

doi: 10.3788/gzxb20124104.0472

用于数码显微镜的白平衡校正方法

窦江龙, 刘岩, 刘鹏, 余飞鸿

(浙江大学 光电系现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:提出了一种用于数码显微镜的非线性白平衡方法. 以标准 D65 光源光照下孟赛尔色卡每个色块的 XYZ 三刺激值和所成图像中的 RGB 值为训练样本, 用神经网络建立不同数码显微镜拍摄的 RGB 输出与 XYZ 三刺激值之间的关系; 再通过 Estevens 矩阵把 XYZ 三刺激值转换成人眼感光器所接受到的刺激值, 并进行非线性计算; 最后把计算结果转换回 RGB 空间, 从而得到白平衡后的图像. 实验结果表明, 该方法所得的白平衡校正结果更加接近标准白光照射下的图像颜色. 在光源色纯度较高的情况下, 采用调整通道增益的方法变化幅度较大, 而采用本文提出方法结果更加稳定; 特别是当光源的色纯度过大使得图像中某个颜色通道的值接近 0 的时候, 用调整三通道增益的方法已经完全失去了校正作用, 而采用本文中的非线性方法仍然可以得到好的校正结果. 同时, 此方法中建立的神经网络模型反映的是成像设备的 RGB 空间到 XYZ 空间的转换特性, 对于不同的光照条件, 此特性不变, 因此对于不同光源不需要分别建立神经网络模型.

关键词:颜色恒常性; 色纯度; 白平衡; BP 神经网络

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0472-6

0 引言

物体在不同光源的照射下会呈现不同的颜色. 这是因为不同的光源的光谱分布不同, 从而导致目标物体的反射光线光谱偏离“真实”物体颜色. 对于人眼来说, 当照明条件变化时, 虽然感知色貌会有差别, 但是视觉系统尽量使感知色的差别趋于最小, 这种现象称为颜色恒常性^[1]. 但是对于图像记录介质来说, 则不具有这一能力. 采用 Von Kries 对角矩阵理论^[2], 通过以特定区域作为参考白或者做灰度世界假设^[3-4], 计算各通道新的增益系数并进行调整, 能够达到颜色适应的目的. 但在实际计算中, 通过调整各通道增益往往不能很好地再现理想的颜色回复结果, 尤其是当光照的色纯度比较高的时候, 恢复结果距目标结果相差比较大. 例如, 在色温为 6 500 K 和 3 100 K 两种情况下拍摄的显微图像, 调整三通道增益, 希望把 3 100 K 光源下拍摄的图像恢复为 6 500 K 光源下的图像, 但是从实验结果上看到, 恢复的颜色上存在明显的偏差.

另一种实现颜色适应的方法是通过放置监督色板, 计算不同光源下色板中各色块的关系矩阵或网络模型, 建立实验色和标准色的联系^[5], 根据此关系

将参考光源下图像按像素恢复为标准光源下的图像. 这种方法在准确度上比调整通道增益的方法要好, 但对于每一种新的光源照明, 都需要利用监督色板重新建立新的转换方式. 因此, 并不适合作为普遍的方法.

本文通过拍摄标准色卡, 建立图像的 RGB 空间到人眼感光器刺激值之间的神经网络模型. 对于实际拍摄到的显微图像, 首先按照上述神经网络模型转换到人眼感光器的刺激, 在人眼刺激值空间中经过 Nayatani 提出的非线性转换公式^[6]把测试光源照明下的颜色恢复为参考光源照明下的颜色; 然后再通过神经网络模型转换回图像空间的 RGB, 得到白平衡结果. 与有监督色板的方法相比, 这种方法可以适应多种光照条件, 不需要对不同光源分别建立转换模型; 从校正效果来说, 本文的方法所得结果优于调整各通道增益所得结果, 特别是在实验光源色的色纯度比较大的情况下.

1 原理与方法

非线性色适应流程见图 1. 首先获取图像 RGB 值与 XYZ 三刺激值之间的转换关系, 同时根据 Estevens 矩阵建立的 XYZ 值与人眼三色感光器刺

第一作者: 窦江龙(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理与颜色校正. Email: porpalone@gmail.com

导师(通讯作者): 余飞鸿(1964-), 男, 教授, 主要研究方向为光学信息处理、光学 CAD 技术、智能化光学仪器、图像处理及光学图像传感器. Email: feihong@zju.edu.cn

收稿日期: 2011-10-18; 修回日期: 2011-12-01

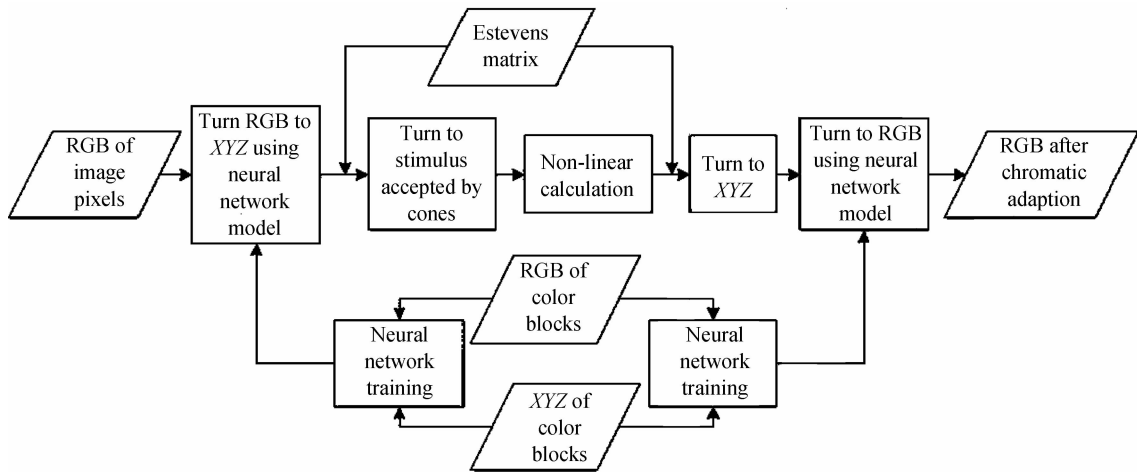


图1 非线性色适应流程
Fig.1 Procedure of non-linear chromatic adaption

激值的转换关系,把待校正图像按像素表示成人眼感光器刺激强度,在人眼的颜色空间中进行非线性转换,最终转换回图像的 RGB.

1.1 建立图像颜色与人眼感光器刺激的关系

1.1.1 建立相机 RGB 与 XYZ 之间的 3 层 BP 网络

BP 神经网络是一种具有三层或者三层以上的神经网络模型,具有很强的非线性映射能力,如图 2. 根据经典的神经网络理论,一个三层的 BP 网络可以完成任意的 n 维输入到 m 维输出的映射^[7]. 以

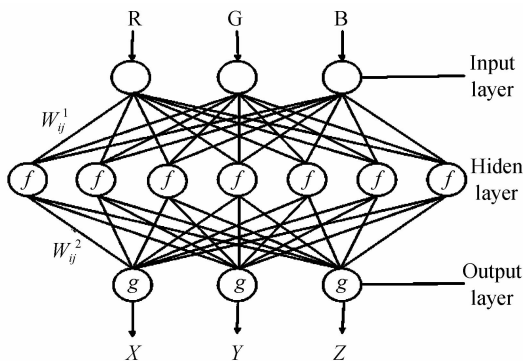


图2 建立神经网络模型示意
Fig.2 Sketch of neural network model in use

XYZ 三刺激值和像素的 RGB 值作为输入输出,建立 3 层神经网络. 这里, W_i^j 为各层连接权值, f 和 g 为神经网络传递函数,其中 f 为 sigmoid 函数, g 为线性函数. 隐藏层节点个数选取为^[8]

$$k = 2 \cdot m + 1 \tag{1}$$

通过预先获取的样本集可以训练得到所求 3 层 BP 网络.

1.1.2 神经网络训练样本的选取

需要进行色适应操作的图片可能来源于各种相机设备,不同的相机对于物体颜色的演绎会有不同. 根据朗伯反射模型,用成像设备拍摄一幅图像时,成像设备的输出的图像数据可以用式(2)表示

$$I_k(x) = \int_F [S_k(\lambda)E(\lambda)R(x,\lambda)]d\lambda \tag{2}$$

式中, I_k 是图像第 k 通道的像素值,积分限 F 代表可见光谱的范围, S_k 是成像设备第 k 通道的相应因数, R 是物体表面的光谱反射比, E 是光源的光谱分布. 式(2)说明了图像颜色决定于物体本身性质、光源性质以及成像设备特性.

对于不同相机, S_k 值的不同会造成同样的物体可能拍摄到不同的颜色效果. 为消除其影响,需要对每种电子目镜,建立各自的 BP 网络模型. 其中,在标准光源 D65 照明下,用电子目镜接普通镜头,拍摄孟塞尔标准色板,从图像中获取 24 个色块的 RGB 值. 另一方面,计算各色块在 D65 照明下颜色的 XYZ 三刺激值.

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{780} P(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y = k \int_{380}^{780} P(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z = k \int_{380}^{780} P(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{cases} \tag{3}$$

式中, k 是归一化系数,用以确保 Y 值为 100, $P(\lambda)$ 是光谱相对分布, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值, $S(\lambda)$ 为物体的光谱反射比,对于标准色卡上的 24 个色块来说,存在着 24 组不同的光谱反射比. 通过查表获取这些已知量,分别计算每一个色块在 D65 照明下的标准三刺激值 XYZ. 同时,在 D65 光源下拍摄到的色卡图像中,取每个色块的 RGB 值. 这样,获得 24 组样本进行神经网络训练,通过多次迭代的方法进行神经网络的训练. 结果表明,所获得的 BP 网络,具有好的收敛性.

1.1.3 XYZ 与人眼感光器刺激的关系

根据三色学说,视网膜上存在能感受红、绿、蓝色的光接收器(椎体细胞),人所感受到的各种颜色都是这三种接收器按照不同比例混合得到的结果. 利用 Esteves 求出的基本光谱灵敏度的原色色品坐标^[9]可将 XYZ 三刺激值转换为人眼的红绿蓝感光

器中的刺激($R_{\text{eye}}, G_{\text{eye}}, B_{\text{eye}}$)强度

$$\begin{bmatrix} R_{\text{eye}} & G_{\text{eye}} & B_{\text{eye}} \end{bmatrix}^T = M \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.2263 & 1.16532 & 0.0457 \\ 0 & 0 & 0.91822 \end{bmatrix} \quad (5)$$

为 XYZ 与人眼 RGB 感光器刺激值之间的转换关系。

1.2 非线性色预测计算

1.2.1 色适应理论基础-Von Kries 公式

Von Kries 假设人眼中存在感受红绿蓝三种感光器. 照明光在光谱变化时, 感光器调整各自的感应度, 以达到色适应的调节. Von Kries 认为, 这种调整在三个通道之间是成比例的. 设红绿蓝感光器中的测试照明体和测试色分别为 (R_0, G_0, B_0) 和 (R, G, B) , 同样参照照明体和参照色分别为 (R'_0, G'_0, B'_0) 和 (R', G', B') , 存在关系^[10]

$$\begin{cases} R/R_0 = R'/R'_0 \\ G/G_0 = G'/G'_0 \\ B/B_0 = B'/B'_0 \end{cases} \quad (6)$$

Von Kries 公式基本说明了色适应的现象, 但对于下面几种现象不能解释

1) Helson-Judd 效应: 用彩光照明时, 在明亮的部分可以感受到照明光的色调, 暗的部分感受到照明光的反色调;

2) Stevens 效应: 改变照度照明多种非彩色物体, 高照度条件下感受到明亮的白色更白, 暗灰色更黑;

3) Hunt 效应: 改变照度照明彩色物体, 随着照度增加感受到彩度增加。

Nayatani 利用 Lam 和 Rigg 实验得出的数据, 将 Von Kries 线性公式结合幂指数, 拟合得到一组新的色适应公式^[6], 相比于 Von Kries 方法, 其色适应变换的准确性更强, 可以更精确地解释上述的几种色适应现象. 在把图像中的 RGB 数据转到人眼的三色感光器强度空间之后, 利用 Nayatani 模型进行色适应变换。

Nayatani 的色适应公式为

$$\begin{cases} \frac{R'+1}{100\rho'_0\xi'+1} = \left[\frac{R+1}{100\rho_0\xi+1} \right]^{P_r} \\ \frac{G'+1}{100\rho'_0\eta'+1} = \left[\frac{G+1}{100\rho_0\eta+1} \right]^{P_g} \\ \frac{B'+1}{100\rho'_0\zeta'+1} = \left[\frac{B+1}{100\rho_0\zeta+1} \right]^{P_b} \end{cases} \quad (7)$$

式中, R, G, B 代表测试色, R', G', B' 代表对应色, ρ'_0 和 ρ_0 分别是灰色参考视场下和测试视场下的反射

比. Nayatani 公式中 ξ, η, ζ 为色品坐标的线性组合:

$$\begin{bmatrix} \xi & \eta & \zeta \end{bmatrix}^T = M \begin{bmatrix} x & y & 1 \end{bmatrix}^T / y \quad (8)$$

其中矩阵 M 见式(5). 对于视场中存在多种颜色的情况, 需要通过图像中每个像素的颜色信息来确定各位置的反射率 ρ . 这时, 对于每种颜色, 有

$$\begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix}^T = \rho_0 \frac{E}{\pi} \begin{bmatrix} \xi & \eta & \zeta \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

注意到存在线性组合, 使 $aR + bG + cB = k\rho_0 E$, 即可以用 RGB 的线性组合来表示照度的相对大小. 假设最大反射率为 ρ_0 , 颜色为 (R_0, G_0, B_0) , 则对于任意一个其它颜色, 其反射率 ρ 可以表示为

$$\rho = \rho_0 \frac{aR + bG + cB}{aR_0 + bG_0 + cB_0} \quad (10)$$

非线性的幂指数为

$$\begin{cases} P_r = f(R_0) / f(R'_0) \\ P_g = f(G_0) / f(G'_0) \\ P_b = g(B_0) / g(B'_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$\begin{cases} f(x) = \frac{6.469 + 6.362x^{0.4495}}{6.469 + x^{0.4495}} \\ g(x) = \frac{8.414 + 8.091x^{0.5128}}{8.414 + x^{0.5128}} \end{cases} \quad (12)$$

R_0, G_0, B_0 和 R'_0, G'_0, B'_0 代表了测试视场和参照视场的光源色, 有

$$\begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \rho_0 \frac{E}{\pi} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 E 和 E' 是两个视场的照度。

1.2.2 光源色的确定

光源的颜色由光谱三刺激值以及光谱分布决定, 即

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{380}^{780} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (14)$$

注意到其形式与式(2)相似, 只相差一个物体光谱反射比 $S(\lambda)$. 即物体的颜色是光源颜色经过光谱反射比调制得到的结果. 对于图像中的白色区域, 其光谱反射比如图 3 (以孟塞尔色卡中的白色色块为例)。

对于可见光谱部分, 其光谱反射比基本恒定, 即调制为线性调制. 一种颜色的光 (R, G, B) 经过白色部分调制, 认为出射的光仍是原颜色的光, 变成 (kR, kG, kB) . 因此, 一般来说, 可以通过寻找图像中认为是最亮的白色部分, 以其当前的颜色表示光源颜色。

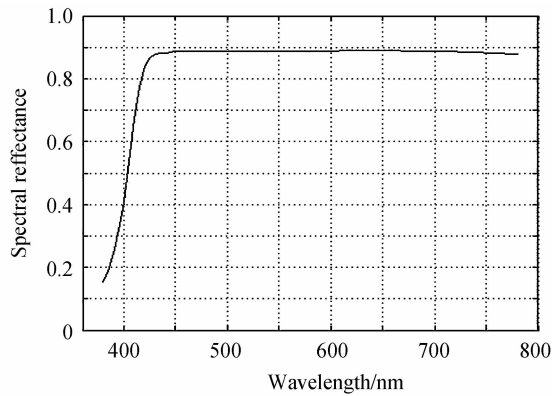


图3 孟塞尔色卡白色色块的光谱反射系数
Fig. 3 Spectral reflectivity of white block in Munsell color chart

但不是每种情况下都能够在图像中找到白色的部分,对于这种情况,需要借助J. V. Weijer提出的Grey Edge假设来确定光源的颜色. J. V. Weijer认为,场景中所有表面的平均反射的差分都是无色差的,图像的光照颜色可以计算图像的平均颜色导数得到,即^[11]

$$\frac{\int |f_x(X, \lambda)| dX}{\int dX} = kE \quad (15)$$

其中 X 表示图像中的点, k 为常量, E 代表光源颜色.

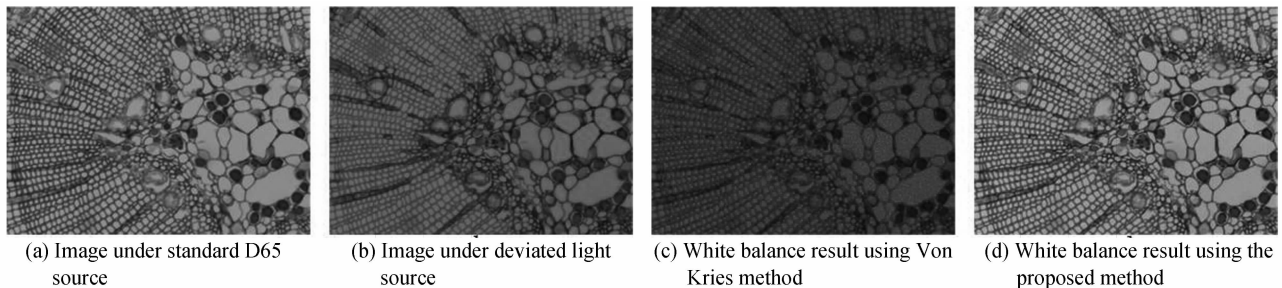


图4 实验结果
Fig. 4 Experiment result

中 B 的分量几乎为 0, 因此白平衡系数很大; B 分量略微的变化就会引起白平衡之后的 B 分量的变化超出可接受范围; 而采用了本文提出的方法之后, 仍然具有比较好的结果.

2.2 客观评价

客观评价以电子目镜对孟塞尔色卡的各种色块的校正结果作为判据, 对几种不同光源分别按照两种方法进行颜色校正, 分别比较所得校正结果与标准光照下图像中各色块色差. 实验中采用的三种光源光谱如图 5.

在 3 种光源下分别用调整 3 通道增益方法 (Gain Adjustment Method) 和本文方法 (Non-linear Method) 进行了色适应计算, 结果对比如图 6.

2 实验结果及评价

颜色校正的效果通常用两种评价标准, 主观评价标准和客观评价标准. 主观评价是直接利用观察者的视觉感受, 对颜色质量进行视觉评价; 客观评价是利用目标颜色和校正颜色的色差作为评价标准, 本文中定义色差为理想值和校正结果在 RGB 空间的距离

$$L = \sqrt{(R-R_0)^2 + (G-G_0)^2 + (B-B_0)^2} \quad (16)$$

2.1 主观评价

实验搭建数字显微图像处理系统, 选取在光源后放置滤光片的方法来实现光源色调节. 实验中通过在卤钨灯光源上放蓝色滤光片来实现白色标准光源, 将蓝色滤光片去掉, 即为黄色光源 (此种情况下所拍摄到的图像中 B 分量几乎为 0). 分别用本文中的方法和调整三通道增益的方法对其它光源照明下的松根显微图像进行颜色校正. 拍摄过程中, 确保图像的各部分都没有发生过曝.

两种白平衡方法的结果对比如图 4.

可以看到, 在光源偏色严重的情况下, 用比例的方法进行白平衡已经完全失效. 由于待恢复的图像

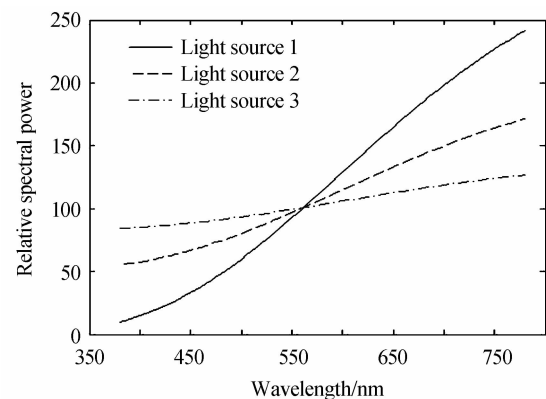


图5 所采用的 3 种光源光谱
Fig. 5 Spectrums of 3 light sources used

从图中可以看到, 光源 2 与标准照明体 A 主波

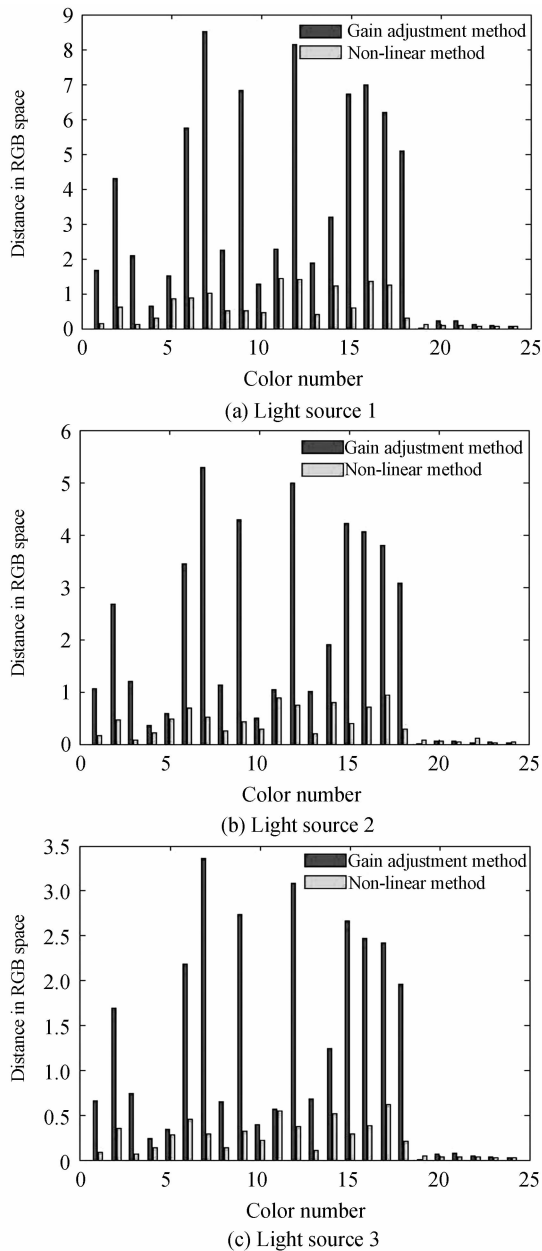


图6 光源1~3下校正结果对比

Fig. 6 Contrast of adaption results with light sources 1~3 长相同,色纯度为0.26;光源3与标准照明体A主波长相同,色纯度为0.09.采用本文的方法得到的结果准确度远优于调整通道增益的方法.另一方面,可以发现对于色纯度不同的光源,利用调整通道增益的方法进行色适应得到的结果相差较大,色纯度越高,校正的结果误差就越大;相反,采用本文所述的方法进行色适应计算得到的结果,在色纯度变化的情况下都能够保持稳定的高准确度.

3 结论

针对常用的白平衡方法的不足,本文基于神经网络模型和Nayatani的色适应公式,提出一种新的

图像白平衡校正算法.通过对实际拍摄图像进行校正,验证了本文中方法比调整3通道增益的方法具有更高的准确度,而且随着光源色纯度的变化,本文方法具有高的稳定性.另一方面,本文中方法所训练的神经网络反映的是成像设备的RGB值与XYZ三刺激值之间的映射关系,此映射关系不会受光照条件的影响;不需要对每种光照都建立对应的神经网络模型,就可以利用非线性计算得到白平衡校正结果.

参考文献

- [1] CAI Xun, MENG Xiang-xu, XIANG hui. The study of an illumination & hue color constancy algorithm[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(8): 922-926.
蔡珣,孟祥旭,向辉.光照色调颜色恒常性算法研究[J].中国图像图形学报,2004,**9**(8): 922-926.
- [2] ZHU Gui-dong, SHEN Li, WANG Jin-jue. A colour correction method based on the region-specific von-kriesadaptation[J]. *Computer Engineering & Science*, 2007, **29**(2): 50-52.
朱贵冬,沈理,王今觉.基于Von Kries色适应的分区颜色校正方法[J].计算机工程与科学,2007, **29**(2): 50-52.
- [3] XU Xiao-zhao, CAI Yi-heng, LIU Xiao-min, et al. Improved grey world color correction algorithms [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 559-564.
徐晓昭,蔡轶珩,刘晓民,等.改进灰度世界颜色校正算法[J].光子学报,2010, **39**(3): 559-564.
- [4] GU Yuan-bao, FU Yu-zhuo. A method of automatic white balance based on gray world mode[J]. *Computer Simulation*, 2005, **22**(9): 185-188.
谷元保,付宇卓.一种基于灰度世界模型自动白平衡方法[J].计算机仿真,2005, **22**(9): 185-188.
- [5] LIU Guan-song, LÜ Jia-wen, XU Jian-guo, et al. The study of supervised color correction [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003, **26**(4): 502-506.
刘关松,吕嘉雯,徐建国,等.监督颜色校正方法研究[J].计算机学报,2003,**26**(4): 502-506.
- [6] LUO M R. A review of chromatic adaptation transforms[J]. *Coloration Technology*, 2000, **30**(1): 77-92.
- [7] SHEN Hui, LIU Zhi-gui, LI Chun-ju. Research on traffic flow forecasting design based on bp neural network [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2008, **23**(2): 72-75.
申慧,刘知贵,李春菊.基于BP神经网络的交通流量预测估计[J].西南科技大学学报. 2008, **23**(2): 72-75.
- [8] 胡武生.神经网络理论及其工程应用[M].北京:测绘出版社,2006: 67.
- [9] 徐海松.颜色信息工程[M].杭州:浙江大学出版社,2005: 163.
- [10] NAYATANI Y. Development of chromatic adaptation transforms and concept for their classification [J]. *Color Research and Applications*, 2006, **31**(3): 205-217.
- [11] LI Bing. Research on color constancy computation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009: 18.
李兵.颜色恒常性计算研究[D].北京:北京交通大学,2009: 18.

A White Balance Method for Digital Microscope

DOU Jiang-long, LIU Yan, LIU Peng, YU Fei-hong

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A new non-linear white balance method is proposed. Taking XYZ stimulus and RGB values of each color block in Munsell color chart illuminated by D65 light source as training samples. A BP neural network mapping relation is built between digit-image RGB values of standard Munsell color chart and XYZ stimulus. Then Estevens matrix is introduced, which is used in translating XYZ stimulus to cone stimulus. After non-linear calculation, the results are translated back into digit-image RGB values and an image after white balance is produced. It is indicated that this method gives a correct result much closer to image of objects illuminated by standard light sources. In the case of high purity light sources, a large volatility exists in adjusting channel-gains, while a stable result using the proposed method. Especially when the purity of the light source is too high to make values of some color channel approach 0, the channels gain method is out of action, while a good correct result still can be achieved. Meanwhile, the mapping relation between RGB values of digit-image and XYZ stimulus is built, which is a still character for different lighting condition.

Key words: Color constancy; Color purity; White balance; BP neural network