基于维纳估计的光谱反射率重建优化算法研究

王丽梅[1]，孔玲君[1,2]
（1. 上海理工大学，上海 200093；2. 上海出版印刷高等专科学校，上海 200093）

摘要：目的 研究光谱反射率重建算法，解决各种物体颜色的光谱反射率重建精度问题。**方法** 通过高精度多光谱成像系统获取实验样本的系统响应值，分光光度计获取样本的光谱反射率，采用Wiener估计法、自适应维纳估计法和提出的优化维纳估计法，对待测样本实验数据进行光谱重建，并评价重建结果。**结果** 在3种光谱重建算法仿真实验中，提出算法的均方根误差平均值为0.0355，平均CIE1976色差为1.4349，优于其他2种算法。**结论** 在光谱重建算法的研究中，基于优化的维纳估计算法可以有效提高光谱的重建精度，可应用于实际的多光谱成像复制中。

关键词： 光谱重建；多光谱成像系统；维纳估计；杰卡德相似原理
中图分类号： TS801.9　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1001-3563(2015)19-0125-05

Optimized Spectral Reflectance Reconstruction Algorithm Based on Wiener Estimation

WANG Li-mei[1], *KONG Ling-jun*[1,2]
(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: A spectral reflectance reconstruction algorithm was studied in the paper, in order to improve the accuracy of the reconstructed spectral reflectance of the colors of different objects. The system response values of each color in the test sample were obtained by high-precision multi-spectral imaging system. And the spectral reflectance values of the colors were measured by spectrophotometer. The spectral reconstruction of the sample data was conducted with Wiener, Adaptive Wiener and the proposed algorithms, and the reconstruction results of the three algorithms were evaluated. The experiment results showed that the root-mean-square-error of the proposed method was 0.0355, and the average color difference was 1.4349, outperforming the other two algorithms in terms of both spectral and colorimetric accuracy. In conclusion, the proposed method had effective performance in improving the spectral reconstruction precision, and can be applied to multi-spectral imaging reproduction.

KEY WORDS: spectral reconstruction; multi-spectral imaging system; Wiener estimation; Jaccard similarity principle

多光谱成像技术是多通道光谱成像技术的简称，与普通成像技术的最大不同之处在于，多光谱成像技术能获取图像每个像素点的光谱反射率或透射率，不是肉眼所见的红、蓝、绿等3色图像[1]。在颜色科学与工程领域，多光谱成像的技术途径是通过图像采集设备，在可见光范围内采集拍摄现场的几个或多个通道的光谱信息，因图像的每个像素和各通道的像素值，都与拍摄现场对应物点在对应通道上的光谱反射率成正比，进而用相应的算法估计其光谱反射率，从而实现颜色信息的真实准确复制[1-2]。多光谱成像技术

收稿日期： 2015-01-21
作者简介： 王丽梅（1988—），女，山东人，上海理工大学硕士生，主攻多光谱颜色复制技术。
通讯作者： 孔玲君（1972—），女，浙江人，博士，上海出版高等专科学校副教授，主要研究方向为图文信息处理与色彩再现、数字印刷及质量评价等。

基于“光谱真实”而非色度，既可以克服同色异谱现象，又能够提高颜色的复制精度。

目前，多光谱成像技术的发展方向主要集中在图像采集系统自身硬件设计的进步[3]；相应的重建算法改进，即光谱反射率重建技术的理论研究[2,4]。多光谱反射率重建算法主要有伪逆法[5]、维纳估计法[6—11]、主成分分析法[12—14]、插值重建法[15—16]等方法。其中，最常用的方法是维纳估计法，它无需知道成像系统的光谱特征矩阵，可通过训练样本不同范围和程度的训练，得到不同效果的光谱反射率重建结果，其技术灵活、通用性强，因而是光谱重建技术研究的热点之一[15]。对此，这里以解决光谱反射率高效重构问题为研究目标，通过多光谱成像设备获取通道响应值，对表征颜色信息的光谱反射率进行重建，并对其重建效果进行分析评价。

1 光谱反射率重建原理

物体表面的反射光谱是不依赖于客观环境和观察者而存在的物体固有的物理特性，可用于描述物体的表面特征，表示为：

$$r(\lambda) = \frac{p(\lambda)}{i(\lambda)} \tag{1}$$

式中：λ为波长；$r(\lambda)$为波长为λ的光照的光谱反射率；$p(\lambda)$和$i(\lambda)$分别为物体入射和反射的光通量。

然而，在实际的光谱重建过程中，大多数成像系统获取的并不是物体表面的光谱反射率r，而是成像系统的响应值u[3]。因此，需要建立成像系统的多通道响应值u与光谱反射率r之间的模型关系：

$$r=F(u) \tag{2}$$

在线性成像系统中，假设$l(\lambda)$为照明光源的光谱功率分布函数，$r(\lambda)$为所成像物体颜色的光谱反射率，$f_i(\lambda)$为系统中第i个通道滤光片的光谱透过率，$s(\lambda)$为成像设备的光谱敏感函数，则成像系统第i个通道的响应输出为：

$$v_i = \int l(\lambda)r(\lambda)f_i(\lambda)s(\lambda)\mathrm{d}\lambda + b_i + n_i = \int m_i(\lambda)r(\lambda)\mathrm{d}\lambda + b_i + n_i \tag{3}$$

式中：n_i为系统噪声。由于$l(\lambda)$，$f_i(\lambda)$与$s(\lambda)$都为未知量，将其合并为单一的光谱响应函数$m_i(\lambda)=l(\lambda)f_i(\lambda)s(\lambda)$。考虑到大部分物体的光谱反射率在400~700 nm可见光波段中是平缓变化的，在实际应用中一般采用10 nm间隔的采样点来表示，从而光谱反射率可表示为$N\times1$维的向量$\boldsymbol{R}$，其中N=31。同样，系统响应也可用$P\times1$维向量$\boldsymbol{V}$表示，其中，P为系统的光谱通道数。从而式(3)重写为向量矩阵形式：

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{HR}+\boldsymbol{n} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{H}$为$P\times N$的光谱响应函数矩阵，对于给定的成像系统是固定的；$\boldsymbol{n}$为$P\times1$的相机噪声向量。另外，$\boldsymbol{u}$为系统响应，$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{V}-\boldsymbol{n}$，则式(4)可写为：

$$\boldsymbol{u}=\boldsymbol{HR} \tag{5}$$

基于式(5)建立成像模型的反转模型，即建立成像系统响应值与光谱数据间的转换矩阵$\boldsymbol{G}$算法，设通过光谱反射率重建算法计算得到的光谱反射率为$\hat{r}$，则重建光谱反射率可表示为：

$$\hat{r} = \boldsymbol{Gu} \tag{6}$$

2 光谱重构算法

2.1 维纳估计算法

维纳估计算法的基本原理是基于原始光谱反射率与用训练样本得到的重建光谱反射率的均方根误差值最小化的方法。

$$E\{\|r-\hat{r}\|^2\} \rightarrow \min \tag{7}$$

令$f(G) = E\{\|r-\hat{r}\|^2\}$，然后对其采用最小二乘法可求得估计矩阵$\boldsymbol{G}$：

$$\boldsymbol{G}=E(r\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})E(\boldsymbol{H}r\boldsymbol{r}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}})^{-1}=E(r\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}})E(\boldsymbol{uu}^{\mathrm{T}})^{-1} \tag{8}$$

2.2 自适应维纳估计法

自适应维纳估计法[7]是基于光谱曲线形状相似度比较，而对传统维纳估计算法做的改进。用传统维纳估计算法得到待测样本的光谱反射率$\hat{r}$，然后测试2样本间的光谱相似性，即从训练样本中选择光谱反射率$\hat{r}$接近于光谱反射率$\hat{r}$的样本。计算2样本的光谱反射率相似度包含平均光谱距离和最大光谱距离，其计算式为：

$$d_i = \alpha\left\{\left|\frac{r_i}{\|r_i\|}-\frac{\hat{r}}{\|\hat{r}\|}\right|\right\}_{\mathrm{mean}} + (1-\alpha)\left\{\left|\frac{r_i}{\|r_i\|}-\frac{\hat{r}}{\|\hat{r}\|}\right|\right\}_{\max} \tag{9}$$

式中：α为调节权重因子，mean为平均值，max为最大值。若训练样本的光谱反射率集用Ω表示，且第i个样本的反射率r_i会相应地出现k_i次，其表达式分别为式(10)(11)。

$$\Omega = \{\underbrace{r_1\cdots r_1}_{k_1},\cdots,\underbrace{r_i\cdots r_i}_{k_i},\cdots,\underbrace{r_L}_{1},\} \tag{10}$$

$$k_i=[(d_N/d_i)^{\gamma}+0.5] \tag{11}$$

式中：[ ]表示取最接近0的整数；γ为指数因素。根据相似度大小，集合中该样本的出现次数也不相同，相似度越高，出现次数越多，从而得到自适应维纳估计的转换矩阵$\boldsymbol{G}$。

2.3　改进的优化重建算法

在传统的维纳估计算法中，所有训练样本的光谱数据是符合正态分布的，被赋予了相同的权重，并由此估计得到K_r。根据相似性理论可知，当用来估计K_r的训练样本越接近待测样本时，则转换矩阵$\boldsymbol{G}$会包含对于待测样本更多的有利颜色信息。鉴于此，这里选用杰卡德相似性原理[17—18]作为衡量训练样本与待测样本间的相似程度。

杰卡德相似性原理（Jaccard Similarity Coefficient，JSC）是一种用来衡量2个集合之间相互重叠程度的方法，被定义为2个集合交集的元素个数除以并集的元素个数。

$$J(A,B)=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|} \tag{12}$$

式中：A和B为2个相互比较的集合。

假设2个样本的光谱曲线分别为$f_1(\lambda,r_1)$和$f_2(\lambda,r_2)$，首先分别计算2条光谱的一阶导数，并记为$f_1^{'}(\lambda,r_1)$和$f_2^{'}(\lambda,r_1)$。根据微积分基本定理可知，当函数的导数大于0时，函数曲线在相应区间为上升趋势；当函数导数小于0时，函数曲线在相应区间为下降趋势；当函数导数等于0时，函数曲线与水平轴平行。在光谱曲线中出现连续2点具有相同光谱反射率的现象几乎是不存在的，故在实际应用中出现的小段水平光谱曲线可看作曲线上升趋势或下降趋势的延续。

将求导后的光谱函数二值化，转换公式为：

$$f_i^{'}(\lambda,r_i)=\begin{cases}1, f_i^{'}(\lambda,r_i)\geqslant 0\\ 0, f_i^{'}(\lambda,r_i)<0\end{cases} \tag{13}$$

通过式(13)的变换，得到2个样本的二值化导数为2个二进制序列。继续规定M_{11or00}表示2个样本光谱曲线在同一光谱波段同时出现1或0的次数；M_{10or01}表示2个样本光谱曲线在同一光谱波段同时出现1，0或0，1的次数。其中，$M_{11or00}+M_{10or01}=N$，N为样本采样总点数。由此，2个样本的光谱相似系数可定义为：

$$J_{SC}=\frac{M_{11or00}}{M_{11or00}+M_{10or01}} \tag{14}$$

在该研究中，用来测试2个样本相似程度的式(14)是杰卡德相似性原理的一种变形，使用该变形可比较2个样本二进制序列的相似度，从而通过2个样本的光谱相似系数赋予样本不同的权重，即：

$$E\{\|J_ir_i-J_i\hat{r}_i\|^2\}\rightarrow \min \tag{15}$$

其中，J_i是2样本的光谱相似系数，于是将式(14)代入式(8)，估计矩阵$\boldsymbol{G}$可变换为：

$$\boldsymbol{G}=E(\tilde{R}\tilde{U}^{\mathrm{T}})E(\tilde{U}\tilde{U}^{\mathrm{T}})^{-1} \tag{16}$$

式中：$\tilde{R}=J_ir_i$；$\tilde{U}=J_iu_i$。

3　实验

3.1　获取数据及评价标准

实验选用GretagMacbeth公司标准色卡Color Checker Rendition Chart（24色）为待测样本，标准色卡Color Checker SG（140色）为训练样本，所测光谱的波长范围是400~700 nm，步长为10 nm，这样光谱反射率是由N=31的向量组成，应用美国MegaVision公司高精度多光谱成像系统获取实验样本的系统响应值，应用Eyeone分光光度计测量样本的光谱反射率。

采用均方根误差RMSE（r_{RMSE}）[2, 12]、色差ΔE[2, 12]作为光谱反射率重建精度的评价标准。假设n个原始光谱反射率为$R(r_1,r_2,\cdots,r_n)$，重建得到的光谱反射率为$\hat{R}(\hat{r}_1,\hat{r}_2,\cdots,\hat{r}_n)$，用$r_{RMSE}$来衡量原始光谱反射率与重建光谱反射率之间的偏差，其表达式为：

$$r_{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(r-\hat{r}_i)^2} \tag{17}$$

采用CIE1976色差公式评价光谱反射率重建值与实际值的色差ΔE_{76}，设2种颜色样本的坐标为(L_1^*,a_1^*,b_1^*)和(L_2^*,a_2^*,b_2^*)，则二者间的色差为：

$$\Delta E=\sqrt{(L_1^*-L_2^*)^2+(a_1^*-a_2^*)^2+(b_1^*-b_2^*)^2} \tag{18}$$

3.2　实验结果及分析

实验采用了传统维纳估计法（以下简称WE）、自适应维纳估计法（以下简称AWE）和提出的优化算法（以下简称JWE），对RC24色色卡进行了光谱反射率重构。重建反射率光谱精度用r_{RMSE}表示，其色度精度用色差ΔE表示，具体数据见表1。

从表1可以看出，采用提出的优化算法得到的重建光谱精度优于维纳估计法和自适应维纳估计法，其重建反射率光谱精度r_{RMSE}的平均值为0.0355，最大值为0.0835，均小于其他2种方法；其色差平均值为1.4349，最大值为4.4038，与AWE算法相当，但要小于

表1 3种方法重建光谱反射率的精度

Tab.1 Comparision of spectral reflectance reconstruction accuracy and chromaticity of three methods (Wiener, Adaptive Wiener and the proposed)

重构方法	r_{RMSE}			ΔE(D65)		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
WE	0.0057	0.0402	0.1094	0.2138	1.5331	5.4221
AWE	0.0060	0.0374	0.1010	0.1642	1.4327	4.4097
JWE	0.0058	0.0355	0.0835	0.2914	1.4349	4.4038

WE算法的平均色差1.5331和最大色差5.4221，在视觉感觉范围内可以接受。因此，提出的优化算法是一种有效的光谱重构方法。

使用3种算法重建出的其中某个颜色样本的光谱反射率曲线及其真实反射率曲线见图1。从图1可以看出，基于提出的优化算法重建得到的光谱反射率曲线更接近于真实光谱反射率曲线。

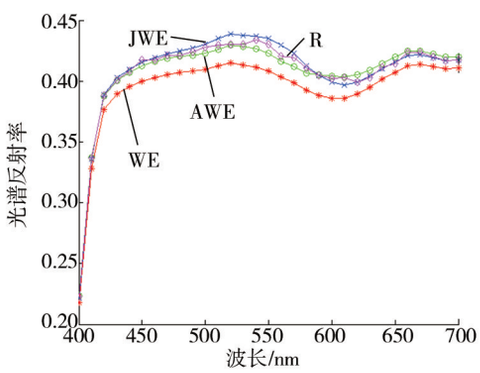

图1 3种算法重建光谱反射率曲线与实际光谱反射率曲线

Fig.1 Spectral reflectance curves reconstructed by the three algorithms as compared with the actual spectral reflectance curve

4 结语

根据相似性理论，提出一种基于维纳估计的光谱反射率重建优化算法，即对2样本的整条光谱曲线在相同波段范围和相同数据点计算相似度，从而赋予样本不同的权重，然后估计得到转换矩阵$\boldsymbol{G}$。实验采用高精度多光谱成像系统，获取系统响应值来重建测试样本的光谱反射率。实验结果表明：提出的优化算法重建得到的光谱均方根误差为0.0355，平均色差为1.4349，均在可接受范围内，且优于传统维纳估计法和自适应维纳估计法。提出的基于维纳估计的光谱反射率重建优化算法具有可行性，可应用于实际的多光谱成像复制中。

参考文献：

[1] 冯杰，曹鹏飞. 基于多光谱成像技术的水稻特征光谱提取[J]. 光学仪器，2013，35(6)：31—35.
FENG Jie, CAO Peng-fei. Extracting Feature Spectrum of Rice Based on Multi-spectral Imaging Technology[J]. Optical Instruments, 2013, 35(6): 31—35.

[2] 杨卫平，徐楠，段剑金，等. 多光谱成像技术在颜色复制方面的应用及发展[J]. 云南民族大学学报：自然科学版，2009，18(3)：191—197.
YANG Wei-ping, XU Nan, DUAN Jian-jin, et al. Application and Development of Multispectral Imaging Technology in Color Reproduction[J]. Journal of Yunnan University of Nationalities: Natural Sciences Edition, 2009, 18(3): 191—197.

[3] TSUCHIDA M, TANAKA H. Development of a High-definition and Multispectral Image Capturing System for Digital Archiving of Early Modern Tapestries of the Kyoto Gion Festival [C]// The 20th International Conference on Pattern Recognition, 2010: 633—637.

[4] BERNS R S, IMAI F H. The Use of Multi-channel Visible Spectrum Imaging for Pigment Identification[C]// The 13th Triennial Meeting Rio de Janeiro Preprints, 2010: 217—222.

[5] 李博. 基于三色相机的多光谱图像获取方法研究[D]. 曲阜：曲阜师范大学，2012.
LI Bo. Study of Approaches to Multispectral Imaging Acquisition Based on Three-color Camera[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2012.

[6] TAKASE K, TSUMURA N. Fast Estimation Algorithm for Calculation of Reflectance Map Based on Wiener Estimation Technique[J]. Optical Review, 2005, 12(1): 20—24.

[7] SHEN H L, CAI P Q, SHAO S J, et al. Reflectance Reconstruction for Multispectral Imaging by Adaptive Wiener Estimation[J]. Optics Express, 2007, 15(23): 15545—15554.

[8] SHEN H L, XIN J H. Spectral Characterization of a Color Scanner Based on Optimized Adaptive Estimation[J]. Optical Society of America, 2006, 23(7): 1566—1569.

[9] 靖新，岳田鑫，郑莉. 基于维纳估计的彩色图像光谱重建算法[J]. 沈阳建筑大学学报：自然科学版，2014，30(1)：175—180.
JING Xin, YUE Tian-xin, ZHENG Li. A Spectral Reflectance

Reconstruction Algorithm for Color Image Using Wiener Estimation Method[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science,2014,30(1):175—180.

[10] 王葛,李长军.用改进的基向量法重建光谱反射比[J].感光科学与光化学,2005,23(5):340—350.
WANG Ge, LI Chang-jun. Improvement in the Estimation of Reflectance Functions Generated Using the Basis Vectors[J]. Photographic Science and Photochemistry, 2005, 23 (5): 340—350.

[11] 王晋.基于数字成像设备的光谱测量精度评价[J].包装工程,2014,35(13):133—138.
WANG Jin. Accuracy Evaluation of Spectral Measurement Based on Digital Imaging Equipment[J]. Packaging Engineering,2014,35(13):133—138.

[12] 任鹏远,廖宁放.基于多光谱成像的光谱反射率重建[J].光学技术,2005,31(3):427—433.
REN Peng-yuan, LIAO Ning-fang. Spectral Reflectance Recovery Based on Multispectral Imaging[J]. Optical Technique, 2005,31(3): 427—433.

[13] 丁国华,朱元泓,李博.基于不同色块数量的光谱重构对比[J].包装工程,2012,33(3):14—18.
DING Guo-hua, ZHU Yuan-hong, LI Bo. Comparison of Spectrum Reconstruction on Different Number of Color Block [J]. Packaging Engineering,2012,33(3):14—18.

[14] 于海琦,刘真,张雷洪.样本特征对光谱图像重构影响的研究[J].包装工程,2014,35(13):144—149.
YU Hai-qi, LIU Zhen, ZHANG Lei-hong. Effects of Sample Characteristics on Spectral Image Reconstruction[J]. Packaging Engineering,2014,35(13):144—149.

[15] CHEN Guang-xue, WANG Hai-wen, LI Jie. Study on the Efficient Reconstruction Method of Spectral Color Imformation [J]. Advanced Materials Research,2011,174:32—35.

[16] 王海文.多光谱颜色复制的关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.
WANG Hai-wen. Research on Key Technologies of Multispectral Color Reproduction[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2012.

[17] 汪婧,荣升格.基于杰卡德相似性的推荐系统研究[J].安徽工程大学学报,2013,28(3):73—76.
WANG Jing, RONG Sheng-ge. Research on Recommender Systems Based on Jaccard Similarity[J]. Journal of Anhui Polytechnic University,2013,28(3):73—76.

[18] 周万怀,谢丽娟,应义斌.一种基于杰卡德相似性原理的光谱匹配算法[J].农业工程学报,2013,29(19): 285—292.
ZHOU Wan-huai, XIE Li-juan, YING Yi-bin. A New Full Spectral Matching Algorithm in a Near-infrared Spectral Database System[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 29(19): 285—292.

(上接第119页)

Characteristics[J].ACS Nano,2010,4(9):5155—5162.

[8] VONGPRADHIP S.QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain[C]// IEEE,2012:47—52.

[9] PANYAVARAPOR N J, HORKAEW P, WONGTRAIRAT W. QR Code Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform[C]// IEEE,2013:791—796.

[10] 刘丽丽,谭延琪,马小虎.基于奇异值分解的Contourlet域三维彩码鲁棒水印算法[J].苏州大学学报:工科版,2011,31(6):10—14.
LIU Li-li, TAN Yan-qi, MA Xiao-hu. A Robust Algorithm of Color Code Image Watermarking Based on Singular Value Decomposition in Contourlet Domain[J]. Journal of Soochow University: Engineering Science Edition, 2011, 31(6): 10—14.

[11] KIKUCHI M, FUJIYOSHI M, KIYA H. A New Color QR Code Forward Compatible with the Standard QR Code Decoder[C]// IEEE,2013 :26—31.

[12] 谢荣生,赵欢喜,吴克寿.基于离散小波变换的QR二维条码防伪技术[J].计算机工程,2013,39(12):126—129.
XIE Rong-sheng, ZHAO Huan-xi, WU Ke-show. QR 2D Barcode Anti-counterfeiting Technique Based on Discrete Wavelet Transform[J]. Computer Engineering. 2013, 39(12): 126—129.

[13] 代小红,王光利.一种用于印刷图像防伪的水印算法设计与实现[J].包装工程,2011(15):118—122.
DAI Xiao-hong, WANG Guang-li. Design and Realization of an Anti-counterfeiting Watermark Algorithm for Printed Image[J]. Packaging Engineering,2011(15):118—122.

[14] 刘真,丁盈盈.一种优化的基于DWT的抗打印扫描的数字水印算法[J].包装工程,2011(11):93—99.
LIU Zhen, DING Ying-ying. An Optimized and DWT Based Printing and Scanning Resistant Watermark Algorithm[J]. Packaging Engineering,2011(11):93—99.

[15] 周丽娟,罗亚明.用于印刷品版权保护的数字水印技术[J].包装工程,2009,30(1):118—119.
ZHOU Li-juan, LUO Ya-ming. Digital Watermarking Technology for Printing Copyright Protection[J]. Packaging Engineering,2009,30(1):118—119.