

基于显著区域的立体图像饱和度舒适范围测定

常永莉, 李素梅, 胡佳洁, 韩旭

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 立体图像观看舒适度的影响因素是立体成像技术领域的关键问题。结合视觉注意机制特性, 定量研究饱和度因素对立体图像视觉舒适度的影响。首先, 得到立体显著度图, 利用模糊隶属度原理和掩膜对其进行优化获得最终的显著立体图像, 并用眼动仪对所得立体图像显著区域的正确性进行验证。然后, 采用改进的逐级逼近法进行主观实验, 通过大量的实验数据得到显著立体图像的舒适饱和度匹配图和差异图。实验结果表明, 双目视图舒适饱和度平均差异值最大可达 0.29。验证实验表明所提方法的舒适饱和度范围具有更好的普适性, 不仅为立体图像舒适度的研究提供了依据, 而且为立体内容的制作提供了技术标准。

关键词 图像处理; 视觉舒适度; 立体图像; 主观评价; 视觉显著区域; 饱和度

中图分类号 TP391.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0710003

Measurement of Comfortable Range of Stereo Image Saturation Based on Salient Region

Chang Yongli, Li Sumei, Hu Jiajie, Han Xu

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

Abstract The influencing factors of the viewing comfort of the stereo images is the key issue in the stereo imaging technology field. Combined with the characteristics of the visual attention mechanism, the influence of saturation factor on visual comfort of stereo image is quantitatively studied in this paper. Firstly, the stereo salient degree map is obtained, after that the fuzzy membership principle and the mask processor are put on it to get the final salient stereo image, and the eye tracker is used to verify the correctness of the salient area of the obtained stereo image. Then the subjective experiments are carried out with improved gradual approximation method, and the matching map and difference map of the comfortable saturation of the salient stereo image are obtained through a large number of experimental data. The experimental results show that the maximum average difference value of the comfortable saturation of the binocular view is 0.29. The verifying experiment shows the comfortable saturation ranges with the proposed method have a good universality. This work not only provides a basis for the study of stereo image comfort, but also provides technical standards for the making of stereo content.

Key words image processing; visual comfort; stereo image; subjective evaluation; visual salient region; saturation

OCIS codes 100.6890; 100.2960; 110.3000; 330.1400

1 引 言

观看立体图像/视频引起的视觉不舒适已经成为立体产品迅速普及并被用户广泛认同的主要制约因素之一。视觉不舒适是一种主观感受, 通常用视觉舒适度来衡量。

截至目前, 不少国内外专家学者已对立体内容舒适度的影响因素进行了研究^[1-5]。Frank Kooi 等^[6]通过主观实验比较系统地定性研究了亮度、色度、饱和度、对比度、串扰、视差等各种因素对双目立体图像舒适度的影响, 实验结果表明, 双目视图不匹配程度超过一定的门限将会严重降低立体图像的视

收稿日期: 2018-02-01; 收到修改稿日期: 2018-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61002028)

作者简介: 常永莉(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事立体图像质量评价以及立体图像舒适度方面的研究。

E-mail: cyl920611@163.com

导师简介: 李素梅(1975—), 女, 博士后, 副教授, 博士生导师, 主要从事立体信息处理和计算机视觉方面的研究。

E-mail: tjnkls@163.com(通信联系人)

觉舒适度。然而,最初国内外大都是定性研究影响立体图像舒适度的因素,且没有统一的评定标准,不足以作为立体内容制作提供可操作的技术支撑。因此,需要对影响立体图像内容舒适度的各因素进行量化。部分文献对影响观看舒适度的饱和度^[7]、亮度^[8]、色度^[9]、对比度^[10]和视差^[11]等各种因素进行了定量研究。但是,此类方法都是基于整幅立体图像进行分析的。文献^[12-13]表明人眼在观察图像时往往更倾向于观察其中的显著性区域而不是整幅图像,该显著性区域特性已应用在很多方面,并取得了很好的结果。

本文结合人眼视觉注意机制,定量研究影响立体内容舒适与否的饱和度因素。首先将视差图和二维图像显著图相结合得到立体显著度图,对立体显著度图进行优化得到显著立体图像,并用眼动仪验证所得显著区域的正确性;然后采用由粗到细的逐级逼近法对显著区域进行处理,来进行大量的主观实验;最后通过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饱和度匹配图和差异图。实验结果表明,所提方法的舒适饱和度的量化范围更加符合人眼视觉主观观测的结果,并为立体内容的制作提供了更好的量化依据。

2 实 验

2.1 实验素材及设备

实验选用韩国先进科学技术院所提供的立体图像数据库作为实验数据集^[14]。该立体图像库中共有120对分辨率为1920 pixel×1080 pixel的立体图像,包含人类、树木、建筑等多种类型的图像。本文从该立体图像库中选取了4幅源立体图像pingpang.bmp、signboard.bmp、kid.bmp和flower.bmp,如图1所示。实验设备采用冠捷(AOC)公司的22 in(55.88 cm)偏光式3D立体显示器。验证显著区域正确性与否的眼动仪采用德国SMI公司的iView X RED。

2.2 实验环境及被试者

实验需在暗室中进行且杂散光照度不大于3 lx,暗室的湿度应保持在10%~80%、温度保持在5℃~35℃,以免影响立体视窗的使用性能。最佳观看距离与屏幕高度有关,对于22 in(55.88 cm)全高清显示器,观看距离应为屏幕高度的7倍^[15]。

为保证实验结果的正确性,Lambooij等^[16]指出,双目视觉生理异常的人观看立体图像时会产生视觉不舒适感或立体感不强,所以筛选双目视觉生理正常的测试者是主观实验的重要任务。因此,所



图1 4幅源立体图像。(a) Pingpang.bmp;

(b) signboard.bmp; (c) kid.bmp; (d) flower.bmp

Fig. 1 Four source of stereo images. (a) Pingpang. bmp;

(b) signboard. bmp; (c) kid. bmp; (d) flower. bmp

有参与实验的人员在天津眼科医院进行双目视觉功能测试的结果均为合格,被试者一共30人,其中男性16人,女性14人;有立体技术研究背景的14人,没有立体技术研究背景的16人。

2.3 主观实验测试方法

主观评价是本文实现饱和度定量研究的重要依据。实验前,首先向被试者介绍实验评价方法和评分等级,语气无偏向性,避免做出影响分数评定的暗示;然后对被试者进行实验训练以保证实验评分结果的正确性。为避免被试者因视觉疲劳而影响实验评价结果,主观实验每个测试阶段均不超过30 min。实验采用单刺激方法,同一幅待测图像显示两次,若同一被试者对同一立体图像给出相差两级或者两级以上的评分时,此分值视为无效评分。根据ITU-R BT.1438立体图像主观评价推荐准则,将立体图像的舒适度分为5个等级,如表1所示。实验允许被试者给出半分的分值,舒适度良好的立体图像应达到4分(含)以上^[17],即舒适立体图像有效评分的统计平均值 $\bar{C} \geq 4$ 。

表1 立体图像舒适度主观评价等级

Table 1 Subjective evaluation level of stereoscopic images comfort

Score	Description	Grade
5	Equally viewing comfort	Very comfortable
4	Slightly reduced viewing comfort	Comfortable
3	Reduced viewing comfort	Fair
2	Considerably reduced viewing comfort	Uncomfortable
1	Extremely reduced viewing comfort	Very uncomfortable

2.4 实验过程

本文算法流程图如图2所示。主要包括立体显著度图的提取,显著立体图像的获取以及实验数据的获取三部分。

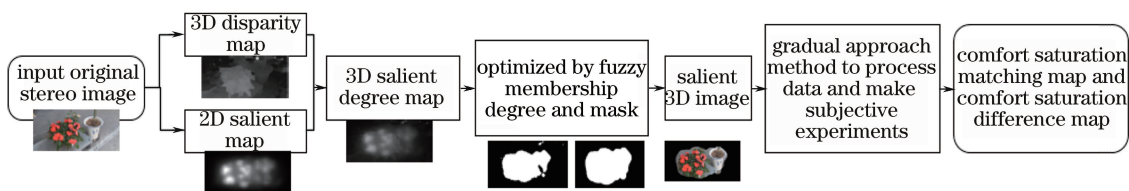


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flowchart

2.4.1 立体显著度图的提取

相比平面图像,立体图像包含更多信息量。由人眼视觉注意机制特性可知^[18],人眼很难在短时间内匹配所有特征边缘,只是关注那些“重要区域”,提取“重要区域”中对象的边界,并最终匹配这些边界以形成立体视觉。因此,可以采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少计算复杂度。

视差是立体图像的重要特性,因此,通过立体图像视差图和二维图像显著图获得立体显著度图。本文采用 GBVS 算法^[19]得到右视点二维图像显著图,记为 $S_{MR}(x, y)$ 。采用快速立体匹配算法^[20]得到以右视点为基准的视差图,记为 $d_R(x, y)$ 。将二维图像视觉显著图 $S_{MR}(x, y)$ 和右视差图像 $d_R(x, y)$ 进行线性加权得到立体显著度图 $I(x, y)$,可以表示为:

$$I(x, y) = \omega_1 d_R(x, y) + \omega_2 S_{MR}(x, y), \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为立体显著度图; ω_1 和 ω_2 为权重,且 $\omega_1 + \omega_2 = 1$;取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。

2.4.2 显著立体图像的获取

由于所得立体显著度图的灰度值 L 在 $[0, 255]$ 之间,图像的灰度分布和显著区域边缘等信息都具有模糊性,无法直接根据所得立体显著度图明确划分为显著区域和非显著区域,因此需要确定一个阈值,使之能够进行划分。利用模糊数学描述图像的特征信息^[21]来优化立体显著度图,优化后的显著图为二值图像,称为掩膜图像,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。为了去除掩膜图像边缘的毛刺及空洞现象,采用形态学的开闭运算对掩膜图像进行优化得到优化掩膜图像。最后将优化掩膜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 组立体图像右视点、视差图、平面显著图、立体显著度图、掩膜图像、优化掩膜图像和显著立体图像。

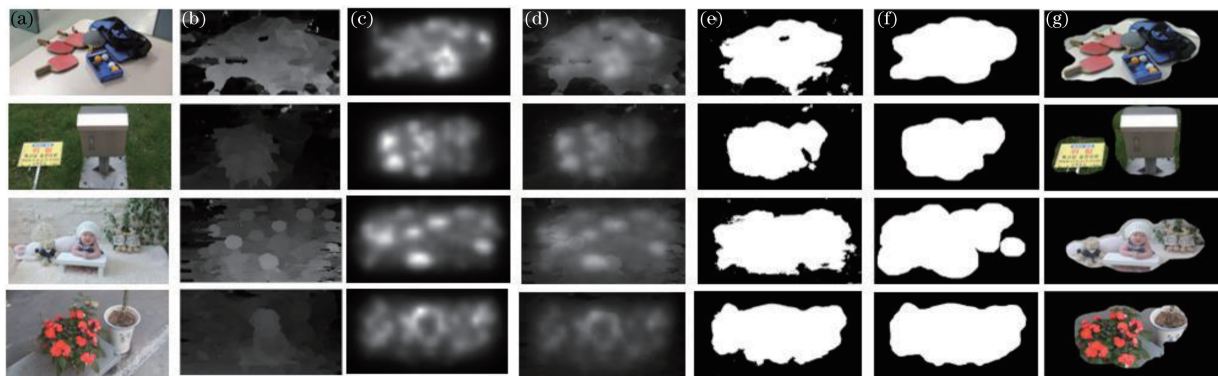


图 3 显著立体图提取过程。(a)右视点;(b)视差图;(c)平面显著图;(d)立体显著度图;(e)掩膜图像;(f)优化掩膜图像;(g)显著立体图像

Fig. 3 Extraction process of salient stereo image. (a) Right view; (b) disparity map; (c) planar salient map; (d) stereo salient map; (e) mask image; (f) optimized mask image; (g) salient stereo image

2.4.3 眼动仪实验验证

为了验证本文所得显著性区域的正确性,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° 时才可以进行实验。每张图片随机呈现且呈现时间为 5 s。将眼动仪测

量出的图像感兴趣区域的热图与所得显著立体图像区域对比发现,二者所得显著区域基本一致。图 4 为眼动仪测量出的图像感兴趣区域的热图,红色、黄色标记区域表明注视时间最长,也是最为显著的部分。绿色标记区域表示较为重要,被试者在实验中对这部分较为感兴趣;蓝色标记部分表示重要程度

较低,但在实验中被试者也对该部分进行了关注;无标记部分表示被试者在实验阶段内对此部分关注很少或没有关注,表示非显著区域。



图 4 眼动仪实验显著热图。(a)Pingpang.bmp; (b)signboard.bmp; (c)kid.bmp; (d)flower.bmp
Fig. 4 Salient hot map of eye tracker experiment.

(a) pingpang. bmp; (b) signboard. bmp;
(c) kid. bmp; (d) flower. bmp

2.4.4 实验数据获取

HSV 较 RGB 颜色空间更接近人的经验和对彩色的感知。因此,实验采用 HSV 颜色模型提取立体图像的饱和度分量。人眼对饱和度的辨别能力可用人眼能分辨的饱和度级数来确定。在 HSV 颜色模型中,人眼大约可分辨 25 级饱和度,饱和度的变化范围从 0 到 1,人眼能分辨出的饱和度阈值为 0.04。若以最小步长 0.04 对立体图像左右视点分别进行饱和度变化处理,则左右视图各得到 51 幅变化后的图像,左右视图两两组合后可得 2601 幅立体饱和度图像。若对 2601 幅图像进行主观实验,费时费力,且其中很多立体图像舒适度明显很差,无需进行一一测试。因此,本文采用由粗到细的逐级逼近法进行数据处理,先以大步长分级找到立体图像舒适与不舒适的两个饱和度边界;然后用小步长将两个饱和度边界中间的饱和度值细化,最终确定舒适与不舒适的饱和度边界。若对立体图像左右视图分别进行三级步长处理,则主观实验测试图像数量依然很多,因此,本实验仅对左视图进行第二级步长分段,对右视图进行第一级、第二级、第三级步长分段。处理步骤如下:

1) 选取源立体图像,得到立体显著度图并最终得到显著立体图像;

2) 将显著立体图像由 RGB 空间转换到 HSV 颜色空间,提取图像饱和度 S 。根据 1) 确定显著与非显著部分;

3) 对显著立体图像左右视图分别以步长 0.11、0.33 进行变换,得到 19 幅左视图和 7 幅右视图,两

两组合后得到 133 幅待测显著立体图像。对待测图像进行主观评分,选取 $\bar{C} \geq 4$ 的图像为满足舒适度要求的显著立体图像。分别记录 $\bar{C} \geq 4$ 的右视图的最大最小饱和度值 S_{1_rup} 、 S_{1_rdown} 以及记录 $\bar{C} < 4$ 的右视图的最大最小饱和度值 S'_{1_rup} 、 S'_{1_rdown} ;

4) 由于第一级步长较大,需要对满足舒适度要求边界处的视图进行第二级步长的细化。对步骤 3) 中饱和度值范围 S_{1_rup} 、 S'_{1_rup} 和 S_{1_rdown} 、 S'_{1_rdown} 进行第二级的步长变化,得到 8 幅二级右视图,左右视图两两组合后得到 152 幅待测显著立体图像。对待测图像进行主观评分,分别记录 $\bar{C} \geq 4$ 的右视图的最大最小饱和度值 S_{2_rup} 、 S_{2_rdown} 以及记录 $\bar{C} < 4$ 的右视图的最大最小饱和度值 S'_{2_rup} 、 S'_{2_rdown} ;

5) 同理,对步骤 4) 中饱和度值范围 S_{2_rup} 、 S'_{2_rup} 和 S_{2_rdown} 、 S'_{2_rdown} 进行第三级的步长变化,得到 8 幅三级右视图,左右视图两两组合后得到 152 幅待测显著立体图像。对待测图像进行主观评分,分别记录 $\bar{C} \geq 4$ 的右视图的最大最小饱和度值 S_{3_rup} 、 S_{3_rdown} 。

因此,采用三级步长逼近法共得到 437 幅待测图像,远小于理论所需的 2601 幅待测图像的数量,大大减少了实验复杂度,且实验结果表现良好。

3 实验结果与数据分析

利用最小二乘分段线性拟合方法对所得实验数据进行处理^[22],得到立体图像舒适饱和度匹配图(图 5)和差异图(图 6)。图 5 横坐标为左视图饱和度值,纵坐标为右视图饱和度值;分段直线所围区域表示在左视图饱和度值不同的情况下,右视图的舒适饱和度值。图 6 横坐标为左视图饱和度值,纵坐标为左视图和右视图的饱和度差值;分段直线所围区域表示

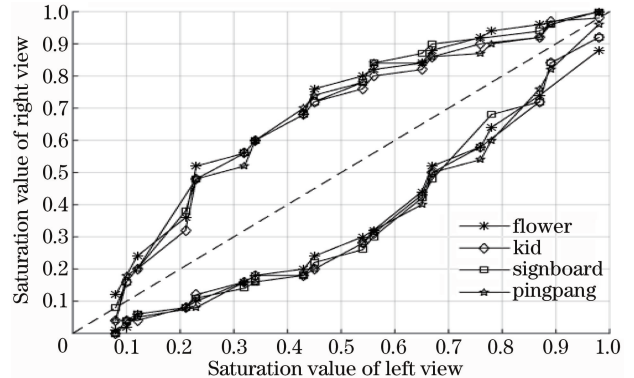


图 5 4 组立体图像舒适饱和度匹配图

Fig. 5 Four groups of stereo image comfortable saturation matching image

立体图像视觉舒适度良好时,左右视图饱和度差值,正值表示右视点饱和度值比左视点饱和度值大,负值表示右视点饱和度值比左视点饱和度值小。

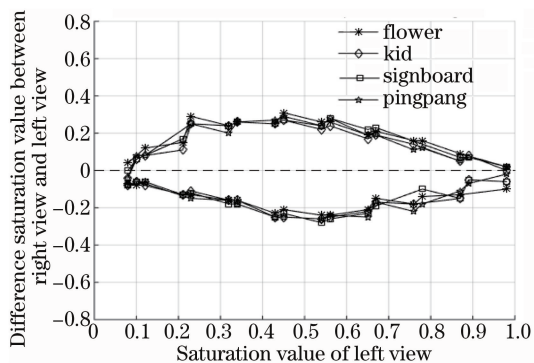


图 6 4 组立体图像舒适饱和度差异图

Fig. 6 Four groups of stereo image comfortable saturation difference image

由图 5 和图 6 可知,只有左右视点饱和度在一定范围内才能保证视觉舒适。从图中可以看出,不同场景的立体图像舒适饱和度匹配区间略有不同,

表 2 4 种场景的饱和度差异门限值

Table 2 Threshold of saturation difference in four scenes

Scene category	Pingpang.bmp	Signboard.bmp	Flower.bmp	Kid.bmp
Maximum range of positive saturation difference	[0,0.29]	[0,0.28]	[0,0.31]	[0,0.27]
Maximum range of negative saturation difference	[-0.26,0]	[-0.28,0]	[-0.24,0]	[-0.26,0]

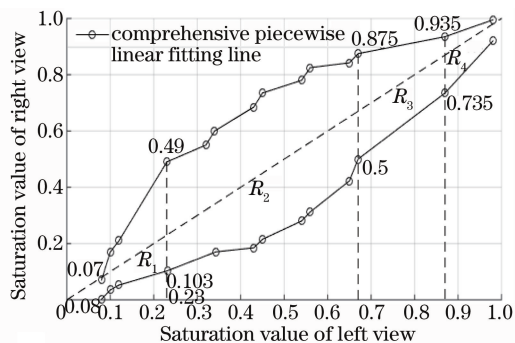


图 7 立体图像舒适饱和度匹配图

Fig. 7 Comfortable saturation matching map of stereo image

将图 7 和图 8 中直线拟合包围区域分为 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 4 部分。从图中可以看出,当饱和度值很低时(在区间 $[0, 0.08]$ 时),没有合适的饱和度值。因为饱和度越低,光谱中的杂色就越多,波段越杂,同时刺激到的人眼细胞种类就越多,颜色无层次,纹理极不清晰,此时人眼无法对左右视图进行很好的融合,就会表现出视觉不舒适现象。具体为:

1) R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 均为 $C \geq 4$ 的饱和度舒适区域。当左右立体图像饱和度在此区间内时,双眼能够在潘诺融像区内舒适融合,视觉舒适性良好。

因为同样数值的饱和度,人眼的感受会随着画面不同而变化,但总体趋势相近。表 2 给出 4 种不同场景的舒适饱和度正最大差异值和负最大差异值。其中 flower.bmp 的舒适饱和度范围较大 $[-0.24, 0.31]$, 而 kid.bmp 的舒适饱和度范围较小 $[-0.26, 0.27]$ 。因为,物体的色饱和度与物体表面反色光谱的选择性程度有关,波段越窄的光发射率越高,也就越饱和。对于花草类图像,花的种类不同且颜色繁多,不论哪种颜色的花,因每个人的主观喜好不同,都可能很受欢迎,所以该类场景的舒适饱和度范围较大;而对于人物类图像,观察者最先观察到人的肤色,而肤色颜色较少,致使该类场景的舒适饱和度范围较小。4 种不同场景的正平均最大差异值为 0.29,负平均最大差异值为 0.26。为了得到具有普适性的舒适度匹配区间,对图 5 和图 6 所示的 4 组立体图像舒适饱和度匹配图和差异图的实验数据进行平均,分别得到立体图像舒适饱和度匹配图和立体图像舒适饱和度差异图,如图 7 和图 8 所示。

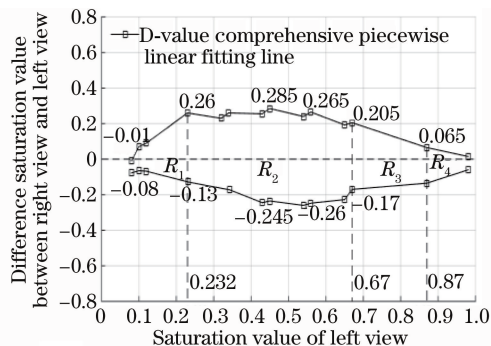


图 8 立体图像舒适饱和度差异图

Fig. 8 Comfortable saturation difference map of stereo image

从图 7 和图 8 中可以看出,立体图像舒适饱和度匹配图关于正对角线近似对称,立体图像舒适饱和度差异图关于水平轴近似对称。因此,主辅眼对舒适饱和度区域的影响并不大。在 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 区域以外,因左右眼饱和度差异值过大,人眼无法融合左右视点图像,造成双眼竞争现象,导致视觉不舒适;

2) 在 R_1 区域,左视图饱和度值范围为 $[0.08, 0.23]$,舒适匹配区域较小。左视图的饱和度低,颜色层次不分明,纹理不清晰,如果左右视图饱

和度差异值过大,人眼会观看到两个视图纹理且两个视图颜色差异较大,导致人眼观看不舒适。因此,此区间舒适范围较窄;

3) 在 R_2 区域,左视图饱和度值范围为 $[0.23, 0.67]$,舒适匹配区域较大。因为 R_2 区域左视图立体图像的饱和度取值适中,立体图像纹理清晰,颜色层次分明,所以,与 R_1 、 R_3 、 R_4 相比较, R_2 区域中右视图饱和度舒适范围最大;

4) 在 R_3 区域,左视图饱和度值范围为 $[0.67, 0.87]$ 。可以看出,随着左视图饱和度值增加,与之相匹配的右视图饱和度范围减小。因为,随着左视图饱和度的增大,立体图像纹理逐渐不清晰,颜色不断变纯,人眼色度视觉刺激加强,所以右视图的舒适匹配区域逐渐变小;

5) 在 R_4 区域,左视图饱和度值范围为 $[0.87, 1]$ 。 R_4 区域与 R_1 区域类似,立体图像舒适饱和度范围较小。在此区域,左视图饱和度较高,使得图像纹理模糊不清楚,颜色过于鲜亮,对人眼的刺激较强烈,造成人眼视觉不舒适。

4 实验验证

4.1 对比验证

图 9 将本文实验和文献[7]从一致性和差异性两方面进行了比较。1) 一致性:本文算法所得立体图像舒适饱和度匹配阈值区间为 $[-0.26, 0.29]$;文献[7]所得立体图像舒适匹配阈值区间为 $[-0.27, 0.27]$ 。二者的舒适匹配区间有相同的趋势,因此,显著区域的舒适度可以代表整幅立体图像的舒适度,与理论一致。2) 差异性:当左视图饱和度取值在非常低的范围($[0, 0.08]$)时,本文实验中,右视图没有与之相匹配的舒适饱和度区域,而在文献[7]中,右视图会有相应的值与之匹配构成舒适区域,该结果不符合人眼的视觉特性。正如前文所述,在左视点饱和度值较低时不应有合适的右视点饱和度值范围与之相匹配。此外,本文采用单刺激实验方法对立体图像显著区域进行主观实验;而文献[7]采用双刺激实验方法,即不断呈现原始图像作为参考,让被试者对测试图像的舒适与否进行评价,原始图像的不断出现会对被试者的主观判定产生一定限制。而单刺激实验方法会让被试者具有较强的自主性,更符合人眼观看图像的视觉特性。因此,人眼视觉注意特性对整幅立体图像的舒适与否进行判定的方法更能为立体内容的制作提供有利的技术支撑,为立体内容舒适标准的制定提供更合理的方案。

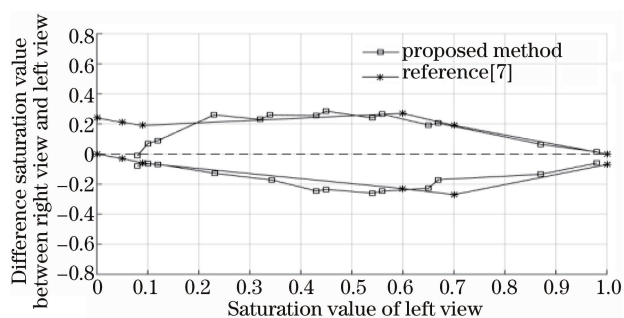


图 9 本文实验与文献[7]舒适饱和度差异图的比较

Fig. 9 Comparison of the difference map of comfortable saturation between experiment and reference[7]

4.2 测试验证

为了验证本文结果是否具有很好的普适性,从数据库中另外选取两幅源立体图像进行验证,如图 10 所示。将这两幅立体图像按照上述步骤进行饱和度处理,选取其中的 80 幅图像进行主观实验。在 flower one.bmp 这组图像中, $\bar{C} \geq 4$ 的合格立体图像有 50 幅,采用本文方法,会有 48 幅图像的饱和度值落在立体图像舒适饱和度匹配区间内,正确检测率为 96%;同理,boy.bmp 这组图像的正确检测率为 94.2%。两组图像的正确检测率都超过了 94%,表明本文结论可直接应用到立体内容的制作中,避免了主观实验费时费力的缺点。



图 10 两幅源立体图像。(a) Flower one.bmp (b) boy.bmp

Fig. 10 Two source of stereo images.

(a) Flower one.bmp (b) boy.bmp

5 结 论

本文结合视觉注意机制特性,通过大量主观实验定量研究了饱和度因素对立体图像舒适度的影响。采用单刺激实验方法进行主观实验,具有很好的自主性,更符合人眼的主观感受。实验所得立体图像舒适饱和度匹配图和立体图像舒适饱和度差异图能够很好地反映立体图像的舒适与否。所提方法为立体图像舒适度的研究以及立体图像的处理提供了新的思路,同时也为立体内容的制作提供了理论依据。但是,影响立体图像/视频舒适度的因素有很多,需要进一步研究其他因素对观看舒适度的影响,进而将各种影响因素的标准进行整合,以便提出更

完善的舒适度评价体系。

参 考 文 献

- [1] Yue G, Hou C, Lei J, *et al.* Optimal region selection for stereoscopic video subtitle insertion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017: 2739756.
- [2] Yue G, Hou C, Lu K, *et al.* Subjective visual comfort assessment based on fusion time for depth information [C]. Computer Science & Education (ICCSE), 2016 11th International Conference on IEEE, 2016: 733-737.
- [3] Duan Z C, Chang Y L, Li S M, *et al.* Measurement of comfort degree and chromaticity range of stereo image based on saliency region[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 0133001.
段志成, 常永莉, 李素梅, 等. 基于显著性区域的立体图像舒适色度范围的测量[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 0133001.
- [4] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfort 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度对比度范围的测量[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0215001.
- [5] Li S M, Zhu Z Q. Quantitative research of comfortable brightness based on saliency region of stereoscopic images[J]. Journal of Tianjin University, 2018, 51(3): 308-314.
李素梅, 朱兆琪. 基于立体图像显著区域的舒适亮度定量研究[J]. 天津大学学报, 2018, 51(3): 308-314.
- [6] Kooi F L, Toet A. Visual comfort of binocular and 3D displays[J]. Display, 2004, 25(2): 99-108.
- [7] Li S M, Fu B B, Zang Y J, *et al.* Measurement of the range of saturation parameter influencing the comfort of stereoscopic images[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(8): 669-676.
李素梅, 付贝贝, 臧艳军, 等. 影响立体图像舒适度的饱和度范围的测定[J]. 天津大学学报, 2012, 45(8): 669-676.
- [8] Zang Y J, Li S M, Wei J J, *et al.* Measurement of the range of the brightness parameter influencing the comfort of stereoscopic images [J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(2): 59-64.
臧艳军, 李素梅, 卫津津, 等. 影响立体图像舒适度的亮度范围测定[J]. 电子测量技术, 2012, 35(2): 59-64.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Zhu D. Research of the parallax influencing the visual comfort of stereoscopic images[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014: 1-56.
朱丹. 影响立体图像舒适度的视差研究[D]. 天津: 天津大学, 2014: 1-56.
- [12] Peng Q, Cheung Y M, You X, *et al.* A hybrid of local and global saliencies for detecting image salient region and appearance [J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2017, 47(1): 86-97.
- [13] Cheng M M, Mitra N J, Huang X L, *et al.* Global contrast based salient region detection [C]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 569-582.
- [14] Korea Advanced Institute of Science and Technology. IVY Lab stereoscopic image database[OL]. [2013-03-12]. <http://ivylab.kaist.ac.kr/demo/3DVCA/3DVCA.html>.
- [15] ITU. ITU-R BT. 500-11 Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[S]. Geneva: ITU-R, 2002: 1-14.
- [16] Lambooi M, Fortuin M, Ijsselsteijn W, *et al.* Measuring visual discomfort associated with 3D displays[J]. SPIE, 2009, 7237: 72370K.
- [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: 图像质量要求与评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [18] Wang F. Visual saliency detection based on context and background[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013: 1-54.
王飞. 基于上下文和背景的视觉显著性检测[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 1-54.
- [19] Harel, Jonathan, Christof K, *et al.* Graph-based visual saliency[C]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2007, 19: 545-552.
- [20] Rhemann C, Hosni A, Bleyer M, *et al.* Fast cost-

- volume filtering for visual correspondence and beyond [C]. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, 35: 3017-3024.
- [21] Li Z M. Research on image segmentation algorithm based on fuzzy clustering [D]. Changsha: Hunan University, 2009: 1-48.
- 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: 1-48.
- [22] Xie Y B. Least square piecewise linear fitting [J]. *Computer Science*, 2012, 39(6A): 482-484.
- 谢友宝. 最小二乘法分段直线拟合[J]. *计算机科学*, 2012, 39(6A): 482-484.