

基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价

汪哲弘 徐海松

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 为了研究 CIELAB 颜色空间中明度、彩度和色调等视觉容差与色调角之间的相关性对基于 CIELAB 的典型色差公式(CIELAB、CMC、BFD、CIE94、LCD 以及 CIEDE2000)预测性能的影响,实验选取了具有不同明度和彩度水平的 5 个色调环($L^* = 30, 50, 70$ 和 $C_{ab}^* = 10, 20, 30$),并采用 3 个不同视觉尺度($\Delta V = 3.02, 5.92$ 和 8.87 CIELAB 单位)进行视觉评估实验。8 名色觉正常观察者根据心理物理学的恒常刺激法原理,在阴极射线管(CRT)显示器上获取了相应颜色中心的明度、彩度和色调视觉容差。对实验结果的详细分析表明,由于明度容差与色调角无明显相关性,6 个色差公式的预测性能均较好,其中 CIEDE2000 略优于其它色差公式。对于彩度容差,LCD (Leeds color-difference formula)预测性能表现最优,而 CIEDE2000 和 BFD 的表现最差,其余色差公式则相差不多。CIEDE2000 和 LCD 的色调权重函数的预测性能明显优于其它色差公式,而 CMC 预测性能则为最差。

关键词 视觉光学; 视觉与色彩; 恒常刺激法; 视觉容差; 色差公式; 权重函数

中图分类号 TN942.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1838

Evaluation of Color-Difference Formulae Based on the Correlation Between Visual Tolerances and Hue Angles

Wang Zhehong Xu Haisong

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract In order to investigate the dependence of lightness, chroma, and hue visual tolerances upon hue angles in CIELAB color space, five hue circles were selected at different lightness and chroma levels ($L^* = 30, 50, 70$ and $C_{ab}^* = 10, 20, 30$), which were observed using three visual scales ($\Delta V = 3.02, 5.92$ 和 8.87 CIELAB units). The test stimuli were presented on the CRT, and the corresponding lightness, chroma, and hue tolerances were measured by a panel of 8 color-normal observers by using the psychophysical method of constant stimuli. Based on the obtained correlation between visual tolerances and hue angles, the prediction performances of the six CIELAB-based color-difference formulae, CIELAB, CMC, BFD, CIE94, LCD, and CIEDE2000, were further evaluated. The detailed analysis indicated that due to the independence between the lightness tolerances and the hue angles, all the formulae performs well, with CIEDE2000 a little better than the others. For chroma tolerances, LCD performs the best, while CIEDE2000 and BFD the poorest, and the others performs nearly the same. The hue weighting functions of CIEDE2000 and LCD outperforms others obviously, with CMC performing poorest.

Key words visual optics; vision and color; method of constant stimuli; visual tolerances; color-difference formulae; weighting functions

1 引言

视觉容差(明度、彩度和色调容差)与 CIELAB

色调角的依赖性关系是色差公式研究中的重要课题之一^[1],不少颜色科学工作者对此开展了大量研究

收稿日期: 2008-10-17; 收到修改稿日期: 2008-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(60578011)资助项目。

作者简介: 汪哲弘(1981—),男,博士研究生,主要从事颜色科学、图像技术等方面的研究。

E-mail: wangzhehong1981@126.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学、视觉与图像工程、光电技术、光学工程方面的教学与研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn

和分析^[2,3]。Qiao 等^[2]采用恒常刺激法得到了阈上色度容差,而 Melgosa^[3]等通过调整法获得了阈上彩度容差,他们的研究表明色调和彩度容差与 CIELAB 色调角之间存在一定的依赖关系。Kim 等提出的 LCD(Leeds color-difference formula)色差公式^[4]中包含了分别考虑彩度和色调容差与色调角依赖性的权重函数,而 CIEDE2000^[5]则采用了考虑色调容差与色调角依赖性的权重函数。

本实验根据不同的视觉尺度,通过心理物理学恒常刺激法^[2~6]获取在 CRT 显示器上显示的刺激色样在明度、彩度和色调等心理相关维度上的视觉容差,并对 6 个基于 CIELAB 的典型色差公式(CIELAB^[7]、CMC^[8]、BFD^[9]、CIE94^[10]、LCD^[4]和 CIEDE2000^[5])的预测性能进行了比较和评价。

2 实验方案

根据 LUT(Look-up Table)法^[6,11]对 CRT 显示器 Neso FD570A 进行色度特征化,并利用光谱辐射度计 PR-650 对所需在 CRT 上显示的刺激色样进行测量。CRT 的色度特性化精度表示为

$$\Delta E_{m,s}^* = \sqrt{(\Delta L_m^* - \Delta L_s^*)^2 + (\Delta a_m^* - \Delta a_s^*)^2 + (\Delta b_m^* - \Delta b_s^*)^2}, \quad (1)$$

式中 ΔL_s^* 、 Δa_s^* 和 Δb_s^* 分别为颜色中心周围分布的点到颜色中心在 CIELAB 空间中 L^* 、 a^* 和 b^* 标度上的理论偏差, ΔL_m^* 、 Δa_m^* 和 Δb_m^* 则为相应的实际测量偏差。在本实验中,平均 $\Delta E_{m,s}^*$ 为 0.34 CIELAB 色差单位,经与国际上已发表文献的比较表明,该显示器的特性化精度是可接受的^[3,12]。

颜色刺激图样如图 1 所示。颜色刺激为位于显示器中央的 2 对 $1^\circ \times 1^\circ$ 视角的正方形色块,每个色块由 1 pixel 宽的黑线所包围。色对之间的间隔为 0.5° ,其中一对为参考色样,另一对为测试色样。背景为一个 $6^\circ \times 6^\circ$ 的中性色方块,其参数如表 1 所示。背景外围为一个 $8^\circ \times 8^\circ$ 的白色边框,其亮度值为 100 cd/m^2 ,色品坐标采用 D65 的相应参数。由于刺激色样对的视角小于 4° ,故相应计算采用 CIE 标准照明体 D65 和 CIE1931 标准色度系统。屏幕其余部分显示为黑色。

根据实验目的和显示器色域,选取由 3 个不同明度水平($L^* = 30, 50$ 和 70)和 3 个不同彩度水平($C_{ab}^* = 10, 20$ 和 30)所组成的 5 个色调环,并以色调环上每 30° 等间隔分布的点作为测试颜色中心。其中,对 $L^* = 50, C_{ab}^* = 20$ 的色调环采用 3 个不同视觉

尺度($\Delta V = 3.02, 5.92$ 和 8.87 CIELAB 单位)进行观察,而其余的色调环则仅用小色差尺度展开视觉实验。3 个视觉尺度的色度参数如表 1 所示,所选取色调环的色度参数如表 2 所示。测试色样沿颜色中心的明度(增加/减少)、彩度(增加/减少)和色调(顺时针/逆时针)共 6 个方向分布,每个方向有 7 个通过先验性实验所确定的测试色样对。通过观察者比较参考色样对和测试色样对的色差大小,利用概率统计的方法计算出相应测试方向的阈上视觉容差值。8 名色觉正常观察者对每个色样对进行 20 次视觉评估。

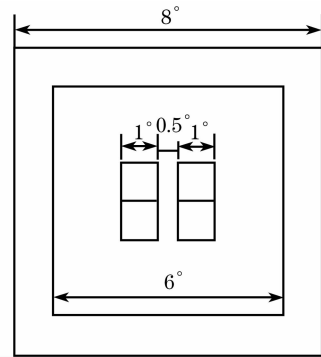


图 1 恒常刺激法的测试刺激图样

Fig. 1 Test stimulus pattern used in the method of constant stimuli

表 1 背景和参考色样对的色度参量

Table 1 The CIELAB values of background and reference sample pairs

	L^*	a^*	b^*	ΔV
Background	50.03	-0.13	0.07	
Reference pair for small visual scale	61.61	0.15	-0.14	3.06
Reference pair for middle visual scale	64.66	0.11	0.16	
Reference pair for large visual scale	61.76	-0.02	0.16	5.92
	67.66	0.21	-0.24	
	61.78	0.13	0.05	8.87
	70.65	0.27	-0.11	

表 2 测试色调环的色度参数

Table 2 The colorimetric data of selected hue circles

Hue circle	L^*	C_{ab}^*	Visual scale
L50C20S	50	20	small
L50C20M	50	20	middle
L50C20L	50	20	large
L30C20S	30	20	small
L70C20S	70	20	small
L50C10S	50	10	small
L50C30S	50	30	small

3 实验结果与分析

利用概率统计方法^[2,6,12]获取了全部观察者对单个颜色中心所对应的明度、彩度和色调容差,如图

2 所示,其中横坐标为 CIELAB 色调角,纵坐标为明度、彩度或色调容差。根据每个观察者的视觉容差与所有观察者的总体视觉容差计算相应的观察者精度,并用 $PF/3$ ^[2,3,6] 表示,平均值为 16 $PF/3$ 单位,

最大为 18 $PF/3$ 单位,与类似实验^[2,3,12,13] 比较可知其具有较高精度。由图 2 可见,明度容差与色样的色调角无明显相关性,而彩度和色调容差则具有一定的色调相关性。

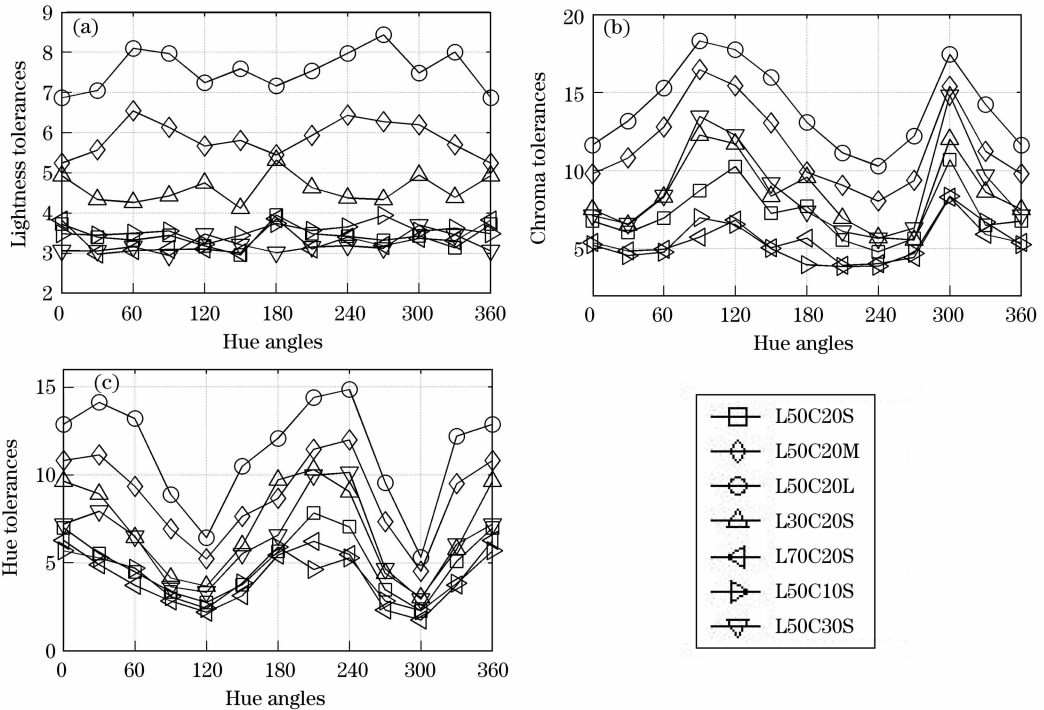


图 2 各个色调环的视觉容差(a)明度;(b)彩度;(c)色调

Fig.2 The visual tolerances for individual hue circles (a) lightness; (b) chroma; (c) hue

分别利用明度、彩度和色调容差对 6 个基于 CIELAB 的典型色差公式的明度、彩度和色调权重函数的预测性能进行评价。各色差公式均采用原始形式,即 $k_L = k_C = k_H = 1$ 。预测结果用 $PF/3$ 表示,分别列于表 3~表 5 中。

虽然对 L30C20S 和 L70C20S 的预测性能表现最差,但对其余色调环的预测性能表现均为最优。对于所有色调环的明度容差,CIEDE2000 预测性能最好,CIELAB、CIE94 和 LCD 次之,而 BFD 和 CMC 则表现最差。

由于明度容差与色调角之间不存在明显的依赖性,因此各个色差公式的明度权重函数预测性能表现均较理想。对于单个色调环,各色差公式对色调环 L50C10S 的明度容差预测性能最好,而对色调环 L70C20S 的明度容差预测性能最差。CIEDE2000

CIEDE2000 和 BFD 的彩度权重函数对单个和所有色调环的预测性能均不理想。由于彩度容差与色调角之间存在一定的色调依赖性,而 LCD 的彩度权重函数引入了考虑彩度容差和色调角依赖性的参数 S_{CH} ,因此 LCD 对单个和总体的彩度容差预测性

表 3 色差公式明度权重函数的预测性能(单位, $PF/3$)

Table 3 The prediction performances of the lightness weighting functions (unit, $PF/3$)

Hue circle	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
L50C20S	7.35	7.34	7.62	7.35	7.34	7.23
L50C20M	6.68	6.71	7.60	6.68	6.71	6.41
L50C20L	6.12	6.17	7.68	6.12	6.16	5.78
L30C20S	7.33	7.33	7.60	7.33	7.33	7.86
L70C20S	8.53	8.54	8.72	8.53	8.55	8.78
L50C10S	4.76	4.72	5.17	4.76	4.73	4.68
L50C30S	6.56	6.49	6.77	6.56	6.52	6.45
All	18.36	29.51	27.30	18.36	20.32	15.68

表 4 色差公式彩度权重函数的预测性能(单位, $PF/3$)Table 4 The prediction performances of the chroma weighting functions (unit, $PF/3$)

Hue circle	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
L50C20S	24.41	24.43	27.04	24.43	16.96	27.23
L50C20M	23.32	23.22	29.76	23.22	17.31	29.87
L50C20L	18.95	18.83	28.54	18.83	12.91	29.80
L30C20S	27.30	27.40	30.85	27.40	19.98	31.23
L70C20S	21.32	21.59	23.20	21.58	14.61	23.70
L50C10S	25.53	25.17	28.23	25.26	20.47	25.86
L50C30S	32.98	33.12	35.29	33.15	25.71	35.27
All	34.93	32.53	35.96	32.23	27.00	36.11

表 5 色差公式色调权重函数的预测性能(单位, $PF/3$)Table 5 The prediction performances of the hue weighting functions (unit, $PF/3$)

Hue circle	CIELAB	CMC	BFD	CIE94	LCD	CIEDE2000
L50C20S	39.30	40.45	38.06	39.34	32.44	31.42
L50C20M	30.25	37.08	29.58	30.26	24.51	27.23
L50C20L	31.43	39.46	31.86	31.43	26.85	29.38
L30C20S	42.28	44.12	42.13	42.19	36.32	33.79
L70C20S	43.21	43.84	43.46	43.14	36.26	33.60
L50C10S	32.87	37.41	32.98	32.90	28.19	26.15
L50C30S	40.50	43.99	38.07	40.47	34.20	34.56
All	43.82	46.61	41.73	42.61	37.23	36.80

能明显优于其它色差公式。各色差公式彩度权重函数对色调环 L50C30S 的预测性能均为最差,表明高彩度刺激色样的彩度容差与色差公式计算值之间的一致性存在较大偏差。

而对于色调容差,无论是单个或全部色调环, CIEDE2000 和 LCD 的色调权重函数的预测性能仍为最优,其主要原因是 CIEDE2000 和 LCD 的色调权重函数均考虑了色调容差与色调角之间的依赖性。而 CMC 的预测性能最差,其余 3 个色差公式则相差不多。

4 结 论

本文通过心理物理实验在 3 个不同明度水平和 3 个不同彩度水平的色调环上测定了不同视觉尺度的明度、彩度和色调容差,并对 6 个基于 CIELAB 的典型色差公式的权重函数预测能力进行了详细的分析和评价。各色差公式的明度权重函数均较理想,其中 CIEDE2000 略优。考虑了彩度容差与色调角依赖性的色差公式 LCD 其彩度权重函数明显优于其它公式。CIEDE2000 和 LCD 的色调权重函数优于其它公式,表明在色调权重函数中考虑色调角依赖性科学有效的。因此在色差评价模型的研究中,有必要深入探讨彩度和色调容差与色调角的依赖性,以进一步提高彩度和色调差的预测准确性。

参 考 文 献

1 R. G. Kuehni. CIEDE2000, milestone or final answer[J]. *Color*

Res. Appl., 2002, **27**(2): 126~127

- 2 Y. Qiao, R. S. Berns, L. Reniff *et al.*. Visual determination of hue suprathreshold color-difference tolerances [J]. *Color Res. Appl.*, 1998, **23**(5): 302~313
- 3 M. Melgosa, R. Huertas, A. Yebra *et al.*. Are chroma tolerances dependent on hue-angle[J]. *Color Res. Appl.*, 2004, **29**(6): 420~427
- 4 D. H. Kim, J. H. Nobbs. New weighting functions for the weighted CIELAB colour difference formula[C]. *Proc. Colour 97 Kyoto*, 1997, **1**: 446~449
- 5 M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formulae: CIEDE2000[J]. *Color Res. Appl.*, 2001, **26**(5): 340~350
- 6 Wang Zhehong, Xu Haisong. Investigations for weighting functions of color-difference formulae based on small suprathreshold color-differences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1215~1219
- 汪哲弘,徐海松. 基于阈上小色差的色差公式权重函数研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1215~1219
- 7 A. R. Robertson. The CIE 1976 color-difference formulae[J]. *Color Res. Appl.*, 1977, **2**(1): 7~11
- 8 CMC Colour-Difference formula[R]. *Color Res. Appl.*, 1984, **9**(4): 250
- 9 M. R. Luo, B. Rigg. BFD(1;c) colour-difference formula part 1-development of formula[J]. *J. Soc. Dyers Col.*, 1987, **103**(1): 86~94
- 10 L. D. Griffin, A. Sephri. Performance of CIE94 for nonreference conditions[J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(2): 108~115
- 11 Liao. Ningfang, Shi Junsheng, Zeng Hua *et al.*. Analysis of interactive errors in conventional CRT colorimetric prediction model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 133~138
- 廖宁放,石俊生,曾华等. 传统阴极射线管色度预测模型的相干误差分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 133~138
- 12 H. Xu, H. Yaguchi, S. Shioiri. Correlation between visual and colorimetric scales ranging from threshold to large color difference [J]. *Color Res. Appl.*, 2002, **27**(5): 349~359
- 13 S. S. Guan, M. R. Luo. Investigation of parametric effects using small colour-differences[J]. *Color Res. Appl.*, 1999, **24**(5): 331~343