

基于 Yule-Nielson 方程的扫描输入图像 色彩校正新模型

黎新伍

(江西财经大学电子商务系, 江西 南昌 330013)

摘要 在光电子学中扫描仪的色彩管理是彩色图像复制的关键技术之一。在分析扫描物呈色原理和误差产生原因的基础上, 提出了一种计算机扫描输入图像色彩管理新模型。重新解释了 Yule-Nielson 方程的参数含意, 使原本只适用于印刷网点图像的 Yule-Nielson 方程也适用于非印刷网点图像。采用了基于最小二乘法的分段曲线拟合, 以克服在数据点分段时算法过分依赖主观经验的不足。结合 Yule-Nielson 方程和拟合曲线算法, 分单色、双色和三色逐步导出输入图像的色彩修正方程。给出的实验结果表明, 模型提高了输入图像的色彩转换精度, 能够在工程中应用于输入图像的色彩转换。

关键词 光电子学; 色彩校正; 曲线拟合; Yule-Nielson 方程

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS200828s2.0048

A New Color Correction Model for Scanning Input Image Based on Yule-Nielson Equation

Li Xinwu

(Electronic Business Department, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract Color management for scanner is one of the key techniques in the color image reproduction in information optics. A modified model of color space conversion is presented based on analyzing the color rendering principle of scanning object and the causes of color error. Firstly, the parameters of Yule-Nielson equation which can be used only for printing dot image originally are reinterpreted, making it can be used also for non-printing dot image. Secondly traditional curve fitting algorithm based on least square principle is corrected to overcome the deficiency of traditional piece curve fitting which contains many experimental elements in the process of separating data into pieces; Then, Yule-Nielson equation and curve fitting method are combined to deduce the modified model for color space conversion for scanning input image through single color correction, bicolor correction and tricolor correction stepwise. Finally the experimental results show that the model can improve scanner color management accuracy and can be used in its color management practically.

Key words optoelectronics; color correction; curve fitting; Yule-Nielson equation

1 引 言

彩色扫描仪首先通过产生分别对应于红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色的三幅图像, 然后将三幅图像合成来完成彩色图像的扫描过程。表征扫描仪颜色特性的颜色空间是遵循加法呈色原理的 RGB 空间, 而扫描物呈色物质颜色特性的色空间是遵循减法呈色原理的 YMC(黄品青)空间, RGB 空间和 YMC 空间均依赖于设备材料, 两者之间难于直接转换, 因此图像色彩的质量控制问题是最困难的关键

技术之一, 也是研究热点之一。色彩管理的主要任务就是解决图像在各种色空间之间的转换问题, 使图像的色彩在整个复制过程中失真最小^[1,2]。

目前色彩管理主要方法是参数法和黑箱法。参数法是根据转换所涉及的设备或材料的参数等形成 RGB 与 XYZ 的数学转换模型, 如通过分析感光材料的感光特性建立色彩复制曲线^[3]。由于扫描仪设备中所涉及的光学特性曲线, 诸如光源光谱曲线、RGB 滤色曲线、感光元件的感光特性曲线等, 具有

较多非线性因素,故参数法在扫描仪中应用难度较大。黑箱法则是在色彩转换中不考虑与设备相关的因素,将总体看作一个黑匣子,只对一定数量的标准色块的输入输出色彩值进行分析、拟合控制,再利用空间关系进行插补求得其他色块的转换关系^[4],这类方法包括 Neugebauer 方程法、一维非线性函数法、线性或矩阵转换法、多维表转换法和多项式拟合算法,以及基于 BP 网络和基于机器学习^[5~9]的转换方法。黑箱法由于不考虑色彩转换的中间过程,只控制输入输出值,故难以保证转换精度。

本文首先将 Yule-Nielson 方程的网点面积率参数重新解释为色料百分比,使得修正后的方程推广到也适用于非印刷网点图像。分单色、双色、三色,逐层利用 Yule-Nielson 方程考察误差,并利用分段拟合逐层对方程予以修正,从而克服了黑箱法不考虑中间转换过程导致精度不高的缺点,提出了扫描图像色彩修正模型,提出了新的扫描图像色彩管理方法和途径。此外,对于扫描仪这类变化规律复杂,不具备严格规律的变化曲线而言,传统的基于最小二乘法的曲线拟合算法根据主观经验对数据进行分段具有明显的不足。本文采用分段拟合,客观地分段三次曲线,克服了数据分段需要主观经验的不足。

2 减色法呈色原理

对人眼的研究表明^[7],只要能有效地控制进入人眼的加色三原色 R,G,B 色光的刺激量,也就控制了自然界各种物体的表面色彩。在颜色相加混合中,通过 R,G,B 三原色光能混合出较多的颜色,有最大的色域。为此选择黄色染料来控制蓝光,因为黄色是蓝色的补色,它能最有效地控制(吸收)蓝光;同理,选择用绿色的补色品色来控制绿光;选择用红色的补色青色来控制红光。通过改变黄、品、青染料的厚度(或浓度),能够容易地改变对红、绿、蓝三原色光的吸收量,完成控制进入人眼的红、绿、蓝三刺激值的数量。因此,黄、品、青就称为减色三原色,其混色规律为:品(M)和黄(Y)双色染料混合呈红色(R),青(C)和黄(Y)双色染料混合呈绿色(G),品(M)和青(C)双色染料混合呈蓝色(B);品(M)、黄(Y)和青三色染料混合呈黑色(BK)。

3 扫描图像误差理论分析

扫描仪获取图像的方式是扫描仪光源将发射光线照射到待扫材料上,从待扫材料上发射光线,再经

过红绿蓝三色滤色片的选择滤光后,剩余的光线通过 CCD 光敏元件实现光电转换,最后经数字化形成图像数字文件,其光学系统光源的相对光谱能量分布、三色滤色片的光谱透射率、光路系统的传播效率和 CCD 器件的光谱敏感性对扫描仪的扫描精度产生重要影响。扫描仪光路系统的传播效率 $\Pi(\lambda)$ 可表示为

$$\Pi(\lambda) = K \cdot s(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot e(\lambda), \quad (1)$$

式中 K 为比例系数, $s(\lambda)$ 为扫描仪光源的相对光谱能量分布, $\tau(\lambda)$ 为滤色片的光谱透射率, $e(\lambda)$ 为 CCD 器件的光谱敏感性。一般情况下,实际扫描仪的光路系统都存在传播误差,使得实际光量和测量光量之间存在差光量。经验表明多数情况下 $\Pi(\lambda)$ 大于 1,偶尔也有小于的情况。这部分差光量在实际测量中需要予以补偿。

4 数据采集

4.1 测量样本

使用的测量样本为 IT8/2 标准色靶,由 AgFa 公司 1998 年制作的,序号为 5x7c60103xx,呈色材料符合 ISO12641 标准的反射稿彩色色靶。其彩色梯尺区有三行(第 13~15 列)是减色三原色黄(Y)、品(M)、青(C)由浅入深的色块;有三行(第 17~19 列)是红(R)、绿(G)、蓝(B)由浅入深的色块,它们是由减色三原色 Y,M,C 两两叠加混合而呈色;还有一行(第 16 列)是中中性色灰度渐增,是由减色三原色 Y、M、C 三色叠加混合而呈色。

4.2 数据测量

实验采用 Colortron 仪为色彩测量仪。为了使测量能够反映客观实际情况,对色靶和扫描图像上的色彩值均采用测量值,这样减少了由于各种测量客观条件导致的误差。同时以色靶的彩色梯尺区色块为实验对象推导色彩转换模型,以其他色块的色彩值作为转换模型的精度验证。

1) 采用缺省设置,测试出 IT8/2 色靶上的全部色块的 RGB 值。然后对应于测量样本的呈色机理,选择彩色梯尺区色块的 RGB 值,建立转换 RGB 值数据库,供中间转换用。

2) 根据 IT8/2 色靶提供的全部色块的 XYZ 标准值,建立色空间 XYZ 值数据库,供验证转换结果用。选择彩色梯尺区 XYZ 值,建立转换 XYZ 标准值数据库,供中间转换用。

5 算法实现

5.1 分段拟合算法

设有 N 个数据 $z_1, z_2, z_3, \dots, z_N$, 由一般数学知识可知^[10], 四个数据点可确定一条三次曲线。由于在选取分段点时, 考虑了分段后要使相邻曲线连续, 即边界点连续这一约束条件, 因此, 用五个数据点拟合一条三次曲线, 拟合的方法为: 首先对数据进行分段, 将第一个到第五个数据分为另一段, 重叠的第五个数据点保证了两个分段的连续性, 其他的依次类推; 然后对各分段数据分别进行三次曲线拟合。易知拟合 n 段三次曲线所需数据个数为 $4n+1$ 。

为说明具体的方法, 令某段数据的三次拟合曲线函数为: $w_t = a + bt + ct^2 + dt^3$ ($t = -2, -1, 0, 1, 2$)。可以将此曲线函数分解为奇偶两个函数: 奇函数 $v_t = bt + dt^3$ 和偶函数 $u_t = a + ct^2$ 。下面应用最小二乘法的基本原理求三次拟合曲线的系数。

由于在每段数据中的第一点和最后一点均两次参与拟合, 因此, 在求一段曲线的拟合方差时需要加权。按照平均分配的原则, 求方差的权值 $\lambda_{-2} = \lambda_2 = 1/2, \lambda_{-1} = \lambda_0 = \lambda_1 = 1$ 。得到该段曲线拟合的方差为

$$S^2 = \sum_{t=-2}^2 \lambda_t (w_t - z_t)^2, \quad (2)$$

曲线表示为奇偶函数的形式为

$$w_t = u_t + v_t, \quad u_{-t} = u_t, \quad v_{-t} = v_t, \quad (3)$$

由(2)式可以推导出

$$u_t = 1/2(w_t + w_{-t}), \quad v_t = 1/2(w_t - w_{-t}), \quad (4)$$

令 $z_t = x_t + y_t, x_{-t} = x_t, y_{-t} = y_t$, 可得

$$x_t = 1/2(z_t + z_{-t}), \quad y_t = 1/2(z_t - z_{-t}), \quad (5)$$

因此, 由(3)和(5)式, 拟合方差可以表示为

$$S^2 = \sum_{t=-2}^2 \lambda_t (u_t - x_t)^2 + \sum_{t=-2}^2 \lambda_t (v_t - y_t)^2 = S_{\text{odd}}^2 + S_{\text{even}}^2, \quad (6)$$

即 w_t 对 z_t 的平滑可以看作是奇函数和偶函数分别平滑的叠加。通过(5)式并经过简单代换运算, 可得到奇函数拟合的方差可表示为

$$S_{\text{odd}}^2 = 2(b+d-y_1)^2 + (2b+8d-y_2)^2, \quad (7)$$

令 $b+d-y_1=0$ 且 $2b+8d-y_2=0$, 可解出 $b = (y_2 - 2y_1)/6, d = (8y_1 - y_2)/6$, 因此 $S_{\text{odd}} = 0$, 即拟合函数的拟合方差为 0, 达到最佳逼近。经过类似的运算, 可得

$$S_{\text{even}}^2 = (e - x_2)^2 + 1/17(3x_0 + e - 4x_1)^2, \quad (8)$$

令 $\partial S_{\text{even}}^2 / \partial e = 0$, 可以分别求解出 e, a, c 。最后得到

的三次拟合曲线表达式为

$$\begin{aligned} w_t = & (3x_0 + 4x_1 - x_2) + (y_2 - 2y_1)t/6 + \\ & (-3x_0 - 2x_1 + 5x_2)t^2/18 + (8y_1 - y_2)t^3/6. \end{aligned} \quad (9)$$

5.2 Yule-Nielson 方程

Neugebauer 方程为一理想数学模型, 1951 年, Yule-Nielson 考虑了各种现实条件后, 提出了用指数 n (一般 n 取 0.5 或 0.65) 来修正此方程^[7]。Yule-Nielson 方程为

$$\begin{bmatrix} X^{1/n_x} \\ Y^{1/n_y} \\ Z^{1/n_z} \end{bmatrix} = \sum_1^8 f_i \begin{bmatrix} X_i^{1/n_x} \\ Y_i^{1/n_y} \\ Z_i^{1/n_z} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中 f_i 表示减色三原色及其混合色的系数, 可由

$$\begin{aligned} f_w &= (1-c) \cdot (1-y) \cdot (1-m), \\ f_y &= y \cdot (1-c) \cdot (1-m), \\ f_c &= c \cdot (1-y) \cdot (1-m), \\ f_m &= m \cdot (1-c) \cdot (1-y), \\ f_r &= y \cdot m \cdot (1-c), \\ f_g &= y \cdot c \cdot (1-m), \\ f_b &= c \cdot m \cdot (1-y), \\ f_{bk} &= y \cdot m \cdot c \end{aligned} \quad (11)$$

求得, X_i, Y_i, Z_i 表示减色三原色及其混合色的三刺激值, 可以通过标准值数据库得到。

Yule-Nielson 方程的参数 y, m, c 表示印刷基本色黄、品、青网点百分比, 故方程只适用于印刷网点呈色图像, 而不适用于扫描仪色靶的呈色方式, 因为扫描仪标准色靶是染料叠加呈色方式。本文将方程参数 y, m, c 重新解释为色料百分比, 使之也适用于非网点图像的色彩转换。

5.3 色彩校正模型推导

5.3.1 单色修正

将梯尺区单色 (以 C 梯尺块为例) 计算得到的 XYZ 值分别带入单色 Yule-Nielson 方程, 通过 X, Y, Z 三个方程能求得三项大小不同的青色料百分比 c 。理论上对同一色块所求得 c 值应该相等, 通过分析理想转换方程系数和实验结果均表明由于各种误差通过 X 求得的百分比最大, 通过 Z 求得的百分比最小。基于扫描仪侧和扫描物侧的误差分析, 再加上液状染料的渗透和湿润膨胀效应以及实践经验均表明染料百分比有增大的趋势, 故以求得的小百分比值为标准值。依次用大百分比值减去相应色块的小百分比值, 再依次用中百分比值减去相应色块的小百分比值, 得到的差值就是单色误差量, 故此误

差量可以由差值予以补偿。实验结果还表明差值呈以色料百分比为自变量的抛物线状,用分段拟合算法拟合出差值曲线方程分别为 $a_d c^2 + b_d c + d_d = 0$ 和 $a_z c^2 + (b_z + 1)c + d_z$ 。以 Z 式中得到的染料百分比为标准,则青 X 式中的色料百分比 c 修正为 $a_d c^2 + (b_d + 1)c + d_d$,将 Y 式的色料百分比 c 修正为 $a_z c^2 + (b_z + 1)c + d_z$ 。单色 C 的 Yule-Nielson 方程为

$$\begin{bmatrix} X^{1/n} \\ Y^{1/n} \\ Z^{1/n} \end{bmatrix} = (1 - c) \begin{bmatrix} X_w^{1/n} \\ Y_w^{1/n} \\ Z_w^{1/n} \end{bmatrix} + c \begin{bmatrix} X_c^{1/n} \\ Y_c^{1/n} \\ Z_c^{1/n} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

单色 C 的 Yule-Nielson 修正方程为

$$\begin{bmatrix} X^{1/n} \\ Y^{1/n} \\ Z^{1/n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [1 - (a_d c^2 + (b_d + 1)c + d_d)] X_w^{1/n} \\ [1 - (a_z c^2 + (b_z + 1)c + d_z)] Y_w^{1/n} \\ (1 - c) Z_w^{1/n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [a_d c^2 + (b_d + 1)c + d_d] X_c^{1/n} \\ [a_z c^2 + (b_z + 1)c + d_z] Y_c^{1/n} \\ c Z_c^{1/n} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

式中 a_d, b_d, d_d 和 a_z, b_z, d_z 分别为大百分比值减去小百分比值和中百分比值减去小百分比值的拟合曲线系数。

5.3.2 双色修正

将梯尺区双色(如 $G = Y + C$)计算得到的 XYZ 值分别带入经过单色修正的双色 Yule-Nielson 方程,通过 XY, XZ, YZ 联立方程求得三项大小不同的青色料和黄色料百分比乘积 yc 。同单色方法可以求出双色误差量,拟合出双色差值方程,并进行双色误差补偿和修正,得到双色修正 Yule-Nielson 方程。

5.3.3 三色修正

将梯尺区三色($BK = Y + M + C$)计算得到的

XYZ 值带入经双色修正的三色 Yule-Nielson 方程,求出黄品青百分比乘积 $ymc1$ 。再将梯尺区黑的 XYZ 的标准值带入已经加上双色修正的三色 Yule-Nielson 方程,求出黄品青百分比乘积 $ymc2$ 。拟合 $ymc1$ 和 $ymc2$ 的差值方程,再进行三色误差补偿和修正,得到三色 Yule-Nielson 修正方程,既为最终本文提出的修正方程。最后得到的修正方程经过单色、双色、三色三层逐层误差修正,尽管形式稍显繁复,表示不便,但在计算机运算中却十分方便。

6 实验验证

用 C 语言对所提出的修正模型实现了求解,修正模型的转换精度可以通过表 1 反映。表 1 为本实验分别用本文算法和目前广泛使用并相对具有较高转换精度的多项式拟合算法和普通 BP 神经网络算法对色靶上全部 288 块色块的转换精度统计表。其中 NBS 色差单位是美国国家标准局采纳的色差单位,计算方法为: $X_b, Y_b, Z_b, X_q, Y_q, Z_q, \Delta E$ 分别表示 X, Y, Z 标准值、修正模型计算得到的 X, Y, Z 值和两者之间的色差

$$\Delta E = \sqrt{(X_b - X_q)^2 + (Y_b - Y_q)^2 + (Z_b - Z_q)^2}.$$

由表 1 的结果可知,所检验的 288 块颜色样品,通过本文的修正模型得到的 XYZ 计算值与由标准数据库得到的 XYZ 标准值之间的平均色差 $\Delta E < 5$ NBS,以及由本算法得到的误差量超过 5 NBS 的色块数目和平均转换误差均明显小于多项式拟合算法和 BP 神经网络算法的转换结果^[3~5]。根据色度学的研究结果,一般当 $\Delta E < 5$ NBS 单位时,可以认为是视觉等效。

表 1 不同算法的转换精度统计表

Table 1 Statistics of conversion precision of different algorithms

Accuracy /NBS	Algorithm		
	This paper	Polynomial fitting algorithm	General BPNN algorithm
Average error	3.46	9.79	7.48
Maximum error	8.94	25.85	12.83
Number of color blocks with an error larger than 5 NBS	7	37	27

7 结 论

提出的修正算法从原理上克服了目前普遍使用的算法中不考虑色彩转换的中间过程,只控制样本色块的输入输出值,从而难以保证转换精度的缺陷。针对扫描仪的呈色原理和误差分析,逐层修正误差,推导出色空间转换方程的方法,实现扫描仪色彩的

有效管理,为扫描仪的色彩管理提出了新的方法和途径。对于不同扫描仪,只需一次校正就可以得到修正系数,故算法是方便可行的。

参 考 文 献

1 David L. Post, Christopher S. Calhoun. An evaluation of

- methods for producing desired colors on CRT monitors [J]. *Color Research and Application*, 2005, **14**(4):172~186
- 2 Liu Quanxiang, Zhu Yuanhong. Research on the reproduction function of gradation true to scenery [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 2000, **24**(10):464~466
刘全香,朱元泓. 忠实于景物的层次复制函数的研究[J]. *武汉测绘科技学报*, 2000, **24**(10):464~466
- 3 Roy S. Berns, Mark E. Gorzybski, Ricardo J. Motta. CRT colorimetry [J]. *Color Research and Application*, 2004, **18**(4):299~313
- 4 Guo Maozu, Wang Yadong, Su Xiaohong. Research of color matching method based on BP network [J]. *Journal of Computers*, 2000, **23**(8):819~823
郭茂祖,王亚东,苏小红. 基于BP网络的色彩匹配方法研究[J]. *计算机学报*, 2000, **23**(8):819~823
- 5 Qian Guoliang, Chen Bing, Shu Wenhao. A color matching method based on machine learning [J]. *Journal of Software*, 1998, **9**(1):845~850
钱国梁,陈 彬,舒文豪. 基于机器学习的色彩匹配方法[J]. *软件学报*, 1998, **9**(1):845~850
- 6 Ohta. Color Principle [M]. Liu Zhongben trans. . Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1997. 191~221
大田登. 色彩工学[M]. 刘中本 译. 西安:西安交通大学出版社, 1997. 191~221
- 7 T. P. Chen. Approximation capability in C^n by multilayer feedforwark networks and related problems [J]. *IEEE Trans. NN*, 2006, **17**(6):57~67
- 8 Yan Li. Spectral reflectance modification of Neugebauer equations [J]. *TAGA*, 1992, **15**(9):154~166
- 9 Noriyuki Shimano. Suppression of noise effects in color correction by spectral sensitivities of image sensors [J]. *Opt. Rev.*, 2002, **9**(2):81~88
- 10 Cai Shan, Zhang Hao, Chen Huihong. Research of piecewise cubic curve fitting method based on least_square principle [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, **7**(3):352~354
蔡 山,张 浩,陈辉洪. 基于最小二乘法的分段三次曲线拟合方法研究[J]. *科学技术与工程*, 2007, **7**(3):352~354