

图像色偏的量化研究与应用^{*}

毛明志¹ 柴啸龙^{1,2}

(中山大学计算机应用研究所 广州510275)¹ (广东商学院数学部 广州510320)²

摘要 目前,国内外针对各种色彩 I/O 设备中图像色偏的量化的研究还比较薄弱,虽然有 ICC 色彩标准,但是没有一个是独立于设备的图像色偏量化标准。本文试图提出一套独立于打机、印刷机等色彩设备的色偏量化体系与方法,通过该方法的应用可方便地实现不同种类的数码打样(印刷机打样,照排机打样,屏幕打样等)。随着色偏量化的深入研究与应用,业界通过主观经验进行色彩纠偏的做法将会成为历史。

关键词 色彩管理,图像色彩,色偏,色模,量化方法

The Study and Application of Distinction Quantum in Graphs Hue

MAO Ming-Zhi¹ CHAI Xiao-Long^{1,2}

(Institute of Computer Application, SUN YAT-SEN University, Guangzhou 510275)¹

(Department of Mathematics, Guangdong Commercial College, Guangzhou 510320)²

Abstract Presently, the study which aimed at all kinds of distinction quantum is still weak. Though ICC standard had presented, yet the standard of distinction quantum between graphs which independent on the color I/O equipment is still in lack. In this paper, we try to present a set of system and methods of the distinction quantum in graphs hue, and it is independent on printer, imprinter and the other color equipment. By this method, digital proof between deferent kinds of color facilities can come into true. Along with the study and application of the distinction quantum in graphs hue, the method of color error correct by mental experience will behind the times.

Keywords Color management, Graphs hue, Distinction of color, Color model, quantum method

1 图像色彩管理

图像的色偏目前还主要是以肉眼识别为主^[1],本文提出了一套色偏评定理论体系和色偏量化方法。这套体系和方法与具体设备无关,与人无关,使得色偏评判由过去主观判断变为自动化实现。

色彩管理^[2~4](Color Management)技术解决的是在计算机系统中各种输入、输出、显示设备之间图形图像传输、再现过程中颜色的一致性问题。颜色转换在整个桌面出版工作流程中是不可避免的,没有合理的色彩管理方法最终会导致输出的颜色失真。

不同的色彩设备使用不同的色彩空间^[5],相同的色彩空间在不同设备上也有不同的再现特性,致使不同的输入、输出和显示设备具有不同色彩再现能力。因此实现色彩再现在以计算机为工具的电子媒体创作、出版过程中是一个至关重要的问题^[6]。传统的色彩校正非常复杂而且是封闭性的,一旦设备调整变化(如打印设备的颜料更换,显示设备的更换或老化等),就需要专业人员来重新调整整套设备的颜色设置,这影响了整个工作流程的效率。在没有 ICC 标准之前,要使用色彩管理系统进行对色,往往需要按照各厂家的规定来建立各种输入、输出设备的颜色特性文件。使用这种方式的直接转换虽有较好的色彩效果,但却会因输入、输出设备的不同,而使得色彩修正、色彩对色极其复杂。但改采用 X、Y、Z 色彩坐标作为参考标准,虽然可以达到 DIC^[7](Device Independent

Color)的目的,但由于无统一的格式,就无法套用到各厂商的色彩设备上。

为了解决这些问题,1993年由 Adobe 等许多世界著名厂商组织成立了 ICC^[8](International Color Consortium),制定了一系列的工业标准,并在此标准下定义了设备特性文件(Device Profile)。这个标准将各种输入设备、显示设备、打印设备等,经过一定的标准校正程序后,产生色彩特性文件(ICC Profile)。不同设备以色彩特性文件为基础使用不同的色彩空间转换模型以完成使用者期望的色彩管理。ICC 建立一个颜色特性文件的连接空间 PCS^[9,10](Profile Connection Space),同时要求各显示、输出、输入设备色彩特性文件以统一格式书写,达到色彩校正和对色的统一。因此只要有色彩设备的 ICC 标准配置文件,图像就可以互传于不同厂牌设备,而且在不同媒体下都能有好的色彩再现。

2 色彩量化基本概念与理论

定义1 在一个表色体系中,所有的色点组成集合 C , 如果能定义一个函数 d , 其定义域是 C 与 C 的笛卡儿乘积 $C \times C$, 其值域含于实数域 R 中, 且满足:

$$(1) d(x_1, x_2) \geq 0$$

$$(2) d(x_1, x_2) = d(x_2, x_1)$$

$$(3) \text{并且当且仅当 } x_1 = x_2 \text{ 时, } d(x_1, x_2) = 0$$

则称 C 为可度量色空间, 称 d 为 C 的色偏函数。

定义2 P 是可度量色空间 C 上的一个色偏函数, 如果

^{*} 本文得到中山大学色彩处理研究项目(35240-7101012)资助。毛明志 CMM 等, 柴啸龙 硕士, 助教, 研究方向是图像处理。

副教授, 硕士生导师, 研究方向是图形图像及计算机仿真, 软件工程与

它满足:

- (1) 对于实数 a , 当 $|a| > 1$ 时, $P(a * x_1, a * x_2) > P(x_1, x_2)$
- (2) 对于实数 a , 当 $0 < |a| < 1$ 时, $P(a * x_1, a * x_2) < P(x_1, x_2)$
- (3) 对于实数 a , 当 $|a| = 0$ 时, $P(a * x_1, a * x_2) = 0$

则称 $P(x)$ 是可度量色空间 C 上的色模。

定义3 $P(x)$ 是可度量色空间 C 上的一个色模, 如果它满足:

- (1) $P(x_1, x_2) \leq P(x_1, \theta) + P(x_2, \theta)$
- (2) $P(a * x_1, a * x_2) = |a| * P(x_1, x_2)$

则称 $P(x)$ 是可度量色空间 C 上的线性色模。其中 θ 是零色点, 代表无色, 它和 x_1 等色点有相同的代数结构。

引理1 Lab 色空间是可度量色空间。

证明: 对于 Lab 色空间中任意两个色点 $c_1(L_1, a_1, b_1)$ 和 $c_2(L_2, a_2, b_2)$, 构造 Lab 上距离函数 d 如下:

$$d(c_1, c_2) = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

显然有: (1) $d(c_1, c_2) \geq 0$; (2) $d(c_1, c_2) = d(c_2, c_1)$; (3) 并且当且仅当 $x_1 = x_2$ 时, $d(x_1, x_2) = 0$ 。由定义1得, Lab 色空间是可度量色空间, 证毕。

定理1 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$ 是 Lab 色空间上的线性色模。

证明: $d(c_1, c_2) \geq 0$ 和 $d(c_1, c_2) = d(c_2, c_1)$ 显然成立, 并且当且仅当 $c_1 = c_2$ 时, $d(c_1, c_2) = 0$ 成立, 因此 d 是 Lab 色空间上的色偏函数, 下面进一步证明它是色模: 色点 c_1 是 (L_1, a_1, b_1) , c_2 是 (L_2, a_2, b_2) , 根据向量数乘规则, 对实数 a , 色点 $a * c_1$ 是 $(a * L_1, a * a_1, a * b_1)$, 色点 $a * c_2$ 是 $(a * L_2, a * a_2, a * b_2)$ 。

$$d(a * c_1, a * c_2) =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(a * L_1 - a * L_2)^2 + (a * a_1 - a * a_2)^2 + (a * b_1 - a * b_2)^2} \\ & = |a| * \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \\ & = |a| * d(c_1, c_2) \end{aligned}$$

当 $|a| > 1$ 时, $d(a * c_1, a * c_2) = |a| * d(c_1, c_2) > d(c_1, c_2)$

当 $0 < |a| < 1$ 时, $d(a * c_1, a * c_2) = |a| * d(c_1, c_2) < d(c_1, c_2)$

当 $|a| = 0$ 时, $d(a * c_1, a * c_2) = |a| * d(c_1, c_2) = 0$

由定义2得, d 是 Lab 色空间上的色模,

$$d(c_1, c_2) = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

$$d(c_1, \theta) = \sqrt{L_1^2 + a_1^2 + b_1^2}$$

$$d(c_2, \theta) = \sqrt{L_2^2 + a_2^2 + b_2^2}$$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \leq \sqrt{L_1^2 + a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{L_2^2 + a_2^2 + b_2^2}$ 在实数域上是显然成立的, 限于篇幅这里不再给出它的证明。

因此我们有 $d(c_1, c_2) \leq d(c_1, \theta) + d(c_2, \theta)$ 成立。

前面已经证明 $d(a * c_1, a * c_2) = |a| * d(c_1, c_2)$ 。由定义3得, $d(c_1, c_2)$ 是 Lab 色空间上的线性色模。证毕。

定理2 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}}$ 是 Lab 色空间上的色模。

证明: 先证 $d(c_1, c_2)$ 是色偏函数。

$$(1) d(c_1, c_2) = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}} > 0$$

$$(2) d(c_1, c_2) = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + |a_2 - a_1| + |b_2 - b_1|^{0.5}} = d(c_2, c_1)$$

(3) 当且仅当 $c_1 = c_2$ 时, $d(c_1, c_2) = 0$

由定义1得, $d(c_1, c_2)$ 是色偏函数。接着来证明 $d(c_1, c_2)$ 是色模。

$$d(a * c_1, a * c_2) =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(a * L_1 - a * L_2)^2 + |a * a_1 - a * a_2| + |a * b_1 - a * b_2|^{0.5}} \\ & = \sqrt{a^2 * (L_1 - L_2)^2 + |a| * |a_1 - a_2| + |a|^{0.5} * |b_1 - b_2|^{0.5}} \\ & = d(c_1, c_2) \end{aligned}$$

当 $|a| > 1$ 时, $a^2 > 1$, $|a|^{0.5} > 1$, 因此有:

$$\begin{aligned} & \sqrt{a^2 * (L_1 - L_2)^2 + |a| * |a_1 - a_2| + |a|^{0.5} * |b_1 - b_2|^{0.5}} \\ & > \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}} = d(c_1, c_2) \end{aligned}$$

当 $0 < |a| < 1$ 时, $0 < a^2 < 1$, $0 < |a|^{0.5} < 1$, 因此有:

$$\begin{aligned} & \sqrt{a^2 * (L_1 - L_2)^2 + |a| * |a_1 - a_2| + |a|^{0.5} * |b_1 - b_2|^{0.5}} \\ & < \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}} \\ & = d(c_1, c_2) \end{aligned}$$

当 $|a| = 0$ 时,

$$\sqrt{a^2 * (L_1 - L_2)^2 + |a| * |a_1 - a_2| + |a|^{0.5} * |b_1 - b_2|^{0.5}} = 0$$

由定义2得, $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2| + |b_1 - b_2|^{0.5}}$ 是 Lab 色空间上的色模。证毕。

推论1 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^2 + |a_1 - a_2|^{0.5} + |b_1 - b_2|}$ 是 Lab 色空间上的色模。

推论2 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{|L_1 - L_2| + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^{0.5}}$ 是 Lab 色空间上的色模。

推论3 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{|L_1 - L_2| + (a_1 - a_2)^{0.5} + (b_1 - b_2)^2}$ 是 Lab 色空间上的色模。

推论4 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^{0.5} + (a_1 - a_2)^2 + |b_1 - b_2|}$ 是 Lab 色空间上的色模。

推论5 $d(c_1, c_2) =$

$\sqrt{(L_1 - L_2)^{0.5} + |a_1 - a_2| + (b_1 - b_2)^2}$ 是 Lab 色空间上的色模。

3 实际应用

对同一幅图片进行光栅化处理得到分别以 C, M, Y, K 为分量的4个 one-bit 文件, 分别把它合成输出到七色 CMYKcmk 彩打的 Epson9600 打印机和四色印刷机上, 得到两个不同的效果图(见图1)。



(a) 在 Epson9600 打印机上输出 (b) 在印刷机上输出

图1 同一幅图像分别在打印机和印刷机上输出

使用肉眼很难判断色偏到底有多大,为了量化地评估这两幅图片的色偏,需要分别在 Epson9600打印机和四色印刷机输出这两幅图时的工作状态下分别输出标准 IT8.7/3的928个色块,然后使用 X-Ritor 分光仪将它们分别制作成 ICC Profile,由这两个 Profile 可以获取928个关键色块在设备无关的 Lab 色域上的色值(见表1)。

利用两个 Profile 产生 Lab 色域上928个色块值后,需要依据色模函数来制定两幅图像的量化色偏。图2是两幅图像的928个关键色点在 Lab 色域以及 LA 和 LB 截面上分布图。

在 Lab 色域上的色模 $d(c1,c2)=$

$\sqrt{(L1-L2)^2+|a1-a2|+|b1-b2|^{0.5}}$ 是能够根据视觉特性均匀反映图像色偏,这也比较符合 Lab 色域的特性。

依据色模 $d(c1,c2)=$

$\sqrt{(L1-L2)^2+|a1-a2|+|b1-b2|^{0.5}}$,对图1所示的两幅图

像进行色偏统计,两幅图像的平均色偏是9.280357,该方法在系统中得到了较好的应用。

表1 两幅图像的928种关键色在 Lab 色域中的色值

编号	Epson9600打印机输出			印刷机输出		
	L	a	b	L	a	b
0A1	11.930	17.040	53.050	13.930	18.620	49.630
0A2	25.330	11.430	10.150	33.070	16.800	15.780
0A3	66.570	71.650	3.700	66.820	73.320	7.410
0A4	2.750	1.450	9.000	4.160	2.900	14.050
0A5	2.820	9.390	2.600	5.540	14.150	7.960
...
26D2	2.250	2.580	2.460	1.210	1.840	1.260
26D3	2.150	2.300	2.350	1.160	1.450	1.120
26D4	2.010	2.060	2.150	1.120	1.160	0.930

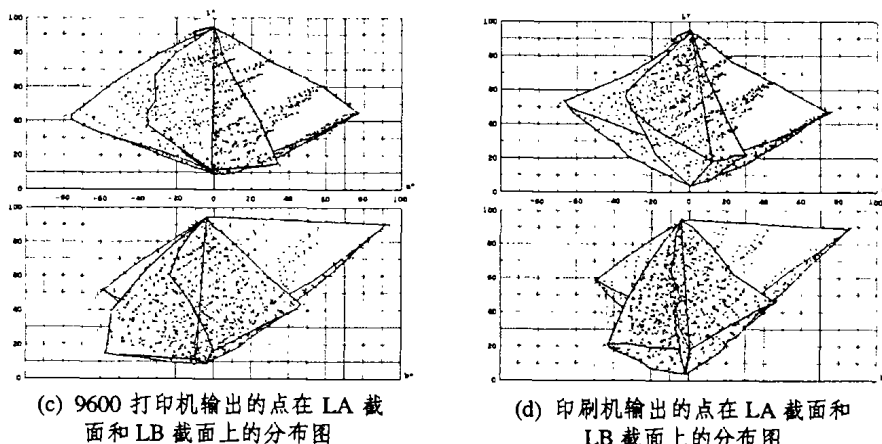
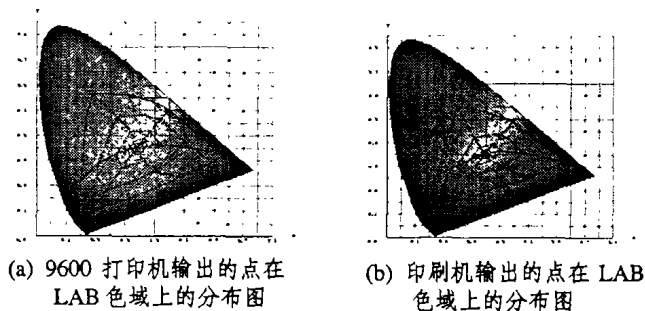


图2 两幅图像的928个关键色域在 Lab 色域及 LA 和 LB 截面的分布图

结论与展望 本文为鉴别图像色偏提供了一整套量化体系和实行方法,也为以后图像工业界深层次提高图像输出精度和质量提供了一套可视的坐标系。

通过该方法的应用可方便地实现不同种类的数码打样(印刷机打样,照排机打样,屏幕打样等)。随着色偏量化的深入研究与应用,业界通过主观经验进行色彩纠偏的做法将会成为历史。

参考文献

- 1 Moroney N. Color matching functions and blue constancy. In: Proc. Intl. Congress of Imaging Science. Tokyo, Japan, 2002. 419~420
- 2 Vrhel M J, Trussell H J. Problems in publishing accurate color in IEEE journals. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(4): 373~376
- 3 Gibson J E, Fairchild M D. Colorimetric characterization of three computer displays (LCD and CRT): [MCSL Technical Report]. 2000

- 4 Finlayson G, Hordley S. Improving gamut mapping color constancy. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(10): 1774~1783
- 5 Montag E D, Fairchild M D. Psychophysical evaluation of gamut mapping techniques using simple rendered images and artificial gamut boundaries. IEEE Transactions On Image Processing, 1997, 6(7): 977~989
- 6 Fairman H S, Brill M H, Hemmendinger H. How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. Color Research Application, 1997, 22(1): 11~23
- 7 Stollnitz E J, Ostromoukhov V, Salesin D H. Reproducing color images using custom inks. In: Proc. of the 25th annual conf. on Computer graphics and interactive techniques, 1998. 267~274
- 8 Braun G J, Ebner F, Fairchild M D. Color gamut mapping in a hue-linearized CIELAB color space. In: IS&T/SID 6th Color Imaging Conference, Scottsdale, 1998. 163~168
- 9 Sharma G, Trussell H J. Digital color imaging. IEEE Transactions On Image Processing, 1997, 6(7): 901~932
- 10 Trussell H J, Allebach J, Fairchild M D, et al. Special issue on color imaging. IEEE Transactions on image processing, 1997, 6(7)