

# 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量

胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 朱兆琪, 侯春萍

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

**摘要** 结合视觉注意机制,通过大量主观实验,定量研究了对比度因素对立体图像视觉舒适度的影响。首先结合平面显著图和立体视差图获得立体显著度图,再利用模糊隶属度和掩模对其进行优化,获得显著立体图像,并用眼动仪验证其合理性;然后对左右视图进行对比度变换和主观实验,数据筛选后得到显著立体图像的舒适对比度匹配图和差异图。实验结果表明:左右视图的对比度差异门限值随着左视图对比度值的不同而改变,且左右视图对比度差异不能过大,最大和最小差异值分别为 1.97 和 -2.40。实验所得舒适对比度范围很好地反映了立体图像的舒适度,验证实验的正确率达 95%,为立体内容的制作提供了更合理可行的定量标准。

**关键词** 机器视觉; 视觉舒适度; 主观评价; 视觉显著区域; 定量研究; 对比度

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0215001

## Measurement of Comfortable Contrast Range of Stereo Image Based on Salient Region

Hu Jiajie, Li Sumei, Chang Yongli, Zhu Zhaoqi, Hou Chunping

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

**Abstract** Combined with the visual attention mechanism, the influence of contrast factor on visual comfort of stereo image is studied quantitatively through a large number of subjective experiments. First, a stereo salient degree map is derived from stereo disparity map and planar salient map. It is optimized through fuzzy membership degree and mask, and the salient stereoscopic images can be obtained. An eye tracker is used to verify its rationality. Then, a series of subjective experiments are conducted after contrast conversion of left and right views. Finally, the comfortable contrast matching map and difference map are obtained after data screening. The experimental results show that the contrast difference thresholds of left and right view change with different left view contrasts, and the contrast difference should not be too large. The maximum and minimum difference values are 1.97 and -2.40, respectively. The obtained comfortable contrast ranges reflect the comfort of stereo image better, and the correct rate reaches 95%, which provides more reasonable and feasible quantitative standards for the making of stereo contents.

**Key words** machine vision; visual comfort; subjective evaluation; visual salient region; quantitative research; contrast

**OCIS codes** 150.0155; 100.6890; 110.3000; 330.1400

## 1 引 言

立体显示技术在给用户带来身临其境的视觉体验的同时,也会使观看者产生不同程度的不适感。视觉疲劳、视觉敏感度降低和双眼调节能力下降等视觉不舒适现象被认为是 3D 产品在市场领域快速普及的主要障碍<sup>[1-2]</sup>。研究表明引起视觉不舒适的

主要因素包括观看环境、立体显示设备、人的生理心理状况和立体内容等 4 个方面,其中缺乏舒适的立体内容是制约立体成像技术普及的重要因素之一<sup>[3]</sup>。影响立体内容舒适度的因素有许多,比如对比度、亮度、色度、饱和度、串扰和视差等<sup>[4]</sup>。本文结合人眼视觉显著特性,定量研究对比度因素对视觉舒适度的影响,进而得到对比度影响舒适度的定量

收稿日期: 2017-08-10; 收到修改稿日期: 2017-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(61002080)

作者简介: 胡佳洁(1995—),女,硕士研究生,主要从事立体图像质量评价方面的研究。E-mail: 13702000775@163.com

导师简介: 李素梅(1975—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事立体图像质量评价、模式识别及神经网络方面的研究。E-mail: lisumei@tju.edu.cn(通信联系人)

标准。

国内外专家学者对影响立体图像舒适度的因素进行了广泛研究。文献[5-6]分别研究了视觉舒适度与立体图像视差大小、视差分布之间的关系。文献[7]指出不恰当的立体图像景深分布会引起人眼视觉疲劳。文献[8]定量研究了立体图像的色度对立体图像舒适度的影响,表明当左右视图的色度差异超过一定门限时,立体图像的舒适度会降低。文献[9]明确指出,长时间观看双目差异较大的立体内容会导致视觉疲劳并诱发眼部疾病。文献[10]表明,立体图像的亮度分布会影响立体内容的舒适度。文献[11]综合研究了视差、图像背景的复杂度和对比度等因素对立体图像质量的定性影响。

由于定量研究立体内容舒适度的影响因素耗时耗力,目前国内外对立体图像舒适度的研究大多是定性的,且尚没有形成统一明确的标准。为了更准确地判断立体图像的舒适度并为立体内容的制作提供直接依据,需要进行定量研究。文献[12]定量研究了对比度对立体图像舒适度的影响,文中采用基于整幅立体图像的研究方法,未充分考虑人眼的视觉特性。众多研究表明,在观看立体内容时,观看者的注意力会立刻被场景中的显著区域吸引,随后人类视觉系统(HVS)控制人眼的晶状体聚焦于显著物体,使得人眼在观察图像时往往只观察到其中的显著部分而不是整幅图像,这种现象称为视觉注意,视觉注意机制对人眼视觉舒适度有重要影响<sup>[13]</sup>。

本文结合视觉注意机制,通过大量主观实验,定量研究对比度对立体图像舒适度的影响。首先采用平面显著图与立体视差图相结合的方法得到立体显著度图,将优化后的立体显著度图与源图像相结合,得到显著立体图像,并利用眼动仪实验验证了立体显著算法提取显著区域的正确性;然后对左右视图进行对比度线性变化分析,并对得到的失真图像进行主观实验;采用最小二乘法对实验数据进行拟合,得到显著立体图像的舒适对比度匹配图和差异图,并对图中各部分进行分析。对比验证和测试验证结果表明,依据本文方法得到的舒适对比度范围更符合人眼视觉主观观测结果,为立体内容的制作提供了更科学合理和简单易行的定量标准。

## 2 实 验

### 2.1 实验素材及设备

实验中用到的立体显示器为 22 英寸(1 英寸=2.54 cm)偏光式 3D 立体显示器(冠捷 215LM00040,

冠捷公司,中国),使用眼动仪(iView X RED, SM 公司,德国)验证显著区域算法提取的正确性。

选用韩国先进科学技术院所提供的立体图像数据库作为立体图像样本数据集<sup>[14]</sup>。该立体图像库由 120 对分辨率为 1920 pixel×1080 pixel 的立体图像组成,涵盖人物、植物和建筑等多种类型的图像。本实验选择该立体图像库中 4 幅源立体图像,如图 1 所示,这 4 幅源立体图像的立体感强,视觉舒适度高,对比度值分布在不同的梯度,具有较好的代表性。



图 1 4 幅源立体图像

Fig. 1 Four pairs of original stereoscopic images

### 2.2 实验条件及被试者选择

根据 ITU (International Telecommunications Union) 主观评价标准<sup>[15]</sup>,进行实验时周围环境的光照亮度必须低于 3 lx,对于 22 英寸全高清显示器,观看距离应为屏幕高度的 3 倍。

为确保所得结论的准确性,实验所选择的 30 名被试者都经过了正规眼科医院的功能检查。选择 17 名男性和 13 名女性,其中 10 人具有先验知识,20 人不具有先验知识,所有被试主眼都是右眼。

### 2.3 主观评价及数据筛选

科学的主观评价过程是定量研究的基础。评价前需向被试者介绍实验评价方法并进行预训练,预训练图像应具有完备性,使被试者能正确理解图像所属等级,测试时长不得超过 0.5 h。主观实验采用 ITU 建议的双刺激损伤标度方法<sup>[15]</sup>。完成主观实验后,为了排除因 30 名被试者的知识背景和实验动机等因素的影响,需要剔除实验数据中的异常值<sup>[15]</sup>,因此提出了两级数据筛选法。首先采用基于均值和置信区间的格鲁布斯检验法<sup>[16]</sup>剔除某幅图像得到的所有主观分值中的异常值,然后采用标准 (ITU-R)BT.500 中推荐的方法检测是否存在评分偏差很大的被试者,若存在则淘汰此被试者并剔除

其给出的所有分数。两级数据筛选严格保证了实验所得数据的客观性。

对筛选后的实验数据进行统计平均,得到一幅立体图像的平均主观分值(MOS)。图像的MOS越高,表明舒适度越好,规定MOS不小于4的立体图像为视觉舒适的立体图像<sup>[17]</sup>。

## 2.4 实验过程

实验流程如图2所示。具体步骤如下:

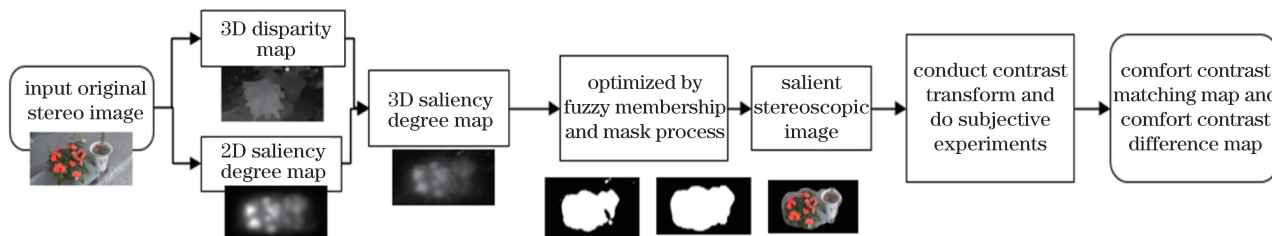


图2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

### 2.4.1 立体显著度图的获取

根据HVS特性,人眼对场景不同部分的注意力呈非均匀分布,大部分注意力集中在场景中的显著区域,而对场景中的非显著区域关注较少<sup>[18]</sup>。因此,可以用显著立体图像的舒适度来反映整幅立体图像的舒适度情况,以提高测试准确率并减小计算复杂度。立体图像的视差特性和图像空间频率都会影响视觉舒适度<sup>[19]</sup>,因此根据二维图像显著图和立体图像视差图来获取立体显著度图。

多数人的主眼为右眼,首先对右视图采用GBVS(Graph Based Visual Saliency)算法<sup>[20]</sup>计算得到平面显著图 $M_R(x, y)$ ,然后采用快速立体匹配算法<sup>[21]</sup>得到以右视图为基准的视差图 $d_R(x, y)$ ,最后采用线性方式将视觉显著图和右视差图像进行加权,得到立体显著度图 $I(x, y)$ , $I(x, y)$ 可表示为

$$I(x, y) = w_1 d_R(x, y) + w_2 M_R(x, y), \quad (1)$$

式中 $w_1$ 和 $w_2$ 为加权比重,且 $w_1 + w_2 = 1$ ,这里取 $w_1 = w_2 = 0.5$ <sup>[22]</sup>。

### 2.4.2 显著立体图像的获取

在得到的立体显著度图中,图像显著区域的边缘模糊,无法根据此图将源图像直接划分为显著区域和非显著区域,因此利用模糊数学的隶属度理论来描述图像中各像素的显著程度<sup>[22]</sup>。对立体显著度图进行优化,得到一幅二值掩模图像 $M(x, y)$ <sup>[23]</sup>。像素点的像素值为1,表明原立体图像中的该点属于显著区域,反之属于非显著区域。

设论域 $X$ 为立体显著度图,将论域中的像素点 $(x, y)$ 分为显著区域 $A$ 和非显著区域 $B$ 两类, $A$ 和

1) 立体显著度图的提取。将二维图像显著图与立体图像视差图相结合,得到立体显著度图。

2) 显著立体图像的获取。立体显著度图经模糊原理及掩模优化得到显著立体图像。

3) 主观实验。将显著立体图像以0.1的步长进行对比度变换并进行主观实验。

4) 舒适对比度匹配图和差异图的获取。

$B$ 是 $X$ 的一个划分,满足 $A \cup B = X, A \cap B = \emptyset$ 。立体显著度图的灰度值表示原始图像中该像素点隶属于显著区域的程度,设像素点 $(x, y)$ 的灰度值为 $L$ ,该点对显著区域 $A$ 的隶属度 $A(x, y) = L/255$ 。

为得到显著区域 $A$ ,需要进行去模糊操作<sup>[22]</sup>。采用阈值分割法得到掩模图像 $M(x, y)$ , $M(x, y)$ 可表示为

$$M(x, y) = \begin{cases} 1 & A(x, y) > T \\ 0 & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $T$ 为分割阈值,由最大类间方差方法确定<sup>[24]</sup>。

对于立体显著度图中任一像素点 $(x, y)$ ,若 $(x, y)$ 对显著区域的隶属度大于阈值 $T$ ,则该像素点属于视觉显著性区域,对应掩模图像 $M(x, y)$ 中的白色区域,否则属于黑色区域。为了去除掩模图像边缘的毛刺及空洞,采用形态学的开闭运算对掩模图像 $M(x, y)$ 进行优化,得到优化的掩模图像。

将优化掩模图像与原始视点图像相乘,得到显著立体图像,如图3所示。图3分别给出了4组立体图像的右视图、视差图、平面显著度图、立体显著度图、掩模图、优化掩模图和显著立体图像。

### 2.4.3 眼动仪实验验证

为了验证本文算法所得显著立体图像的显著性区域是否准确,采用眼动仪对源立体图像的显著区域进行主观测量。每次实验前先进行校准实验和基准测量,当被试者对校准基准点的观测误差小于 $1^\circ$ 时进行实验。每张图片随机呈现,且呈现时间为5s。根据眼动仪测量得到图像感兴趣区域的热图,将其与计算所得的显著立体图像区域进

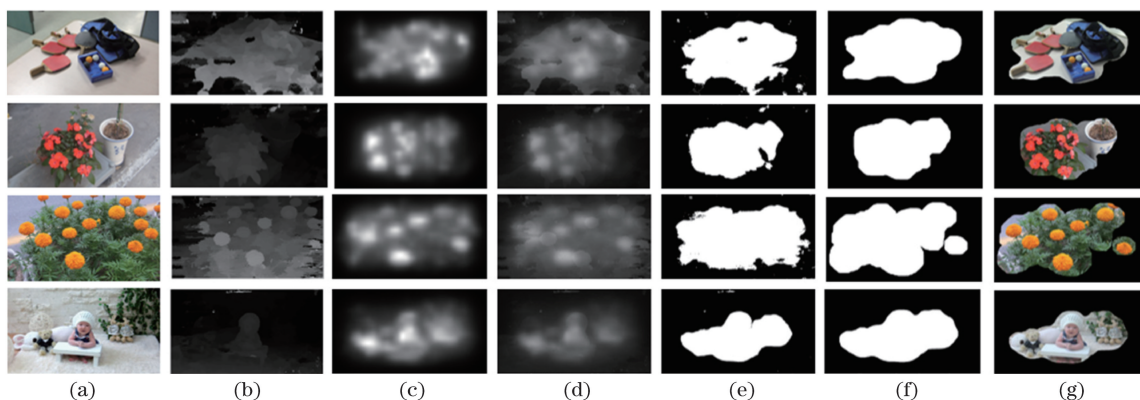


图3 显著立体图像提取过程。(a)右视图;(b)视差图;(c) 2D显著度图;(d) 3D显著度图;  
(e)掩模图;(f)优化掩模图;(g)显著立体图像

Fig. 3 Extraction process of salient stereoscopic images. (a) Right view; (b) disparity map;  
(c) 2D saliency degree map; (d) 3D saliency degree map; (e) mask map;  
(f) optimized mask map; (g) salient stereo image

行对比,通过对比发现二者所提出的显著区域基本一致。图4为眼动仪测量出的图像感兴趣区域的热图。



图4 眼动仪实验测得的显著热图

Fig. 4 Salient hot maps obtained by eye tracker experiment

眼动仪实验以颜色的暖色度来显示注视点的时间和位置的动态变化。图4中标记为红色、黄色区域的被注视时间最长,也是最为显著的部分;绿色标记部分表示较为重要的区域,被试者在实验中对此部分比较感兴趣;蓝色标记部分表示重要程度较低的区域,但在实验中被试者也关注了该区域;无标记部分表示被试者在实验阶段关注很少或没有关注的区域,为非显著区域。对比发现,本文算法获得的显著区域与主观实验结果基本一致,表明该方法能够很好地提取显著立体图像。

#### 2.4.4 对比度变换

获得显著立体图像后,采用对比度线性变换法<sup>[12]</sup>对左右视图进行不同等级的对比度变换,得到一系列失真的待测立体图像。对图像进行对比度变换时,记图像原始像素点的灰度值为  $I_n$ , 根据对比

度变换公式计算得到变换后像素点的灰度值  $O_{ut}$  为

$$O_{ut} = A_{vg} + (I_n - A_{vg})(1 - \alpha), \quad (3)$$

式中  $A_{vg}$  为整张图片的平均灰度值;  $\alpha \in [-1, 1]$  为对比度调整因子,调节输出像素点与输入像素点灰度值的对应关系。文献<sup>[12]</sup>中  $\alpha$  的变换步长为 0.2, 步长较大使得所得结果不够精细,因此取  $\alpha$  的变换步长为 0.1, 得到 21 条对比度变换直线, 对应 21 种等级的对比度失真, 如图 5 所示。当  $\alpha > 0$  时, 对应的直线斜率大于 1, 图像对比度增大; 当  $\alpha < 0$  时, 对应的直线斜率小于 1, 图像对比度减小; 当  $\alpha = 0$  时, 图像对比度不变<sup>[12]</sup>。每条对比度变换直线都经过点  $(A_{vg}, A_{vg})$  且关于  $(A_{vg}, A_{vg})$  对称, 使得对比度变换前后图片的平均亮度保持不变。

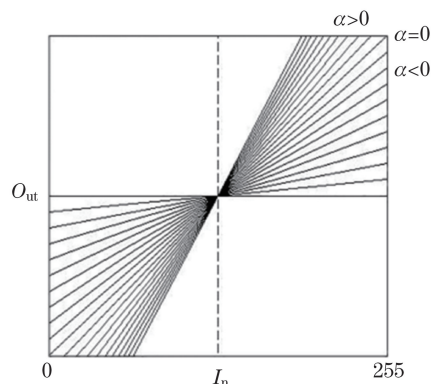


图5 对比度线性变化示意图

Fig. 5 Diagram of linear variation of contrast

综上,实验主要步骤如下:提取源立体图像左右视图的亮度灰度图,按(3)式进行对比度线性变换,分别得到 21 幅对比度失真的左右视图,两两组合得到 441 幅待测立体图像并进行主观实验;选取

MOS 大于等于 4 的图像作为满足舒适度要求的立体图像,将左视图对比度相同的合格立体图像分成一组,统计一组中右视图对比度范围并记录最大值和最小值。

### 3 数据处理与分析

由第 2.1 节的分析可知,不同源立体图像的原 始对比度值有较大差异。为得到统一的衡量标准,定义对比度线性变换后与变换前的比值为归一化对比度,下文中的对比度均指归一化对比度。采用最小二乘分段线性拟合法<sup>[25]</sup>对 4 组实验数据进行处理,结果如图 6 所示。

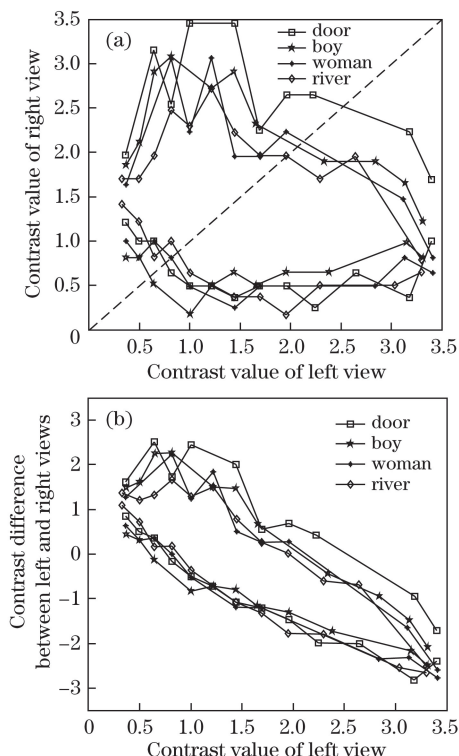


图 6 4 组立体图像舒适对比度匹配图和差异图。

(a) 舒适对比度匹配图; (b) 舒适对比度差异图

Fig. 6 Comfortable contrast matching map (MM) and difference map (DM) of four group of stereo images.

(a) Comfortable contrast MM; (b) comfortable contrast DM

图 6(a) 中分段直线所围区域表示立体图像的视觉舒适度良好时,对应不同的左视图对比度,右视图归一化对比度的取值范围。图 6(b) 中分段直线围成的区域表示立体图像的视觉舒适度良好时左右视图的归一化对比度值的差异范围,可以看出当右视图对比度高于左视图时差异值为正值,反之差异值为负值。

为保证实验所得结论的普适性,选择的 4 幅源立体图像对比度分布在不同的梯度,图 6(a)、(b) 中

的 4 条拟合直线虽不完全重合,但变化趋势一致。为得到具有普适性的舒适对比度匹配图和差异图,根据统计学原理对图 6 中 4 组数据进行统计平均,所得结果如图 7 所示。图 7 所示的结果不仅可作为判断一幅立体图像对比度是否舒适的依据,也为立体内容的制作提供了定量标准。

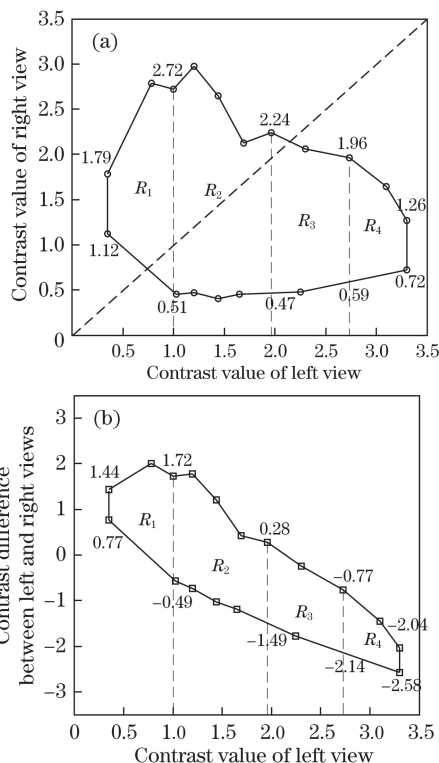


图 7 立体图像舒适对比度匹配图和差异图。

(a) 舒适对比度匹配图; (b) 舒适对比度差异图

Fig. 7 Comfortable contrast MM and DM of stereo images.

(a) Comfortable contrast MM; (b) comfortable contrast DM

将分段拟合直线围成的舒适区域划分为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  4 个部分,对图 7(a) 各部分的分析如表 1 所列。结合图 7(a) 与表 1 可知,  $R_1$  区域关于直线  $y=x$  不对称且处于直线上方,表明  $R_1$  区域右视图的对比度高于左视图。这是因为当左视图对比度过低时,右眼作为主眼在双目融合中起主导作用,由 Fechner 悖论<sup>[26]</sup>可知,适当提高右视点的对比度能在一定程度上弥补左视点的低对比度造成的视觉不舒适,此时主辅眼起作用。  $R_2$  区域关于直线  $y=x$  大体对称,说明左视图归一化对比度在  $[1.00, 1.96]$  范围时,主辅眼几乎不起作用。  $R_3$ 、 $R_4$  区域关于  $y=x$  不对称且处于直线下方,表明  $R_3$ 、 $R_4$  区域右视图的对比度低于左视图,这是因为左视图对比度过高时,对比度较小的右视图可以通过双目融合弥补左视图的高对比度刺激。

表 1 对图 7(a)中视觉舒适区域的分析结果  
Table 1 Analysis results of visually comfortable regions in figure 7(a)

Region	Contrast range of left eye	Symmetrical about $y=x$	Dominance eye works	Main influencing factors
$R_1$	(0.35, 1.00)	No	No	Binocular difference; dominance eye
$R_2$	(1.00, 1.96)	Yes	Yes	Binocular combination
$R_3$	(1.96, 2.73)	No	No	Dominance eye
$R_4$	(2.73, 3.30)	No	No	High contrast stimulus; dominance eye

图 7(a)中  $R_1$  区域的左视图对比度很低,左眼感知到的图像纹理极不清晰,细节很模糊,随着左视图归一化对比度值逐渐增大到 1,左眼感知到的图像质量变好,舒适区域呈扩大趋势。 $R_2$  区域左右视图归一化对比度值都在 1.50 附近,相当于对源立体图像进行小幅度的对比度增强,使感知到的左右视图纹理更清晰,视觉质量较好,且左右眼对比度差异不大,容易进行双目融合得到舒适度高的立体图像,因此  $R_2$  区域面积较大。 $R_3$  区域左视图对比度较高,图像出现明显的颜色失真,且图像阴影区域细节丢失,左眼感知到的图像质量变差,使得  $R_3$  舒适区域逐渐减小。 $R_4$  区域左视图对比度很高,右视点对比度较小时,左右视点差异过大,双眼无法舒适融像;右视点对比度也较高时,虽可以舒适融像,但感知到的图像对比度过高,视觉舒适度仍不好,因此  $R_4$  舒适区域呈现缩小闭合的趋势。

由图 7(b)可知,当左视点的对比度不同时,舒适立体图像的左右视点对比度差异的门限值也不同。给定一幅左视图及其对比度,根据图 7(b)确定要合成一幅舒适的立体图像,在左视图基础上进行多大幅度的对比度增强或减弱以得到右视点。整体来看,左右视图对比度差异的最小值为 -2.40,最大值为 1.97,两个视点的对比度差异过大会导致视觉不舒适。直线  $y=0$  表示左右视图对比度值相同,此直线只部分包含于图 7(b)的舒适区域中,说明在制作立体内容时,不能简单地将左视图的对比度值作为生成右视图时的标准对比度值,而应根据所得的对比度匹配图和差异图,合理地确定生成右视图的对比度范围。

以上为对视觉舒适区域的分析,下面结合图 7(a)分析造成立体图像不舒适的原因及解决方法。图 7(a)中的左上角和右下角为非舒适区域,主要是因为此时左右视点对比度差异过大,双眼难以舒适融像,长时间观看这种立体图像或视频易造成视觉疲劳,进而诱发眼部疾病,此时应适当减小或增

大右视点的对比度,便于人眼双目融合得到舒适图像;图 7(a)中的左下角和右上角为非舒适区域,虽然左右视点的对比度接近且易于双目融合,但由于两个视点的对比度都过低或者过高,融合得到的立体图像质量不佳,造成视觉不舒适。在制作双目立体图像时,要注意利用主眼图像的调节作用,例如可用主眼视图较小的对比度抑制另一视图的高对比度刺激,以生成适于人眼观看的立体内容。

## 4 实验验证

### 4.1 对比验证

文献[12]在未考虑视觉显著性的情况下,直接定量研究整幅立体图像的对比度对视觉舒适度的影响,图 8 为本文实验结果与文献[12]实验结果的对比图。实心符号的连线所围舒适区域代表本文实验结果,记作  $R_A$ ,空心符号的连线所围舒适区域表示文献[12]的实验结果,记作  $R_B$ , $R_6 = R_A \cap R_B$ , $R_7 = R_A \setminus R_6$ , $R_5 = R_B \setminus R_6$ 。

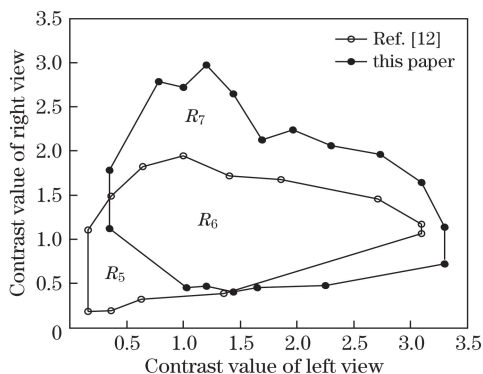


图 8 本文与文献[12]实验结果对比  
Fig. 8 Comparison of experimental results in this paper and Ref. [12]

图 8 的  $R_6$  区域表明文献[12]所得舒适区域基本包含于本文所得舒适区域,说明显著区域的舒适度与整幅立体图像的舒适度有较好的一致性,与理论相符。 $R_5$  区域表明,当左视点的对比度非常低时,文献[12]得到的舒适区域中对应的右视点对比

度也非常低,但此时两个视图的纹理细节都很模糊,图像亮度低,人眼难以通过双目融合得到较舒适的立体图像,因此文献[12]所得 $R_5$ 区域并不符合人眼视觉特性。在本文所得舒适区域中,当左视点对比度很低时,右视点对比度明显高于左视点,根据Fechner悖论可知,在双目融合的过程中,对比度较大视点可以弥补另一视点对比度过小的影响,使得感知到的立体图像仍处于人眼视觉舒适范围,因此本文所得舒适区域更加符合人眼视觉特性。 $R_7$ 区域表明,对于固定的左视图,根据本文所得舒适范围制作立体内容时,右视点对比度具有更大的动态舒适范围,有效地放宽了立体内容制作的限制条件,为制作提供了便利。

由于立体图像的显著区域较非显著区域包含更多细节和纹理信息,显著区域的空间频率集中于高频区<sup>[27]</sup>。光学传递函数表明,人眼成像系统对不同空间频率成分的响应不同<sup>[28]</sup>,对比度敏感函数进一步指出<sup>[29]</sup>,高频段人眼的对比度的灵敏度降低,要感知到相同的对比度,需要增大图像实际的对比度。定义 $C_L$ 为右视点具有最大舒适范围时左视点恰好对应的对比度。表2列出了本文与文献[12]所得舒适区域中的 $C_L$ ,左视点可取最大、最小对比度值 $C_{L_{max}}$ 、 $C_{L_{min}}$ 以及右视点可取最大、最小对比度值 $C_{R_{max}}$ 、 $C_{R_{min}}$ 。从表2可以看出,本文所得舒适区域中这5个特征值都比文献[12]的高,并且因为被试的主眼是右眼, $C_{R_{max}}$ 、 $C_{R_{min}}$ 的增加幅度更大,这一现象与人眼对比度敏感特性相符。表2进一步说明了本文所得舒适对比度区域非常符合人眼视觉特性。

表2 本文与文献[12]相关对比度值比较

Table 2 Comparison of correlation contrast values in this paper and Ref. [12]

Contrast value	$C_{R_{max}}$	$C_{R_{min}}$	$C_{L_{max}}$	$C_{L_{min}}$	$C_L$
Ref. [12]	1.94	0.18	3.10	0.16	1.00
This paper	2.97	0.41	3.30	0.35	1.20
Increment	1.03	0.23	0.20	0.19	0.20

## 4.2 测试验证

为了验证本文实验得到的立体图像舒适对比度匹配图和差异图是否具有普适性,另外选取了两幅源立体图像进行结果验证。所选图像如图9所示,将这两幅立体图像按照上述步骤进行对比度处理,每幅图像得到441幅对比度失真图,进行主观实验并分析实验结果。图9(a)所得MOS大于等于4的视觉舒适立体图像有91幅,左右视图对比度值落在

本文实验所得立体图像舒适对比度匹配图内的立体图像有87幅,在合格立体图像中所占比例为95.6%;同样计算得到,图9(b)中图片的正确率为97.5%。两组图片的正确率都超过了95%,验证了本文实验所得立体图像舒适对比度匹配图和差异图具有很好的普适性,利用所得结论可以快速直接地根据立体图像左右视图的对比度来判断图像是否舒适,很大程度上改善了主观实验费时费力的现状。



图9 两幅源立体图像。(a)玩具;(b)小孩

Fig. 9 Two pairs of original stereo images.

(a) Toy; (b) kid

## 5 结 论

基于视觉注意机制,通过大量主观实验定量研究了对比度对立体图像舒适度的影响,更好地反映了人眼的视觉感受,并得到了立体图像舒适对比度匹配图和差异图。一方面,可以依据实验结果判断立体图像是否舒适,很好地弥补了主观实验费时费力的缺点;另一方面,通过对结果图的全面详细分析,为立体内容的制作和处理提供了参考和依据。相比于未考虑视觉注意机制的实验,本文所得舒适范围更符合人眼视觉特性,能为立体内容的制作提供更合理可行的定量标准。但是,影响立体图像视觉舒适度的因素有许多,有待进一步研究其他因素(色度和饱和度等)对观看舒适度的影响,以完善整个理论体系。

## 参 考 文 献

- [1] Yano S, Emoto M, Mitsunashi T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images[J]. Displays, 2004, 25(4): 141-150.
- [2] Yano S, Ide S, Mitsunashi T, et al. A study of visual fatigue and visual comfort for 3D HDTV/HDTV images[J]. Displays, 2002, 23(4): 191-201.
- [3] Lambooi M, Ijsselstein W, Heynderickx A I. Stereoscopic displays and visual comfort: A review[M].

- Eindhoven: Eindhoven University of Technology Eindhoven University of Technology Philips Research, 2007.
- [4] Zheng H D, Yu Y J, Cheng W M. A review on three-dimensional display techniques[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 426-434.  
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): 426-434.
- [5] Pan H, Daly S. 3D video disparity scaling for preference and prevention of discomfort[C]. *SPIE*, 2011, 7863: 786306.
- [6] Jincheol P, Heeseok O, Lee S, *et al.* 3D visual discomfort predictor: Analysis of horizontal disparity and neural activity statistics[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(3): 1101-1104.
- [7] 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.
- [8] Liu C, Li S M, Zhu D, *et al.* Quantitative research of the hue parameter influence on the visual comfort of stereoscopic images[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(1): 178-185.  
刘畅, 李素梅, 朱丹, 等. 色度对立体图像视觉舒适度影响的定量研究[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(1): 178-185.
- [9] International Organization for Standardization. Image safety: Reducing the incidence of undesirable biomedical effects caused by visual image sequences[S]. Switzerland: ISO Copyright Office IHS, 2005.
- [10] Chen J, Zhou J, Sun J, *et al.* Visual discomfort prediction on stereoscopic 3D images without explicit disparities[J]. *Image Communication*, 2017, 51: 50-60.
- [11] So G J, Kim S H, Kim J Y. Evaluation model of the visual fatigue on the 3D stereoscopic video[J]. *International Journal of Computer and Engineering*, 2016, 8(4): 336-342.
- [12] Liu C, Li S M. Measurement of contrast range affecting comfort of stereoscopic images[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(4): 748-755.  
刘畅, 李素梅. 影响立体图像舒适度的对比度范围的测定[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(4): 748-755.
- [13] Jung C, Wang S. Visual comfort assessment in stereoscopic 3D images using salient object disparity[J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(6): 482-484.
- [14] Korea Advanced Institute of Science and Technology. IVY Lab stereoscopic image database[OL]. [2013-03-12]. <http://ivylib.kaist.ac.kr/demo/3DVCA/3DVCA.html>.
- [15] ITU-R. Recommendation ITU-R BT.1438. Subjective assessment of stereoscopic television pictures[S]. Geneva: ITU-R, 2000: 1-14.
- [16] Ma L S. Application of Grubbs test in equipment comparison test[J]. *Opencast Mining Technology*, 2014(4): 62-64.  
马立爽. 格鲁布斯检验法在设备比对试验中的应用[J]. *露天采矿技术*, 2014(4): 62-64.
- [17] Beijing Technology Quality Control Office. DBII/T384.5-2009, Image information management system technical: Image quality requirements and evaluation methods[S]. Beijing: China Standards Press, 2009.  
北京市质量技术监督局. DBII/T384.5-2009 图像信息管理系统技术规范第5部分: 图像质量要求与评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] Harel J, Christof K, Perona P. Graph-based visual saliency[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2007, 19: 545-552.
- [19] Wang J, Da Silva M P, LeCallet P, *et al.* Computational model of stereoscopic 3D visual saliency[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(6): 2151-2165.
- [20] Schölkopf B, Platt J, Hofmann T. Graph-Based visual saliency[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2007, 19: 545-552.
- [21] Christoph R, Asmaa H, Michael B, *et al.* Fast cost-volume filtering for visual correspondence and beyond[C]. *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2011: 3017-3024.
- [22] Li Z M. Research on image segmentation algorithm based on fuzzy clustering[D]. Changsha: Hunan University, 2009.  
李志梅. 基于模糊聚类的图像分割算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [23] Jiang Q P, Shao F, Jiang G Y, *et al.* An objective stereoscopic image visual comfort assessment metric based on visual important regions[J]. *Chinese Journal of Electronics and 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.
- [24] Yu W J. The research of image segmentation method based on improved adaptive genetic algorithm and out method[D]. Haikou: Hainan University, 2012.  
余文姣. 基于改进遗传算法的最大类间方差图像分割方法研究[D]. 海南: 海南大学, 2012.
- [25] Liu C. Quantitative analysis and assessment research on factors influencing the visual comfort of stereoscopic image[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.  
刘畅. 立体图像舒适度的定量分析及评价研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.



- [26] Ming J, Xu H F, Yang Y. Research of space similarity analysis model with Weber-Fechner law[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010, 40(11): 1148-1152.  
明军, 许会芳, 杨杨. Weber-Fechner 空间相似分解模型的研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40(11): 1148-1152.
- [27] Hou X, Zhang L. Saliency detection: A spectral residual approach[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 9738156.
- [28] Yang Y R, Dai Y. Evaluation of the effect on eye aberration on retinal imaging quality based on the root mean square error and correlation coefficient[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0333001.  
杨彦荣, 戴云. 基于均方根误差和相关系数评价人眼像差对视网膜像质的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0333001.
- [29] Johnson G M, Fairchild M D. A top down description of S-CIELAB and CIEDE2000[J]. Color Research & Application, 2010, 28(6): 425-435.