

一种面向多光谱图像的打印分色方法

王莹 曾平 王义峰 罗雪梅

(西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘要 为解决多光谱图像打印输出问题,提出一种用非线性优化技术实现光谱图像打印分色的方法,以同时提高再现图像的光谱精度和色度精度。从分析打印系统成色机理及 Neugebauer 光谱模型入手,比较了图像光谱特性和色度特性对打印效果的影响,可知输出图像光谱误差和色度误差对打印质量均至关重要;据此构造了图像光谱误差和色度误差目标函数,分别反映再现图像的光谱精度和色度精度,并根据实际打印过程对各打印基色的墨量控制值进行约束;最后采用非线性优化方法,逐点计算图像光谱对应的墨量控制值,实现打印分色。实验表明,该方法能同时兼顾再现图像的光谱精度和色度精度,与仅考虑光谱误差的迭代分色方法相比,再现色度精度能提高约 3~10 倍。

关键词 光谱色彩学;光谱图像打印分色;非线性优化;多光谱图像;光谱反射比

中图分类号 TN911.74; TP334 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2122

Spectral-Based Color Separation for Multi-Spectral Images

Wang Ying Zeng Ping Wang Yifeng Luo Xuemei

(School of Computer Science, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract To reproduce multi-spectral images on a printer, a new spectral-based color separation method using the nonlinear optimization technology was presented, which could improve spectral and the colorimetric precision simultaneously. Based on the color principles of printer systems and the Neugebauer model, the effect of spectral and colorimetric characteristics of images on printing output was analyzed. This led to the conclusion that spectral and colorimetric errors were both important for printed images. For this reason, the spectral error and colorimetric error objective functions were designed firstly, one presenting the colorimetric precision of the printed images and another for spectral precision. Furthermore, the effective area coverage of the printer primary inks was limited according to the actual printing process. Finally the nonlinear optimization method was used, by which the spectral reflectance of the multi-spectral images could be transformed to the effective area coverage of the inks and the color separation was realized. Experiments show that the proposed method improves the spectral and colorimetric precision simultaneously. The output spectral precision is about 3 to 10 times higher than that of the regressive method only based on the spectral error.

Key words spectral color science; spectral-based color separation; nonlinear optimization; multi-spectral images; spectral reflectance

1 引言

多光谱图像(Multi-spectral images)是像素值为原始景物光谱反射比(而非 RGB 色度值)的一类图像,可通过多光谱相机获取,主要用于原始景物在不同光照条件下的准确一致再现,目前已广泛应用于艺术品存档^[1,2]、远程医学^[3,4]、军事目标成像等

高端应用领域。

多光谱图像硬拷贝输出目前主要利用超四色打印机实现。由于现有超四色打印不能完全再现各种光谱反射比,面临多对一映射关系、同色异谱现象等多种因素影响,因此优化多光谱图像打印分色方法已成为亟需解决的一个问题。

收稿日期: 2008-07-08; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 国家部委“十一五”预研项目(51316060203)资助课题。

作者简介: 王莹(1977—),女,博士研究生,主要从事多光谱图像输入输出技术方面的研究。

E-mail: mailwangying@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 曾平(1956—),男,教授,主要从事颜色科学、图形图像输入输出技术等方面的研究。

一个好的多光谱图像打印分色方法至少应具有两大特点：一是能有效克服光谱反射比高维(通常为 31 维以上)产生的影响；二是给出的近似光谱反射比，在不同的光照条件下(特别是在用户关心的若干典型光照条件下)均有较好的色彩再现质量。现有的打印分色方法有查找表^[5,6]、神经网络^[7,8]和基于 Neugebauer 方程^[9~13]的方法等，查找表主要用于低维图像的分色，对于高维图像，因需要建立的查找表过大而无法应用。神经网络实现方式复杂，网络训练时间长，很难得到实际应用。Neugebauer 方程是建立在光谱基础上，其所需样本数少，可有效降低分色的数据量，因此可用于光谱图像打印分色的设计。文献[9,10]在 Neugebauer 方程基础上提出一种线性回归迭代法，但该方法仅能从光谱角度实现线性化，且再现光谱精度和色度精度均较低。文献[11~13]提出基于均方根误差进行迭代的方法，其以达到最小的光谱误差为目的，忽略了图像颜色是物体光谱反射比、观察者、照明共同作用的结果这一特点，在追求高精度再现光谱时忽略了色度精度，打印效果不甚理想。

本文提出一种新的面向多光谱图像的打印分色方法。首先分析图像的光谱特性与色度特性对图像输出质量的影响，在此基础上通过对光谱到均匀颜色空间 CIELAB 的转换分析，构造出能反映颜色再现后色度精度的目标函数；同时，根据 Yule-Nielson Spectral Neugebauer 模型，构造出反映打印输出后图像光谱精度的目标函数；然后根据打印过程的物理限制，对打印机基色墨量控制值进行约束；最后，通过对两个目标函数进行加权，采用非线性优化方法获得给定的图像光谱对应的墨水控制，从而实现光谱图像打印分色。本方法从光谱和色度两方面同时保证了图像再现精度，有效提高了多光谱图像打印输出的色彩质量。

2 Yule-Nielson Spectral Neugebauer 模型

在半调打印系统中，一个半调元的光谱反射比，是当各打印基色墨水对半调元 100% 全覆盖时的光谱反射比的加权和，权值为各基色墨水实际对该半调元的覆盖率。基于此，Neugebauer^[14]建立了从打印色的各基色墨水覆盖率估算其光谱反射比的方程。在理想情况下，墨水覆盖率即为产生某颜色所用的墨量的比例。Neugebauer 方程的光谱形式如下

$$\hat{R}_\lambda = \sum_j b_j \mathbf{R}_{\lambda,j,\max}, \quad j = 1, \dots, 2^K \quad (1)$$

其中 \hat{R}_λ 为根据墨水覆盖率估算出的打印色光谱反射比，下标 λ 表示光谱反射比是波长的函数； $\mathbf{R}_{\lambda,j,\max}$ 表示第 j 个 Neugebauer 基色全覆盖半调元时的光谱反射比(当打印机有 K 个基色时，Neugebauer 基色有 2^K 个，表示 K 个墨水的 2^K 种叠印组合，对于特定打印机，这组光谱反射比可提前测得)； b_j 表示第 j 个 Neugebauer 基色部分覆盖半调元时的墨水覆盖率，可由如下 Demichel 公式^[14]求得

$$b_j = \prod_i \begin{bmatrix} a_{\text{eff},i} & \text{condition}(i,j) \\ (1 - a_{\text{eff},i}) & \text{else} \end{bmatrix}, \quad i = 1, \dots, K \quad j = 1, \dots, 2^K \quad (2)$$

其中 a_{eff} 为 K 维打印机基色墨水覆盖率矢量。condition(i, j) 表示条件“当第 i 个墨水出现在第 j 个 Neugebauer 基色中”。

在实际打印过程中，由于点增益的存在，使得 Neugebauer 方程的精度不高。Yule 和 Nielson^[14]通过分析打印的光学点增益，在 Neugebauer 方程中引入幂因子，模拟光学点增益的影响，使得估计出的光谱精度更高。改进形成的 Yule-Nielson Spectral Neugebauer(YNSN)模型如下

$$\hat{R}_\lambda = \left[\sum_j b_j \mathbf{R}_{\lambda,j,\max}^{1/n} \right]^n, \quad j = 1, \dots, 2^K \quad (3)$$

其中 n 为进行光学点增益修正引入的 Yule-Nielson 因子，其他变量的定义与(1)式相同。

3 面向多光谱图像的打印分色方法

由 YNSN 模型知，根据打印色的各基色墨水覆盖率(即墨量比例)，通过(2)式计算得到 b_j ，代入(3)式，即可获得打印颜色的光谱反射比，这一过程称为正向变换。但在图像打印输出时，实际需要的是逆向变换，即根据图像的光谱反射比计算所需的墨水覆盖率，这一操作亦称分色。由(3)式可知，YNSN 模型无法得到解析逆模型。此外，传统的分色方法大多采用查找表法，但是，光谱反射率为高维数据，以 31 维为例，为生成建立查找表所需的样本点，在每维上采样 17 个样本，假设输出通道为 6 通道(如六色打印机)，每通道用 1 字节表示，则所构成的查找表大小为 8×10^{29} GB，这远远超出了计算机的存储容量。而 Neugebauer 方程仅需要 2^K 个光谱反射比样本，对于六色打印机，仅需 64 个样本，若在此方程基础上建立逆向变换，可大大降低分色所需的数据量。基于以上两个原因，本文在 YNSN 模型的基础上，采用非线性

优化方法来实现光谱图像打印分色。

在多光谱图像打印中,力求使得打印图像与源图像的光谱达到一致。但由于打印机墨水个数和打印机所能打印的颜色范围即色域的限制,无法完全再现源图像光谱,使得光谱误差不可避免。由于光谱独立于人眼视觉系统对颜色的感知,且光谱空间为非均匀空间,其误差不能体现在特定观察环境下

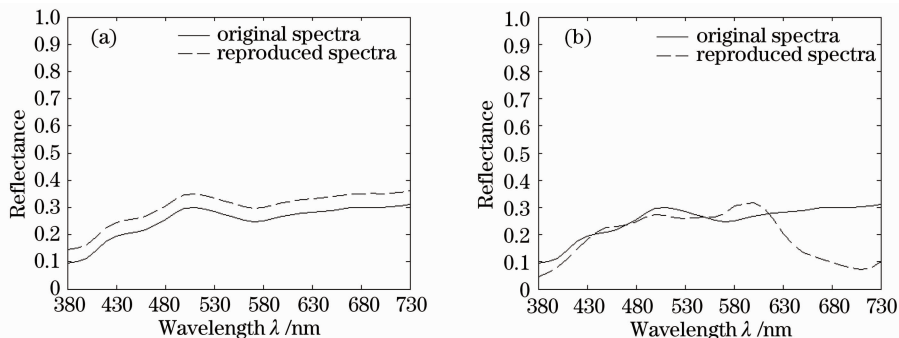


图 1 不同精度特征的光谱反射比曲线。(a) 反射比相差 0.05, (b) 同色异谱

Fig. 1 Spectral curves with different precision characteristics. (a) 0.05 spectral difference, (b) metamerism

表 1 光谱精度和色度精度比较

Table 1 Comparison of spectral and colorimetric precision

Spectrum	ΔE_{00}^* , D65, 2° observer	ΔE_{00}^* , A, 2° observer	E_{RMS}	MI_{00} , D65, A, 2° observer
Fig. 1(a)	3.8914	3.8509	0.05	2.2670
Fig. 1(b)	0.0003	5.2257	0.1076	5.3955

表 1 中色度精度采用修正的 CIEDE2000 (ΔE_{00}^*) 色差公式^[15]计算;光谱精度采用均方根(RMS)误差进行衡量。均方根误差 (E_{RMS}) 计算公式如下

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\Delta\beta(\lambda_i)]^2} \quad (4)$$

其中 N 为光谱反射比数据的维数, $\Delta\beta(\lambda_i)$ 为在波长 λ_i 处的光谱反射比误差。

由表 1 可知,光谱精度和色度精度反映了颜色再现的不同特点。当光谱精度高时,同色异谱指数低,反映出再现色和源色在变换光照条件时产生的色感知变化小[表 1 中图 1(a)光谱在光照从 D65 变换到 A 时色差变化很小];而色度精度高反映出在

的颜色再现质量。色度误差为在特定的观察环境(照明、观察者)下打印图像和源图像的颜色误差,好的色度精度能保证在单一环境中的颜色再现质量。但由于打印机的打印机制是同色异谱的,在一种环境下达到颜色匹配,在另一环境下打印图像和源图像可能会产生严重的颜色失真。例如图 1 所示光谱,经过计算得到其光谱精度和色度精度见表 1。

特定光照条件下色感知的差异小[表 1 中图 1(b)光谱仅在 D65 下色差很小]。因此,光谱精度和色度精度对一幅图像的输出质量均至关重要,但两者又无法保持一致,仅单独强调一方的精度,并不能带来好的输出效果。为此,本文提出同时以提高光谱和色度精度为目标的光谱分色方法。

3.1 色度目标函数的构造

对色度精度的评价,需要在均匀颜色空间中进行,本文选取 ICC 推荐的 CIELAB 均匀颜色空间,色度值均指 CIELAB 空间中的色度值。设 $C(a_{eff})$ 为根据 a_{eff} 估算出的色度值, c 为根据已知的图像光谱 r 合成的色度值,则可由下式表示根据 r 进行分色后的色度精度

$$\|C(a_{eff}) - c(r)\|_2^2 \quad (5)$$

其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 2-范数的平方。

特定观察环境下 CIELAB 空间的色度值 $c = (L^* a^* b^*)^T$ 可由该条件下的三刺激值求得

$$\begin{cases} L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 & (Y/Y_n > 0.008856) \\ a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] & (X/X_n > 0.008856) \\ b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}] & (Z/Z_n > 0.008856) \end{cases}$$

或

$$\begin{cases} L^* = 903.3(Y/Y_n) & (Y/Y_n \leq 0.008856) \\ a^* = 3893.5[(X/X_n) - (Y/Y_n)] & (X/X_n \leq 0.008856) \\ b^* = 1557.4[(Y/Y_n) - (Z/Z_n)] & (Z/Z_n \leq 0.008856) \end{cases} \quad (6)$$

为便于公式推导,将(6)式转化为矩阵表示形式

$$\mathbf{c} = \mathbf{M} \cdot f(\mathbf{t}) + \mathbf{M}_v, \quad (7)$$

其中 $\mathbf{t} = (t_1 \ t_2 \ t_3)^\top = (X/X_n \ Y/Y_n \ Z/Z_n)^\top$ 表示正则化后的三刺激值; $f(\mathbf{t}) = (t_1^{m_1} \ t_2^{m_2} \ t_3^{m_3})^\top$, 当 $t_i > 0.008856$ 时, $m_i = 1/3$, 否则, $m_i = 1, i = 1, 2, 3$; \mathbf{M} 为(6)式中 $f(\mathbf{t})$ 的系数矩阵, \mathbf{M}_v 为(6)式中的常数项矩阵。

对给定的光谱反射比 \mathbf{r} , 其在特定观察环境下的三刺激值 $\mathbf{t}_r = (X \ Y \ Z)^\top$ 可由下式得到:

$$\begin{cases} X = k \sum_{\lambda} \mathbf{r}(\lambda) \mathbf{E}(\lambda) \bar{\mathbf{x}}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = k \sum_{\lambda} \mathbf{r}(\lambda) \mathbf{E}(\lambda) \bar{\mathbf{y}}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = k \sum_{\lambda} \mathbf{r}(\lambda) \mathbf{E}(\lambda) \bar{\mathbf{z}}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases} \quad (8)$$

表示为矩阵形式如下:

$$\mathbf{t}_r = (X \ Y \ Z)^\top = k \cdot \mathbf{F} \cdot \text{diag}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{r} \quad (9)$$

其中 $k = 100 / [\mathbf{y} \cdot \text{diag}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{ones}]$ 为使完全漫反射面的三刺激值 $Y=100$ 的常数; $\mathbf{F} = (\bar{\mathbf{x}} \ \bar{\mathbf{y}} \ \bar{\mathbf{z}})^\top$ 表示特定观察者的色匹配函数; \mathbf{E} 表示特定光照的光谱功率分布, $\text{diag}(\cdot)$ 表示以矢量为对角元素生成对角阵; \mathbf{ones} 表示全 1 矢量, 其维度与 \mathbf{r} 维度相同。令 \mathbf{t}_n 表示完全漫反射面的三刺激值, 则

$$\mathbf{t}_n = (X_n \ Y_n \ Z_n)^\top = k \cdot \mathbf{F} \cdot \text{diag}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{ones}, \quad (10)$$

根据(9)式和(10)式, 可得

$$\mathbf{t} = (X/X_n \ Y/Y_n \ Z/Z_n)^\top = \text{diag}(\mathbf{t}_n^{-1}) \cdot \mathbf{t}_r = k \cdot \text{diag}(\mathbf{t}_n^{-1}) \cdot \mathbf{F} \cdot \text{diag}(\mathbf{E}) \cdot \mathbf{r} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{r} \quad (11)$$

其中 $\mathbf{D} = k \cdot \text{diag}(\mathbf{t}_n^{-1}) \cdot \mathbf{F} \cdot \text{diag}(\mathbf{E})$ 。对于给定的光照、观察者条件, \mathbf{D} 为常数矩阵, 可预先计算确定。

对于给定的墨水覆盖率矢量 \mathbf{a}_{eff} , 通过(3)式的 YNSN 模型, 得到其对应的光谱反射比 $\hat{\mathbf{R}}(\mathbf{a}_{\text{eff}})$, 则根据(5)式、(7)式和(11)式, 色度目标函数可定义如下:

$$f_c(\mathbf{a}_{\text{eff}}) = \|\mathbf{C}(\mathbf{a}_{\text{eff}}) - \mathbf{c}(\mathbf{r})\|_2^2 = \|\mathbf{M} \cdot f[\mathbf{D} \cdot \hat{\mathbf{R}}(\mathbf{a}_{\text{eff}})] - f(\mathbf{D} \cdot \mathbf{r})\|_2^2, \quad (12)$$

其中 \mathbf{r} 为已知的图像光谱反射比。

3.2 光谱目标函数的构造

由于 YNSN 模型是建立在光谱反射比基础上, 因此其可直接用于光谱精度的评价。与(12)式类似, 可构造光谱目标函数如下

$$f_r(\mathbf{a}_{\text{eff}}) = \|\hat{\mathbf{R}}(\mathbf{a}_{\text{eff}}) - \mathbf{r}\|_2^2. \quad (13)$$

3.3 用于光谱图像打印分色的非线性优化问题的设计与实现

通过以上对色度目标函数及光谱目标函数的构

造, 根据(12)式和(13)式, 确定如下非线性优化的目标函数

$$f_{\text{obj}}(\mathbf{a}_{\text{eff}}) = \omega_1 \cdot f_c(\mathbf{a}_{\text{eff}}) + \omega_2 \cdot f_r(\mathbf{a}_{\text{eff}}), \quad \omega_1 + \omega_2 = 1 \quad (14)$$

其中 ω_1 和 ω_2 分别表示两目标函数对最终结果影响的权重。可根据应用需求, 当主要考虑输出图像在单一光照、观察者条件下的输出效果时, 可设置 $\omega_1 > \omega_2$, 使分色过程偏重于提高色度精度; 反之, 当需要在多个光照、观察者条件下对输出效果进行观察比较时, 可设置 $\omega_2 > \omega_1$, 以降低输出颜色在不同条件下的同色异谱指数。

在实际打印过程中, 各打印机基色的墨水覆盖率以百分比表示, 因此矢量 \mathbf{a}_{eff} 各分量应介于 0 和 1 之间。此外, 如果打印时各基色墨量过多, 承印纸张无法挂墨, 导致打印质量下降, 因此, 在打印中应对总墨量进行限制。

综合以上分析, 构造用于光谱图像打印分色的非线性优化问题描述如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & \omega_1 \cdot f_c(\mathbf{a}_{\text{eff}}) + \omega_2 \cdot f_r(\mathbf{a}_{\text{eff}}) \quad \omega_1 + \omega_2 = 1 \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{a}_{\text{eff}} \in [0, 1] \\ & \text{sum}(\mathbf{a}_{\text{eff}}) \leq a_{\text{limit}}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中 a_{limit} 表示总墨量限制, $\text{sum}(\cdot)$ 表示对矢量各分量进行求和。

对优化问题(15)的求解, 可采用有约束的优化方法实现。本文在实验中首先采用惩罚函数法, 将问题转化为无约束的优化问题, 再利用拟牛顿法进行求解。应用中可根据具体情况选择其他优化方法实现。

4 实验结果

实验采用 Epson Stylus Photo 1200 打印机测试数据进行, 该打印机有 CMYKGO 六基色(青、品红、黄、黑、绿、橙), 共 64 个 Neugebauer 基色。选取

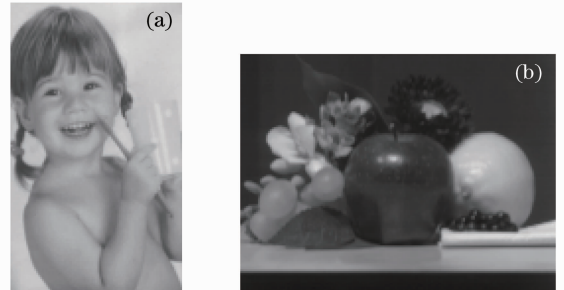


图 2 多光谱图像合成的 RGB 图像。(a) young-girl 图,

(b) fruits-and-flowers 图

Fig. 2 RGB images derived from multi-spectral images.

(a) young-girl, (b) fruits-and-flowers

两幅多光谱测试图对分色方法进行测试。测试图格式均为 SPB 格式多光谱图,由这两幅多光谱图像合成的 RGB 图像见图 2,其中图 2(a)为一幅典型的肤色图;图 2(b)为一幅具有高饱和度颜色的景物图。测试图像的光谱反射比在 400 nm 到 700 nm 之间每隔 10 nm 进行采样,其维度为 31 维。

在优化求解时,墨水覆盖率初值设为 $\mathbf{a}_{\text{eff}} = [0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5 \ 0.5]$,以保证不因初值选择在过暗区域或过亮区域而使实验结果失去一般性。最大墨量限制设定为 $a_{\text{limit}} = 500\%$,目标函

表 2 三种方法针对 young-girl 图的分色精度比较

Table 2 Comparison of precision for the young-girl image using the three methods

Spectral color separation	ΔE_{00}^* , D65	E_{RMS} , D65	ΔE_{00}^* , A	E_{RMS} , A	ΔE_{00}^* , F11	E_{RMS} , F11
Method 1	30.9332	0.2445	33.0665	0.2445	33.201	0.2445
Method 2	1.3394	0.0202	1.2603	0.0202	1.5206	0.0202
Method 3	0.3821	0.0213	0.3655	0.0211	0.3894	0.0220

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

表 3 三种方法针对 fruits-and-flowers 图的分色精度比较

Table 3 Comparison of precision for the fruits-and-flowers image using the three methods

Spectral color separation	ΔE_{00}^* , D65	E_{RMS} , D65	ΔE_{00}^* , A	E_{RMS} , A	ΔE_{00}^* , F11	E_{RMS} , F11
Method 1	28.8441	0.1293	27.7829	0.1293	27.561	0.1293
Method 2	6.3369	0.0335	6.3674	0.0335	8.2342	0.0335
Method 3	0.6894	0.0408	0.7723	0.0405	0.5176	0.0453

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

由表 2 和表 3 可知,新方法在光谱精度和色度精度两方面均有较好表现,尤其在色度精度上有明

显优势。和基于均方根光谱误差的迭代法相比,新方法由于兼顾了光谱和色度两方面特征,仅在光谱精度上略低于后者,但在色度精度上有显著提高。

针对不同的光照条件,以及不同特征的多光谱图像,从表 2 及表 3 可知,以上结论同样成立。其中,由于 fruits-and-flowers 图包含大量高饱和度颜色,超出打印机色域范围,因此实验结果差于 young-girl 图。

实验中选择 fruits-and-flowers 图进行主观视觉对比,实验光照分别选择 D65、A、F11,图 3 给出在光照 D65 下的对比图。从图 3 可以看出,采用线性回归迭代法进行分色产生了明显的颜色失真;基于均方根光谱误差迭代法使得结果图像的饱和度降低,明度细节丢失;采用基于光谱和色度精度的分色方法使得图像在明度、彩度和饱和度三方面均得到较好保持。当光照变换为 A 和 F11 时,以上结论同样成立。

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

Method 1: linear regression iteration; Method 2: iteration based on RMS error; Method 3: method based on spectral and color precision

5 结 论

本文提出一种新的面向多光谱图像的打印分色

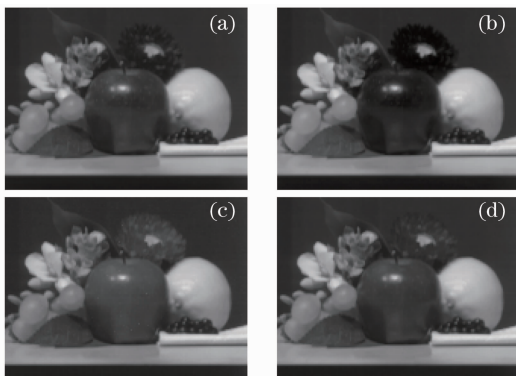


图 3 光照 D65 下 fruits-and-flowers 图三种分色方法结果对比图。(a) 源图,(b) 线性回归迭代法,(c) 基于均方根误差的迭代法,(d) 基于光谱和色度精度的分色方法

Fig. 3 Comparison of fruits-and-flowers image using three methods under D65. (a) source image, (b) linear regression iteration, (c) iteration based on RMS error, (d) method based on spectral and colorimetric precision

方法,从分析图像的光谱特性和色度特性对图像打印质量的影响入手,根据输出图像的色度精度和光谱精度,采用非线性优化的方法,显著提高了光谱打印的彩色分色精度。与其他分色方法如线性回归迭代法、基于均方根光谱误差的迭代法相比,新方法在色度和光谱精度两方面均能保持较好的分色效果,有效提高了多光谱图像的打印输出质量。

参 考 文 献

- 1 Yonghui Zhao, Roy S. Berns, Lawrence A. Taplin *et al.*. An investigation of multispectral imaging for the mapping pigments in paintings[C]. *SPIE* 2008, **6810**: 681007
- 2 Vladimir Bochko, Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake. A spectral color imaging system for estimating spectral reflectance of paint[J]. *J. Imaging Science and Technology*, 2007, **51**(1): 70~78
- 3 Christian Munzenmayer, Dietrich Paulus, Thomas Wittenberg. A spectral color correction framework for medical applications [J]. *IEEE Trans on Biomedical Engineering*, 2006, **53**(2): 254~265
- 4 Norimichi Tsumura, Yoichi Miyake, Francisco H. Imai. Medical vision: measurement of skin absolute spectral-reflectance-image and the application to component analysis[C]. *Proc. of the Third International Conference on Multispectral Color Science* 2001, 25~28
- 5 Yuntae Kim, Yangho Cho. Color look-up table design for gamut mapping and color space conversion[C]. *Proc. of IS&T's Int Conf on Digital Production Printing and Industrial Applications*, 2003, 28~29
- 6 Insu Jang, Changhwan Son, Taeyong Park *et al.*. Hi-fi printer characterization method Using color correlation for gamut extension[C]. *IEEE Int Conf on Image Processing*, 2006, 1517~1520
- 7 Paul Apostolos Drakopoulos, Ganesh Subbarayan. Color printer characterization using optimization theory and neural networks [P]. United States Patent: 6480299, 2002
- 8 Guo Maozu, Wang Yadong. Research of color matching method based on BP network[J]. *Chinese J. computers.* 2000, **23**(8): 819~823
- 郭茂祖,王亚东. 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
- 9 Philipp Urban, Mitchell R. Rosen, Roy S. Berns. Accelerating spectral-based color separation within the Neugebauer subspace [J]. *J. Electronic Imaging*, 2007, **16**(4): 043014-1~11
- 10 Philipp Urban, Rolf-Rainer Grigat. Spectral-based color separation using linear regression iteration[J]. *Color Research & Application*, 2006, **31**(3): 229~238
- 11 Roy S. Berns, Lawrence A. Taplin, Tony Z. Liang. Spectral color reproduction with six color output [P]. United States Patent: 6698860, 2004
- 12 Lawrence A. Taplin, Roy S. Berns. Spectral color reproduction based on a six-color inkjet output system [C]. *IS&T/SID's Ninth Color Imaging Conference*, 2001, 209~213
- 13 Diyuan Tzeng, Roy S. Berns. Spectral-based six-color separation minimizing metamerism[C]. *IS&T/SID's Eighth Color Imaging Conference*, 2000, 342~347
- 14 David R. Wyble, Roy S. Berns. A critical review of spectral models applied to binary color printing [J]. *Color Research & Application*, 2000, **25**(1): 4~19
- 15 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Revision of the weight functions of CIEDE2000 color difference formula [J]. *Packaging Engineering*, 2008, **29**(1): 33~35
黄 敏,刘浩学,廖宁放. 基于 CIEDE2000 色差公式权重函数修正的研究 [J]. *包装工程*, 2008, **29**(1): 33~35
- 16 Huang Min, Liao Ningfang, Liu Haoxue *et al.*. Cathode-ray tube color perceptible color difference threshold evaluation in visual color matching. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 599~603
黄 敏,廖宁放,刘浩学 等. 颜色视觉匹配中显示器颜色色差阈值的评价 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 599~603
- 17 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1274~1278
汪哲弘,徐海松. 颜色视觉匹配中明度阈值的评价 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1274~1278
- 18 Wang Xichang, Zhou Fengkun, Chen Shufang *et al.*. Design and study on color sensitive function [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1057~1064
王喜昌,周丰昆,陈淑芳 等. 颜色灵敏函数模型的设计及其规律的研究 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1057~1064