

用聚类分析的方法分类观察者颜色匹配函数

黄敏, 郭春丽, 何瑞丽, 习永惠

北京印刷学院印刷与包装工程学院, 北京 102600

摘要 色觉正常的观察者, 尤其是不同年龄段的观察者, 颜色分辨能力具有较大的差异。为了分类色觉正常观察者的锥细胞光谱响应, 补充现有 CIE1931, CIE1964 和 CIE2006 颜色匹配函数, 基于 Stiles&Burch 数据集的 47 个观察者函数(10°视场)和 CIE2006 代入 20~80 岁(10°视场)观察者不同年龄产生的 61 个函数(共 108 个颜色匹配函数), 用聚类分析方法中的 k-medoids 算法, 计算距离选用欧氏距离的平方, 将 108 个颜色匹配函数在 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道分别聚为 5 类, 共产生了 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 个类别。将 108 个颜色匹配函数作为 108 个“个体观察者”, 在 iPad 显示设备上呈现 CIE 推荐的 17 个颜色, 用 108 个颜色匹配函数和 125 个类别颜色匹配函数比较, 计算 17 个颜色的 CIEDE2000 色差平均值, 以最小色差值作为评价标准, 从 125 个类别中挑选出 10 个分类观察者颜色匹配函数表征观察者锥细胞光谱响应。108 名“观察者”中有 77.8% 的观察者属于这 10 个分类。在 iPad 显示设备上显示 CIE 推荐的 5 个颜色(灰、红、黄、绿、蓝色), 组织 30 名(20~25 岁)年轻观察者和 17 名(61~74 岁)老年观察者, 在 Quato 专业显示器上依次匹配 5 个目标色, 共采集到 158 组, 即 790 个(=158 组 \times 5 个色中心)颜色匹配实验数据。为将这 158 组数据(视为 158 名“观察者”)进行分类, 分别将 10 个分类颜色匹配函数代入计算, 以计算得到 5 个颜色 CIEDE2000 色差平均值最小的颜色匹配函数, 作为 158 名观察者相对应的分类, 在 10 个分类观察者函数中优选出 8 个颜色匹配函数 BIGC-1, BIGC-2, ..., BIGC-8。进一步地, 用优化建立的分类颜色匹配函数检验课题组前期基于近同色异谱色样对开展的目视色差比较实验, 结果发现 BIGC-3 适用于年轻观察者, BIGC-5 适用于老年观察者, 同时计算得到的 STRESS 值也较其他颜色匹配函数的结果有所降低。

关键词 聚类分析; 分类观察者函数; 颜色匹配函数; 生理老化; 观察者同色异谱

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)02-0454-07

引言

颜色是一种视觉感知, 色觉正常观察者的感红、感绿和感蓝锥细胞接收到不同强度的光信号会产生相应的神经冲动传给大脑, 从而引起颜色感觉。现有量化表示观察者锥细胞光谱响应, 计算颜色色度值的颜色匹配函数(color matching functions, CMFs)仅有 CIE 国际照明委员会推荐的 CIE1931 和 CIE1964 标准观察者函数^[1], 代表了不同观察视场下(2°和 10°)人眼的平均锥细胞光谱响应。CIETC1-36 分会于 2006 年推出了 CIE2006^[2]颜色匹配函数计算模型, 该模型考虑到年龄和视场角的因素, 可产生 20~80 岁不同年龄观察者和 1°~10°不同视场角的颜色匹配函数, 但在实际使用中需要代入观察者的真实年龄, 较不方便。而且研究表明^[3-5], 相同年龄的观察者的锥细胞光谱响应并不完全相同, 在模型中使用

观察者的真实年龄, 与使用该年龄段观察者平均年龄得到的颜色匹配函数计算结果之间具有较大的偏差, 很难将 CIE2006 模型应用于实际的颜色计算和评价过程。

不同观察者之间的颜色匹配度, 受样本对的颜色刺激光谱形状影响较大。当样本对间的光谱差异较大, 特别是某一样本对由窄带原色光谱组成时, 观察者之间的颜色分辨差异会被放大^[6]。随着窄带、宽色域显示设备的出现, 观察者同色异谱现象尤为严重。为了更为精确地进行颜色复制, 许多显示设备生产商开始设计多个单色性较好的原色光谱, 比如激光显示器, 这虽然明显地增大了显示设备的色域, 但是同时却放大了观察者间的辨色差异及同色异谱现象。

为了更好地表征不同类别观察者的颜色分辨差异, 方便进行颜色表征及不同设备间颜色的色差评价, 本文基于 108 个颜色匹配函数, 用聚类分析的方法进行观察者颜色匹配函数的分类。选用 iPad 上显示的 17 个颜色进行分类的计算优

收稿日期: 2018-12-21, 修订日期: 2019-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675029, 61308081)资助

作者简介: 黄敏, 女, 1979 年生, 北京印刷学院印刷与包装工程学院教授 e-mail: huangmin@bigc.edu.cn

选,用 iPad 和 Quato 专业显示器的颜色匹配实验数据进行分类的实验优选,用反射色的色差比较实验数据进行分类的检验。分类的 BIGC-颜色匹配函数可补充现有 CIE1931, CIE1964 和 CIE2006 的颜色匹配函数,更好地描述不同年龄段个体观察者的锥细胞光谱响应。

1 颜色匹配实验

研究中^[7]曾选取了 5 台具有不同原色光谱的显示设备开展了观察者同色异谱差异的比较,模拟计算和颜色匹配实验结果均表明显示设备的原色光谱能放大观察者间的颜色分辨差异。如表 4 所示,以 iPad 为目标设备,Quato 显示设备较其他三台显示设备(NEC241, NEC242, EIZO-CG19)与目标设备 iPad 的差异最大,颜色匹配实验得到的 \overline{OM} 值为 9.59,最小值为 EIZO-CG19 与 iPad 间的结果, \overline{OM} 值为 3.89。

为更好地表现不同观察者的锥细胞光谱响应差异,在前期组织 30 名年轻观察者采用 5 台显示设备开展颜色匹配实验的基础上,本实验又增加了 17 名老年观察者,在 Quato 显示设备与 iPad 显示设备间,基于 CIE 推荐的 5 个颜色开展了颜色匹配实验,实验装置示意图如图 1 所示。实验的参数与过程均与前期 5 台显示设备间的颜色匹配实验操作相同^[7]。两台显示设备三原色的光谱能量分布如图 2 所示,其中虚线为目标设备 iPad 的 $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ 三原色光谱能量分布,实线为 Quato 显示器的 $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, $B(\lambda)$ 三原色光谱能量分布。由图 2 可见,两台显示设备的原色光谱能量曲

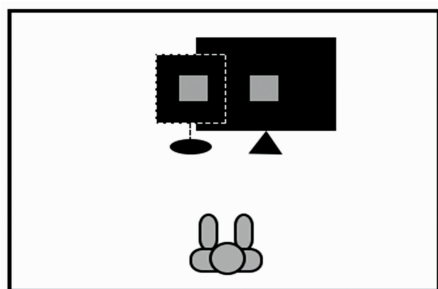


图 1 颜色匹配实验装置

Fig. 1 The setup of color matching experiment

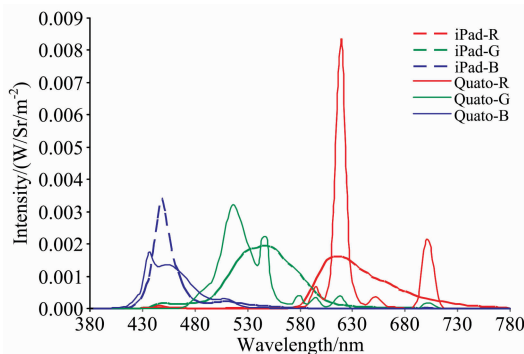


图 2 显示设备和目标设备三原色的光谱分布
Fig. 2 Spectral Power Distributions of the target and matched displays in three channels

线的形状、带宽和峰值波长位置都有较大的差异,在颜色匹配实验过程中可产生同色异谱样本对。

所有年轻观察者均为北京印刷学院印刷工程专业的学生,色觉正常并具有颜色科学的基础理论知识;所有老年观察者色觉正常,无明显眼类疾病。30 名年轻观察者(14 男 16 女),年龄分布在 20 到 27 岁,5 名观察者重复了 8 组实验,2 名观察者重复了 2 组实验,23 名观察者进行了 1 组实验,共采集到 67 组(=5×8+2×2+23×1),335 个(=67 组×5 个色中心)颜色匹配数据。17 名老年观察者(5 男 12 女),年龄分布在 61 到 74 岁,6 名观察者重复了 8 组实验,10 名观察者重复了 4 组实验,1 名观察者重复了 3 组实验,共采集到 91 组(=6×8+10×4+1×3),455 个(=91 组×5 个色中心)颜色匹配数据。整个颜色匹配实验过程共收集到 158 组,790 个颜色匹配数据。

2 聚类分析的方法分类颜色匹配函数

2.1 Sarkar 的分类方法

CIE TC 1-36 分会提出的 CIE2006 计算模型忽略了相同年龄观察者间的个体差异。2011 年, Sarkar^[8] 提出将 1959 年的 Stiles&Burch 的 47 个观察者颜色匹配函数^[9] 和 CIE2006 模型计算 20~80 岁不同年龄观察者的 61 个颜色匹配函数结合产生 108 个配色函数(如图 3 所示)。在聚类分析方法中^[10], 采用 K-Means 的聚类分析工具, 计算聚类的距离指标 $D(\text{distance})$ 为欧氏距离的平方, 进行 20 次迭代在 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道分别聚为 5 类, 产生了 5×5×5=125 个分类颜色匹配函数。基于 D65 光源照明下的 240 个 Color-checker 反射样品, 分别计算 125 个分类函数与 47 个 Stiles&Burch 颜色匹配函数(代表真实观察者的锥细胞响应)间的最小 CIEDE2000 色差平均值, 从而挑选出可表征每一个 Stiles&Burch 观察者锥细胞光谱响应的函数。图 4 为 Sarkar 聚类的 8 个颜色匹配函数, 其中, Sarkar 指出 S7 和 S8 颜色匹配函数更适合于表征老年观察者的锥细胞光谱响应。

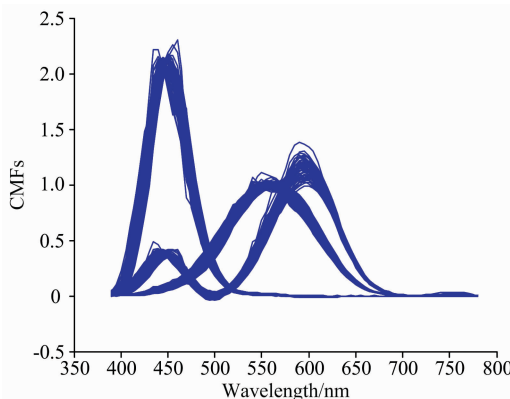


图 3 108 个颜色匹配函数的光谱响应
Fig. 3 The spectral response of 108 CMFs

2.2 改进后的分类方法

Sarkar 在聚类分析时, 选用的评价样本为 D65 光源照明

下的 240 个 Colorchecker 色卡, 其光谱曲线变化较为平缓, 本文中, 基于 CIE 推荐的 17 个颜色中心^[11], 在 iPad 三原色显示设备上显示 17 个颜色作为参考色, 其光谱辐射能量分布如图 5(a) 所示。参考色用 CIE1964 颜色匹配函数计算得到的色度值如表 1 所示, 其中标注“*”的为上述颜色匹配实验中使用的 5 个颜色中心。

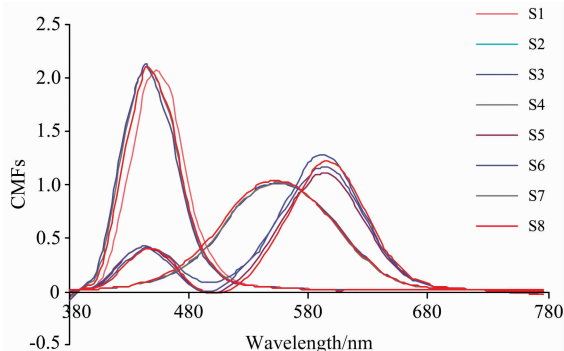


图 4 Sarkar 提出的 8 个类别观察者函数分布

Fig. 4 The distributions of Sarkar Proposed 8 categories

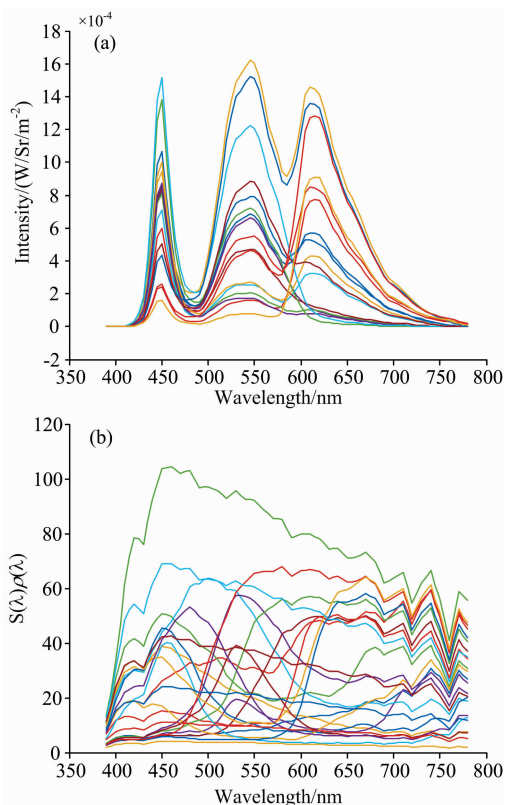


图 5 用于聚类分析颜色样品的颜色刺激光谱能量分布

(a): iPad 显示器显示的 17 个颜色;

(b): D65 照明体系 Colorchecker 色卡中的 24 色

Fig. 5 The spectral curves of the color stimuli used for cluster analysis

(a): 17 iPad displayed colors;

(b): 24 Colorchecker illuminated by D65 illuminant

表 1 计算用 17 个颜色的色度值

Table 1 The colorimetric values of 17 color centers

Color	L_{i0}^*	a_{i0}^*	b_{i0}^*	C_{i0}^*	h_{i0}^*
* Gray	63.0	-0.5	0.6	0.8	126.9
* Red	45.8	37.7	23.3	44.3	31.7
Red, high chroma	44.1	50.9	31.5	59.9	31.8
Orange	62.6	13.3	22.0	25.7	58.9
Orange, high chroma	62.8	30.2	48.3	56.9	58.0
* Yellow	88.6	-6.9	46.3	46.8	98.5
Yellow, high chroma	86.0	-10.0	67.6	68.3	98.4
Yellow-Green	66.5	-10.4	13.9	17.3	126.8
Yellow-Green, high chroma	65.7	-24.4	31.8	40.1	127.5
* Green	57.0	-27.1	0.7	27.1	178.5
Green, high chroma	72.6	-38.9	-0.3	38.9	180.4
Blue-green	51.3	-16.9	-10.2	19.7	211.0
Blue-green, high chroma	59.0	-26.1	-17.9	31.7	214.3
* Blue	37.1	3.1	-31.1	31.2	275.7
Blue, high chroma	34.6	6.2	-37.9	38.4	279.3
Purple	44.8	11.8	-13.3	17.8	311.6
Purple, high chroma	46.9	20.1	-23.0	30.5	311.2

在 Sarkar 的聚类分析中, 使用的 k-means 算法对于异常值十分敏感, 因此选用 k-medoids 算法, 以集群中位于最中心的对象, 而不是将集群中的平均值作为参考点。分类的方法仍然基于最小化每个对象与其参考点之间的不相似程度之和的原理进行^[10]。在聚类分析时, 选用 50 次迭代, 计算聚类的距离指标 $D(\text{distance})$ 仍为欧氏距离的平方。将 108 个颜色匹配函数在 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道分别聚为 5 类。为比较选用 Colorchecker 反射色卡和 iPad 自发光色作为目标色的区别, 选用 24 个 Colorchecker 色卡在 D65 标准照明体系下的颜色刺激能量光谱分布曲线[如图 5(b) 所示], 进行聚类分析结果的比较。

进行聚类分析时, 发现选用图 5(b) 中 Colorchecker 色卡的光谱数据作为测试色(即类似于 Sarkar 的方法), 108 个颜色匹配函数分类较为集中, 无法有效的完成分类。选用图 5(a) 所示的 17 个自发光色的光谱数据作为参考色, 将 108 个颜色匹配函数的 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道分别聚为 5 类。图 6 所示, 黑色曲线表示 108 个颜色匹配函数的光谱响应, 红色、绿色和蓝色曲线分别表示 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道的 5 个聚类的光谱响应, 共产生了 $5 \times 5 \times 5 = 125$ 个类别颜色匹配函数。

为了在这 125 个类别中挑选出适合表征观察者锥细胞光谱响应的函数, 将 108 个颜色匹配函数作为 108 个“个体观察者”的锥细胞光谱响应, 分别和 125 个类别比较, 代入图 5(a) 所示 iPad 上显示的 17 个颜色刺激光谱, 计算 XYZ 色度值, 进而计算 CIEDE2000 色差平均值。以最小 CIEDE2000 色差值作为评价标准, 按观察者分类个数(/比例)由高到低进行排序, 挑选出前 10 个分类颜色匹配函数(图 7 所示)。分类结果如表 2 所示, 有 77.8% 的观察者属于前 10 个分类。同时可见, 在分类的颜色匹配函数中, $\bar{y}(\lambda)$ 通道 2-类别的颜色匹配函数并无聚类。

3 分类颜色匹配函数的检验

3.1 颜色匹配数据的实验优选

将表 2 中分类产生的颜色匹配函数，代入本次基于 iPad 和 Quato 显示设备开展颜色匹配实验采集到的 158 组数据中（以 158 名“观察者”进行检验）。以计算得到最小 CIEDE2000 色差平均值的颜色匹配函数，代表 158 名观察者相对应的分类，结果如图 8 所示，其中 No. 11 为 CIE1964 颜色匹配函数。由图 8 可见，158 个“观察者”的颜色匹配函数分类，无观察者属于 No. 2 和 No. 7 以及 No. 11 类别。从图 8 中挑选出前 8 个分类颜色匹配函数，即有观察者分类归类的颜色匹配函数。将观察者分类个数由高到低进行排序，重新命名为 BIGC-1, BIGC-2, ..., BIGC-8, 分别对应图 8 中的 No. 10, No. 5, ..., No. 4。

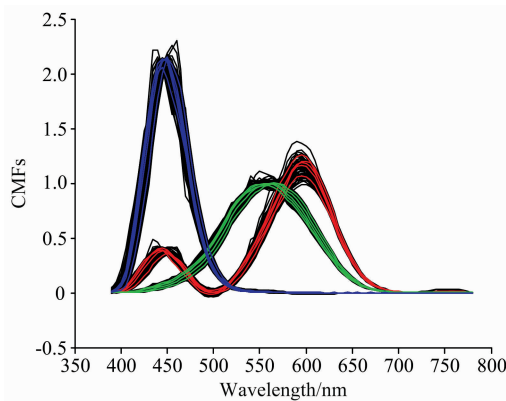


图 6 聚类产生的颜色匹配函数

Fig. 6 Reduced set of x - y - z - color matching functions plotted on 108 observer data

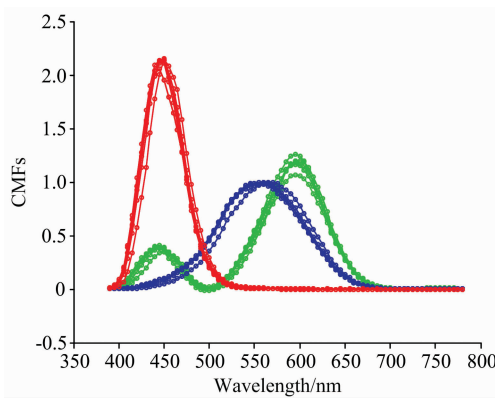


图 7 迭代产生的前 10 类颜色匹配函数

Fig. 7 The reduced set of ten observer categories

3.2 BIGC 颜色匹配函数的检验

工作前期基于 5 个颜色中心、20 对近同色异谱样本对，组织 30 名年轻和 26 名老年观察者开展了色差比较实验^[12]。用 3.1 节实验优选建立的 BIGC-1, BIGC-2, ..., BIGC-8 颜色匹配函数代入标样和比较样的颜色刺激函数，计算

CIEDE2000 色差值，比较其与目视评价结果的 STRESS 值^[13]，从而表征不同颜色匹配函数的表现。STRESS 值越小，说明颜色匹配函数的表现性能越好。同时与 CIE1931, CIE1964 和分别代入年轻和老年观察者平均年龄 22 岁和 68 岁的 CIE2006 和 Sarkar 的 8 个类别颜色匹配函数以及文献 [12] 中基于 CIE1964 颜色匹配函数优化建立的 BIGC-Young 和 BIGC-Old 进行比较分析，计算结果如表 3 所示。

表 2 迭代产生的分类颜色匹配函数

Table 2 The detailed information of the reduced ten observer categories

No.	Combination	x -	y -	z -	Total Obs.	Obs. Covered/%
1	50	2	5	5	15	13.9
2	117	5	4	2	14	26.9
3	63	3	3	3	11	37.0
4	49	2	5	4	11	47.2
5	91	4	4	1	9	55.6
6	1	1	1	1	7	62.0
7	119	5	4	4	6	67.6
8	64	3	3	4	4	71.3
9	46	2	5	1	4	75.0
10	76	4	1	1	3	77.8

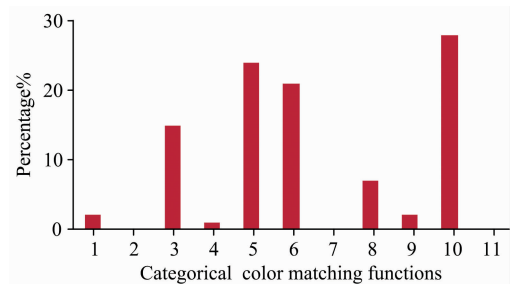


图 8 158 名观察者的分类

Fig. 8 Categories of 158 observers

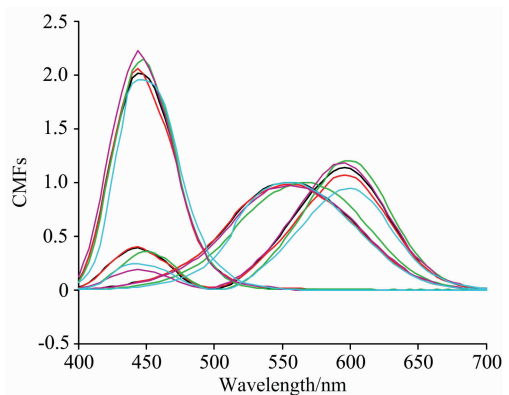


图 9 CIE1964 和 BIGC-不同颜色匹配函数的光谱分布

Fig. 9 Spectral distributions of CIE1964 and BIGC-CMFs

表 3 中，若对包含 BIGC-Young 和 BIGC-Old 在内的 22 个颜色匹配函数进行测试，以最小 STRESS 值出现的观察者

个数对观察者进行分类, 结果如表 3 中 Obs. 列的数字所示; 若不考虑 BIGC-Young 和 BIGC-Old, 对其余 20 个颜色匹配函数进行测试, 同样以最小 STRESS 值出现的观察者个数统计, 结果如表中 Obs. 列括号中的数字所示, 其中有 11 名年轻观察者被分类到 BIGC-3 颜色匹配函数, 而老年观察者中有 12 名观察者被分类到 BIGC-5 颜色匹配函数。BIGC-3 计算 30 名观察者的平均 STRESS 值为 39.5, 仅次于 BIGC-Young 的结算结果(39.4)。BIGC-5 计算 26 名老年观察者的

平均 STRESS 值为 37.1, 优于 BIGC-Old(38.0)和 CIE1931(38.4)颜色匹配函数的计算结果。由此可见, BIGC-3 和 BIGC-5 分别与年轻和老年观察者的目视评价数据具有较好的一致性表现。同时表 3 中, CIE 推荐的颜色匹配函数并无明显的计算优势, 尤其针对年轻观察者。同时, 比较表 3(打印色之间)和图 8(显示色之间)的结果可知, 颜色样本的原色光谱对观察者颜色匹配函数分类具有较大的影响。

表 3 不同颜色匹配函数评价近同色异谱色样对的表现

Table 3 The performances of different CMFs for nearly metameric color samples in terms of STRESS values

CMFs	Young			Old		
	STRESS	Obs.	Obs Covered%	STRESS	Obs.	Obs Covered%
CIE1931	65.2			38.4	2(8)	7.7(30.8)
CIE1964	42.7			63.9		
CIE2006(22)	47			68.3		
CIE2006(68)	61.2			41.9		
Sarkar1	48.4			67.3		
S2	40.8	2(10)	6.7(33.3)	51.5	(3)	(11.5)
S3	42.3			56.9		
S4	47.5			68.3		
S5	43.8			64.8		
S6	41.8	7(7)	23.3(23.3)	64.7		
S7	51.2	1(1)	3.3(3.3)	43.9	2(2)	7.7(7.7)
S8	45.5			51.3		
BIGC-1	50.8			70.4		
BIGC-2	47.4			68.6		
BIGC-3	39.5	6(11)	20(36.7)	59.8		
BIGC-4	64.7			39.0	1(1)	3.8(3.8)
BIGC-5	60.0	1(1)	3.3(3.3)	37.1	8(12)	30.8(46.2)
BIGC-6						
BIGC-7						
BIGC-8						
BIGC-Young	39.4	13	43.3	51.6	3	11.5
BIGC-Old	65.3			38.0	10	38.5
In total		30	100		26	100

比较 CIE1964 和 BIGC-颜色匹配函数的光谱响应曲线, 如图 9 所示(其中黑色曲线表示 CIE1964 颜色匹配函数, 红色和品红线分别表示 BIGC-3 和 BIGC-Young 的光谱响应曲线, 绿色和青色线分别表示 BIGC-5 和 BIGC-Old 的光谱响应曲线)。表征年轻(BIGC-Young 和 BIGC-3)和老年观察者

(BIGC-Old 和 BIGC-5)锥细胞光谱响应的颜色匹配函数的主要区别在于 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道的光谱曲线峰值波长的位移, BIGC-3, BIGC-Young 和 CIE1964 在三个通道的峰值波长位置相同, BIGC-5 较 BIGC-3 和 CIE1964 均向长波方向有不同程度的位移, 具体峰值波长位置如表 4 所示。

表 4 不同颜色匹配函数的峰值波长位置

Table 4 Positions of peak wavelengths of different color matching functions

	CIE1964	CIE2006-22	CIE2006-68	BIGC-Young	BIGC-Old	BIGC-3	BIGC-5
$\bar{x}(\lambda)$	444	440	448	444	444	444	452
	596	596	600	596	600	596	600
$\bar{y}(\lambda)$	556	556	564	556	556	556	568
$\bar{z}(\lambda)$	444	444	452	444	444	444	448

将本次聚类分析方法建立的适用于年轻和老年观察者年龄段的分类颜色匹配函数 BIGC-3 和 BIGC-5, 与 CIE2006-22

和 CIE2006-68 进行比较, 发现 BIGC-3 较 CIE2006-22 在 $\bar{x}(\lambda)$ 通道的第二峰值波长向长波段偏移了约 4 nm, BIGC-5 颜

色匹配函数较 CIE2006-68 在 $\bar{x}(\lambda)$ 通道的第二峰值波长处、在 $\bar{y}(\lambda)$ 通道分别向长波段偏移了约 4 nm, 在 $\bar{z}(\lambda)$ 通道向短波方向偏移了约 4 nm。分类的 BIGC 颜色匹配函数在现有 CIE2006 颜色匹配函数的基础上有了一定的改进和优化, 检验结果表明, 其可更好地用于年轻和老年观察者的锥细胞光谱响应, 今后需要搜集更多的目视评价数据对 BIGC-其他类别颜色匹配函数进行分类、检验。

4 结 论

采用 108 个颜色匹配函数进行分通道聚类, 在 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 三个通道分别聚为 5 类, 组合产生了 125 个颜色匹配函数。在 iPad 三原色显示设备上呈现 CIE 推荐的 17 个颜色, 用 125 个颜色匹配函数和 108 个颜色匹配函数分别代入 17 个颜色刺激的光谱能量, 依次比较、计算不同颜色匹配

函数表征 17 个颜色的 CIEDE2000 色差平均值。以 CIEDE2000 色差最小值进行观察者颜色匹配函数的分类, 按观察者分类个数(/比例)由高到低进行排序, 挑选出 125 个颜色匹配函数中分类的前 10 个观察者函数。

将 10 个分类颜色匹配函数代入基于 iPad 和 Quato 三原色显示设备采集到的 158 组颜色匹配实验数据, 以每组最小 CIEDE2000 色差值作为评价标准, 进一步挑选出前 8 类颜色匹配函数(BIGC-1, BIGC2, ..., BIGC-8)。用观察者对近同色异谱色样对的目视色差数据检验 8 个 BIGC 颜色匹配函数的表现, 发现 BIGC-3 适用于表征年轻观察者的锥细胞光谱响应, BIGC-5 适用于老年观察者。无观察者属于 BIGC-1, 2, 6, 7, 8。研究结果可为建立不同年龄分类观察者颜色匹配函数提供计算方法和理论依据, 后期可继续对分类的 8 个 BIGC 颜色匹配函数的表现性能进行检验和优化。

References

- [1] CIE. CIE Publication 15; 2004. Central Bureau of the CIE, Vienna, 2004.
- [2] CIE. CIE Technical Report. 2006. 170.
- [3] Burgos-Fernández F J, Vilaseca M, Perales E, et al. Opt. Appl., 2016, 46: 117.
- [4] Asano Y, Fairchild M D, Blondé L, et al. Color Res. Appl., 2016, 41: 530.
- [5] HUANG Min, HE Rui-li, SHI Chun-jie, et al(黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(7): 2241.
- [6] Asano Y, Fairchild MD, Blonde L, et al. Proceedings of the IS&T/SID Color Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology, Boston, MA, 2014. 1.
- [7] HUANG Min, HE Rui-li, GUO Chun-li, et al(黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2019, 39(1): 0133001.
- [8] Abhijit Sarkar. Identification and Assignment of Colorimetric Observer Categories and Their Applications in Color and Vision Science. Rennes, France Université De Nantes, 2011.
- [9] Stiles W S, Burch J M. Journal of Modern Optics, 1959, 6: 1.
- [10] Johnson R, Wichern D. Handbook of Applied Multivariate Statistical Analysis (Pearson Education International, NJ), USA, 2007, 6th ed.
- [11] Witt K. Color Research & Application, 1995, 20(6): 399.
- [12] HUANG Min, HE Rui-li, GUO Chun-li, et al(黄敏, 何瑞丽, 郭春丽, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(3): 033301.
- [13] Garcia P A, Huertas R, Melgosa M, et al. J. Opt. Soc. Am. A, 2007, 7: 1823.

Classification of Color Matching Functions with the Method of Cluster Analysis

HUANG Min, GUO Chun-li, HE Rui-li, XI Yong-hui

School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

Abstract Larger color discrimination difference exists among observers with normal color vision, especially those of different ages. In order to classify the cone fundamentals among normal color observers, the 108 color matching functions (CMFs) including 47 Stiles&Burch CMFs and 61 CMFs computed by CIE2006 model were respectively classified into 5 categories in $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ three channels by using the k-medoids algorithm of clustering analysis method as well as the square of Euclidean distance and a total of $5 \times 5 \times 5 = 125$ categories were generated. Taking the 108 CMFs as 108 "individual observers", the 17 color centers recommended by CIE were displayed on the center of iPad and 108 CMFs were compared with 125 categorical functions, then the average of 17 colors' CIEDE2000 color differences were calculated. Finally 10 categorical CMFs were selected from those 125 categories to represent the spectral response of human cone cells. The results indicated that 77.8% from the 108 "real

observers” were satisfied, which regarded the obtained minimum color difference as the objective function. As the target colors, CIE recommended 5 colors (gray, red, yellow, green, blue) were presented on the iPad and 30 young observers aged 20 to 25 and 17 old observers aged 61 to 74 were organized to match 5 color centers correspondingly on Quato display. Therefore, 158 groups, 790 color data (each group includes 5 color centers) were obtained and then categorized by computing CIEDE2000 color difference using 10 categorical CMFs. The CMFs possessing the minimum color difference value were assigned as the corresponding classification of 158 observers and finally 8 out of 10 categories were selected and named BIGC-1, BIGC-2, ..., BIGC-8, which were used to test the results of paired comparison experiment based on metameric color samples in our previous study. The obtained results show that BIGC-3 CMFs worked well for young observers while BIGC-5 CMFs were suitable to old observers. Additionally, the calculated results of STRESS value were also lower than the results computed by other CMFs.

Keywords Cluster analysis; Categorize observer functions; Color matching functions; Physiological aging; Observer metamerism

(Received Dec. 21, 2018; accepted Apr. 28, 2019)

(上接 453 页)

2.4 墙报展示

墙报展示作为本次会议的一种主要形式。墙报要求制作规范,内容体现研究工作的创新点。在准备墙报时注意以下几个方面:

1. 墙报尺寸:高 110 公分×宽 80 公分;
2. 墙报内容不包括中英文摘要和参考文献;
3. 墙报内容以图文为主,层次分明,主要体现研究工作的创新性,主要结果和结论;
4. 墙报右上侧写上论文编号;

拟作墙报展示的代表,在会议注册系统中提交墙报题目和编号。组委会将组织专家对青年学者、博硕士研究生墙报进行评审,并对优秀墙报颁发优秀论文证书和奖金。

三、会议稿件

会议截稿日期为 12 月 30 日,请大家按照会议第一轮通知的要求继续投稿。

<http://www.sinospectroscopy.org.cn/readnews.php?nid=94098>

四、会议注册

4.1 会议注册费

2020 年 4 月 20 日以前缴纳注册费:正式代表:1600 元/人;学生代表:1000 元/人;2020 年 4 月 20 日后及现场缴纳注册费:正式代表:1800 元/人;学生代表:1200 元/人,现场缴费将邮寄发票。由于酒店房间是预留,2020 年 4 月 20 日后及现场缴纳注册费的代表将不能保证房间;陪同家属 1000 元/人(没有发票)。

会议注册费收缴方式:

银行汇款,如网银、手机银行、支付宝、微信转账、银行柜台等。

收款单位:四川大学(请注明:2020 光谱+姓名);

帐号:5100 1870 4690 5988 8666;

开户行:建行成都川大支行;

汇款成功后请务必将姓名、参会编号、单位发票抬头、单位税号、汇款金额通过邮箱(atcpubs@scu.edu.cn)告知会务组,以便核实会议注册费发票信息。(如果需要开具增值税发票,请注明并提供单位名称、纳税人识别号、地址、电话、开户行及账号)

发票联系人:张亮 联系邮箱:zhang.liang@scu.edu.cn 联系方式:15902844473

4.2 会议注册系统

请登陆光谱网会议主页:<http://www.sinospectroscopy.org.cn/meeting/index.php?mid=24>

注册并提交您的参会信息,包括个人信息、报告题目、墙报题目、住房预定等信息。

(下转 471 页)