差和立体失真是造成视觉不舒适的主要因素;文献[4]表明,长时间观看双目差异较大的立体内容会诱发眼部疾病;文献[5]研究了图像的视差幅度和视差梯度对视觉舒适度的影响;文献[6]通过让被试

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-03-25; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61002028)

\* E-mail: tjnkls@163.com; \*\* E-mail: 13702000775@163.com

观察具有不同视差的小球,研究了柱透镜光栅三维(3D)显示器观看的舒适视差范围;文献[7]表明,当立体图像的视差一定时,图像中前景物体越宽,越难以融合得到舒适的图像。

上述研究结论大多数是定性的,为了给立体内容的制作提供直接精确的标准,需要得到定量的舒适范围。文献[8]基于整幅图像研究了水平视差对视觉舒适度的影响并得到定量结论,但未考虑人眼视觉的显著特性,即人眼在观看立体图像时倾向于忽略非显著对象,只关注视觉显著区域,这种特性被称为视觉注意机制<sup>[9]</sup>。本文结合视觉注意机制,通过大量主观实验研究视差因素对立体图像舒适度的影响,得到舒适视差的定量范围。首先,利用平面显著图和立体视差图得到显著立体图像,并用眼动仪验证其正确性;然后,采用平移像素法对显著立体图像进行变换,得到大量视差失真的立体图像并进行



图 1 4 幅源立体图像。(a) Ball;(b) plant;(c) flower;(d) baby

Fig. 1 Four original stereoscopic images. (a) Ball; (b) plant; (c) flower; (d) baby

## 2.2 实验相关标准

主观实验时光照不宜过强。所用显示器的屏幕高度约为 27 cm,观看距离约为 180 cm,是屏幕高度的 7 倍<sup>[11]</sup>。实验挑选 28 名视锐度良好的被试,女性 14 名,男性 14 名,主眼均为右眼。采用双刺激损伤标度法,被试对每幅失真图像评分时都以源图像作为参考,每位被试评测时长不超过 30 min。实验前指导被试,被试理解评分规则后进行测试。为保证被试所给分值的准确性,对实验数据进行筛选。首先由每个被试所给分值  $x_i$ ,计算一幅立体图像所得评价值的均值和标准差,根据格鲁布斯检验法<sup>[12]</sup>剔除异常主观评价;然后,计算评分的二阶矩和四阶矩,按照 ITU-1438<sup>[13]</sup>的方法剔除异常被试。两级筛选后,对失真图像的  $M$  个主观分数  $x_i$

进行统计平均,得到主观评价价值  $\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1}^M x_i}{M}$ 。

## 2.3 实验过程

### 2.3.1 显著立体图像的获取

大脑在处理视觉信息时,总是迅速选择显著对象进行优先处理,而忽略或舍弃非显著对象。这一机制使得人眼能够从众多的视觉信息中快速地选择出最重要和值得关注的区域。模拟人眼视觉特性,

主观实验;最后,拟合出主观评价价值随视差变化的曲线图,得到舒适视差的定量范围。验证结果表明,本文方法所得范围更精确、更符合人眼视觉特性,能为立体内容的制作提供科学易行的定量标准。

## 2 实 验

### 2.1 实验素材及设备

实验使用 22 英寸(1 英寸=2.54 cm)偏光式 3D 显示器,使用德国 SM 公司的 iView X RED 眼动仪捕获图像的显著区域<sup>[10]</sup>。所用图片来自韩国先进技术院立体图像库,该图像库共有 120 对分辨率为 1920 pixel×1080 pixel 的立体图像,挑选其中 8 幅源立体图像进行主观实验,所选源图像均经过垂直视差校正,立体感强,视觉舒适度好,涵盖室内和室外场景,包括了俯视图和平视图,具有较好的代表性。其中 4 幅源立体图像如图 1 所示。

用显著立体图像的舒适度来表示整幅立体图像的舒适度,可有效降低计算复杂度。获取显著立体图像的算法如图 2 所示:通过基于视觉特点(GBVS)算法<sup>[14]</sup>处理右视点图像得到二维(2D)图像显著图,通过快速立体匹配算法<sup>[15]</sup>得到立体图像视差图,结合二维图像显著图和立体图像视差图得到立体显著度图,立体显著度图经模糊原理及掩模优化得到显著立体图像<sup>[16]</sup>。具体算法流程可参考文献[10]。

在利用本文算法获取显著立体图像的过程中,得到的阶段图如图 3 所示。利用眼动仪验证所得显著立体图像的准确性<sup>[10]</sup>。源图像对应的眼动仪热图如图 4 所示,热图反应的人眼注意区域和本文算法提取的显著区域基本一致。

### 2.3.2 视差失真图像的获取

对于在平行配置模式下拍摄得到的立体图像,可以通过视差平移法进行视差调整<sup>[17]</sup>,无需相机的硬件参数,利用软件编程即可实现,简便快捷。采用视差平移法,对显著立体图像进行不同等级的水平视差调整和垂直视差调整,得到主观实验素材。

立体图像的水平视差有正负之分,正视差即入屏,负视差即出屏,如图 5 所示。 $b_0$  为双目间距, $X_r$  和  $X_l$  分别为任一点在右视图和左视图中的位置,

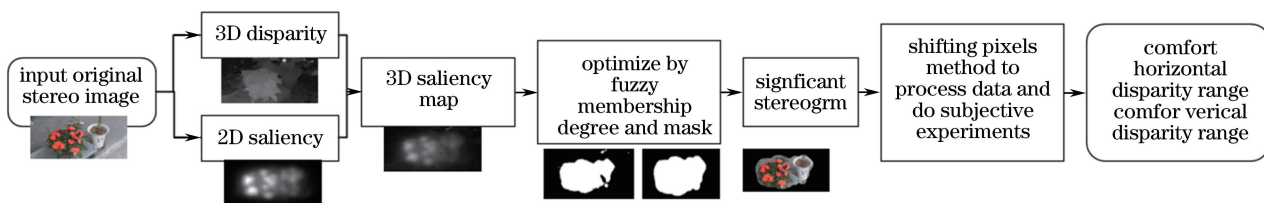


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of algorithm

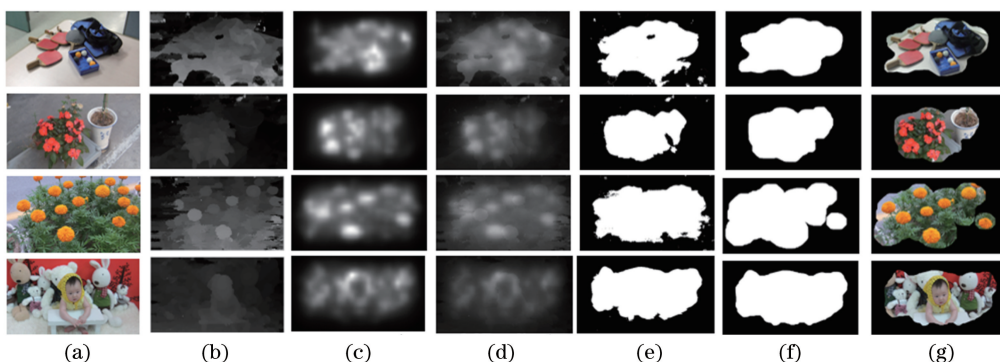


图 3 显著立体图提取过程。(a)右视图;(b)视差图;

(c) 2D 显著图像;(d) 3D 显著图像;(e)遮挡图像;(f)优化后的遮挡图像;(g)显著立体图像

Fig. 3 Serial images during salient stereoscopic images obtaining. (a) Right view; (b) disparity map; (c) 2D salient map; (d) 3D salient map; (e) mask map; (f) optimized mask map; (g) salient stereo map



图 4 眼动仪实验显著热图

Fig. 4 Salient hot map of eye tracker experiment

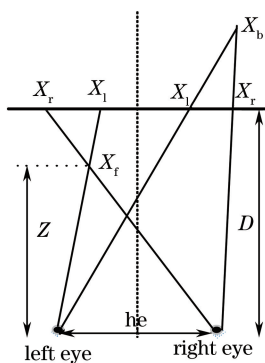


图 5 正、负水平视差示意图

Fig. 5 Schematic of positive and negative horizontal disparity

$X_r$  和  $X_b$  为其出屏像点和入屏像点,  $Z$  为人眼到像点的距离。在 Panum 融像区内, 水平视差越大, 内容的立体感越强, 视觉体验越好; 在超出 Panum 融像区后, 增大水平视差, 人脑无法舒适融像, 观看者出现复视、恶心等症状。预实验确定了正、负水平视差的最大调整范围为 250 pixel, 最小调整量为 5 pixel, 因此一幅源立体图像经过视差调整可得 100 幅视差失真的立体图像。

垂直视差是造成视觉不舒适的主要原因之一, 由于成像设备和拍摄条件等因素的限制, 采集到的立体图像均存在垂直视差, 需要对其进行校正。垂直视差的校正算法复杂度高, 计算量大, 在实际应用中难以将垂直视差严格校正为 0, 目前尚无统一标准给出垂直视差校正到何范围, 才不会破坏立体内容的舒适度。实验研究人眼能接受的垂直视差范围, 通过预实验确定最大正、负视差调整范围为 100 pixel, 最小调整量为 2 pixel, 一幅源立体图像经过垂直视差调整可得 100 幅视差失真立体图像。综上, 一幅源图像共生成 200 幅视差失真的立体图像。

### 3 数据处理及分析

#### 3.1 水平视差舒适范围

用最小二乘分段线性拟合法处理实验数据, 所

得结果如图 6 所示。8 幅源立体图像的平均意见得分(MOS)值随水平视差变化得到 8 条拟合直线,变化趋势基本一致。随着正视差和负视差的增大,视觉舒适度降低,与先验知识一致。将 8 组数据进行统计平均,得到图 7。

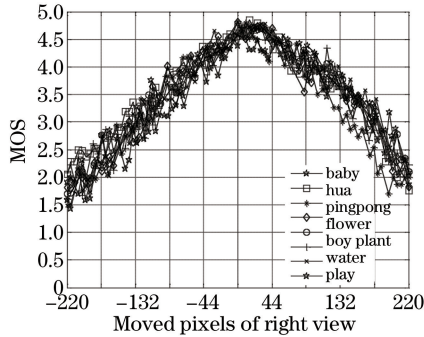


图 6 8 组源立体图像的 MOS 值与水平视差对应图  
Fig. 6 MOS of eight stereo images varies with horizontal disparity

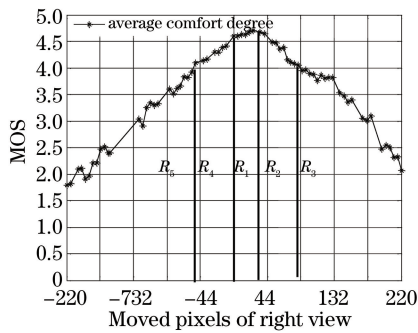


图 7 源立体图像的 MOS 值与水平视差对应图  
Fig. 7 MOS of source stereo images varies with horizontal disparity

将图 7 中所围区域分为 5 个子区域  $R_1 \sim R_5$ , 选取 MOS 值  $\geq 4$  的图像作为满足视觉舒适要求的立体图像。将  $R_1 \sim R_5$  的信息汇总于表 1, 结合表 1 对图 7 各部分分析如下。

表 1  $R_1 \sim R_5$  区域属性表  
Table 1 Attribute of region  $R_1 \sim R_5$

Region	Behind / before screen	Disparity value / pixel	MOS value	Belong to comfortable area or not
$R_1$	Behind	(0, 25)	(4.6, 4.7)	Yes
$R_2$	Behind	(25, 5)	(4.7, 4)	Yes
$R_3$	Behind	>85	<4	No
$R_4$	Before	(0, -50)	(4.6, 4)	Yes
$R_5$	Before	<-50	<4	No

1)  $R_1$  区域为立体视觉舒适区, 视差范围为  $0 \sim 25$  pixel, 是主观评价值的增区间。该区域靠近零视差面, 视差范围较窄, 随着入屏视差的出现, 画

面立体感逐渐增强, 入屏视差变大对增强立体感的贡献大于对双目融合的破坏, 立体视觉体验更好, 在此区域内主观评价值随视差增大而增大, 直到峰值。

2)  $R_2$  区域为立体视觉舒适区, 视差范围为  $25 \sim 85$  pixel, 是主观评价值的减区间。在该区域, 随着正视差的增大, 画面景深加深, 立体感增强, 使得视觉体验更好, 但视差变大使得融合得到单目图像所需时间逐渐变长, MOS 值随视差增大而减小。从整体来看, 此区域内的立体内容既具备良好的立体感也不易使观众产生视疲劳, 因此是视觉舒适区域。

3)  $R_3$  区域为立体视觉不舒适区, 视差  $>85$  pixel, 是主观评价值的减区间。区间视差过大, 超过 Panum 融像区的允许范围, 引起双目的辐辏调节冲突, 人眼所需融像时间更长, 造成眼肌疲劳, 视觉舒适度降低至 4 分以下。随着视差进一步增大, 人眼不能在短时间内融合左右视点得到立体图像, 出现复视现象, 此时主观分数降至 3 分以下, 制作立体内容时应该避免这种情况。

4)  $R_4$  区域为立体视觉舒适区, 视差范围为  $0 \sim -50$  pixel, 是主观评价值的减区间。相较于入屏的立体图像, 出屏立体图像能带来更逼真的视觉体验。在该区域, 立体内容的水平视差较小, 双目差异在 Panum 融像区内, 双目单视的效果好, 立体内容略微出屏, 不会逼近人眼造成眼部肌肉紧张, 此范围内的立体内容视觉舒适度高。

5)  $R_5$  区域为立体视觉不舒适区, 视差  $<-50$  pixel, 是主观评价值的减区间。随着负视差绝对值的增大, 出屏视差过大, 人眼感知到的 3D 图像越来越远离屏幕而接近人眼, 逼迫眼球向内运动, 视线的交叉角增大, 被试产生眼胀和头晕的感觉。此范围内的立体内容视觉舒适度差, 制作立体内容时应避免这种情况。

综合来看, 图 7 中正视差区域和负视差区域基本关于直线  $x=0$  对称, 主要差异为: 1) 正视差的舒适范围大于负视差的舒适范围, 满足立体内容舒适度要求的最大正视差为 85 pixel, 最大负视差为  $-50$  pixel, 印证了人眼对出屏视差的敏感度比入屏视差的敏感度高<sup>[18]</sup>; 2) 正视差区域存在一个较小的增区间  $R_1$ , 幅度较小的入屏视差能够带来立体感, 且不会影响双目融合, 此时舒适度随视差值增大而提高, 直至视差大到干扰双目融合时, 视觉舒适度达到峰值, 这一现象与文献[18]的定性研究结论一致。

为了便于立体内容的制作,将视差的像素单位转换为角度。结合图 6,实验时观看距离  $D$  约为 180 cm,双目距离  $b_e$  为 6.5 cm,实验屏幕宽度为 47.5 cm,图像分辨率为 1920 pixel $\times$ 1080 pixel,每个像素宽度为 0.025 cm, $Z$  为人眼距像点的距离。

根据公式(1)将像素视差转换为角度视差<sup>[8]</sup>:

$$\theta = 2 \left( \arctan \frac{b_e}{2D} - \arctan \frac{b_e}{2Z} \right) \quad (1)$$

转换结果如表 2 所示,其中,disparity in 表示入屏视差范围,disparity out 表示出屏视差范围。

表 2 基于显著区域的立体图像舒适度与视差对应关系

Table 2 Correspondence between comfort and parallax of stereo image based on significant region

Index	MSO			
	$\geq 4$	[3.5,4]	[3,3.5]	$\leq 3$
Disparity in	$[0^\circ, 0.644^\circ)$	$[0.644^\circ, 1.099^\circ)$	$[1.099^\circ, 1.327^\circ)$	$\geq 1.327^\circ$
Disparity out	$(-0.379^\circ, 0^\circ]$	$(-0.645^\circ, -0.379^\circ]$	$(-0.891^\circ, -0.645^\circ]$	$\leq -0.891^\circ$

在表 2 中,根据 MOS 值将立体内容舒适度分为 4 个等级,记录其出屏视差和入屏视差。每个等级对应入屏视差的舒适范围均略大于出屏视差舒适范围,说明在立体内容制作时,为保证内容的安全性和舒适性,需要更注重控制出屏视差的大小。立体图像的最佳视差范围为  $(-0.379^\circ, 0.644^\circ)$ ,此时主观评价价值高于 4,视觉舒适度良好。

### 3.2 垂直视差舒适范围

用最小二乘分段线性拟合法处理 8 组实验数据,所得结果如图 8 所示。8 幅源立体图像的 MOS 值随垂直视差变化得到 8 条拟合直线,变化趋势基本一致,随着正视差和负视差的增大,视觉舒适度降低。同样将图 8 中 8 组数据进行统计平均,得到图 9。

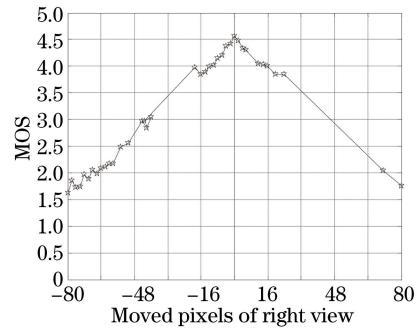


图 9 源立体图像的 MOS 值与垂直视差对应图  
Fig. 9 MOS of source stereo images varies with vertical disparity

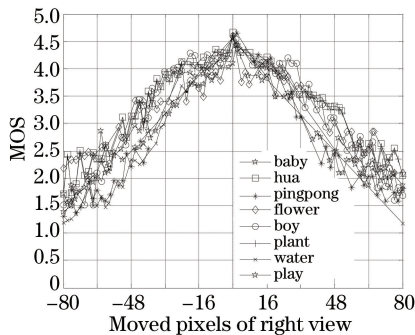


图 8 8 组源立体图像的 MOS 值与垂直视差对应图  
Fig. 8 MOS of eight stereo images varies with vertical disparity

图 9 曲线整体关于直线  $x=0$  对称,表明人眼对向上和向下的垂直视差失真同样敏感,这与水平视差的结论不同。在视觉舒适度不低于 4 分的前提下,人眼能接受的垂直视差范围是  $[-13, 15]$  pixel,实验中显示器高度为 26.5 cm,每个像素点高度为 0.025 cm,将垂直视差范围以角度表示为  $(-0.10^\circ, 0.11^\circ)$ ,制作立体内容时,需要将立体内容的垂直视差校正到此范围。

将 MOS 值随水平视差和垂直视差变化的曲线

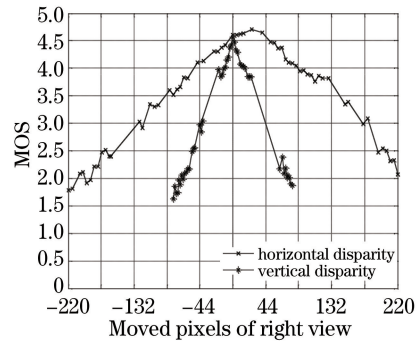


图 10 水平视差与垂直视差对比图

Fig. 10 Contrast map of horizontal and vertical disparity 进行对比,如图 10 所示,垂直视差的曲线更尖锐,下降的梯度明显大于水平视差曲线下降的梯度,MOS 值下降到 2 时,水平视差约为 220 pixel,而垂直视差约为 80 pixel,定量说明了人眼对垂直视差的灵敏度远大于对水平视差的灵敏度。

## 4 实验验证

### 4.1 对比验证

文献[8]未考虑人眼视觉注意机制,采用无源图像作为参考的单刺激方法,研究视差因素对立体图像视觉舒适度的影响。图11(a)和图11(b)分别为文献

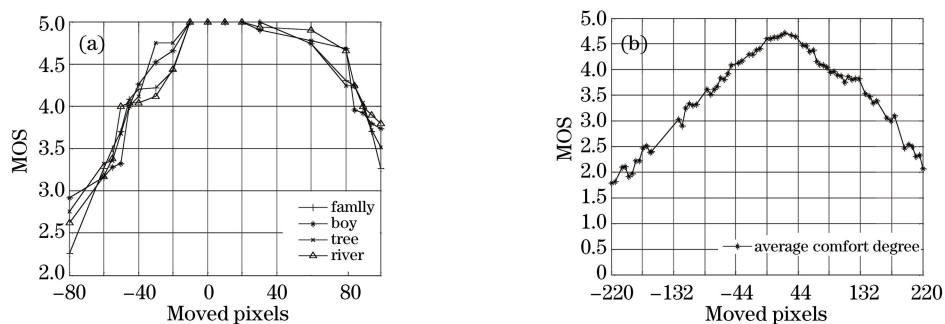


图 11 不同方法的水平视差失真实验结果对比。(a)文献[8]方法;(b)本文方法

Fig. 11 Comparison of experimental results of horizontal disparity with different methods.

(a) Method in Ref. [8]; (b) proposed method

[8]和本文方法所得的 MOS 值随水平视差变化的结果,可以看出,本文实验结果优于文献[8]方法。

1) 在正视差范围内,图 11(a)中的曲线没有上升,而图 11(b)中存在较小的增区间,即前文所指的  $R_1$ ,与文献[18]指出的立体视觉体验吻合,即背景视差从无到有时,立体内容的视觉体验比零视差图像更好。本文方法所得舒适水平视差范围更符合人眼视觉特性。

2) 在视差失真程度较小时,文献[8]所得主观评价价值几乎无变化,而本文方法所得曲线变化率明显较大,表明结合视觉注意机制,被试能够更敏感地感知较小的视差失真,提高了实验的精确度。

#### 4.2 测试验证

为验证本文方法所得的舒适视差范围是否具有

普适性,分别从韩国先进科学技术院立体图像库、3D LIVE Phase I 数据库和 3D LIVE Phase II 数据库中挑选了两幅不同场景、不同角度拍摄的图像,共 6 幅源立体图像进行测试验证,部分图像如图 12 所示。对每幅立体图像按照 2.3 节的实验步骤进行处理,得到失真立体图像并进行主观实验。toy 这组图像得到 44 幅  $MOS \geq 4$  的失真图,其中,41 幅落在本文舒适视差范围内,准确率为 93.1%。同理,计算得到其他 5 组测试图像的准确率分别为 92.9%, 92.2%, 96.0%, 93.9%, 91.3%, 验证实验的准确率均大于 90%。本文方法结合了视觉注意机制,并使用更科学的双刺激损失标度法进行主观实验,所得到的舒适视差范围对不同场景、不同数据库的立体图像具有较好的普适性和可靠性。



图 12 源立体图像。(a) Toy;(b) drinking;(c) tree;(d) house;(e) slide;(f) seat

Fig. 12 Part of original stereoscopic images. (a) Toy; (b) drinking; (c) tree; (d) house; (e) slide; (f) seat

## 5 结 论

基于视觉注意机制,通过大量主观实验研究了视差因素对立体图像舒适度的影响,分析了主观舒适度随水平视差和垂直视差的变化趋势,得到了舒适水平视差的定量范围为  $(-0.379^\circ, 0.644^\circ)$ ,可接受的垂直视差范围为  $(-0.10^\circ, 0.11^\circ)$ ,且验证实验的准确率大于 90%。实验结果表明,考虑视觉注意机制的实验结果更符合人眼视觉特性,本文方法所得舒适视差范围对不同数据库具有较好的普适性,为立体内容的制作提供了直接可靠的定量标准。但影响立体图像舒适度的因素还有很多,有待进一步

研究其他因素(色度、饱和度等)对观看舒适度的影响,完善整个理论体系。

### 参 考 文 献

[1] Zheng H D, Yu Y J, Cheng W M. A review on three-dimensional display techniques [J]. Optical Technique, 2008, 34(3): 426-430, 434.  
郑华东,于瀛洁,程维明. 三维立体显示技术研究新进展[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 426-430, 434.

[2] Xia Z P, Cheng C. Stereoscopic display image depth adjustment based on visual saliency[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0133001.  
夏振平,程成. 基于视觉显著性的立体显示图像深度调整[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0133001.

- [3] Lambooij M, IJsselsteijn W A, Heynderickx I. Visual discomfort of 3D TV: assessment methods and modeling[J]. *Displays*, 2011, 32(4): 209-218.
- [4] ISO/TMBG Technical management board-groups. Image safety: Reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences: IWA 3:2005[S/OL]. [2018-01-25]. <https://www.iso.org/standard/43019.html>.
- [5] Jung C, Wang S. Visual comfort assessment in stereoscopic 3D images using salient object disparity [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(6): 482-484.
- [6] Li X F, Wang Q H, Li D H, *et al.* Research on relation between the range of binocular parallax and visual fatigue in 3D display based on lenticulation lens [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(5): 873-877.  
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.
- [7] Sohn H, Jung Y J, Lee S I, *et al.* Predicting visual discomfort using object size and disparity information in stereoscopic images [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2013, 59(1): 28-37.
- [8] Li S M, Li Y D, Zhu D. Research on the disparity range of stereo image comfort based on depth perception and subjective evaluation [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, 28(9): 1045-1054.  
李素梅, 李永达, 朱丹. 基于深度感知和主观评价的影响立体图像舒适度的视差范围研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2017, 28(9): 1045-1054.
- [9] 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.
- [10] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0215001.  
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0215001.
- [11] Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures: Recommendation ITU-R BT. 500-11[S/OL]. [2018-01-25]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-11-200206-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-11-200206-S!!PDF-E.pdf).
- [12] Jain R B. A recursive version of Grubbs' test for detecting multiple outliers in environmental and chemical data [J]. *Clinical Biochemistry*, 2010, 43(12): 1030-1033.
- [13] ITU-R. Recommendation ITU-R BT. 1438. Subjective assessment of stereoscopic television pictures[S]. Geneva: ITU-R, 2000: 1-14.
- [14] Harel J, Koch C, Perona P. Graph-based visual saliency [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2006, 19: 545-552.
- [15] Rhemann C, Hosni A, Bleyer M, *et al.* Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond [C]. 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011: 3017-3024.
- [16] Jiang Q P, Shao F, Jiang G Y, *et al.* An objective stereoscopic image visual comfort assessment metric based on visual important regions [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 875-881.  
姜求平, 邵枫, 蒋刚毅, 等. 基于视觉重要区域的立体图像视觉舒适度客观评价方法 [J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 875-881.
- [17] Kwon K C, Choi J K, Kim N, *et al.* Automatic control of horizontal-moving stereoscopic camera by disparity compensation [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2002, 6(4): 150-155.
- [18] Qiu Z H. The research on disparity management in visual comfort and health of 3D display [J]. *Post Production*, 2017, 23(2): 51-56.  
邱章红. 3D 影像的“视觉舒适度与健康安全”中的“视差管理”研究 [J]. *影视制作*, 2017, 23(2): 51-56.