

一组显示器与打印体对应色数据及其色适应模型评价

吴旭东 石俊生 云利军

(云南师范大学颜色与图像视觉实验室, 云南 昆明 650092)

摘要 通过视觉匹配实验获得显示器(CRT)与打印体之间相同与不同色温下一组对应色数据,采用偏差分析了实验数据的可靠性,利用实验数据与已有的跨媒体对应色数据对 Von Kries,CMCCAT2000 和 CAT02 三种典型色适应变换和 CIECAM02 色貌模型的表现进行了评价和比较。结果表明,Von Kries 与 CMCCAT2000 色适应模型表现相同,CMCCAT2000 色适应变换模型的表现好于 CIECAM02 色貌模型,CIECAM02 色貌模型的表现要好于 CAT02 色适应变换模型。结果与三种色适应变换和 CIECAM02 色貌模型在同种媒介中的表现不一致,这与模型改进过程中选择的数据以同种媒介对应色数据居多有关,而实验获得的对应色数据和对色适应评价结果将为跨媒体颜色再现中色适应模型及色貌模型的改进提供依据。

关键词 色度学;色貌模型;色适应变换;视觉匹配实验;对应色数据

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0533001

New Set of Corresponding Colors Data between Monitor and Printer and Evaluation of Chromatic Adaptation Transforms

Wu Xudong Shi Junsheng Yun Lijun

(Color and Image Vision Laboratory, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China)

Abstract A new set of corresponding-colors data between monitor and printer is obtained from a series of visual color matching experiments, and the data's reliability is analyzed with deviation. The new corresponding colors data and the Braun and Fairchild data are used to test the performance of three chromatic adaptation transforms (i.e. Von Kries, CMCCAT2000 and CAT02) and the CIECAM02 color appearance model. The results show that Von Kries and CMCCAT2000 have the same performance, the CMCCAT2000 gives more accurate prediction than the CIECAM02, and the CIECAM02 gives more accurate prediction than the CAT02. The results are not consistent with the performance of three chromatic adaptation transforms and the CIECAM02 in predicting the corresponding colors for the same media. Previous study of chromatic adaptation transform and CIECAM02 use mainly the corresponding colors data for the same media. The new set of corresponding colors data and the results will provide a reference for the improvement of chromatic adaptation transforms and color appearance model of CIECAM02.

Key words colorimetry; color-appearance model; chromatic adaptation transform; visual matching experiment; corresponding-colors data

OCIS codes 330.0330; 260.0260; 120.0120

1 引 言

色貌模型是近年来颜色科学技术研究的重点和热点,成为现代色度学的标志。2004 年国际标准照明委员会(CIE)公布了 CIECAM02 模型^[1],但其模

型本身仍存在一些问题^[2],而且也不是一个能满足所有颜色应用的模型,色貌模型的改进及其应用研究仍将是未来研究的重点。CIECAM02 代表了一般色貌模型的处理步骤,可概括为三个步骤:1)将输

收稿日期: 2010-10-21; **收到修改稿日期**: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(60668001)资助课题。

作者简介: 吴旭东(1980—),男,硕士研究生,主要从事颜色科学与视觉技术等方面的研究。

E-mail: wxdhhb2008@163.com

导师简介: 石俊生(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事颜色、图像与视觉科学等方面的研究。

E-mail: shi-js@263.net (通信联系人,中国光学学会会员号: S040420574M)

人的刺激 CIEXYZ 变换到色适应基元空间进行色适应变换,这个过程模拟视觉适应;2)变换到锥响应基元空间进行依赖于绝对适应亮度的非线性处理,模拟锥细胞非线性压缩;3)在对立色坐标基础上计算色相、明度、视明度、彩度、视彩度和饱和度等颜色感知属性。任何色貌模型都是模拟人眼视觉系统颜色感知过程,都是以心理物理学视觉实验数据为基础。视觉实验数据包括两类:1)是对应色数据,用于建立色适应变换模型;2)色貌数据,用于量化感知色貌属性。

现有大部分的对对应色数据多为同一种媒介,特别是反射体之间得到的。如 Lam 的对对应色数据是 58 块毛织染色样品在 A 和 D65 两种不同的光源下实验获得的^[3],McCann 对对应色数据是 Mondrian 图片和孟塞尔色卡在不同光源下通过匹配实验获得的^[4],CSAJ,LUTCHI,Helson 和 Kuo & Luo 对对应色数据也是用反射媒介得到的^[5~8]。对于发光机制不同的媒介,如最常应用的自发光显示器和反射光打印体的对应色数据则较少,用于研究使用最多的是一组 Braun & Fairchild 跨媒体对应色数据^[9]。而 Braun & Fairchild 数据是对两幅包括复杂刺激的图像得出的显示器和打印体对应色数据,图像刺激中目标和背景比较复杂难以准确描述,对精确的

色貌量化不利。为了补充用于色适应变换、色貌模型以及跨媒体颜色再现研究的对应色数据,本文采用心理物理学视觉实验,得到简单白背景下显示器和打印体两种不同媒介、在相同和不同色温下 17 种颜色的一组对应色数据,并验证实验数据的可靠性,同时使用实验得到的数据对 Von Kries,CMCCAT 2000 和 CAT02 三种典型色适应变换和 CIECAM02 色貌模型的表现进行评价,并与使用 Braun & Fairchild 对应色数据的评价进行比较。

2 视觉匹配实验

2.1 打印样本制作

获得对应色数据的视觉匹配实验是在显示器(CRT)上匹配打印体,所以需要先准备打印样本。实验选取了 1995 年 CIE 在色差评价中推荐的 17 种颜色作为显示器与打印体的对应色研究^[10],包括了 9 种色调、亮度与彩度的变化。打印样本是由 Epson Me1+四色普通彩色喷墨打印机,采用原装墨水和标准彩色打印纸张制作大小为 4 cm×4 cm 的色块。打印机首先采用线性回归方法特性化,目的使打印颜色与颜色中心尽量一致。打印出的 17 种颜色 CIELAB 值如表 1 所示。

表 1 打印体 17 种颜色色样在灯箱 D65 光源下的 CIELAB 色度值

Table 1 CIELAB chrominance value of 17 printer colors under D65 light source

Color number	Color	L^*	a^*	b^*
1	Grey	66.52	2.54	-1.19
2	Red	43.51	35.14	25.45
3	Red, high chroma	54.12	54.57	32.90
4	Orange	68.95	14.60	18.35
5	Orange, high chroma	67.57	37.45	62.65
6	Yellow	87.12	-5.50	48.58
7	Yellow, high chroma	91.14	-6.59	80.95
8	Yellow-green	72.87	-13.83	8.78
9	Yellow-green, high chroma	68.49	-38.22	45.52
10	Green	61.26	-40.47	-2.20
11	Green, high chroma	60.71	-48.56	3.61
12	Blue-green	53.49	-22.06	-22.09
13	Blue-green, high chroma	58.91	-29.72	-27.16
14	Blue	36.47	5.40	-35.20
15	Blue, high chroma	36.20	13.67	-48.96
16	Purple	48.83	16.30	-14.41
17	Purple, high chroma	50.23	35.98	-33.76

2.2 实验设备及观察条件

实验使用 HP-p1130 专业显示器和惠思比灯箱。显示器设置色温为 6500 K 和 9300 K、对比度

为 100%、亮度为 50%;灯箱分别采用 D65 和 A 光源。显示器屏幕设置为灰色,并在调色软件中选 4 cm×4 cm 大小的色块和 20 cm 大小的白背景;灯

箱内壁为中性灰,灯箱中采用的 45/0 几何观测条件使人眼与观察色块成垂直关系。在灯箱中放置大小为 20 cm 白色硬纸板作为背景。在观察灯箱和显示

器上的色块时,观察距离为 115 cm,形成 2°视角,实验在暗室中进行。按照两种媒介采用相同和不同色温,实验分为三项,具体数据及观察条件如表 2 所示。

表 2 显示器与灯箱中打印体颜色匹配观察条件

Table 2 Viewing conditions of CRT display and light booth

Phase	Illuminant / white point	CCT/ CCT /K	Printer /CRT		
			Luminance /maximal luminance / (cd/m ²)	Background / background	Surround /surround
1	D65/6500 K	6091/6517	344.5/94.0	White /white	Average /dim
2	D65/9300 K	6091/8587	344.5/116.0	White /white	Average /dim
3	A/6500 K	2642/6517	213.1/94.0	White /white	Average /dim

2.3 匹配方法

由于灯箱的光源对显示器的观察影响较大,为了避免两个光源之间的影响,在观察者观察打印色块时将 CRT 遮挡,当观察者观察显示器上的复制色块时用帘将灯箱遮挡。因此实验采用了记忆匹配的方法,示意图如图 1 所示。

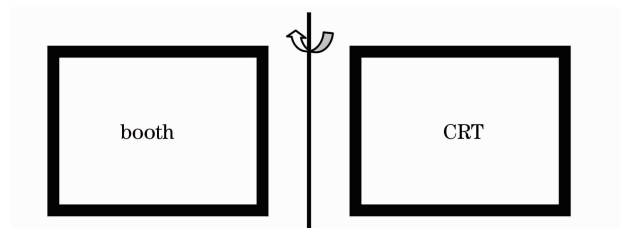


图 1 实验示意图

Fig. 1 Schemes of experiments

1) 实验前的准备

显示器特性化:首先对显示器进行特性化,目的为显示器提供与打印体匹配的显示初值,缩短匹配实验时间。显示器特性化精度在 1 个 ΔE_{ab}^* 左右^[11]。

观察者:7 位色觉正常、视力校正正在 1.2 以上观察者男 4 女 3,年龄在 22~26 岁之间,都是本实验室具有色度学知识的研究生。

记忆匹配训练:实验前必须对观察者进行记忆匹配训练,让其在暗室中,熟悉记忆匹配的流程,并能熟练掌握色块软件的调节使用。观察者记忆的准确性对实验非常重要,因而需要进行必要的记忆训练。训练的方法如下:先在显示器上显示一个色块作为原始色块,适应 60 s 并记忆,然后让其在显示器上从一组色块中选出哪一幅为原始的色块。实验的 7 位观察者均能准确的选择出原始色块。

2) 记忆匹配法的实验步骤

记忆匹配法的实验步骤参考文献[12],步骤如下:

1) 首先要求观察者对灯箱环境下打印色块一

样大小的白纸适应 1 min;

2) 然后记忆灯箱中打印体的色彩外貌,至少记忆 1 min;

3) 待观察者记忆后,将灯箱用帘子遮住,打开已开启的显示器的帘子,适应显示器中心白色块 1 min,根据记忆的打印体的色彩外貌选择满意的色块或调节软件再现原始色块。为了克服显示器的不均匀性,在匹配的过程中显示器上的色块的位置应始终在显示器的正中央不变;

4) 重复 1)~3)直到匹配出满意的效果;

5) 重复 1)~4)进行其他打印体的实验。

2.4 对应色数据

对应色数据使用 Photo Research 公司 PR-715 光谱辐射度计测量色块的 CIEXYZ 值。17 种颜色在相同和不同色温下对应色数据如表 3~5 所示,其中表 3 的观察条件是灯箱 D65 光源与显示器色温 6500 K,表 4 是灯箱 D65 光源与显示器色温 9300 K,表 5 是灯箱 A 光源与显示器色温 6500 K。灯箱光源与显示器白点数据如表 6 所示。

2.5 数据可靠性分析

采用 Breneman 对应色实验数据可靠性分析方法分析本实验数据的可靠性^[13],即通过计算 u' 和 v' 均方根差,均方根差越小越好。通过 7 名观察者匹配分别得到 17 种颜色样本在三项实验的 7 组 XYZ 值,由此可以计算出每个样本的 u' 和 v' 值, u' 和 v' 平均值及 u' 和 v' 均方根差,如表 7~9 所示,三项实验 17 种颜色样本 u' 和 v' 均方根差最大值分别为 4.60×10^{-3} 和 6.90×10^{-3} , 1.30×10^{-3} 和 4.70×10^{-3} , 6.60×10^{-3} 和 5.30×10^{-3} ,比 Breneman 数据 u' 和 v' 均方根差最大值 23×10^{-3} 和 33×10^{-3} 还小。同时还可以计算出 7 名观察者匹配的色块与匹配的平均值之间的色差(具体数据如表 10~12 所示)。由表可见,即 7 名观察者与匹配平均值之间的色差

最大值分别为 4.01, 5.58 和 3.93 个 ΔE_{ab}^* 色差单位 (其中有一位观察者在第三项实验中高彩度黄与其他观察者有一定差距)。由此可以认为 7 个观察者的实验结果基本是一致的, 且这些数据是有效的。

表 3 17 种颜色对应色数据(D65/6500 K)

Table 3 Corresponding colors data of 17 colors (D65/6500 K)

Color number	Printer(D65)			CRT(6500 K)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	35.09	35.99	37.97	32.38	32.77	36.97
2	18.94	13.50	5.90	17.86	12.09	6.03
3	34.66	22.09	8.76	31.98	19.83	7.08
4	42.15	39.27	27.04	42.67	39.46	27.84
5	48.01	37.39	6.94	48.44	37.71	6.28
6	64.59	70.25	27.74	65.81	72.78	31.86
7	72.02	78.78	14.37	70.73	78.57	14.23
8	38.43	44.96	38.75	38.86	46.40	41.61
9	26.44	38.64	12.92	26.11	37.98	13.18
10	19.12	29.55	31.93	21.14	32.03	35.94
11	17.14	28.92	27.38	18.40	30.28	29.25
12	16.31	21.50	36.75	17.84	23.77	45.26
13	19.24	26.93	49.11	22.51	30.55	57.75
14	9.48	9.25	25.52	9.51	8.72	30.53
15	10.38	9.11	34.51	10.69	8.63	41.33
16	19.75	17.46	25.84	17.70	15.43	25.58
17	25.37	18.62	41.65	24.14	17.45	42.38

表 4 17 种颜色对应色数据(D65/9300 K)

Table 4 Corresponding colors data of 17 colors (D65/9300 K)

Color number	Printer(D65)			CRT(9300 K)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	35.09	35.99	37.97	35.42	37.69	46.09
2	18.94	13.50	5.90	18.83	12.89	6.36
3	34.66	22.09	8.76	30.06	17.91	6.99
4	42.15	39.27	27.04	40.61	39.20	34.75
5	48.01	37.39	6.94	45.41	35.51	5.28
6	64.59	70.25	27.74	70.12	79.97	42.83
7	72.02	78.78	14.37	66.65	78.60	19.75
8	38.43	44.96	38.75	39.77	49.49	50.62
9	26.44	38.64	12.92	25.52	41.68	16.13
10	19.12	29.55	31.93	24.64	37.83	49.46
11	17.14	28.92	27.38	21.12	33.25	36.74
12	16.31	21.50	36.75	20.12	26.34	51.65
13	19.24	26.93	49.11	26.79	35.28	68.77
14	9.48	9.25	25.52	10.05	8.85	34.40
15	10.38	9.11	34.51	12.22	9.63	48.28
16	19.75	17.46	25.84	22.13	18.59	39.46
17	25.37	18.62	41.65	28.30	19.21	59.02

表 5 17 种颜色对应色数据(A/6500 K)

Table 5 Corresponding colors data of 17 colors (A/6500 K)

Color number	Printer (A)			CRT(6500 K)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	40.82	34.42	10.47	35.91	36.54	33.24
2	26.85	16.23	2.00	23.66	14.69	2.72
3	49.18	27.73	2.95	40.28	23.06	3.44
4	52.93	39.98	7.79	43.62	38.06	17.93
5	70.67	45.66	3.16	49.76	35.97	4.95
6	74.89	63.59	8.44	68.56	73.16	19.80
7	85.73	72.64	5.54	70.17	75.13	20.81
8	40.81	38.21	10.25	37.45	43.75	34.23
9	29.28	31.90	4.42	29.02	40.30	14.70
10	16.59	21.13	8.44	18.45	27.50	23.69
11	14.50	20.06	7.39	18.49	30.15	23.66
12	12.76	15.09	8.85	13.94	19.14	28.31
13	14.65	19.26	12.55	17.97	25.93	34.76
14	8.10	7.83	6.34	5.02	4.96	13.36
15	6.43	6.37	7.39	6.14	6.00	17.30
16	23.43	17.86	6.93	19.26	16.14	18.17
17	27.55	19.19	9.74	25.05	18.55	26.82

表 6 两种设备的白点数据

Table 6 White spots data of two devices

Device	X	Y	Z
1	CRT	94.23	100.00
	Booth	95.44	100.00
2	CRT	93.12	100.00
	Booth	95.44	100.00
3	CRT	93.38	100.00
	Booth	112.48	100.00

表 7 均方根差评价 7 名观察者的偏差(D65/6500 K)

Table 7 Deviation between 7 observers (D65/6500 K)

Color number	Average of u' and v'		Interobserver variation / 10^{-3}	
	u'	v'	σ'_u	σ'_v
1	0.20	0.46	0.50	2.20
2	0.33	0.50	4.60	1.10
3	0.36	0.51	0.79	0.28
4	0.24	0.49	0.15	0.10
5	0.31	0.54	0.52	0.12
6	0.21	0.52	1.10	1.20
7	0.22	0.55	0.39	0.13
8	0.18	0.49	0.30	0.34
9	0.16	0.54	0.66	0.21
10	0.14	0.47	2.80	2.40
11	0.13	0.49	0.17	0.86
12	0.14	0.42	0.20	1.00
13	0.14	0.42	0.14	0.75
14	0.16	0.34	1.40	6.90
15	0.16	0.29	0.22	0.64
16	0.22	0.43	0.50	0.66
17	0.23	0.38	0.71	0.58

表 8 均方根差评价 7 名观察者的偏差(D65/9300 K)

Table 8 Deviation between 7 observers (D65/9300 K)

Color number	Average of u' and v'		Interobserver variation / 10^{-6}	
	u'	v'	σ'_u	σ'_v
1	0.19	0.46	0.27	0.60
2	0.33	0.50	1.20	0.80
3	0.38	0.50	1.10	0.60
4	0.22	0.48	0.40	2.60
5	0.31	0.54	1.30	0.20
6	0.20	0.51	0.23	0.42
7	0.20	0.54	1.30	0.70
8	0.17	0.48	0.31	0.21
9	0.15	0.54	0.25	0.14
10	0.13	0.46	0.20	1.20
11	0.13	0.47	0.26	0.79
12	0.14	0.42	0.60	4.70
13	0.14	0.42	0.20	1.40
14	0.16	0.32	0.20	2.30
15	0.16	0.29	0.10	3.30
16	0.21	0.40	0.70	1.10
17	0.23	0.35	0.80	1.90

表 9 均方根差评价 7 名观察者的偏差(A/6500 K)

Table 9 Deviation between 7 observers (A/6500 K)

Color number	Average of u' and v'		Interobserver variation / 10^{-3}	
	u'	v'	σ'_u	σ'_v
1	0.21	0.48	1.90	0.70
2	0.38	0.52	0.28	0.15
3	0.41	0.52	0.48	0.12
4	0.26	0.51	0.41	0.20
5	0.33	0.54	6.60	0.80
6	0.22	0.54	4.10	0.70
7	0.22	0.54	2.40	5.30
8	0.19	0.49	0.46	0.52
9	0.17	0.53	0.54	0.23
10	0.15	0.49	0.70	0.91
11	0.14	0.50	0.18	1.00
12	0.14	0.45	0.16	0.74
13	0.14	0.46	0.50	1.10
14	0.17	0.37	0.67	0.44
15	0.17	0.36	0.60	2.10
16	0.24	0.46	0.40	1.50
17	0.26	0.44	0.60	1.50

表 10 用色差评价 7 名观察者与匹配平均值之间的偏差(单位: ΔE_{ab}^*)(D65/6500 K)

Table 10 Color-difference between match values of 7 observers and the average values(unit: ΔE_{ab}^*) (D65/6500 K)

Color number/observer	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
1	1.21	0.31	0.38	1.67	1.80	1.74	0.65
2	1.17	1.47	0.65	0.59	1.00	1.07	2.55
3	0.48	0.16	0.59	0.21	0.18	0.33	0.14
4	0.11	0.06	0.12	0.12	0.18	0.15	0.10
5	0.34	0.23	0.38	0.27	0.14	0.24	0.19
6	1.08	1.61	1.54	1.26	1.78	1.24	3.67
7	0.24	0.42	0.42	0.64	0.35	0.37	0.24
8	0.21	0.68	0.38	0.31	0.21	0.27	0.32
9	0.23	0.56	0.08	0.75	0.76	0.22	0.77
10	0.78	0.93	1.30	1.68	4.01	1.48	2.86
11	0.44	0.54	0.38	0.34	1.04	0.46	1.08
12	0.27	0.92	0.64	0.25	0.55	0.20	0.58
13	0.15	0.04	0.46	0.81	0.32	0.20	0.68
14	0.43	1.62	0.51	0.69	2.52	1.88	3.54
15	0.46	0.22	0.22	0.18	0.09	0.08	0.19
16	0.38	0.41	0.34	0.38	0.28	0.26	0.53
17	0.13	0.39	0.31	0.44	0.40	0.15	0.35

表 11 用色差评价 7 名观察者与匹配平均值之间的偏差(单位: ΔE_{ab}^*) (D65/9300 K)

Table 11 Color-difference between match values of observers and the average values(unit: ΔE_{ab}^*) (D65/9300 K)

Color number/observer	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
1	0.25	0.15	0.56	0.20	0.45	0.53	0.22
2	0.91	0.54	0.28	0.13	0.77	0.26	0.27
3	0.69	0.18	0.39	0.55	0.46	0.31	0.24
4	1.37	1.27	0.21	0.77	4.31	0.57	0.78
5	1.02	0.75	0.51	0.14	0.22	0.15	0.25
6	0.37	0.52	0.56	0.38	0.35	0.64	0.28
7	2.87	0.74	0.47	0.37	0.58	0.67	0.51
8	0.18	0.66	0.27	0.10	0.15	0.12	0.04
9	0.87	0.22	0.55	0.18	0.12	0.60	0.12
10	0.35	0.93	0.31	0.49	1.49	0.23	0.77
11	0.18	0.81	0.62	0.49	0.98	1.18	0.35
12	5.58	0.47	1.24	1.06	1.13	0.94	0.97
13	0.70	1.18	0.49	0.47	0.73	1.00	0.31
14	0.14	0.66	1.28	0.15	1.37	1.11	0.16
15	2.74	0.97	1.49	0.93	0.88	1.31	0.97
16	0.76	0.34	0.58	0.30	0.41	0.32	0.40
17	1.97	0.80	0.85	0.79	0.89	2.04	0.93

表 12 用色差评价 7 名观察者与匹配平均值之间的偏差(单位: ΔE_{ab}^*) (A/6500 K)

Table 12 Color-difference between match values of observers and the average values(unit: ΔE_{ab}^*) (A/6500 K)

Color number/observer	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]
1	0.59	1.02	0.48	1.73	0.55	1.15	2.08
2	0.57	0.39	0.29	0.11	0.14	0.29	1.25
3	0.14	0.10	0.35	0.21	0.19	0.24	0.29
4	0.23	0.24	0.18	0.18	0.53	0.12	0.25
5	2.65	2.54	2.90	3.06	1.97	2.84	1.07
6	1.67	2.91	1.56	4.00	3.54	3.31	3.54
7	3.93	3.65	2.47	2.55	3.52	3.73	19.91
8	0.17	0.30	0.27	0.43	0.44	0.40	1.13
9	0.17	0.25	0.21	1.12	0.23	0.28	0.86
10	0.75	0.67	0.84	1.13	0.38	0.63	0.40
11	0.28	1.01	0.20	0.53	1.18	0.96	0.57
12	0.22	0.27	0.13	0.66	0.58	0.19	0.36
13	0.69	0.59	0.56	0.53	0.16	0.58	1.60
14	0.16	0.15	0.16	0.28	0.17	0.07	0.29
15	0.86	0.47	0.79	1.19	0.29	0.27	0.52
16	0.74	0.95	0.99	0.95	0.82	0.81	0.39
17	0.93	0.21	0.52	1.02	0.35	0.20	0.66

3 对应色数据的相关研究

3.1 对应色数据之间的 CIELAB 色差

7 名观察者在三项实验中对色之间的 CIELAB 色差如表 13 所示。由表可知,在第一项实验,不同颜色对应色色差不尽相同,红、蓝两种颜色的色差较大,特别是高彩度蓝色的色差达到 10.99 个 ΔE_{ab}^* 单位,属于大色差范围。第二项实验的色差比第一项要大一点,但第三项实验的平均色差达到

了 17.81 个 ΔE_{ab}^* 单位,这是由于第三项实验中两种媒介观察白点相差较大。不同颜色的对应色在视觉上是一致的,色差应该为零。对应色 CIELAB 色差不是很小,说明 CIELAB 色差公式在评价色差上有困难。色空间均匀性及色差公式的研究一直是色度学研究的重要课题。

与本文两种媒介在相同白点条件的第一项实验相当的 Braun & Fairchild 实验,给出的图像“fruit”

对应色数据之间 CIELAB 色差的最小、最大和平均色差分别为 3.61, 15.07 和 9.06 个 ΔE_{ab}^* 色差单位(需要说明:这是使用文献中给出的对应色与白点数据计算得到的,文献中给出的数据是 1.33, 6.36, 3.45)。本文的平均色差是 4.27 比 9.06 要小,可能的原因是研究的样本和背景不同, Braun & Fairchild 中的样本和背景是在图像中,其复杂性影响实验者匹配的准确性。

表 13 显示器与打印体对应色之间 CIELAB 色差

Table 13 CIELAB color difference of corresponding colors between CRT and printer

Color number	Printer/CRT		
	D65/6500K	D65/9300K	A/6500K
1	4.00	5.11	8.27
2	6.13	6.46	24.39
3	4.74	9.42	28.12
4	2.78	1.38	15.98
5	4.65	10.8	14.66
6	2.39	5.9	26.60
7	1.77	8.03	7.32
8	1.48	7.15	11.38
9	2.14	11.65	17.08
10	3.03	7.11	21.95
11	3.33	9.03	23.86
12	4.54	6.44	14.4
13	4.58	12.14	25.66
14	9.46	10.53	14.81
15	10.99	11.52	19.96
16	3.85	9.7	11.97
17	2.75	12.37	16.39
Average	4.27	8.51	17.81

3.2 用对应色数据评价色适应模型和 CIECAM02 色貌模型

下面用实验得到的对应色数据比较 Von Kries, CMCCAT2000 和 CAT02 三种色适应模型和 CIECAM02 色貌模型的显示器与打印体跨媒介颜色再现效果,原理如图 2 所示。图中最上方是上面视觉匹配实验已经得到的显示器与打印体对应色数据 XYZ,它们之间存在的色差定义为图中偏差 A。由打印体的 XYZ,通过色适应变换或色貌模型可以预测显示器的 XYZ,预测值与视觉匹配得到显示器的 XYZ 之间的色差(图中偏差 B)作为评价各模型跨媒介颜色再现效果。色适应变换可以直接由打印体预测显示器,而 CIECAM02 色貌模型要通过模型的正、逆变换。并采用相对色貌属性 JCh 进行颜色匹配才能完成预测。

评价数据如表 14~16 所示。可以看出,各模型表现顺序是: Von Kries \approx CMCCAT 2000 > CIECAM02 >

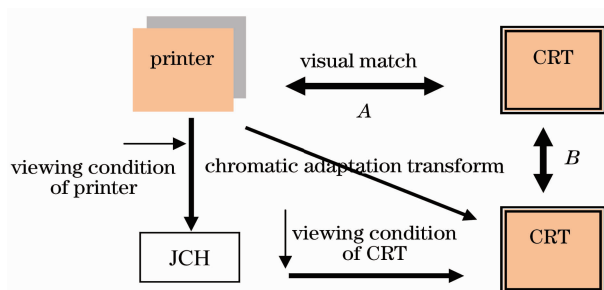


图 2 评价色适应变换及色貌模型变换流程图

Fig. 2 Evaluation flow chart of chromatic adaptation transforms and CIECAM02 color-appearance model

CAT02。Von Kries 和 CMCCAT 2000 色适应变换模型预测的结果基本相同,都好于 CIECAM02 色貌模型,而 CAT02 色适应变换模型的预测最差。从理论上,色适应变换模型没有考虑人眼视觉对明度、彩度、色相属性属性的定量描述,但 CIECAM02 色貌模型表现不佳,说明在 CIECAM02 模型在跨媒体颜色中应用有待进一步研究。

下面与采用 Braun & Fairchild 的显示器与打印体对应色数据评价结果进行比较,表 17 和表 18 是采用图“fruit”第二项和第三项对应色数据对四种模型的评价结果。可以看出,四种模型表现基本相同,与实验数据结果有一定差异,这种差异同样可能是研究的样本和背景不同造成的。

表 14 用色适应模型和 CIECAM02 色貌模型预测颜色与匹配色块的色差(单位: ΔE_{ab}^*) (D65/6500 K)

Table 14 Color difference between the match colors and predicted colors with the chromatic adaptation transforms and CIECAM02 (unit: ΔE_{ab}^*) (D65/6500 K)

Color number	Von Kries	CMCCAT 2000	CAT02	CIECAM02
1	5.09	5.03	7.08	2.38
2	6.35	6.13	6.83	6.44
3	4.74	4.40	5.27	4.11
4	3.06	2.45	5.53	2.92
5	3.64	3.19	5.65	4.14
6	3.09	3.55	11.42	5.04
7	2.60	2.26	10.57	3.21
8	1.01	1.50	9.02	3.51
9	4.97	4.07	6.78	3.10
10	3.33	2.75	4.89	5.87
11	4.61	3.77	3.91	5.42
12	3.53	4.24	8.54	8.42
13	3.33	3.43	4.41	7.33
14	8.07	8.84	9.82	11.46
15	8.71	9.78	10.89	13.12
16	4.38	4.64	7.01	3.75
17	2.75	2.93	5.52	3.89
Average	4.31	4.29	7.24	5.54

表 15 用色适应模型和 CIECAM02 色貌模型预测颜色与匹配色块的色差(单位: ΔE_{ab}^*) (D65/9300 K)

Table 15 Color difference between the match colors and predicted colors with the chromatic adaptation transforms and CIECAM02 (unit: ΔE_{ab}^*) (D65/9300 K)

Color number	Von Kries	CMCCAT 2000	CAT02	CIECAM02
1	7.63	6.37	13.32	10.73
2	11.07	9.07	4.31	13.97
3	13.89	11.44	4.48	14.13
4	4.71	4.77	14.58	8.98
5	17.24	15.23	8.07	17.17
6	10.55	10.53	20.39	12.95
7	5.69	7.70	22.01	9.77
8	9.99	10.01	18.78	13.51
9	11.25	13.50	23.79	17.20
10	11.40	11.29	17.70	16.65
11	10.98	9.02	10.72	13.63
12	10.01	8.86	14.08	14.72
13	12.87	11.35	13.48	16.46
14	6.60	10.94	17.60	15.37
15	6.50	11.54	19.48	17.43
16	10.37	12.58	18.30	16.43
17	10.81	14.64	21.19	18.79
Average	10.09	10.52	15.43	14.58

表 16 用色适应模型和 CIECAM02 色貌模型预测颜色与匹配色块的色差(单位: ΔE_{ab}^*) (A/6500 K)

Table 16 Color difference between the match colors and predicted colors with the chromatic adaptation transforms and CIECAM02 (unit: ΔE_{ab}^*) (A/6500 K)

Color number	Von Kries	CMCCAT 2000	CAT02	CIECAM02
1	8.88	7.06	11.79	9.82
2	26.09	21.06	21.73	26.71
3	29.74	24.61	25.51	29.36
4	17.61	10.58	14.50	15.45
5	19.25	15.24	17.52	17.78
6	27.40	24.49	29.56	27.91
7	9.71	7.76	13.71	8.00
8	11.07	10.09	15.26	12.87
9	16.78	13.10	17.56	18.38
10	21.98	13.79	18.24	19.05
11	23.69	16.88	21.22	22.47
12	18.63	9.77	14.07	14.07
13	28.02	14.90	19.50	19.43
14	12.70	7.79	8.83	2.70
15	21.44	5.15	8.11	5.43
16	8.70	1.74	4.95	6.60
17	10.25	2.17	4.50	8.12
Average	18.35	12.13	15.68	15.54

表 17 采用 Braun & Fairchild 数据得到的预测颜色与匹配色块的色差(单位: ΔE_{ab}^*) (D65/D65)

Table 17 Color difference between the match colors and predicted colors by Braun and Fairchild data (unit: ΔE_{ab}^*) (D65/D65)

Target numbers of fruit	Von Kries	CMCCAT 2000	CAT02	CIECAM02
1#	15.07	14.89	15.66	14.91
2#	7.19	7.02	5.68	6.50
3#	12.19	12.26	11.92	12.45
4#	6.66	6.58	4.28	6.15
5#	11.90	11.90	12.16	12.06
6#	9.73	9.90	10.27	10.13
7#	3.78	3.92	4.35	4.23
8#	8.24	7.48	8.28	7.01
9#	3.63	3.45	6.20	3.51
10#	4.19	4.15	3.94	4.13
11#	9.72	9.82	10.54	10.00
12#	9.88	9.93	10.59	10.09
13#	10.98	10.96	10.65	11.19
14#	9.51	9.49	9.47	9.76
15#	5.60	5.65	5.67	5.72
16#	12.14	12.16	12.27	12.29
17#	9.54	9.74	10.25	9.95
Average	8.82	8.78	8.95	8.83

表 18 采用 Braun & Fairchild 数据得到的预测颜色与匹配色块的色差(单位: ΔE_{ab}^*) (9300K/D65)

Table 18 Color difference between the match colors and predicted colors by Braun and Fairchild data (unit: ΔE_{ab}^*) (9300K/D65)

Target numbers of fruit	Von Kries	CMCCAT 2000	CAT02	CIECAM02
1#	14.12	14.01	13.30	14.64
2#	8.11	8.31	7.06	7.88
3#	14.41	14.56	13.77	15.17
4#	7.59	8.03	5.80	7.92
5#	12.98	13.29	12.86	13.99
6#	12.08	12.21	11.57	12.76
7#	3.46	3.58	4.38	4.12
8#	10.70	8.24	8.61	6.87
9#	5.13	4.00	5.82	3.56
10#	4.85	4.73	4.75	4.59
11#	10.93	11.08	11.24	11.52
12#	10.83	10.89	11.16	11.20
13#	11.00	11.06	11.16	11.68
14#	9.20	9.29	9.81	9.96
15#	6.37	6.45	6.58	6.71
16#	13.59	13.83	13.11	14.34
17#	12.15	12.20	11.85	12.71
Average	9.85	9.75	9.58	9.98

3.3 对应色数据在色品图中的表现

用品色图可以更为直观地看出打印体、匹配的平均值与三种色适应模型及 CIECAM02 色貌模型预测颜色之间的关系,以第一项实验为例作出其色品图如图 3~6 所示,其中相邻的一组圆圈、菱形和正方形分别代表灯箱中的色块、显示器上匹配的对应色和模型预测的对应色。圆圈与菱形之间的距离代表打印体与显示器匹配色之间色差的大小,正方形与圆圈,菱形之间的距离代表模型预测的对应色与显示器匹配色之间色差的大小,这些距离的大小

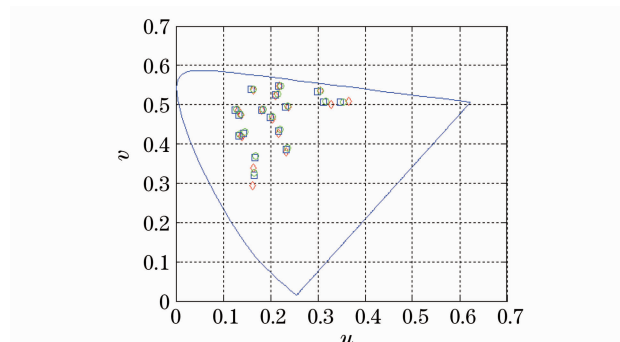


图 3 用 Von Kries 色适应变换模型得到的预测色品图
Fig. 3 Diagram of predictive colors by Von Kries color adaptation transform model

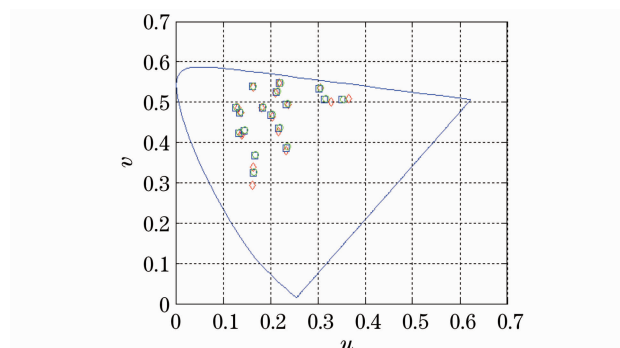


图 4 用 CMCCAT2000 色适应变换模型得到的预测色品图
Fig. 4 Diagram of predictive colors by CMCCAT2000

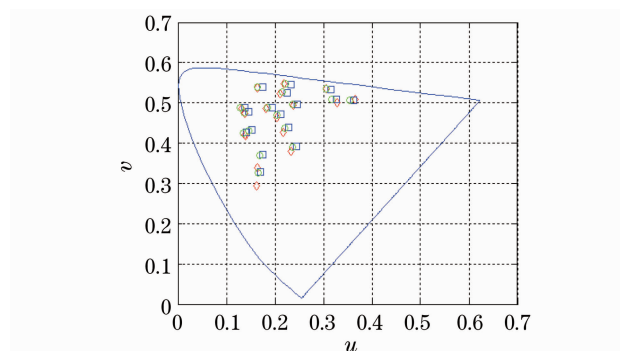


图 5 CAT02 色适应变换模型预测色品图
Fig. 5 Diagram of predictive colors by CAT02

可以直观地看出模型预测性能的好坏。由图中可以看出 Von Kries 和 CMCCAT2000 色适应模型预测点与显示器匹配色的重合性好于 CAT02 色适应模型和 CIECAM02 色貌模型预测点,CAT02 色适应模型预测点与显示器匹配色间距较大。

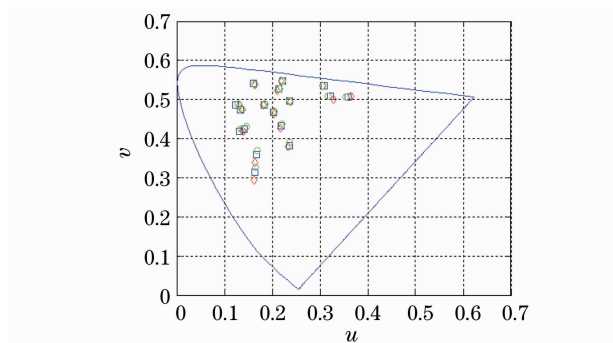


图 6 用 CIECAM02 色貌模型得到的预测色品图
Fig. 6 Diagram of predictive colors by CIECAM02

4 结 论

通过视觉匹配实验获得了显示器与打印体 17 种颜色在相同和不同色温的一组对应色数据,分析了数据的可靠性,使用实验中得到的对应色数据评价了 Von Kries,CMCCAT2000 和 CAT02 色适应模型以及 CIECAM02 色貌模型对跨媒体对应色的预测效果。结果表明,Von Kries 与 CMCCAT2000 色适应模型表现相同,CMCCAT2000 的表现好于 CIECAM02 模型,CIECAM02 色貌模型的表现好于模型本身的 CAT02 色适应变换模型,而采用 Braun & Fairchild 显示器与打印体对立色数据对四种模型评价结果有一定差异。

对应色数据是色适应模型以及色貌模型研究的基础,从对应色匹配、对应色数据和评价结果整个研究过程发现,跨媒介问题值得注意的方面如下:

1) 观察与匹配方式的影响。实验采用“记忆观察与匹配”方式,实验中也与“双目同时”方式做了简单对比,结果得到的对应色数据差距较大。此“双目同时”方式是两种观察混合适应,混合适应是目前研究的重点。

2) 不同色适应模型对不同的对应色数据表现不同。Von Kries 是最简单的色适应模型,其它模型都是建立在此基础上,CIECAM02 中采用 CAT02 色适应模型,而 CAT02 是一个称作“锐变换”的复杂模型 CMCCAT2000 的简化形式。2001 年 Süssstrunk 等^[14]对各种色适应模型的评价得出的结论是,CMCCAT2000 模型明显优于 Von

Kries。从最近 Bianco 和 Schettini 对色适应模型表现评价的研究结果看出^[15], CMCCAT2000 与 CAT02 模型表现基本相同, Von Kries 模型对大多数数据表现较差, 但个别数据表现较好。在显示器与打印体跨媒介中, 三种色适应模型在 Braun & Fairchild 图像复杂背景下得到对应色数据表现基本相同; 实验是在简单背景下获得的对应上色数据, Von Kries 与 CMCCAT2000 模型表现基本相同, 都好于 CAT02 模型, 而且考虑了其它观察条件的 CIECAM02 色貌模型, 在跨媒介颜色再现中也没有表现出优势。以上说明, 最简单 Von Kries 模型仍然有优势, “锐变换”模型仍将继续研究。另外, 不同模型的表现也与对应色数据有关, 包括同种媒介与不同种媒介、简单与复杂背景等, 各种对应色数据都需要补充。

3) 不同种媒介对应色色差问题。从实验得到的对应色之间 CIELAB 色差大小, 以及 Braun & Fairchild 给出的显示器与打印体对应数据计算的 CIELAB 色差大小来看, CIELAB 色差评价不同种媒介的误差非常大。

参 考 文 献

- 1 N. Moroney, M. D. Fairchild, R. W. G. Hunt *et al.*. The CIECAM02 colour appearance models [C]. Proceedings of the 10th of CIC, Scotsdale, USA, 2002, 23~27
- 2 Changjun Li, M. Ronnier Luo, Michael R. Pointer. Recent progress with extensions to CIECAM02 [C]. Seventeenth Color Imaging Conference, Albuquerque, New Mexico, 2009, 69~74
- 3 M. Ronnier Luo, Peter A. Rhodes. Corresponding-colour datasets[J]. *Col. Res. Appl.*, 1999, **24**(4): 295~296
- 4 J. J. McCann, P. McKees, T. H. Taylor. Quantitative studies in retinex theory[J]. *Vision Res.*, 1976, **16**: 445~458
- 5 Yoshinobu Nayatani, Tadashi Yano, Masamori Ihara. Analyses of methods for predicting corresponding colors of LUTCHI data [J]. *Col. Res. Appl.*, 2002, **27**(5): 335~348
- 6 M. R. Luo, P. A. Rhodes. Using the LUTCHI colour appearance data[J]. *Col. Res. Appl.*, 1997, **22**(6): 414~417
- 7 H. Helson, D. B. Judd, M. H. Warren. Object-color changes from daylight to incandescent filament illumination [J]. *Illum Eng.*, 1952, **47**: 221~233
- 8 W. G. Kuo, M. R. Luo, H. E. Bez. Various chromatic adaptation transforms tested using new color appearance data in textiles [J]. *Col. Res. Appl.*, 1995, **20**(5): 313~327
- 9 Karen M. Braun, Mark D. Fairchild. Psychophysical generation of matching images for cross-media color reproduction[J]. *J. Soc. Inf. Display*, 2000, **8**(1): 33~44
- 10 K. Witt. CIE guidelines for coordinated future work on industrial colour-difference evaluation[J]. *Col. Res. Appl.*, 1995, **20**(6): 399~403
- 11 Shi Junsheng, Yun Lijun, Yan Jiang *et al.*. Accuracy of colorimetric characterization and effect of black point for CRT monitor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 371~376
- 石俊生, 云利军, 杨健等. CRT 显示器特性化精度及黑点的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 371~376
- 12 Chai Binghua. Study on Some Problems of Color Appearance Model CIECAM02[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006
- 柴冰华. 色貌模型 CIECAM02 若干问题的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006
- 13 Edwin J. Breneman. Corresponding chromaticities for different states of adaptation to complex visual fields[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(6): 1115~1129
- 14 Sabine Süssstrunk, Jack Holm, Graham D. Finlayson. Chromatic adaptation performance of different RGB sensors [C]. *SPIE*, 2001, **4300**: 172~183
- 15 S. Bianco, R. Schettini. Two new Von Kries based chromatic adaptation transforms found by numerical optimization[J]. *Color Research & Application*, 2010, **35**(3): 184~192