

彩色扫描仪的特征化

徐艳芳, 刘文耀, 左坤隆, 朱 昊

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 阐述了扫描仪特征化的原理和方法。采用多项式回归和人工神经网络技术, 建立了扫描仪记录的 RGB 信息和原影像 CIEXYZ 及 CIELAB 色度信息之间的非线性对应关系。对 4 个常用扫描仪, 实验得到了合理的多项式和人工神经网络结构。发现多项式项数为 10 较为合适, 达到的 CIELAB 平均色差和最大色差分别在 1.6~3.0 和 8~13 个色差单位之间; 6 个隐含层神经元为人工神经网络较为合理的结构, 达到的 CIELAB 平均色差和最大色差分别在 1.4~2.6 和 6~8 个色差单位之间。实验结果表明, 对常用扫描仪的特征化, 可采用多项式回归或人工神经网络技术, 其中人工神经网络技术精度较高。

关键词: 彩色扫描仪; 特征化; 色差; 多项式回归; 人工神经网络

中图分类号: TP334.8; O432.3 文献标识码: A

Characterization of color scanners

XU Yanfang, LIU Weiyao, ZUO Kunlong, ZHU Hao

(*Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science
(Tianjin University), Ministry of Education,
College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: The nonlinear relationship between the scanner RGB signals and original image CIEXYZ or CIELAB values were obtained using the polynomial regression and the artificial neural network procedures. The reasonable structures of the polynomial and the artificial neural network were found for four color scanners. The better number of polynomial terms was 10, reaching the accuracy of 1.6~3.0 CDU (color difference unit) CIELAB average CD (color difference) and 8~13 CDU CIELAB maximal CD. And the reasonable number of hidden cells of the network was 6, reaching the accuracy of 1.4~2.6 CDU CIELAB average CD and 6~8 CDU CIELAB maximal CD. The test results showed that the polynomial regression and the artificial neural network techniques could be used to characterize commonly used color scanners, and the latter has a higher accuracy.

Key words: color scanner; characterization; color difference; polynomial regression; artificial neural network

1 引言

在人类的所有感觉中, 视觉和色彩的感觉恐怕是最令人兴奋的, 彩色信息带来的信息量远远多于黑白信息。随着数字技术的发展, 以 CCD 为光敏感元件的彩色信息捕获工具已在彩色复制、机器视觉等领域中发挥作用^[1], 特别是多用于彩色复制领域的彩色扫描仪已成为常用设备。

扫描仪在捕获彩色光信息后与其他诸如显示器、打印机等设备间色彩的一致性通讯成为彩色工作流程的关键, 这一关键的保证首先需要建立客观、一致的颜色描述, 即各个设备能够由反映人眼视觉特征的 CIE 色彩度量数值描述颜色。但实际上, 彩色设备均以自己独特的语言表示色彩, 如扫描仪用其 CCD 响应的 RGB (红、绿、蓝) 数值, 打印机则用其决定原色墨量的 CMYK (青、品红、黄、黑) 数值, 它们与 CIE 色彩度量值, 如 CIE XYZ 或 CIE LAB 值不同, 存在着某种非线性的对应关系, 其非线性特征及复杂程度直接与设备的技术性能相关。将设备色彩值与 CIE 色彩值对应关系的建立称为设备的特征化^[2], 是彩色工作流程中一项重要的工作。常用的技术方法有基于最小二乘法的多项式回归技术^[3]、三维查找表与插值技术^[4]及神经网络技术^[5]。

针对目前常用扫描仪的性能特点, 确定了多项式回归和神经网络两种特征化技术方法, 通过实验对这两种技术的性能特点及实现精度进行了比较和说明。

2 扫描仪特征化原理

扫描仪的 CCD 电子感应器件响应照明光经被扫描影像表面反射的光谱。通常, 设计 3 种不同波段透过的滤色片覆加在不同的感应器件上, 形成三波段感应输出数值, 即 RGB 输出值。以离散数值的近似形式表示, 扫描仪的记录过程可描述为:

$$Z_i = H(M^T L r_i), \quad (1)$$

其中, 脚标 i 指扫描影像表面采样点 i ; Z_i 为 3×1 阶扫描仪输出 RGB 列矢量; r_i 是点 i 的 $N \times 1$ 阶光谱反射率列矢量, N 为光谱采样点数; L 为 $N \times N$ 阶对角矩阵, 其对角元素对应扫描仪光源的 N 个

辐射光谱功率采样值; M 为 $N \times 3$ 阶矩阵, 其第 j ($j = 1, 2, 3$) 列矢量 m_j 对应第 j 个滤色片光谱透过率和扫描仪响应器件光谱灵敏度的乘积, 上标 T 代表矩阵的转置; H 代表一种非线性函数关系。

若以 A 代表 $N \times 3$ 阶矩阵, 表征 CIE XYZ 色匹配函数采样矩阵, t 为 CIE XYZ 列矢量, 则在照明体 L 下具有反射率 r_i 的点 i , 满足

$$t_i = A^T L r_i, \quad (2)$$

扫描仪的特征化问题便是确定一种连续的映射关系 Ψ_{scan} , 将所记录的数值 RGB 变换为 CIE 标准色度值, 这里为 CIE XYZ, 即

$$t = \Psi_{\text{scan}}(Z), \quad (3)$$

式 (3) 对所有的 r 成立。

这种映射关系建立的第 1 步是选择一系列色块, 其所有色彩能代表感兴趣的色彩范围。理想情况下, 这些色彩对扫描仪和标准观察者而言在所用照明光源下都不是同色异谱的, 以保证一对一的映射。实际中这点不准保证。ANSI/ISO II8.7/2 为国际标准委员会确定的符合此要求的反射型色板^[6]。此色板的主要部分包括灰色色块、青品黄单色染料色块、双色染料组合色块及其他 12 个色调 3 个亮度级等共 264 个色块。

以 Q 表示色块总个数, 各色块对应的 CIE XYZ 色度值和扫描仪记录值分别为 $t_k = A^T L r_k$ 和 $Z_k = H(M^T L r_k)$, $k = 1, 2, \dots, Q$ 。于是, 扫描仪特征化的实现变为寻找这样的变换 Ψ_{scan} , 使得

$$\Psi_{\text{scan}} = \arg(\min_{k=1}^Q \|\Psi(Z_k) - t_k\|^2), \quad (4)$$

成立。式中 $\|\cdot\|^2$ 是误差判据, 代表变换的 CIE XYZ 值与测量的实际 XYZ 值的方差。(4) 的含义为变换 Ψ_{scan} 使所有色块的方差和最小。

t_k 代表的标准色度值为 CIE XYZ 值。由于对人的视觉而言, CIE XYZ 为非均匀色空间, 满足 (4) 的 Ψ_{scan} 并不能保证视觉上的色差最小, 颜色的量化和比较常在视觉均匀色空间中进行^[7], 因而也常在 CIE LAB 和 CIE LUV 均匀色空间中进行 Ψ_{scan} 的确定, 综合为

$$\Psi_{\text{scan}} = \arg(\min_{k=1}^Q \|\Psi(Z_k) - \Gamma(t_k)\|^2), \quad (5)$$

$\Gamma(\cdot)$ 为从 CIE XYZ 到 CIE LAB 或 CIE LUV 的变换。

3 特征化实验

3.1 实验仪器和材料

实验选择了常用的 4 台平板扫描仪, 为 Epson perfection 1 200 u、Epson perfection 1 640 su、Microtek ScanMaker V600 和 Microtek ScanMaker 4 700, 编号为 1、2、3、4, 但编号顺序不代表上述顺序。选用阿克发 (Agfa) 摄影材料制备的 II8. 7/2 标准色板为特征化反射色板。

3.2 多项式回归实验及结果分析

多项式回归方法即由 (5) 表示的 Ψ_{scan} 为多项式的情况。具体到由 $Z = (RGB)^T$ 到 $t = (XYZ)^T$, 一次 (线性) 多项式关系可表示为

$$t = A_{3 \times 3} Z, \quad (6)$$

二次多项式关系则为

$$[XYZ]^T = A_{3 \times 9} [R \ G \ B \ RG \ GB \ RB \ R^2 \ G^2 \ B^2]^T, \quad (7)$$

有时也加上常数项。高阶多项式关系即增加 R 、 G 、 B 的高次项。

对实验的 II8. 7/2 色板而言, 多项式回归意味着寻找使 264 个色块满足诸如式 (7) 和式 (5) 的系数矩阵 A 。

实验进行了 $XYZ = f(RGB)$ 的 (R G B) 一次线性回归、(R G B RG GB RB) 6 项回归、(R G B RG GB RB R² G² B²) 9 项二次回归、(R G B RG GB RB R² G² B² RGB R³ G³ B³) 13 项回归。XYZ 的拟合误差所产生的视觉色差以 D_{50} 下 CIE LAB 均匀色空间的方差 $\Delta E_{L^* a^* b^*}$ 表示, 常简记为 ΔE ,

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (8)$$

II8. 7/2 色板拟合平均色差 $\overline{\Delta E}$ 和最大色差 ΔE_{max} 结果见表 1。

表 1: $XYZ = f(RGB)$ 多项式回归的 $\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$

Tab. 1 $\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$ values for $XYZ = f(RGB)$ polynomial regression

扫描仪编号	多项式项数				
	3	6	9	10	13
1 [#]	14. 45/37. 8 9.	03/43. 94 3.	63/12. 54 2.	84/11. 24 2.	21/9. 19
2 [#]	10. 78/25. 92 5.	80/32. 14 2.	74/12. 57 2.	16/12. 12 1.	41/11. 41
3 [#]	13. 53/40. 08 12.	86/59. 61 2.	05/9. 94 1.	82/7. 98 1.	12/5. 00
4 [#]	12. 98/27. 10 10.	90/73. 00 4.	19/17. 13 3.	37/15. 31 3.	11/12. 83
4 [#] 色组 1 (回归)	12. 96/27. 00 10.	28/69. 67 4.	18/16. 49 3.	29/14. 37 3.	18/17. 73
4 [#] 色组 2 (检验)	12. 94/26. 40 10.	17/46. 16 3.	79/12. 77 3.	36/13. 40 3.	42/17. 61

理论上讲, 多项式的项数越多, 回归精度就越高, 但随着多项式项数的提高, 会出现误差的局部极大和极小; 而且, 在一定数目的回归数据下, 高阶项的回归会出现泛化能力的降低。因此, 对各组数据进行了泛化分析。方法是将 II8. 7/2 的 264 个色块按色彩相近的 2 个分入不同组的方式分为各 132 个色块的 2 组, 一组用于回归, 另一组用于泛化检验。作为代表, 表 1 中列出了 4[#] 扫描仪的结果, 另外 3 个扫描仪亦有相同的规律。

ΔE 为 2. 3 左右对应视觉上的刚可辨差^[8]。

$$A_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} 1.4136 & -0.5856 & 0.5209 & 0.6623 & 0.0555 & 0.0530 \\ 0.3485 & 1.0797 & -0.2672 & 0.6141 & 0.3443 & -0.1264 \\ 0.3453 & -1.1407 & 1.8122 & -0.1004 & 0.7071 & 0.0636 \end{bmatrix}$$

表 1 数据表明, 对所实验扫描仪而言, 线性回归远不能满足要求, 9 项、10 项和 13 项回归具有较好的回归精度, 特别是对 2[#] 和 3[#] 扫描仪, 回归精度较高。但从平均色差角度看, 到 13 项回归泛化能力开始下降, 10 项回归应是较合理的选择。

从表 1 数据同时看到, 含有 R、G、B 和交叉项 RG、GB、RB 的 6 项回归出现了局部极大, 平均色差也较线性回归情况改善不大 (扫描仪 2[#] 稍好些); 分析此时的回归系数表明, 都表现为交叉项系数占有较大的比重, 如其中一扫描仪情况为:

与前 3 列 R、G、B 线性项系数相比, 后 3 列 RG、GB、RB 交叉项系数仍很大, 最大约占主成分(如第一行为 1.4136) 的 50%, 表明了较强的非线性关系。此时拟合的 264 组 XYZ 及计算转换的 $L^* a^* b^*$ 值中有些数值超过了 XYZ 和 $L^* a^* b^*$ 的定义范围, 致使与测试数值产生了非常大的偏差, 形成很高的平均色差和最大色差。这表明, XYZ 与 RGB 间与线性关系有较大的偏离, 增加 R、G、B 的相互作用也不足以表征其非线性特性。含有 9 项的 2 次回归和更高阶回归则实现了较好的非线性关系近似, 此时不再出现 XYZ 及 $L^* a^* b^*$ 拟合数值超出范围的现象。

扫描仪大多使用荧光光源, 其辐射光谱与人眼视觉空间使用的日光光谱差异很大, 这在原理上就限制了由 RGB 到 CIE XYZ 之间存在着严格的线性变换关系^[9]; 此外, 现今绝大多数扫描仪设

计用于捕获摄影材料的影像。这种材料所代表的减色影像, 以青、品、黄三色染料的密度变化有效地形成和区分色彩, 扫描仪只要有效地感应其密度变化就足够了。实际中, 通常使用峰值落在红、绿、蓝范围的三个窄波带滤色片对感应器响应进行限定, 使其响应密度变化^[10]。而密度与 CIE XYZ 之间是非线性的关系, 这与色度测量的光谱要求形成了更大的差异。因此, 从实际设计的角度看, 用于非色度扫描的扫描仪, 影像的色度值 CIE XYZ 与其响应值 RGB 之间的非线性关系成为自然。

鉴于 CIE XYZ 与 RGB 之间较强的非线性特征, 实验同时进行了 $L^* a^* b^* = f(\text{RGB})$ 的上述几种回归实验, 以考察直接考虑 $L^* a^* b^*$ 与 RGB 之间非线性关系的情况。结果见表 2。

表 2 $L^* a^* b^* = f(\text{RGB})$ 多项式回归的 $\overline{\Delta E}/\Delta E_{\max}$

Tab. 1 $\overline{\Delta E}/\Delta E_{\max}$ values for $L^* a^* b^* = f(\text{RGB})$ polynomial regression

扫描仪编号	多项式项数				
	3	6	9	10	13
1 [#]	8. 20/25. 96 5. 44/19. 94 2. 36/9. 96 2. 23/9. 19 2. 12/8. 13				
2 [#]	8. 82/23. 56 5. 07/17. 39 2. 26/13. 33 2. 26/13. 23 2. 22/11. 09				
3 [#]	5. 59/19. 21 2. 86/11. 00 2. 09/9. 66 1. 65/7. 86 1. 53/6. 24				
4 [#]	5. 79/21. 29 3. 90/15. 01 3. 22/13. 32 2. 96/10. 84 2. 76/9. 61				
4 [#]	色组 1 (回归)	5. 67/17. 18 3. 95/15. 86 3. 19/10. 01 2. 87/9. 70 2. 75/8. 73			
	色组 2 (检验)	5. 50/18. 68 3. 82/16. 91 3. 21/12. 68 2. 77/11. 01 2. 83/9. 45			

与表 1 数据比较, $L^* a^* b^*$ 直接与 RGB 进行多项式回归, 相同回归情况下, 无论是平均色差还是最大色差效果均好于或相接近于 XYZ 与 RGB 回归, 表明直接建立 $L^* a^* b^*$ 与 RGB 之间的多项式回归更适合于常用扫描的特征化。

3. 3 神经网络实验及结果分析

人工神经网络具有很强的处理非线性关系的能力, 误差反向传播的 BP 神经网络^[11]应用最为广泛。在数字设备的色彩校准中常用三层 BP 网络^[5, 12], 具体到本实验中应用的由 RGB $\rightarrow L^* a^* b^*$ 的网络结构如图 1 所示。输入层为自变量 RGB, 输出层为结果 $L^* a^* b^*$ 。

实验以 IT8. 7/2 色板 264 个色块的扫描仪 RGB 响应值和 D₅₀ CIE LAB 测试值对上述网络进行训练, 实现其一定精度的非线性关系。

将输入 RGB 数值归一化, 隐含层和输出层分

别选用 sigmoid 非线性函数和 pureline 线性函数作为激活函数, 选用 trainlm BP 训练法, 使用 264 组输入、输出数据集, 并对 5~9 个不同隐含层神经元个数的情况进行了网络训练。同时, 为了检验不同情况下网络的泛化能力, 对前述划分的 2 个数据集 (各 132 组数据) 进行了网络训练和泛化能力检验。实验表明, 上述各种情况下均能得到快速的收敛, 并能得到稳定的训练结果。但当隐含层神经元数目从 6 到 9 增加时, 网络的泛化能力开始下降, 因而选择 6 个隐含层神经元作为特征化网络的最优结构。以 CIE LAB 的平均色差和最大色差表示网络确定的 $L^* a^* b^* = f(\text{RGB})$ 的非线性拟合精度, 10 次训练的平均结果见表 3。 $(\Delta E_{\max})_{\max}$ 为 10 次结果中 ΔE_{\max} 的最大值, $\text{RMS}(\overline{\Delta E})$ 为 10 次网络训练平均色差的均方根误差。表 4 为两数组集各 132 组数据, 一数组集训练网

络、一数组集泛化检验 10 次实验的平均结果, 总的来看两数组集间没有大的差距。

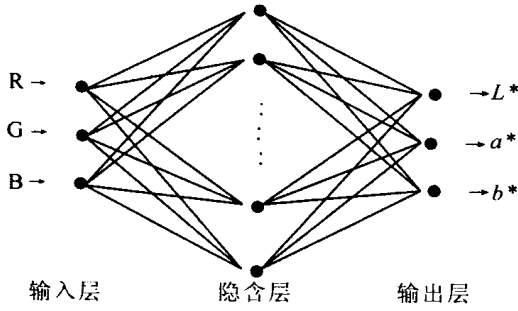


图 1 RGB 与 CIELAB 之间色转换的网络结构
 Fig. 1 Neural networks for the color conversion between RGB and CIE LAB

表 3 网络拟合精度及重复性

Tab. 3 $\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$ values and its reproducibility of neural network

扫描仪编号	$\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$	$(\Delta E_{max})_{max}$	RMS ($\overline{\Delta E}$)
1 [#]	1. 94/ 5. 73	6. 43	0. 055
2 [#]	1. 47/ 6. 54	6. 84	0. 017
3 [#]	1. 40/ 5. 80	7. 02	0. 043
4 [#]	2. 62/ 8. 35	9. 01	0. 056

表 4 泛化实验 $\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$

Tab. 4 $\overline{\Delta E} / \Delta E_{max}$ values of generalizing test

扫描仪编号	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
色组 1 (训练)	88/ 5. 80	42/ 6. 26	41/ 5. 57	2. 58/ 9. 35
色组 2 (检验)	93/ 6. 08	47/ 6. 56	45/ 5. 10	2. 70/ 9. 16

表 3 数据中, 2. 62 的 ΔE 平均色差稍大于视觉刚可辨差 2. 3, 其他平均色差均小于视觉刚可辨差; 10 次训练平均色差的波动最大仅为 3%。因此, 所确定的网络结构能够稳定地收敛于较高的精度; 而且由于 trainlm 是一种快速训练法, 收敛速度也很快。表 3 数据与表 2 比较, 4 个扫描仪网络训练的平均色差均比 10 项回归的平均色差低, 降低 8% 到 35% 不等; 最大色差也均有不同程度的降低。实验表明, 神经网络方法对于扫描仪的特征化问题具有较多项式回归更大的优势。

4 结 论

对于常用的彩色扫描仪, 多项式回归技术仍可以达到较高的精度, 不失为一种快速有效的方法; 特别地, 相同回归情况下, 由扫描仪信号 RGB 到 CIE LAB 的回归优于到 CIE XYZ 的回归。与多项式回归方法相比, 神经网络技术可以实现更高的精度, 且具有较好的重复性, 可成为扫描仪高精度特征化的有效方法。结果同时表明, 无论是哪种方法, 能够达到的最佳精度与扫描仪的特性密切相关。

参考文献:

[1] 于前洋. 作为图像传感器的 CCD、ICCD 和 IRCCD [J]. 光学精密工程, 1994, 2 (5): 8 16
 YU Q Y. The CCD, ICCD and IRCCD as imager [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1994, 2 (5): 8 16. (in Chinese)

[2] JOHNSON T. Methods for characterizing colour scanners and digital cameras [J]. *Displays*, 1996, 16 (4): 183-191.

[3] KANG H R. Color scanner calibration [J]. *Imaging Sci Technol*, 1992, 36 (2): 162-170.

[4] HUNG P C. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look up table model and interpolations [J]. *Electron Imaging*, 1993, 2 (1): 53-61.

[5] VRHEL M J, TRUSSELL H J. Color scanner calibration via a neural network [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1999, (6): 3465-3468.

[6] MACDONALD L W. Developments in color management systems [J]. *Displays*, 1996, 16 (4): 203-211.

[7] 任智斌, 隋永新. 在均匀色空间中实现彩色图像的颜色量化 [J]. 光学精密工程, 2002, 10 (4): 340-345.
 REN ZH B, SUI Y X. Color quantization of color images in a homogeneous color space [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10 (4): 340-345 (in Chinese)

[8] MAHY M, VAN EYCKDEN L, OOSTERLINCK A. Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV [J]. *Color Res Appl*, 1994, 19 (2): 105-121

- [9] SHARMA G. TRUEESL H J. Digital color imaging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6 (7): 901-931.
- [10] RODRIGUEZ M A, STOCKHAM T G. Producing colorimetric data from densitometric scanners [J]. *SPIE*, 1993, 1913: 413-418.
- [11] 蒋宗礼, 人工神经网络导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. 39-54.
JIANG Z L. *Introduction to artificial neural network* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. 39-54. (in Chinese)
- [12] SHIRO USUI, YOSHIFUMI ARAI, SHIGEKI NAKAUCHI. Neural networks for device independent digital color imaging [J]. *Information Sciences*, 2000, 123 (1-2): 115-125

作者简介: 徐艳芳 (1963-), 女, 河北保定人, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为彩色数字图像处理及色彩性能评价。E-mail: fang912@21cn.com

欢迎订阅《光机电信息》(月刊)

《光机电信息》是一份为工程师、研究者、科学家和技术专家提供国内外有关光学、光电子学和精密机械综合消息的月刊。它从技术和商业两方面报道和分析上述领域的最新研究进展和发展趋势, 其特点是信息量大且传播速度快。

完整的报道范围

《光机电信息》以全方位的视角瞄准国际前沿, 紧盯国内外光机电领域发展的热点和焦点, 每期以专题形式发布。主要报道光学、光电子学、光电工程、精密机械、激光、光通信、光学仪器、发光学、显示技术、医用光学、光学材料、微纳技术、微机械系统 (MEMS)、先进加工制造技术等诸多读者感兴趣的领域。

有效的报道内容

《光机电信息》是国内致力于光电子领域的工程师、管理人员、科学家、研究者和技术专家的必读之物。《光机电信息》每月都会向其所服务的产业提供以下栏目: 各种专题报道、市场纵横、科技简讯、产品放送、设计与应用和专题信息长廊等。

广告投资的最好选择

《光机电信息》是一份每月发行量达5 000余份的资深杂志, 这意味着每年有数 10 万人次的顶级工程师和研究人员阅读《光机电信息》。您的广告会被所有《光机电信息》的读者看到。请抓住机遇, 扩大贵公司在中国市场的知名度。

欲投放广告于《光机电信息》 请按下列地址联系

联系人: 高晓萍

传 真: (0431) 5682346

电 话: (0431) 6176853

地 址: 长春市东南湖大路 16 号 邮 编: 130033

E-mail: xxfw@ciomp.ac.cn