

文章编号:1007-2780(2017)01-0062-07

基于视觉显著性的立体显示灰阶串扰量化

夏振平*, 程 成

(苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要:为了更为合理地评价立体显示系统中的串扰现象,对传统灰阶串扰进行了加权并进一步单一数值量化。研究选取了大量涵盖各种类型和场景的立体图像,对每一灰阶转换组合出现的概率进行统计,同时提取立体图像视觉显著性,提出了平均灰阶转换显著性的概念。平均灰阶转换显著性以矩阵形式呈现,应用其对传统灰阶串扰矩阵加权后可获得更为合理的灰阶串扰。加权后的灰阶串扰矩阵求和后即可获得数值范围在 0%~100% 的单一数值串扰。提出的加权灰阶串扰及其数值单一化方法充分考虑了图像内容和人眼视觉关注机理的影响,得到的评价结果更加客观、合理。同时,研究结果对串扰现象的优化以及视觉舒适度的提高具有指导和推动作用。

关 键 词:立体显示;视觉显著性;灰阶串扰;单一数值量化;测量评价

中图分类号:TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173201.0062

Visual saliency based gray-to-gray crosstalk evaluation in stereoscopic displays

XIA Zhen-ping*, CHENG Cheng

(College of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science
and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: To evaluate the crosstalk phenomenon more reasonably in stereoscopic display systems, weighting and single value evaluation method is applied to traditional gray-to-gray crosstalk. The study selected a large number of three dimensional (3D) images with various types and scenes, and proposed average gray level transition saliency (AGLTS) concept based on probability analysis of each gray level transition and 3D image visual saliency extraction. AGLTS is also existing in matrix form and weighting the traditional gray-to-gray crosstalk matrix to get more reasonable gray-to-gray crosstalk. The elements in weighted gray-to-gray crosstalk matrix are added as the final single value for crosstalk evaluation, which is restricted in the range between 0 and 100 percent. The proposed weighted gray-to-gray crosstalk and it's single value evaluation method fully considers the effect of 3D

收稿日期:2016-09-12;修订日期:2016-10-19.

基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目资助(No. 15KJB510030);苏州科技大学科研基金(No. XKQ201421)
Supported by the University Natural Science Research Program of Jiangsu Province (No. 15KJB510030);
Science Research Foundation of Suzhou University of Science and Technology (No. XKQ201421)

* 通信联系人, E-mail: xzp@usts.edu.cn

image content and attention mechanism of human visual system on crosstalk, and the derived crosstalk evaluation is more objective and reasonable. The investigation result helps with the optimization of crosstalk and the improvement of visual comfort.

Key words: 3D display; visual saliency; gray-to-gray crosstalk; single value evaluation; measurement and evaluation

1 引言

立体显示技术在立体深度呈现方面具有独特的优势,因此它被广泛应用于娱乐、商业宣传、科学研究等多个领域。例如,立体显示已经成为电视机的一个重要功能;很多电影都采用立体显示模式;立体显示技术还应用在医学成像诊断系统以及军事训练系统中^[1]。因此,立体显示图像质量越来越受到人们的关注,成为一个非常重要的研究热点^[2-3]。在诸多立体显示图像质量的影响因素中,串扰(Crosstalk)是其中比较重要的影响因素之一^[4-5]。

目前已经提出了多种方法对立体显示技术中的串扰进行评价。黑白串扰(Black-white Crosstalk)是首先被提出的,它是一种在测量过程中使用全屏黑和全屏白图像的串扰评价方法^[6],只用一个最大串扰值评价整个立体显示系统的串扰。由于部分类型的立体显示系统(特别是时序立体显示)的非线性以及不可叠加性,研究者们随后提出了利用矩阵形式代替最大值的灰阶串扰(Gray-to-Gray Crosstalk)评价方法^[7-8]。尽管灰阶串扰中的有些方法声称已经考虑了人因视觉,其视觉感知仍然是基于观看全屏灰度图像。然而,真正的人因视觉感知应该是基于立体显示设备在实际使用时显示的内容。考虑到真实的人因视觉感知,视觉显著性是视觉感知中图像的重要特性之一,并且已经被广泛用于诸多图像相关的研究^[9-10]。二维图像的视觉显著性通常是基于低水平图像特征,比如亮度、色彩、方向、边缘等的变化^[11]。立体图像的视觉显著性在二维图像显著性的基础上又考虑了深度显著性^[12-13]。

在本文的研究中,提出了一种更为合理的立体显示串扰评价方法。该方法基于立体显示设备

在实际使用时的显示内容,类似于显示系统功耗评价方法中考虑平均图像水平(Average Picture Level, APL)^[14-15]的方式。研究中选取了大量的立体图像,分析它们的灰度转换出现的频率和图像视觉显著性。获得的平均灰阶转换显著性(Average Gray Level Transition Saliency, AGLTS)矩阵用来对传统的串扰矩阵进行加权,再通过平均的方法归一化为单一串扰评价数值。考虑真实人因视觉感知条件的灰阶串扰评价方法及其数值单一化,将更加合理准确地评价立体显示系统的串扰现象。

2 灰阶串扰评价方法

灰阶串扰评价中的亮度测量通常使用全屏图像,如图1所示,呈现的是测量时的观察视图(observed view)和非观察视图(unobserved view)。该示例中,亮度 $L_{i,k}$ 是透过左眼通道(观察通道)测量所得,亮度 $L_{i,i}$ 通常被定义为零串扰情况,它是在观察视图和非观察视图灰度相同时测量所得。图2所示是一台主动快门式立体显示器通过左眼通道的测量结果,所选取的灰阶转换等级为 9×9 。

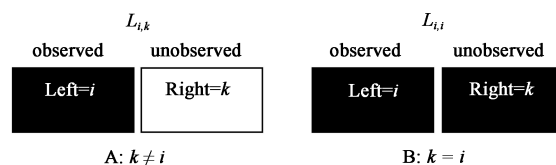


图1 透过观察通道测量的亮度:左图 $k \neq i$,右图 $k = i$ 。“ i ”和“ k ”分别代表观察(左)和非观察(右)视图的灰度等级

Fig. 1 Luminance measured through observed channel. In the left figure $k \neq i$ and in the right figure $k = i$. “ i ” and “ k ” represents the observed (left) and unobserved (right) view gray level respectively

Gray level		Observed View i								
Unobserved View k	Lum.(cd/m ²)	0	32	64	96	128	160	192	224	255
	0	0.03	0.55	2.36	5.09	8.86	13.5	19.2	26.6	34.1
	32	0.04	0.41	1.73	4.33	8.20	13.4	18.7	25.7	33.0
	64	0.08	0.53	1.80	4.50	8.29	13.3	18.7	25.7	33.2
	96	0.15	0.60	2.12	4.63	8.40	13.4	19.0	26.0	33.7
	128	0.29	0.76	2.24	4.81	8.55	13.3	18.9	25.9	33.5
	160	0.49	0.94	2.44	5.26	8.80	13.5	18.9	26.4	33.7
	192	0.70	1.14	2.67	5.56	9.16	13.9	19.5	26.1	34.3
	224	1.01	1.37	2.93	5.78	9.45	14.7	19.9	27.0	34.1
	255	1.36	1.58	3.19	6.09	9.93	14.8	20.9	27.5	34.9

图 2 透过观察(左)通道测量的 9×9 灰阶亮度矩阵

Fig.2 9×9 gray-to-gray luminance matrix measured through observed (left) channel

基于亮度测量矩阵,研究者提出了多种方法来计算串扰矩阵。这些方法通常基于不同理论模型,其中一些方法基于韦伯定律($\Delta L/L=C$),有些方法利用 Gamma 进行校正,有些方法利用明度(Lightness)代替亮度(Luminance),即使基于同一理论的算法也有不同的表达形式。我们先前的研究同样提出了一种基于韦伯定律的串扰评价方法,该方法利用目标亮度(L_t)与参考亮度(L_b)的差值(ΔL)除以它们的平均值($L_{average}$)^[7]。比如,图 1 中所示 i 和 k 分别代表观察视图和非观察视图的灰度等级,基于韦伯定律的串扰定义如式 1 所示。该方法在数学上将串扰数值严格限定在 0~2 的范围之内,或者可以归一化在 0%~100%的范围内。图 3 是基于图 2 的亮度测量矩

阵利用式(1)计算,并除以 2 归一化后得到的灰阶串扰矩阵,矩阵中所有元素的值都介于 0~1 之间。

$$C.T(i,k)=\left|\frac{\Delta L}{L_{average}}\right|=2\times\left|\frac{L_{i,k}-L_{i,i}}{L_{i,k}+L_{i,i}}\right|. \tag{1}$$

我们先前的研究还包括设计了大量的视觉感知实验研究串扰的可见性,以及探索客观评价结果和主观评价结果的相关性,以此比较不同客观评价方法的优劣。研究结果表明,基于韦伯定律的几种串扰客观评价结果与主观评价结果具有较高的相关性和一致性,我们提出的方法(式 1)具有最佳的表现。陈等^[8]在随后的研究中也验证了该研究结果。

Gray level		Observed View i								
Unobserved View k	Crosstalk	0	32	64	96	128	160	192	224	255
	0	-	0.146	0.135	0.047	0.018	0.000	0.008	0.007	0.012
	32	0.143	-	0.020	0.033	0.021	0.004	0.021	0.025	0.028
	64	0.455	0.128	-	0.014	0.015	0.007	0.021	0.025	0.025
	96	0.667	0.188	0.082	-	0.009	0.004	0.013	0.019	0.017
	128	0.813	0.299	0.109	0.019	-	0.007	0.016	0.021	0.020
	160	0.885	0.393	0.151	0.064	0.014	-	0.016	0.011	0.017
	192	0.918	0.471	0.195	0.091	0.034	0.015	-	0.017	0.009
	224	0.942	0.539	0.239	0.110	0.050	0.043	0.010	-	0.012
	255	0.957	0.588	0.279	0.136	0.075	0.046	0.035	0.009	-

图 3 基于观察通道亮度矩阵计算的 9×9 灰阶串扰矩阵

Fig.3 9×9 gray-to-gray crosstalk matrix calculated based on luminance matrix measured through observed channel

3 立体图像视觉显著性

获得立体图像视觉显著性的方法主要可以

分为两种。其一是利用主观实验方法让被试记录下感兴趣的图像区域或者利用眼动记录装置记录眼睛的关注区域;另外一种方法是基于图像处理建立客观计算模型来估计图像显著性区

域。我们的研究最终目的是基于大量的图像分析,利用客观方法评价显示系统,因此本文研究中的立体图像视觉显著性获取采用了基于图像处理的客观方法。在已有研究中,大量的二维图像视觉显著性模型都是基于视觉特征集成理论。自下而上的视觉注意机理最为常用,该方法速度快,具有前意识并且基于数据驱动。立体显示图像通过深度感知提升视觉临场感,因此立体图像视觉显著性应该包含深度信息,据此相应提出了深度显著性的概念代表深度信息在视觉注意力上所产生的影响。

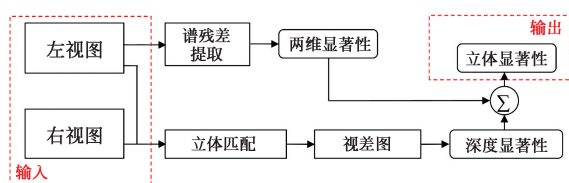


图4 立体图像视觉显著性获取流程图

Fig.4 Flow chart of 3D image visual saliency acquisition

本文所采用的立体图像视觉显著性获取方法如图4所示,立体图像左右视图作为输入,显著性图是系统的输出。首先,通过在立体图像左视图上应用谱残差提取的方法获得二维图像视觉显著性图^[11],该谱残差提取方法独立于处理对象的特征、类别或者其它先验知识。在该流程示例中,通过分析左图像的对数谱获取谱残差(式2),随后基于谱残差在空间域重构二维图像视觉显著性图(式3)。

$$R(f) = L(f) - A(f), \quad (2)$$

其中: $R(f)$ 是对数谱, $A(f)$ 是对数谱的一般形状。

$$S_{2D}(x) = g(x) * F^{-1}[\exp(R(f) + P(f))], \quad (3)$$

其中: $g(x)$ 为起平滑作用的高斯滤波器。 $P(f)$ 为图像的相位谱。 F^{-1} 是反傅立叶变换符号。

深度显著性图通过在图像深度图上应用高斯差分(Difference of Gaussians, DoG)滤波器获

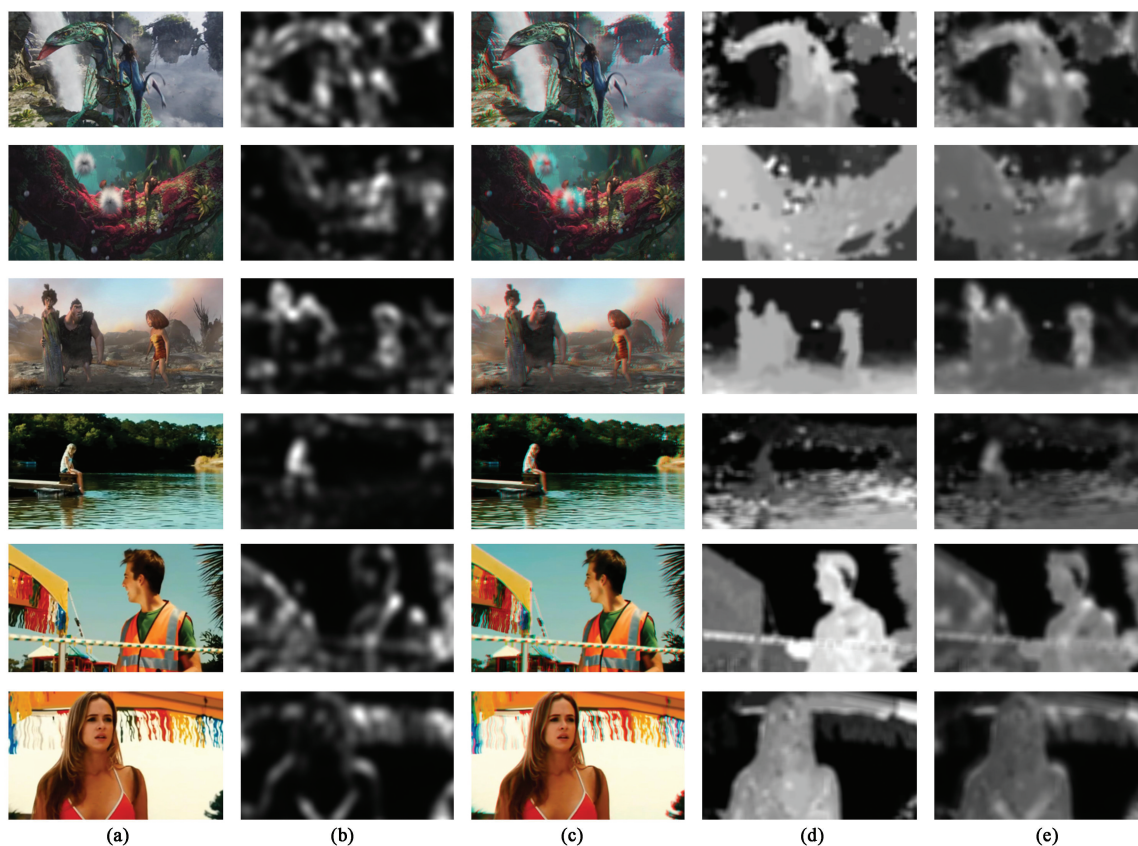


图5 立体图像显著性获取示例。(a)左视图;(b)二维显著性;(c)立体图像;(d)深度显著性;(e)立体显著性

Fig.5 Example of 3D image saliency acquisition. (a) left view; (b) 2D image saliency; (c) 3D image; (d) depth saliency; (e) 3D image saliency

得^[13]。图像深度图的获取(式 4)考虑了实际观看条件,同时采用更为合理的角度视差代替像素视差^[10]。

$$S_{\text{dep}} = P(C=1) \frac{P(\bar{f}_{\text{dep}} | C=1)}{P(\bar{f}_{\text{dep}})}, \quad (4)$$

其中: C 是表示一个点是否被关注的二进制随机变量。 $\bar{f}_{\text{dep}}$ 是指从这一点观察的深度特征的随机变量。

立体图像视觉显著性图是将两维图像视觉显著性图和深度显著性图相融合而获得。然而,尽管已经提出了多种方法,目前还没有具体的融合标准和规范。因此,本文采用直接简单的平均方法进行融合,如式(5)所示,其中 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ ^[16]。

$$S_{3D} = \omega_1 \times S_{2D} + \omega_2 \times S_{\text{dep}}. \quad (5)$$

根据以上介绍的方法,基于具体的立体图像内容,其中间产物和最终的立体图像显著性图如图 5 所示。其中,左视图、右视图以及最终获得的立体图像显著性图都是点对点的,这使基于图像显著性的灰度转换统计成为可能。

4 串扰矩阵加权及其数值单一化

4.1 灰阶转换权重统计

为了在灰阶转换权重统计中引进立体显示系统使用的实际情况,本文研究了包含自然图像和计算机合成图像的大量立体图像。所分析统计的立体图像数量超过 5 000 幅,所选图像场景不重复同时尽量包含各种类型。所采用的统计分析基于两方面的假设:(1)一个灰阶转换出现的次数越多,其对灰阶串扰的影响越大;(2)

当一个具体图像的具体灰阶转换出现时,对应点的图像显著性越高表明其在串扰评价中的权重越大。根据这种假设,本文基于大量丰富的立体图像内容统计,提出了平均灰阶转换显著性(Average Gray Level Transition Saliency, AGLTS)矩阵的概念。

$$\text{AGLTS}(i, k) = \sum_{m=1}^n \sum_{j=1}^v \sum_{l=1}^h \mu_{i,k}(j, l) \times S_{3D}^m(j, l), \quad (6)$$

其中: $\mu_{i,k}(j, l)$ 是表示具体灰阶转换(观察视图灰阶为 i , 非观察视图灰阶为 k)在具体位置(垂直和水平像素坐标值分别为 j 和 l)是否存在的二进制数。 $S_{3D}^m(j, l)$ 是编号为 m 的立体图像,对应垂直和水平像素坐标分别为 j 和 l 位置的图像显著性值。

由于统计结果中平均灰阶转换显著性 $\text{AGLTS}(i, k)$ 和 $\text{AGLTS}(k, i)$ 的差别极其微小,而且统计数据也没有要区分左右视图,因此本文将平均灰阶转换显著性矩阵对角线对应数据进行了平均,所得矩阵如图 6 所示。传统灰阶串扰矩阵经过平均灰阶转换显著性矩阵加权后可以获得更为合理的立体显示串扰评价。图 7 是图 3 的串扰矩阵经过加权后获得的灰阶串扰矩阵。

4.2 灰阶串扰数值单一化

对于普通消费者来说,通过比较串扰矩阵的方式评价立体显示器并以此为依据选择购买是不切实际的,因此灰阶串扰的数值单一化是必要的。图 2 中的串扰数值在数学上严格限定在 0%~100% 的范围内,同时加权矩阵 AGLTS 中元素的数值的被归一化处理,因此加权后的串扰矩阵的所有元素数值和也被严格限制在 0%~100% 的范围内,图 7

Gray level	Observed View i									
Unobserved View k	AGLTS	0	32	64	96	128	160	192	224	255
	0	-	2.03E-03	5.30E-04	1.65E-04	9.20E-05	4.21E-05	2.35E-05	7.02E-06	3.84E-05
	32	2.03E-03	-	6.36E-02	1.93E-02	9.74E-03	5.02E-03	2.80E-03	1.44E-03	3.16E-04
	64	5.30E-04	6.36E-02	-	7.89E-02	2.61E-02	1.09E-02	4.88E-03	2.39E-03	1.59E-03
	96	1.65E-04	1.93E-02	7.89E-02	-	6.71E-02	2.00E-02	8.71E-03	3.42E-03	3.50E-03
	128	9.20E-05	9.74E-03	2.61E-02	6.71E-02	-	5.06E-02	1.47E-02	5.31E-03	6.77E-03
	160	4.21E-05	5.02E-03	1.09E-02	2.00E-02	5.06E-02	-	3.14E-02	7.71E-03	8.00E-03
	192	2.35E-05	2.80E-03	4.88E-03	8.71E-03	1.47E-02	3.14E-02	-	1.60E-02	1.03E-02
	224	7.02E-06	1.44E-03	2.39E-03	3.42E-03	5.31E-03	7.71E-03	1.60E-02	-	1.66E-02
	255	3.84E-05	3.16E-04	1.59E-03	3.50E-03	6.77E-03	8.00E-03	1.03E-02	1.66E-02	-

图 6 9×9 平均灰阶转换显著性矩阵

Fig.6 9×9 average gray level transition saliency matrix

Gray level		Observed View i									
Unobserved View k	Weighted CT	0	32	64	96	128	160	192	224	255	
	0	-	2.96E-04	7.13E-05	7.79E-06	1.64E-06	0.00E+00	1.82E-07	5.24E-08	4.45E-07	
	32	2.90E-04	-	1.26E-03	6.46E-04	2.03E-04	1.87E-05	5.86E-05	3.54E-05	8.83E-06	
	64	2.41E-04	8.12E-03	-	1.12E-03	4.02E-04	8.13E-05	1.02E-04	5.89E-05	3.98E-05	
	96	1.10E-04	3.63E-03	6.44E-03	-	5.94E-04	7.42E-05	1.13E-04	6.45E-05	6.13E-05	
	128	7.47E-05	2.91E-03	2.84E-03	1.28E-03	-	3.78E-04	2.29E-04	1.10E-04	1.38E-04	
	160	3.72E-05	1.97E-03	1.64E-03	1.27E-03	7.29E-04	-	4.91E-04	8.66E-05	1.40E-04	
	192	2.16E-05	1.32E-03	9.50E-04	7.95E-04	5.06E-04	4.59E-04	-	2.71E-04	8.90E-05	
	224	6.61E-06	7.75E-04	5.71E-04	3.78E-04	2.65E-04	3.28E-04	1.63E-04	-	1.93E-04	
	255	3.68E-05	1.86E-04	4.44E-04	4.77E-04	5.05E-04	3.68E-04	3.56E-04	1.53E-04	-	

图7 加权后的9×9灰阶串扰矩阵

Fig.7 Weighted 9×9 gray-to-gray crosstalk matrix

的灰阶串扰数值单一化值为4.81%。图8是4台显示器灰阶串扰数值单一化后的结果,串扰值分别为1.39%、10.6%、5.83%和3.19%。其中,显示器#1为偏振式立体显示(中心点垂直测量),串扰值最小。对于普通消费者来说这显然更加易于直接比较不同立体显示器的串扰方面的性能并做出最后的选择。

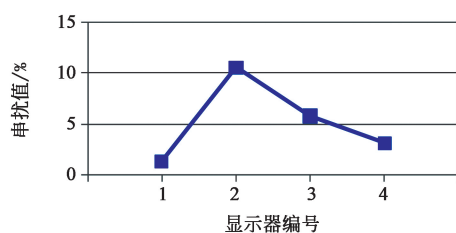


图8 利用单一数值方法对四台立体显示器进行串扰评价

Fig.8 Single value crosstalk evaluation of four 3D displays

5 结 论

立体显示技术的广泛应用使人们对其显示质

量提出了越来越高的要求,串扰现象是影响立体显示图像质量最主要的因素之一,客观合理的串扰评价对其改进具有重大影响。传统灰阶串扰不加区分地列举所有灰阶转换组合的串扰作为显示系统的串扰评价指标,然而不同灰阶转换组合在实际显示内容中出现的频率是不同的,图像的视觉显著性对串扰感知也有重大影响。因此本文选取了大量涵盖各种类型和场景的立体图像,对每一灰阶转换组合出现的概率进行统计,同时提取立体图像视觉显著性,提出了平均灰阶转换显著性的概念。平均灰阶转换显著性以矩阵形式呈现,应用其对传统灰阶串扰矩阵加权后可获得更为合理的灰阶串扰。加权后的灰阶串扰矩阵求和后即可获得数值范围在0%~100%的单一数值串扰。提出的加权灰阶串扰及其数值单一化方法充分考虑了图像内容和人眼视觉关注机理的影响,得到的评价结果更加客观、合理。同时,研究结果对串扰现象的优化以及视觉舒适度的提高具有指导和推动作用。

参 考 文 献:

- [1] MCINTIREJ P, HAVIG P R, GEISELMAN E E. Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review [J]. *Displays*, 2014, 35: 18-26.
- [2] 田浩南,张叶.基于边缘及特征点匹配的立体图像质量评价[J].液晶与显示,2015,30(4):666-672.
TIAN H N, ZHANG Y. Quality evaluation of stereo image based on edge and characteristic point matching [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(4): 666-672. (in Chinese)
- [3] 王晓燕,王世刚,姜秀红,等.亮度优化立体视频视觉舒适度评价[J].中国光学,2015,8(3):394-400.
WANG X Y, WANG S G, JIANG X H, et al. Evaluation of stereo video visual comfort based on luminance optimization [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 394-400. (in Chinese)
- [4] HANHART P, EBRAHIMI T. Subjective evaluation of two stereoscopic imaging systems exploiting visual attention to improve 3D quality of experience [C]. *Proceedings of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, 2014,

- 9011; 90110D1-11.
- [5] ZAFAR F, BADANO A. Characterization of crosstalk in stereoscopic display devices [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 22(12): 613-622.
 - [6] PALA S, STEVENS R AND SURMAN P. *Optical crosstalk and visual comfort of a stereoscopic display used in a real-time application* [C]. Proc. SPIE, 2007, 6490: 1101-1112.
 - [7] XIA Z P, LI X H, CUI Y, *et al.* A study on the perceptual relevance of crosstalk equations for stereoscopic displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2013, 21: 271-279.
 - [8] CHEN F H, YE P, HUANG F, *et al.* Method for 3D gray-to-gray crosstalk uniformity measurement with high perceptual relevance [J]. *Journal of Information Display*, 2015, 16(4): 195-205.
 - [9] 柯洪昌, 孙宏彬. 图像序列的显著性目标区域检测方法[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 768-774.
KE H C AND SUN H B. A saliency target area detection method of image sequence [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 768-774. (in Chinese)
 - [10] XIA Z P, CHENG C, HU F Y, *et al.* Image Saliency Detection based Depth Adjustment for Stereoscopic Image [C]. *SID Symposium Digest*, 2016: 727-730.
 - [11] HOU X D, ZHANG L Q. Saliency detection: A spectral residual approach [C]. *Proceedings of IEEE on Computer Vision & Pattern Recognition*, 2007: 1-8.
 - [12] WANG J, SILVA M P D, CALLET P L, *et al.* Computational Model of Stereoscopic 3D Visual Saliency [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(6): 2151-2165.
 - [13] JIANG Q P, SHAO F, JIANG G Y, *et al.* A depth perception and visual comfort guided computational model for stereoscopic 3D visual saliency [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2015, 38: 57-69.
 - [14] Joint Technical Committel TE_001. AS/NZS 62087-2008. Methods of measurement for the power consumption of audio, video and related equipment [S]. Sydney, Australia, 2008.
 - [15] FAIRHURST J. How an International Standard Reduced TV Power Consumption [C]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(3): 474-475.
 - [16] POTAPOVA E, ZILLICH M AND VINCZE M. Learning what matters: Combining probabilistic models of 2D and 3D saliency cues [C]. *Proceedings of ICVS*, 2011, 6962: 132-142.

作者简介: 夏振平(1985—), 男, 江苏兴化人, 博士, 讲师, 主要从事立体显示图像质量测量、评价和优化方面的研究。E-mail: xzp@usts.edu.cn