

基于向量夹角样本选择的光谱反射率重建

曾茜¹, 孔玲君^{1,2}, 占文杰¹

(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** 研究一种更有效的训练样本选择方法, 以提高光谱反射率的重建精度。**方法** 提出将样本看做向量, 根据测试样本与训练样本之间的夹角判断两者间的相似度, 然后把该夹角大小作为相似度权重赋予该训练样本, 实验以孟塞尔色卡为样本集, 训练样本分别为经过 Mohammadi 方法选择的样本和经过文中提出的向量夹角方法选择的样本, 以色差和光谱均方根误差为评价指标, 从重构精度和样本选择的有效性等 2 个方面对 2 种样本筛选方法进行比较和验证。**结果** 通过 Matlab 软件仿真实验, 文中所提方法的平均色差能降低到 0.7945, 最大色差为 2.1569, 平均光谱均方根误差降低到 0.011 42, 最大光谱均方根误差为 0.0218。**结论** 基于向量夹角选择样本具有简单且精确的优势, 能够满足高精度颜色复制的要求, 可以为快速准确地选择样本和提高颜色复制精度提供参考。

关键词: 光谱反射率重建; 样本选择; 向量夹角

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0216-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.034

Spectral Reflectance Reconstruction Based on Vector Angle Sample Selection

ZENG Xi¹, KONG Ling-jun^{1,2}, ZHAN Wen-jie¹

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to study a more effective training sample selection method to improve the reconstruction accuracy of spectral reflectance. The sample was proposed to be regarded as a vector, and the similarity between the test sample and the training sample was determined according to the angle between them. Then, the included angle was used as the similarity weight of the training sample. The experiment used the Munsell color card as a sample set, and the training samples were selected by Mohammadi method and the proposed method. With color difference and spectral root mean square error as the evaluation indexes, the two sample selection methods were compared and verified from two aspects: reconstruction accuracy and the effectiveness of sample selection. Through the Matlab software simulation experiment, the average color difference of the proposed method could be reduced to 0.7945, the maximum color difference was 2.1569, the mean spectral root mean square error was reduced to 0.011 42, and the maximum spectral root mean square error was 0.0218. The sample selection based on vector angle is simple and accurate, which can meet the requirements of high precision color reproduction and provide a reference for how to select samples quickly and accurately and improve the accuracy of color reproduction.

KEY WORDS: spectral reflectance reconstruction; sample selection; vector angle

多光谱成像技术在遥感、彩色成像、生物医疗、文化遗产和艺术品研究等领域的应用越来越广^[1-3],

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 上海理工大学科技发展项目 (2018KJFZ023); 国家新闻出版署重点实验室“柔版印刷绿色制版与标准化实验室”招标课题 (ZBKT201706)

作者简介: 曾茜 (1992—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻多光谱图像复制。

通信作者: 孔玲君 (1972—), 女, 博士, 上海出版印刷高等专科学校教授, 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。

如何重建获得高精度的光谱反射率信息是当前面临的关键问题。常用的光谱重建算法按重建原理可分为基于训练样本和基于模型两大类^[4]，基于训练样本光谱重建研究主要是建立样本的光谱反射率与设备响应值之间的关系矩阵，因此如何选择样本对光谱重建的精度是至关重要的，近年来基于样本选择光谱重建研究是光谱重建研究的热点。目前常用的训练样本选择方法可以分为 2 类。第 1 类是固定子分区法，其主要思想是把光谱空间按照一定的颜色特性进行划分。如 Garcia-Beltran^[5]、Nguyen^[6]、ZhangXiandou^[7]等按照色相对光谱空间进行分区，这一类方法是根据预先定义好的色相角进行空间划分，其存在的问题是在临近分区线周围的颜色点特征较难界定，导致子分区划分的不够准确。第 2 类根据测试样本的不同颜色属性进行选择，有 Hardeberg 提出的最小条件数方法^[8]、Cheung 等提出的 MAXMINC 方法^[9]、Mohammadi 提出的光谱聚类分析方法^[10]以及沈会良等提出的光谱特征向量分析方法^[11]，这类方法从表征样本集颜色析，选择具有典型代表性的训练样本集，进行光谱重建工作。第 2 类方法精度都较高，但是存在过程较复杂、迭代时间长等问题，而且没有考虑到与测试样本相似度更高的训练样本应赋予较大权重，也没有从样本选择的有效性去分析该方法的有效性。为了找到一种快速而又有效的选择样本的方法，文中提出基于光谱反射率向量夹角选择样本和向量夹角加权的光谱重建方法，并从重构精度与样本选择的有效性 2 个方面对此方法进行验证。

1 原理

1.1 光谱重建算法

假设照相机是理想的线性光电转换系统，一个色块的响应值可以由式（1）得到：

$$d_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} s(\lambda)l(\lambda)\tau(\lambda)r(\lambda)d(\lambda) + \xi_k \quad (1)$$

式中： k 为相机的第 k 个通道； d_k 为第 k 个通道相机的响应值； $s(\lambda)$ 为相机 CCD 的灵敏度； $l(\lambda)$ 为光谱功率分布； $\tau(\lambda)$ 为相机滤色片的透过率； $r(\lambda)$ 为物体表面的光谱反射率； ξ_k 为第 k 个通道的附加噪声。灵敏度、光谱功率分布、滤色片的透过率都是在可见光波长范围内等间隔采样，因此式（2）可以写成离散的矩阵的形式：

$$d = Mr + \xi \quad (2)$$

式中： d 为一个色块某一点的响应值； M 为相机整体系统的光谱灵敏度矩阵； r 为物体表面的光谱反射率矩阵。重建光谱反射率就是式（2）的一个逆过程，输入待重建色块的响应值，输出重建光谱反射率，见式（3）。

$$\hat{r} = Qd \quad (3)$$

式中： $\hat{r}$ 为重构光谱反射率； Q 为相机的响应值到光谱反射率转换的矩阵，它是由已知响应值和光谱反射率的训练样本通过相应的计算方法得到的，目前计算方法有伪逆、PCA 或 Wiener 估计等方法，伪逆法因其计算过程简单在光谱重建算法中较常使用，其方法为：

$$\hat{r} = r_{\text{train}} [d_{\text{train}}]^{-1} d_{\text{test}} \quad (4)$$

式中： $[]^{-1}$ 为伪逆运算符号； r_{train} 为训练样本的光谱反射率矩阵； d_{train} 为训练样本的响应值矩阵； d_{test} 为测试样品的响应值。文中采用伪逆法通过改进训练样本选择方法提高光谱重构精度。

1.2 样本选择方法

基于训练样本的光谱重建方法中训练样本的选择主要有 3 方面的问题：测试样本与训练样本相似度问题，相似性越低光谱重构精度越低，相似性越高光谱重构的精度越高；训练样本太多，数据冗余的问题，数据冗余会造成重构的精度降低；用整个训练样本集重构测试样本的问题，实际上与测试样本越相似的训练样本应赋予较大权重^[12-15]。由于这些问题的存在，文中分提出了根据测试样本与训练样本之间的夹角判断两者间的相似度，然后把该夹角大小作为相似度权重赋予该训练样本，采用伪逆法重构光谱反射率。

首先计算测试样本与训练样本之间的夹角。把所有样本看作为具有 n 维的向量，用式（5）表示：

$$a = (r_1 \cdots r_n) \quad (5)$$

式中： a 为样本向量； n 为光谱反射率的维数； $r_1 \cdots r_n$ 为具有 n 维的样本光谱反射率值。

光谱反射率有着物体表面颜色的“指纹”之称^[16]，光谱反射率曲线走势相似的物体颜色也是相似的，两者的相似度可用 2 个向量的夹角来度量，见式（6）。

$$e_i = \arcsin \frac{a \cdot b_i}{|a||b_i|} (i = 1, 2 \cdots W) \quad (6)$$

式中： a 为测试样本向量； b 为训练样本向量； W 为训练样本集的数量； e_i 为测试样本与第 i 个训练样本的相似度。然后依据相似度从大到小将所有的训练样本进行排列，选取前 p 个样本组成与测试样本相似度较高的训练样本子集，在训练样本子集中对应的色差值权重 e 可以表示成矩阵形式，见式（7）。

$$e = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & e_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & e_p \end{bmatrix}_{p \times p} \quad (7)$$

将权值 e 带入式（4）得到式（8）。

$$\hat{r} = [e r_{\text{subsettrain}}]^{-1} e d_{\text{subsettrain}} d_{\text{test}} \quad (8)$$

式中: $[]^{-1}$ 为伪逆运算符号; $\mathbf{r}_{\text{subsettrain}}$ 为训练样本子集的光谱反射率矩阵; $\mathbf{d}_{\text{subsettrain}}$ 为训练样本子集响应值。

2 实验仿真

选用 Munsell 色卡 (1269 色) 作为样本集, 其中奇数样本为训练样本集, 偶数样本为测试样本集, 基于颜色的 RGB 三通道信息采用伪逆法重构其光谱反射率, 并使用 Matlab 软件进行仿真实验。在训练样本选择方法上, 使用文中提出的方法与 Mohammadi 方法, 并对 2 种方法的重构精度进行比较。

文中提出的方法的 p 值以色差与光谱均方根差最小为目的进行调试, 当训练样本为 20 左右重构误差最小, Mohammadi 方法训练样本个数设为 24。光谱反射率的精度指标采用均方根误差 (RMSE) 和在 D50 标准光源及 CIE1931 标准观察者函数计算条件下的色差 (ΔE_{ab})。均方根误差 RMSE 由式 (9) 计算得到。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}(\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r})'(\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{r})} \quad (9)$$

式中: $\hat{\mathbf{r}}$ 为重建样本的光谱反射率向量; $\mathbf{r}$ 为重建样本实际测量得到的光谱反射率向量; n 为光谱反射率的采样波段数。实验中光谱反射率取值范围为 400 ~ 700

nm, 间隔采样为 10 nm, 因此这里的 n 取值为 31。

3 实验结果分析

3.1 选择样本的有效性

为了更加清晰地验证文中提出的样本选择方法所选取样本的有效性, 随机选 4 个具有典型波段分布的测试样本进行重构, 计算得到测试样本的光谱反射率曲线, 见图 1。

从图 1 的 4 个检测样本与重构样本的光谱曲线分布可以看出, 文中方法重建得到的光谱反射率与样本的实际光谱反射率十分接近, 说明由文中所提出的方法要优于 Mohammadi 方法。

同时, 根据测试样本的光谱反射率值计算得到其对应的 CIE XYZ 值和 CIE Lab 值。测试样本与训练样本的 ab 空间分布见图 2。

从图 2 可以看出: 用文中提出的方法所选择的训练样本均分布在测试样本的周围, 且不同的检测样本选择得到的训练样本也不相同。Mohammadi 方法选择的训练样本不随检测样本的不同而变化, 它所选择的训练样本在 4 个象限中均有分布且固定不变, 代表的是整个 Munsell 样本集; 4 个检测样本中, 文中方法位于第 1 象限的检测样本重构效率最好, 位于第 4

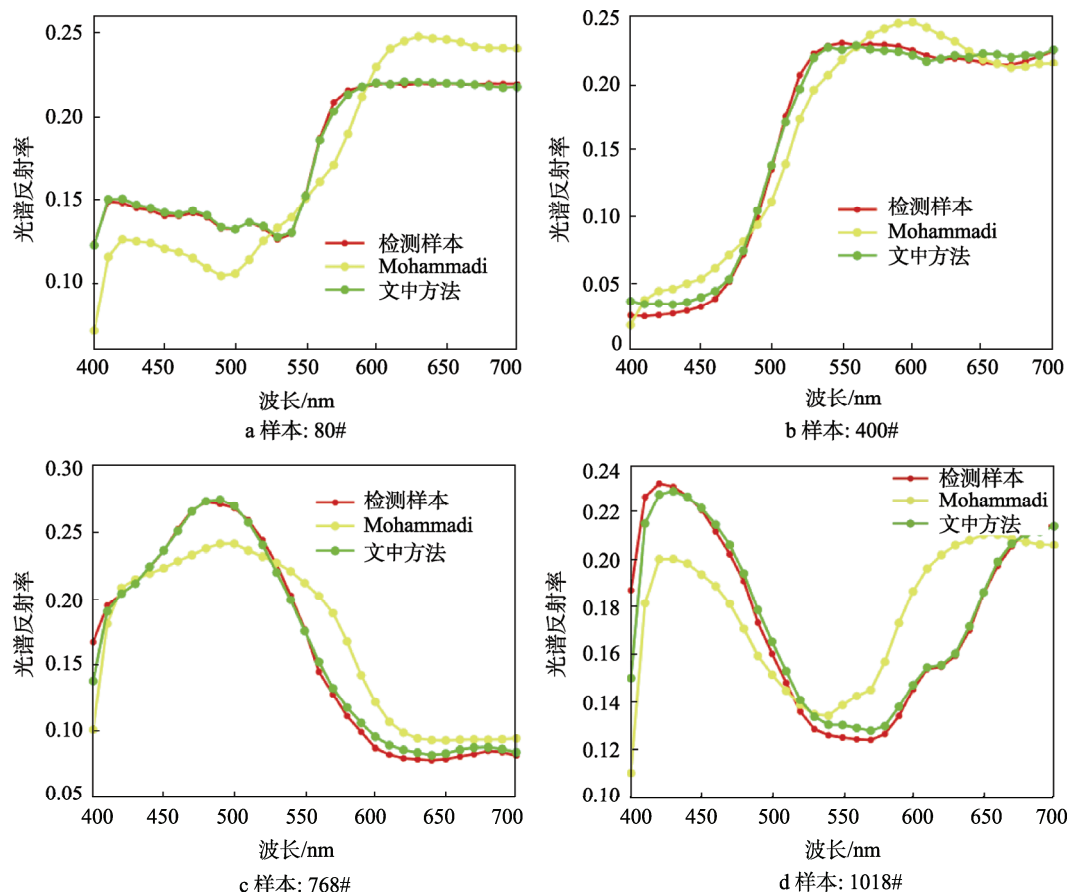


图 1 原样本与重构样本的光谱图分布

Fig.1 Spectral distribution of original sample and reconstructed sample

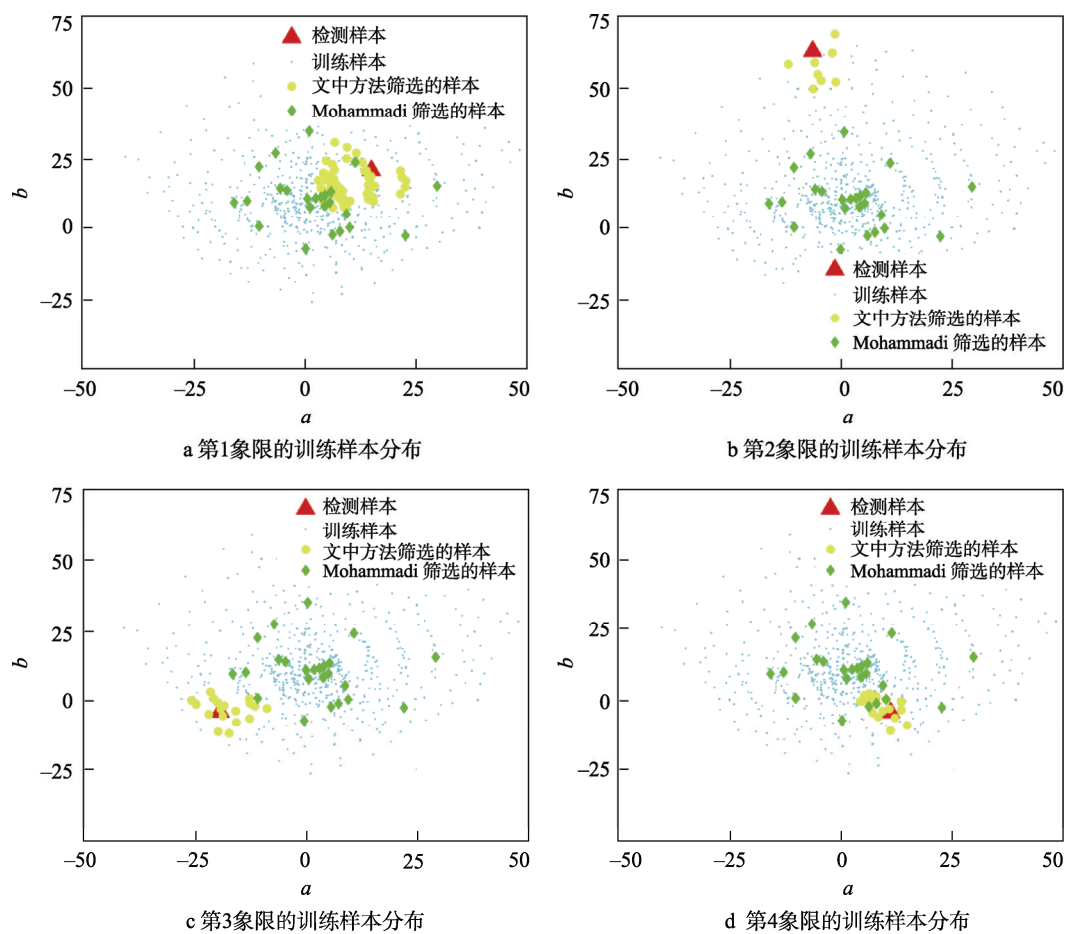


图 2 2 种方法选择的训练样本在 ab 空间分布
Fig.2 Distribution of testing samples selected by two methods in ab chromaticity space

象限的重构精度较差一些。同时根据样本在 ab 空间分布图可以看出在第 1 象限内的检测样本周围的训练样本分布呈环状分布,范围较广。位于第 4 象限的检测样本周围的训练样本分布范围较窄,所选择的训练样本较集中。

从以上实验结果可以得出,训练样本的选择应根据检测样本的不同而自适应地发生变化,训练样本与测试样本应具有高相似性,测试样本与训练样本相似性越高光谱重构的精度越高,且训练样本应有良好的代表性,这样才能有效提高光谱反射率重建精度。

3.2 重构光谱的精度比较

用 2 种方法对所有的测试样本进行重构,通过实验发现基于光谱反射率向量夹角方法的 P 值取 0.99 时平均重构精度最高,分别比较 2 种方法重构的光谱反射率与实际测量的光谱反射率。重构得到的光谱反射率精度统计见表 1。

从表 1 可以看出文中提出方法无论是在色差方面,还是在光谱均方根误差方面,2 种方法的光谱重构精度均取得了较好的效果,其中基于光谱反射率向量夹角方法优于 Mohammadi 方法。基于光谱反射率向量夹角方法的重建光谱与原光谱的平均光谱均方根

表 1 2 种训练样本选择方法的重建精度比较
Tab.1 Comparison of the reconstruction accuracy of two sample selection methods

方法	ΔE_{ab}			RMSE		
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
Mohammadi 方法	2.227	7.0831	0.1743	0.0340	0.1026	0.0092
基于光谱反射率向量夹角方法	0.7945	2.1569	0.1012	0.0114	0.0218	0.0012

误差为 0.0114,最大光谱均方根误差为 0.0218,最小光谱均方根误差为 0.0012,均比 Mohammadi 方法得到的相应值小;同时,基于光谱反射率向量夹角方法得到的平均色差值为 0.7945,最大色差值为 2.1569,最小色差值为 0.1012,比 Mohammadi 方法得到的平均色差值降低了 1.4325。由此可见,基于文中提出的样本选择方法的光谱重建的色度精度和光谱精度都有显著提高,色彩还原精度较好,能够为高精度的颜色复制提供较准确的光谱信息。

4 结语

针对光谱重建过程中如何更有效地选择训练样

本的问题,从训练样本的相似性与训练样本的权重 2 个方面进行改进,提出基于光谱反射率向量夹角选择样本并通过夹角进行训练样本加权的方法,文中不仅仅考虑到根据每一个测试样本的光谱曲线形态选择训练样本,生成自适应转换矩阵,而且提出对自适应样本集中的每一个训练样本应赋予相应的权重。从实验结果可以得出,基于光谱反射率向量夹角选择样本方法获得的重建光谱的色度精度和光谱精度显著提高,其精度和计算时间均明显优于传统算法,能在较大程度上满足工业生产中颜色复制、数字典藏、颜色质量评估等需要。

参考文献:

- [1] YUEN P W, RICHARDSON M. An Introduction to Hyper Spectral Imaging and Its Application for Security, Surveillance and Target Acquisition[J]. Imaging Science Journal The, 2010, 58(5): 241—253.
- [2] RIBES A, SCHMITT F, BRETTEL H. Calibration and Spectral Reconstruction for an Art Painting Multispectral Acquisition System[C]// Conference on Colour in Graphics, 2015: 498—530.
- [3] LIANG H. Advances in Multi Spectral and Hyper Spectral Imaging for Archaeology and Art Conservation[J]. Applied Physics A, 2012, 106(2): 309—323.
- [4] WU J, LIU Z, TAN S, et al. Computational Spectral Imaging Based on Random Modulation and Compressed Sensing Reconstruction Algorithm[C]// 3D Image Acquisition and Display: Technology, Perception and Applications, 2016: 37.
- [5] GARCIA-BELTRAN A, NIEVES J L, HEMANDEZ-ANDRES J, et al. Linear Bases for Spectral Reflectance Functions of Acrylic Paints[J]. Color Research & Application, 2015, 23(1): 39—45.
- [6] NGUYEN R M H, PRASAD D K, BROWN M S. Training-based Spectral Reconstruction from a Single RGB Image[C]// European Conference on Computer Vision Springer, Cham, 2014: 186—201.
- [7] ZHANG X D, XU H. Reconstructing Spectral Reflectance by Dividing Spectral Space and Extending the Principal Components in Principal Component Analysis[J]. JOSA A, 2008, 25(2): 371—378.
- [8] HARDEBERG J Y, SCHMITT F J M, BRETTEL H. Multispectral Color Image Capture Using a Liquid Crystal Tunable Filter[J]. Optical Engineering, 2002, 40(10): 2532—2548.
- [9] CHEUNG V, WESTLAND S. Methods for Optimal Color Selection[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(5): 481—488.
- [10] MOHAMMADI M, NEZAMABADI M, BEMS R S, et al. Spectral Imaging Target Development Based on Hierarchical Cluster Analysis[C]// 12th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems Scottsdale, 2004: 59—64.
- [11] SHEN H L, ZHANG H G, XIN J H, et al. Optimal Selection of Representative Colors for Spectral Reflectance Reconstruction a Multispectral Imaging System[J]. Applied Optics, 2008, 47(13): 2494—2502.
- [12] 梁金星, 万晓霞. 彩色数码相机单幅 RGB 图像光谱重建研究[J]. 光学学报, 2017(9): 1—11.
LIANG Jin-xing, WAN Xiao-xia. Study on Spectral Reconstruction of Single RGB Image of Color Digital Camera[J]. Acta optica Sinica, 2017(9): 1—11.
- [13] ZHANG L, LIANG D. Study on the Effects of Sample Selection on Spectral Reflectance Reconstruction Based on the Algorithm of Compressive Sensing[J]. Laser Physics, 2016, 26(1): 015206.
- [14] 龙艳群, 王慧琴, 王可, 等. 基于样本优化选取的光谱重建方法研究[J]. 影像科学与光化学, 2017, 35(1): 88—96.
LONG Yan-qun, WANG Hui-qin, WANG Ke, et al. Spectral Reconstruction Method Based on Optimized Sample Selection[J]. Image Science and Photochemistry, 2017, 35(1): 88—96.
- [15] 李婵, 万晓霞, 刘强, 等. 基于主成分分析的光谱重建训练样本选择方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(5): 1400—1405.
LI Chan, WAN Xiao-xia, LIU Qiang, et al. Study on Selection Methods of Spectral Reconstruction Training Samples Based on Principal Component Analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(5): 1400—1405.
- [16] 王莹. 多光谱图像色彩再现关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
WANG Ying. Research on Key Technologies of Color Reproduction in Multispectral Images[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.