

彩色数字图像色差计算方法的研究

刘浩学¹ 黄 敏¹ 武 兵¹ 崔桂华^{2*} 罗 明³

¹ 北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600
² VeriVide Limited, Leicester, LE19 4SG, UK
³ 浙江大学颜色与影像技术研究中心, 浙江 杭州 310027

摘要 用 5 幅 ISO SCID 图像在 EIZO CG19 显示器上分别进行了两组图像色差等级评价实验。两组实验分别在室内自然照明环境和标准灯箱中进行,用目视评价实验数据检验并优化彩色图像色差的计算公式。用 CIELAB、CIEDE2000、CIE94 和 CMC 色差公式对第一组实验数据计算结果表明,现有色差公式计算的图像明度差和彩度差与实际色差感觉有明显的系统性差异,图像内容对计算色差与色差感觉的关系有一定影响,说明需要对原始色差公式进行改进。提出了用实验数据拟合直线斜率比值优化色差公式的方法,得到 CIELAB(1.50:1)、CIEDE2000(2.29:1)、CIE94(3.04:1)和 CMC(3.38:1)计算的色差比原始公式有明显的改善,其中 CIEDE2000(2.29:1)计算结果受图像内容的影响最小。用第二组实验数据检验色差公式的优化效果也证明,这种优化方法准确,简单,具有普遍适用性。

关键词 视觉、色彩与视觉光学;色差等级;图像色差计算;色差公式;色差公式优化

中图分类号 O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0933001

Study of Color Difference Evaluation in Color Digital Images

Liu Haoxue¹ Huang Min¹ Wu Bing¹ Cui Guihua² M. Ronnier Luo³

¹ School of Printing and Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China
² VeriVide Limited, Leicester, LE19 4SG, UK
³ Color and Image Technology Research Center, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Two psychophysical experiments, experiment I and experiment II, were conducted to test color difference calculation method in images. Five ISO SCID images were used as test images and the test image pairs were displayed on EIZO CG 19 monitors. The computed color difference with CIELAB, CIEDE2000, CIE94 and CMC formulae showed that the calculated color difference in lightness and chroma attributes behaved very differently and the color image contents had some effects on the color sensation. An optimization method of color difference formulae is proposed based on the experiment I data. The optimized formulae CIELAB(1.50:1), CIEDE2000(2.29:1), CIE94(3.04:1) and CMC(3.38:1) perform much better than the original one and CIEDE2000(2.29:1) is the best among the four. The optimized formulae are also tested by the experiment II data, which proves that the optimized method proposed is accurate, simple and practical.

Key words vision, color and visual optics; color-difference scale; color-difference calculation of image; color-difference formula; optimization of color-difference formula

OCIS codes 330.1730; 330.1690; 330.1715; 330.1710

1 引 言

随着各种显示媒体技术的发展,彩色图像在信

息传播中的作用越来越重要。彩色图像不再仅以印刷品的形式呈现,而更多的是以数字形式在显示器、

收稿日期: 2012-03-12; 收到修改稿日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61040066)和北京市教委科技面上项目(KM201210015001)资助课题。

作者简介: 刘浩学(1953—),男,教授,主要从事颜色科学与影像技术、印刷工程等方面的教学与研究。

E-mail: liuhaoxue@bigc.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: guihua.cui@gmail.com

电视、手机和平板电脑等设备上呈现,因而非常有必要对这些显示图像的颜色感觉进行评价,研究显示图像颜色差别对颜色感觉的影响,建立能够模拟颜色感觉的色差计算方法。

由于图像是由大量不同颜色的像素点构成,是不均匀颜色样品,既不能用颜色测量仪器直接测量,也比均匀颜色样品颜色的计算复杂,目前还未形成统一的计算方法,因而成为当前的研究热点之一。国际照明委员会(CIE)在2011年10月发布了《图像色差评价方法》的技术报告,报告了当前图像色差研究的进展,并归纳了图像色差阈值的研究成果,给出了用图像阈值色差实验数据优化色差公式的结果^[1]。CIE技术报告中也对S-CIELAB色差公式^[2]评价图像色差的效果做了分析,证明S-CIELAB公式仅对评价图像噪声和图像压缩损失产生的色差计算有效,对图像颜色变化的评价效果不好。

CIELAB等目前常用的色差公式是否能够用于计算图像色差以及如何应用这些色差公式评价图像色差是本研究的目标。分别在EIZO CG19液晶显示器(LCD)上对显示图像做了两组图像色差等级评价实验,一组实验在室内自然照明环境下进行,通过照度测量控制环境光稳定在一定范围,相当于CIECAM02中的“平均”水平;另一组实验在CPC-8标准灯箱内进行,分别用D65和D50模拟光源作为

观察条件的环境光。用这两组实验数据检验常用色差公式计算图像色差的效果并对色差公式进行改进。

2 实 验

用5幅ISO SCID 400标准图像N2、N3、N4、N5和N7^[3](如图1)作为测试图像,这些图像包括了风景、人物和静物等类型,包含了高彩度和低彩度、高光和暗调以及记忆色等典型颜色,具有一定的代表性。分别对明度和彩度两个视觉属性进行线性变换和指数变换处理,其中明度与彩度单独改变各8个等级,共同改变4个等级,每幅图像有20个色差等级,具体的变换参数如表1所示^[4]。表中第一列为变换函数,其中 k 与 a 分别为线性变换和指数变换的参数, V_{in} 和 V_{out} 分别为图像各像素变换前后的颜色值,颜色值先通过sRGB将RGB值转换为CIEXYZ,再由CIELAB值转换为明度 L^* 、彩度 C^* 和色调角 h^* 。第二、第三列分别是彩度和明度变换的参数值,最后两列是彩度与明度同时变换时的参数,其中一个色差等级分别使用了两个不同的线性变换函数。逐像素计算原始图像与变换图像的色差,用各像素色差的平均值代表图像的色差等级。CIELAB色差的计算公式为

$$\Delta E = \frac{\sum_{0 \leq i \leq M} \sum_{0 \leq j \leq N} [(L_{1ij}^* - L_{2ij}^*)^2 + (a_{1ij}^* - a_{2ij}^*)^2 + (b_{1ij}^* - b_{2ij}^*)^2]^{1/2}}{MN}, \quad (1)$$

式中 M 和 N 为图像的横纵两个方向的像素数。其它色差公式的计算与(1)式相同。

将制作好的目视评价图像样品对按随机顺序并列显示在EIZO LCD上,LCD分辨率为1280 pixel×

1024 pixel,图像的背景为70%明度灰色,观察距离约450 mm,由观察者根据色差感觉为每一对图像给出一个0~4的目视色差等级。确定色差等级的规则如表2所示。

表1 图像颜色变换参数

Table 1 Transform function and coefficients

Function	Parameter (C^*)	Parameter (L^*)	Parameter (C^* & L^*)	
			C^*	L^*
$V_{out} = kV_{in}$	0.85	0.95		
	0.70	0.85	0.92	
$V_{out} = kV_{in} + 255 \cdot (1 - k)$	0.95	0.95		0.92
	0.98	0.65	1.02	1.05
$V_{out} = 255 \cdot \left(\frac{V_{in}}{255}\right)^a$	1.02	0.85	0.90	0.85
	1.15	1.15	0.85	0.90
	1.25	1.25		
	1.30	1.35		



图 1 目视评价所用 ISO SCID 400 图像。(a) N2; b) N5; (c) N3; (d) N4; (e) N7

Fig. 1 ISO SCID 400 images in the experiments.

(a) N2; (b) N5; (c) N3; (d) N4; (e) N7

表 2 目视色差判断等级

Table 2 Color difference grading rules for visual evaluation experiment

Colour perception	Category
No difference	0
Just perceptible difference, which is indistinct	1
Weak difference, which is ensured to exist	2
A little obvious difference, which is acceptable	3
Obvious difference, which is not acceptable	4

Note: 1. If the difference is considered between the two levels, a decimal could be scored, such as $\Delta V=2.8$.

Note: 2. If the difference is considered to be greater than level 4, the score could be recorded above 4 based on the colour sense scale, such as $\Delta V=5.5$

有 12 名观察者参加了第一组实验(6 男 6 女, 平均年龄 26.3 岁), 每对图像评价 3 次, 共获得 3600 个(5 幅 \times 20 个变换等级 \times 12 人 \times 3 次重复) 实验数据^[5]。第二组实验有 19 名观察者, 其中男生 10 人, 女生 9 人, 观察者的平均年龄为 22 岁。实验中只取 N2、N3、N5 和 N7 作为测试图像, 去掉了彩度与明度一起改变的色样, 并且增加了 4 对无色差图像对, 总共得到 12920 个(17 对 \times 5 幅 \times 10 次 \times 19 人) 评价数据^[6]。

3 实验结果及讨论

3.1 主客观实验结果的相关性

将第一组实验中各测试图像的 CIELAB(1:1)

计算色差为横坐标, 12 名观察者相应的目视评价色差等级平均值为纵坐标, 考察计算色差与色差感觉的相关性, 如图 2 所示。图中的实验数据按测试图像分类, 不同图像的实验结果用不同的点型表示, 直线为计算结果与目视色差等级的线性拟合, 5 幅图像拟合直线的参数如表 3 所示。表 3 中 Slope 代表图像色差感觉等级随计算色差改变的规律, R^2 是拟合直线的相关系数, 表示实验数据点围绕直线的离散情况, R^2 越接近 1 说明数据点与直线的相关性越高, 表明计算色差越接近目视色差, 即计算效果越好。Intercept 是拟合直线在纵坐标轴上的截距, 由图 2 及表 3 的数据都可以看出截距不为 0, 说明即使测试图像无色差, 观察者也判断两幅图像颜色有差别, 这可能是由于观察者心理预期或图像色差阈值不确定区间所致, 为此在第二组实验中专门安排了无色差的颜 色对, 用来检验观察者心理预期值和拟合直线的截距。由实验数据可以得出以下几点:

1) 用 CIELAB(1:1) 色差公式计算的色差值与图像色差感觉之间具有一定的线性相关性, 随着计算色差值的改变, 色差感觉也相应变化。尽管实验数据有一定的分散, 但相关系数 R^2 远远大于本实验条件下的相关系数临界值 0.315, 说明线性关系显著。使用 S-CIELAB 公式计算的结果差于 CIELAB(1:1) 的计算结果^[4,5], 与 CIE 技术报告的结论一致。

2) 各图像的拟合直线的斜率和截距具有一定的差别, 说明图像内容对计算色差和色差感觉有一定的影响, 对于不同图像相同的计算色差值引起的感觉有略微的差别。特别是 N4、N5 的彩度比较小而且非彩色的面积比较大, 与其它 3 幅高彩度图像的实验结果具有不同的规律, 斜率明显分成了 0.36 和 0.29 两组。

3) 实验点的离散性说明计算色差与实际色差

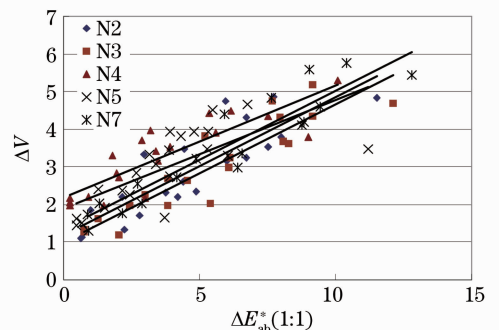


图 2 计算色差与目视色差的相关性

Fig. 2 Correlation of calculated and visual color difference

感觉有一定的差别。如果某个色差公式或计算方法使实验结果数据点的离散性减小,提高了相关系数 R^2 的值,则说明该计算公式的效果更符合实际色差感觉。为此用实验数据检验了 CIEDE2000(1:1)、CIE94(1:1)和 CMC(1:1)色差公式的计算效果,如图 3~5 所示。从图中拟合直线可以看出, CIEDE2000(1:1)和 CIE94(1:1)拟合直线的斜率趋于一致,说明这两个色差公式的计算结果降低了与图像内容的相关性。但从图中的数据点也可以明显看出,图中的数据点比图 2 中用 CIELAB(1:1)色差公式计算的离散性更大,这可以从表 4 中拟合直线参数中看出,拟合直线的相关系数 R^2 都有一定程度的降低,甚至低于临界值,说明用该公式计算的色差与感觉色差一致性有所下降。CMC(1:1)计算的效果在 4 个公式中最差。

表 3 CIELAB(1:1) 色差与实验数据拟合直线参数

Table 3 Parameter of fitted line of experimental data with $\Delta E_{ab}^*(1:1)$

	Slope	Intercept	R^2
N2	0.368	1.172	0.742
N3	0.364	1.017	0.837
N4	0.297	2.192	0.737
N5	0.287	1.896	0.508
N7	0.368	1.341	0.857

表 4 不同色差公式计算效果的检验

Table 4 Performance of different color difference formulae

	CIEDE2000(1:1)			CIE94(1:1)			CMC(1:1)		
	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2
N2	0.37	1.68	0.49	0.27	1.92	0.37	0.23	1.93	0.37
N3	0.39	1.61	0.55	0.27	1.88	0.42	0.19	2.01	0.38
N4	0.37	2.19	0.78	0.28	2.34	0.67	0.30	2.21	0.78
N5	0.37	2.04	0.45	0.22	2.30	0.30	0.34	1.96	0.49
N7	0.39	1.98	0.56	0.28	2.23	0.42	0.22	2.33	0.39

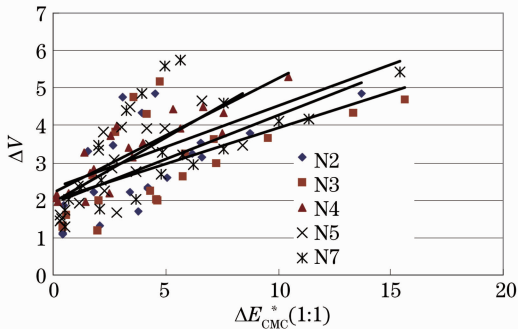


图 5 CMC(1:1) 计算色差与目视色差的相关性
Fig. 5 Correlation between $\Delta E_{CMC}^*(1:1)$ and visual color difference

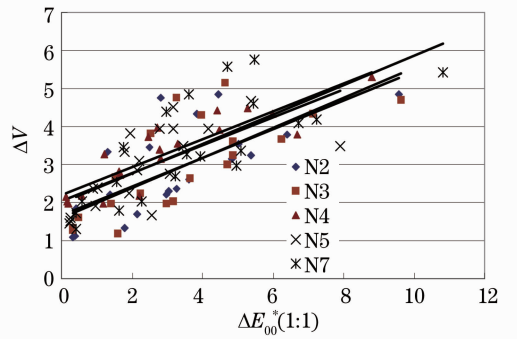


图 3 CIEDE2000(1:1) 计算色差与目视色差的相关性
Fig. 3 Correlation between $\Delta E_{00}^*(1:1)$ and visual difference

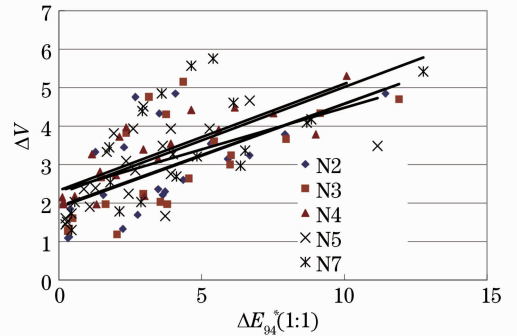


图 4 CIE94(1:1) 计算色差与目视色差的相关性
Fig. 4 Correlation between $\Delta E_{94}^*(1:1)$ and visual difference

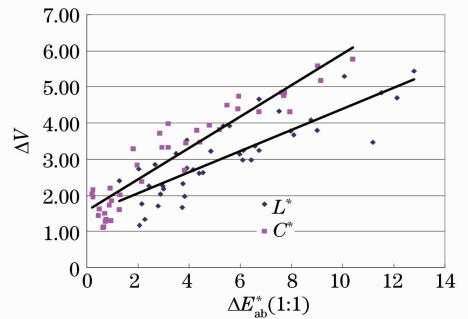


图 6 实验数据按明度和彩度与 CIELAB(1:1) 计算色差拟合的相关性
Fig. 6 Difference between lightness and chroma in $\Delta E_{ab}^*(1:1)$

为了分析实验数据离散性的原因,将单独改变明度和彩度的实验数据分开进行线性回归,结果如图6所示。从图中可以明显看出,用CIELAB(1:1)公式计算的明度色差和彩度色差所对应的色差感觉规律很不一样,两个视觉属性的实验值形成了两个截然不同的分支,拟合直线的斜率分别为0.44和0.29,说明对CIELAB(1:1)彩度差的感觉要明显高于明度差。另外还可以看出,明度与彩度分开拟合的相关系数 R^2 也有了一定提高,数据的离散性得

表5 不同色差公式彩度与明度回归直线参数

Table 5 Parameters of the best fitted linear equation of lightness and chroma for different color difference formulae

	CIELAB(1:1)			CIEDE2000(1:1)			CIE94(1:1)			CMC(1:1)		
	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2
C^*	0.44	1.56	0.88	0.85	1.52	0.91	0.90	1.52	0.91	0.84	1.42	0.92
L^*	0.29	1.48	0.72	0.37	1.47	0.76	0.30	1.48	0.72	0.25	1.64	0.68
C^*/L^*	1.50			2.29			3.04			3.38		

3.2 色差公式的优化

根据前面的讨论可以发现,目视色差等级与明度及彩度计算色差有明显的差异,表现为实际色差感觉对计算的明度差和彩度差具有不同的权重。对于均匀颜色样品来说,用实验数据优化色差公式通常使用拟合色差椭圆的方法,但对应彩色图像的色差数据来说这种方法难以实现^[7,8]。从数学上说,如果计算色差在各视觉属性上与色差感觉一致,则目视色差数据与计算色差的拟合直线应该重合在一起,即图6中彩度与明度的拟合直线相重合。也就是说,可以通过调整两条不同视觉属性的拟合直线斜率,使二者斜率相同并重合到一起修正色差公式。为此,计算表5中各色差公式彩度拟合直线与明度拟合直线的比值,将此比值作为色差公式修正系数。按此方法各色差公式计算出来的修正系数如表5最下面一行数据所示。

图7~10为用优化后的CIELAB(1.50:1)、

表6 优化后色差公式彩度与明度回归直线参数

Table 6 Parameters of fitting lines for optimized color difference formulae

	CIELAB(1.50:1)			CIEDE2000(2.29:1)			CIE94(3.04:1)			CMC(3.38:1)		
	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2	Slope	Intercept	R^2
C^*	0.44	1.56	0.88	0.86	1.51	0.91	0.90	1.53	0.91	0.83	1.43	0.92
L^*	0.43	1.48	0.72	0.83	1.46	0.76	0.88	1.47	0.72	0.81	1.63	0.68

从图7~10还可以看出,优化后CIELAB(1.50:1)的明度与彩度直线最接近,计算的明度差和彩度差在感觉上很接近,而其他3个公式的两条直线分开的要略大一些,但是这三个公式计算的回归相关系数都高于CIELAB(1.50:1),说明数据的离散程度更低,拟合效果更好。另外,CIELAB(1.

到了改善。用其它色差公式按视觉属性进行计算也得到了类似的结果,结果总结在表5中。从表中数据也可以看出彩度与明度变化的斜率有着很大的差别,分别计算彩度和明度后的相关系数 R^2 得到了很大程度的提高,说明图2~5中数据点分散的原因主要由彩度和明度感觉规律不同所致,同时也说明对色差公式的系数进行优化可以提高计算结果与色差感觉的相关性。

CIEDE2000(2.29:1)、CIE94(3.04:1)和CMC(3.38:1)色差公式的计算色差与实验结果的相关性。从图可以看出,用系数优化后色差公式计算的色差已经基本消除了明度与彩度感觉间的差别,明度和彩度的拟合直线几乎重叠在一起,说明实际色差感觉与计算的色差趋于一致,两条直线越接近重合说明计算明度差和彩度差与实际感觉越一致。从表6中优化后拟合直线的参数可以看出,色差公式系数优化的效果是将明度回归直线的斜率提高,使其趋近于彩度回归直线,而彩度色差数据及回归直线保持不变。对比表6和表5的对应数据还可以发现,色差公式优化前后的线性回归相关系数 R^2 完全没有改变,直线的截距也基本没有变化,说明用优化后色差公式计算的结果不会改变原来各色差数据点之间的相互关系,因而拟合的效果不会发生改变,仅仅使明度色差数据整体发生了一个绕坐标原点旋转一定角度的变换。

50:1)色差公式拟合直线的斜率明显低于其它三个公式的结果,而斜率越接近1,说明计算色差与实际色差感觉的变化比例越接近相等。

为了考察优化后色差公式所计算色差与图像内容的相关性,将优化后色差数据按图像排列并重新画图,如图11~14所示。与图2~5比较可以清楚

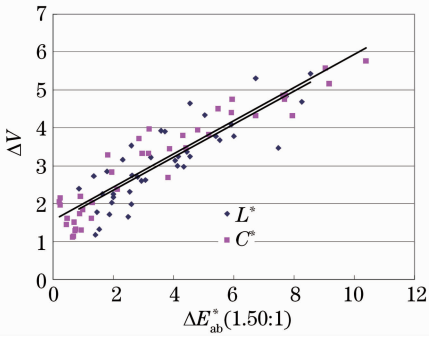


图 7 CIELAB(1.50:1)色差与目视色差的相关性
Fig. 7 Correlation between CIELAB(1.50:1) and visual color difference

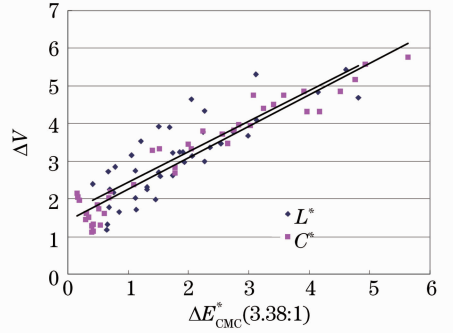


图 10 CMC(3.38:1)计算色差与目视色差的相关性
Fig. 10 Correlation between CMC(3.38:1) and visual color difference

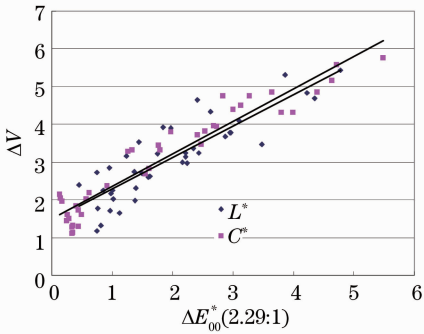


图 8 CIEDE2000(2.29:1)色差与目视色差的相关性
Fig. 8 Correlation between CIEDE2000(2.29:1) and visual color difference

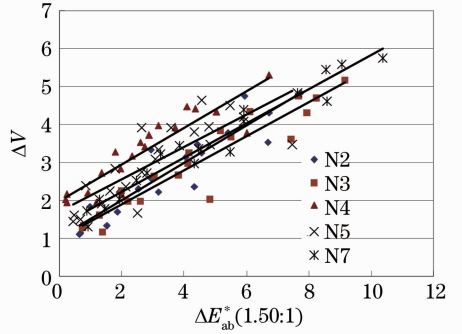


图 11 CIELAB(1.50:1)色差与图像内容的相关性
Fig. 11 Correlation between image color content and CIELAB (1.50:1) calculated color difference

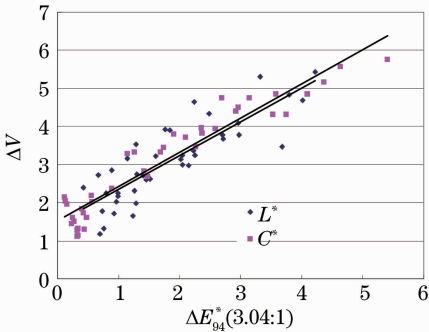


图 9 CIE94(3.04:1)色差与目视色差的相关性
Fig. 9 Correlation between CIE94(3.04:1) and visual color difference

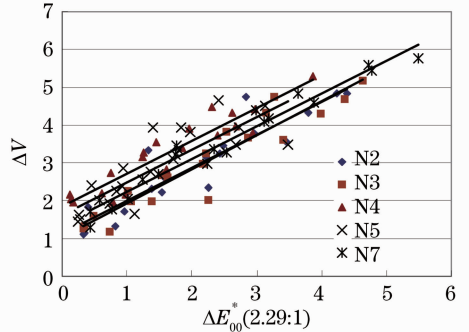


图 12 CIEDE2000(2.29:1)色差与图像内容的相关性
Fig. 12 Correlation between image color content and CIEDE2000 (2.29:1) calculated color difference

看到,优化后色差公式计算的结果使各图像的拟合直线趋于平行,说明对各图像色差等级的变化趋于一致,数据点在直线周围分布较优化前明显集中,数据离散程度得到了很大改善。但是,不同图像拟合直线之间仍然存在一定的差别,体现在直线间的距离上,说明图像内容对色差感觉的影响主要体现在色差阈值的差别上。根据图 11~14 的情况,可以用拟合直线在纵坐标轴上的截距来表示各图像的色差阈值差异,为此将各色差公式数据拟合直线的参数

汇总于表 7 中。

表 7 列出了 4 个优化后色差公式对 5 幅图像拟合直线的参数。可以看出,各图像用同一色差公式计算的色差拟合直线斜率几乎相等,但 CIELAB(1.50:1)的斜率明显低于其他 3 个公式的结果。如果直线斜率等于 1,则主观色差感觉与计算色差的等级相等,若小于 1 则较大计算色差等级对应较小色差感觉。CIELAB(1.50:1)的斜率较小,说明比其他公式的色差单位要小,相同的色差感觉比其他色

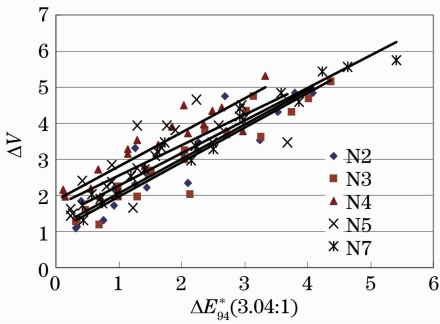


图 13 CIE94(3.04:1)色差与图像内容的相关性

Fig. 13 Correlation between image color content and CIE94 (3.04:1) calculated color difference

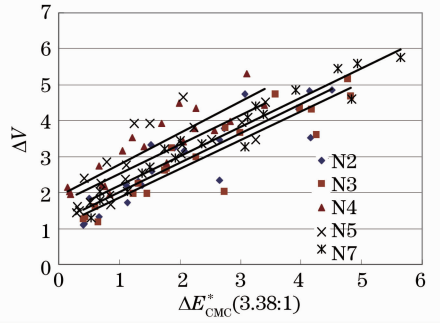


图 14 CMC(3.38:1)计算色差与图像内容的相关性

Fig. 14 Correlation between image color content and CMC (3.38:1) calculated color difference

表 7 不同色差公式计算不同图像的效果对比

Table 7 Performance of different optimized formulae for images

	CIELAB(1.50:1)			CIEDE2000(2.29:1)			CIE94(3.04:1)			CMC(3.38:1)		
	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
N2	0.49	1.00	0.88	0.88	1.12	0.85	0.96	1.10	0.85	0.82	1.19	0.81
N3	0.45	1.00	0.89	0.90	1.03	0.90	0.96	1.01	0.90	0.80	1.07	0.86
N4	0.48	1.98	0.82	0.87	1.85	0.87	0.95	1.86	0.85	0.88	1.89	0.79
N5	0.43	1.70	0.62	0.86	1.63	0.69	0.84	1.72	0.63	0.81	1.72	0.65
N7	0.45	1.33	0.95	0.87	1.36	0.96	0.90	1.37	0.95	0.82	1.37	0.94
Mean	0.46	1.40	0.83	0.87	1.40	0.85	0.92	1.41	0.84	0.83	1.45	0.81
CV / %	5.32	27.55		1.43	22.17		5.02	23.70		3.59	21.50	

差公式对应的计算色差值更大,这点也可以从图中的横坐标刻度看出。对应相同的图像色差感觉, CIELAB(1.50:1)的计算色差范围大于0~10,而其他色差公式的色差范围都在6以内。

对比表 7 和表 3、表 4,优化后的回归相关系数显著提高,说明优化后公式的计算色差更加接近色差感觉。表 7 的最后两行列出了平均值和变异系数(CV),用来对比各图像的计算效果,CV 小说明对各图像的计算结果接近,图像内容对色差计算的影响小。表中 CIEDE2000(2.29:1)的斜率 CV 明显小于其它公式,截距 CV 也仅比最小值 21.50 大了 0.67,说明该公式的表现最好,各图像的拟合直线平行度最高,截距(色差阈值)也很接近。其他三个色差公式的计算效果各有优劣,但 CIELAB(1.50:1)的截距和斜率的离散度都最大,说明受图像内容影响最大。

3.3 优化后色差公式的检验

实验二是一组独立的图像色差等级实验,实验方法类似但观察者完全不同,两实验大约间隔近一年时间^[6,9]。按照明度和彩度属性将实验二结果分类并作图,如图 15~18 所示。对比图 7~10 可以看出两组实验结果非常一致,由此可以说明两组不同实验的结果非常接近。作为与表 6 数据的对比,将图中的回归直线数据列于表 8 中。对比两表的数据

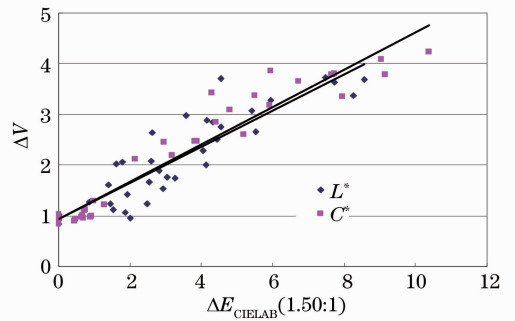


图 15 实验二数据对 CIELAB(1.50:1)色差公式的检验

Fig. 15 Test results of CIELAB(1.50:1) formula with the data of experiment II

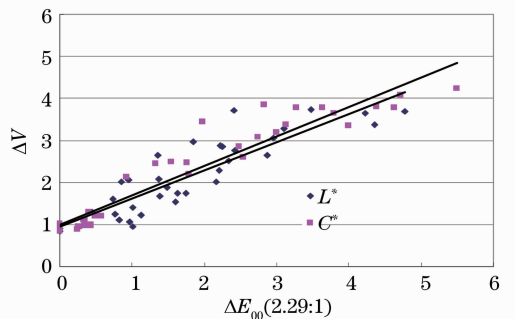


图 16 实验二数据对 CIEDE2000(2.29:1)色差公式的检验

Fig. 16 Test results of CIEDE2000(2.29:1) formula with the data of experiment II

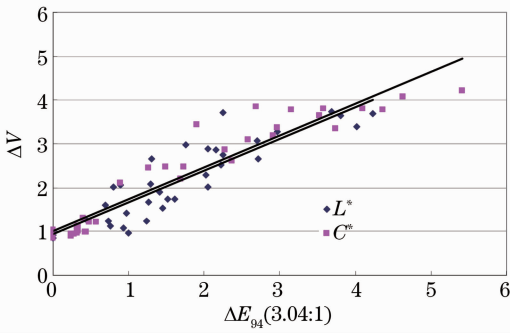


图 17 实验二数据对 CIE94(3.04:1) 色差公式的检验

Fig. 17 Test results of CIE94(3.04:1) formula with the data of experiment II

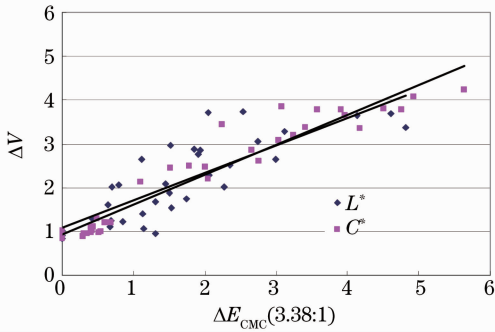


图 18 实验二数据对 CMC(3.38:1) 色差公式的检验

Fig. 18 Test results of CMC(3.38:1) formula with the data of experiment II

可以看出,尽管两组实验的斜率和截距数值不一样,表明两组实验结果有一定偏差,但同一个公式计算的彩度和明度拟合直线斜率几乎相等,说明优化的效果非常明显。

图 15~18 中的拟合直线都与纵坐标轴有交点,而实验一的结果没有交点,代表了观察者对实验二无色差样品对的色差感觉等级,是由于观察者对图像色差预期引起的判断误差。

在 CIE 技术报告中根据已有的阈值实验数据

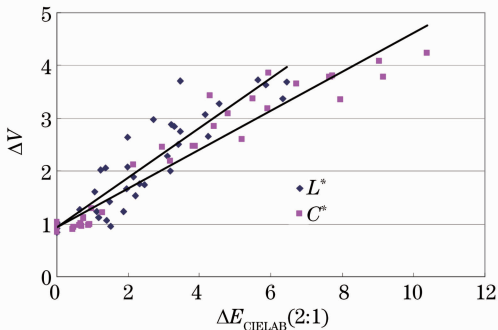


图 19 实验二数据对 CIELAB(2:1) 色差公式的检验

Fig. 19 Test results of CIELAB(2:1) formula with experiment II's data

对色差公式进行了优化^[10~12],推荐使用 $K_L=2$ 进行图像色差的计算^[1]。为进行对比,用 $K_L=2$ 对实验二的数据进行检验,检验使用系数 2 产生的差异大小,结果如图 19~22 所示,相应的计算数据列于表 9 中。与图 15~18 对比可以看出,用 $K_L=2$ 对实验二的数据进行计算的结果要差于优化公式的结果,彩度和明度的拟合直线显著分开,说明计算色差的明度和彩度感觉不一致,而且与优化公式中 K_L 值相差越大,差别就越大,如 CIE94(2:1) 和 CMC

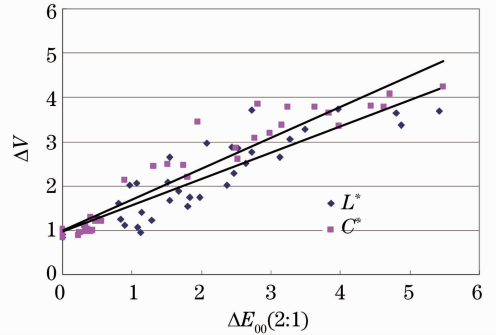


图 20 实验二数据对 CIEDE2000(2:1) 色差公式的检验

Fig. 20 Test results of CIEDE2000(2:1) formula with experiment II's data

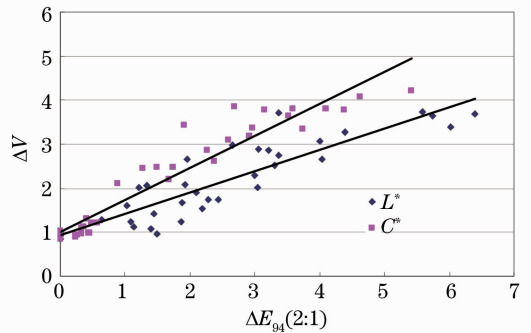


图 21 实验二数据对 CIE94(2:1) 色差公式的检验

Fig. 21 Test results of CIE94(2:1) formula with experiment II's data

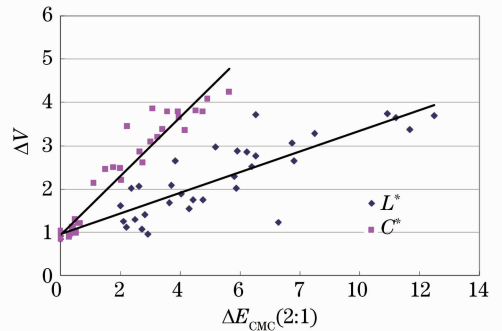


图 22 实验二数据对 CMC(2:1) 色差公式的检验

Fig. 22 Test results of CMC(2:1) formula with experiment II's data

表 8 用优化后色差公式检验实验二的数据

Table 8 Test results of optimized formulae with experiment II's data

	CIELAB(1, 50:1)			CIEDE2000(2, 29:1)			CIE94(3, 04:1)			CMC(3, 38:1)		
	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
C*	0.37	0.94	0.93	0.70	1.00	0.91	0.73	1.00	0.91	0.68	0.93	0.93
L*	0.36	0.94	0.80	0.67	0.96	0.79	0.73	0.93	0.80	0.62	1.10	0.67

表 9 用 $K_L=2$ 色差公式检验实验二的数据Table 9 Test of color difference formulae with $K_L=2$ with experiment II's data

	CIELAB(2:1)			CIEDE2000(2:1)			CIE94(2:1)			CMC(2:1)		
	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²	Slope	Intercept	R ²
C*	0.37	0.94	0.93	0.70	1.01	0.91	0.73	1.00	0.91	0.68	0.94	0.93
L*	0.47	0.94	0.80	0.59	0.96	0.79	0.48	0.94	0.80	0.24	0.95	0.74

(2:1)。其中由于 CIEDE2000 的 K_L 值仅相差 0.29, 因此与优化公式的结果最接近, 说明用 CIEDE2000(2:1) 可以大致代表图像的色差感觉。

对比表 9 和表 8 的数据也可以看出, 用 $K_L=2$ 计算的色差与目视色差等级的彩度和明度拟合直线斜率差别明显拉大, 其中 CMC(2:1) 的斜率差别最大, 而拟合直线的相关系数基本保持不变, 说明计算的明度色差值整体旋转了一个角度, K_L 值的改变不影响与目视实验数据间的关系。

4 结 论

两组不同时间、不同观察者和不同观察环境条件下所做的图像色差等级目视评价实验结果表明, 两组实验的数据具有很好的一致性。对实验数据分析得到了如下结论:

1) 用常规色差公式对相似数字图像逐像素进行色差计算并取色差的平均值可以近似表示图像颜色的色差感觉, 计算色差与色差感觉间具有一定的线性相关性。实验结果表明, 计算的明度差和彩度差具有明显不同的视觉感觉, 因此需要对色差公式进行优化。

2) 用明度和彩度色差感觉分别进行线性回归, 用回归直线的斜率比值作为色差公式修正因子的方法是成功的, 可以显著改善色差公式的计算准确性。用第一组实验数据对色差公式优化的结果表明, CIELAB(1, 50:1)、CIEDE2000(2, 29:1)、CIE94(3, 04:1) 和 CMC(3, 38:1) 与目视色差具有很高的一致性。用第二组实验数据对优化后色差公式的检验证明了优化后色差公式具有普适性。

3) 图像颜色内容对图像色差计算有一定的影响, 不同类型图像用相同方法计算的色差具有略微

不同的色差感觉。用优化后的色差公式计算图像色差可以在一定程度上降低图像内容对计算结果的影响, 其中 CIEDE2000(2, 29:1) 具有最佳的表现。

4) 实验获得的 CIEDE2000 明度因子与 CIE 技术分会 8-02 推荐使用的因子 $K_L=2$ 非常接近, 说明 CIEDE2000(2:1) 基本可以用来预测图像色差感觉。

参 考 文 献

- 1 CIE, CIE Technical Report Method for deriving colour differences in images[R]. CIE 199:2011, ISBN 978 3 902842 38 1. Vienna, Austria; Central Bureau of the CIE, 2011
- 2 X. M. Zhang, B. A. Wandell. A spatial extension of S-CIELAB for digital color image reproduction [C]. Proc. of the SID Symposiums, 1996, 731~734
- 3 ISO. ISO 12640-1: 1997. Graphic Technology—Graphic Technology—Prepress digital data exchange—CMYK standard colour image data (CMYK/SCID) [S]. Geneva: ISO, 1997
- 4 Haoxue Liu, Meng Xie, Min Huang *et al.*. Research on digital image's color-difference by altering lightness and chroma I: analysis of subjective color-difference data set [C]. Proc. The 31st International Congress on Imaging Science, 2010, 216~219
- 5 Xie Meng. Study on Methods of Image Quality Evaluation Based on the Color-Difference Formula [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2010
- 解 萌. 基于色差公式的图像评价方法研究 [D]. 北京印刷学院, 2010
- 6 Linlin Meng, Jinglian Zhang, Haoxue Liu. The research on effect of ambient light on soft proofing [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **174**: 60~63
- 7 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Study on just-noticeable color difference discrimination threshold by using printed samples I: analysis of visual evaluation experimental data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1431~1435
- 黄 敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 I: 目视评价实验数据分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1431~1435
- 8 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Just-noticeable color difference discrimination threshold using printed samples II: analysis and evaluation of color-difference formulae [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1740~1745
- 黄 敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 II: 色差公式分析与评价 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(6):

1740~1745

- 9 Yunlong Hao, Haoxue Liu, Yuandou Chen *et al.*. Research on digital image's color-difference threshold under different lighting levels [C]. 4th International Congress on Image and Signal Processing, Shanghai, 2011, 1753~1757
- 10 M. Stokes. Colorimetric Tolerances of Digital Images [D]. RIT, University of Rochester, 1991

- 11 Tao Song, Ronnier Luo. Testing color-difference formulae on complex images using a CRT monitor [C]. The Eighth Color Imaging Conference, IS&T and SID, Scottsdale, Arizona, 2000, 44~48
- 12 C. Sano, T. Song, M. R. Luo. Colour differences for complex images [C]. The 11th Color Imaging Conference, IS&T and SID, Scottsdale, Arizona, 2003, 121~126

栏目编辑: 李文誌