

# 基于局部估计的多光源图像颜色恒常性计算

王谦，陈永利，王佳辉，刘文霞，王秀月，陈璐瑶  
(天津科技大学，天津 300222)

**摘要：**目的 解决多光源场景图像的颜色矫正问题。方法 首先采用网格划分和关键点取样2种方法对多光源图像划分区域，然后对划分后的区域采用单光源颜色恒常性算法估计光源，把每一个区域对场景光源颜色的贡献整合为复合光源颜色作为多光源场景的近似估计，最后采用对角模型进行矫正，并将此方法与单独用单光源颜色恒常性算法估计做对比。结果 通过对多光源图像划分区域，可以弱化多个光源对图像的影响，与单独用单光源颜色恒常性算法估计对比，对图像的矫正效果显著。结论 通过局部估计多光源图像，所提出的方法可以有效解决多光源室外场景图像的颜色恒常性问题。

**关键词：**颜色恒常性；多光源；场景光源估计；颜色矫正

中图分类号：TS801.3 文献标识码：A 文章编号：1001-3563(2017)19-0213-05

## Colour Constancy Calculation of Multi-light Source Image Based on Local Estimation

WANG Qian, CHEN Yong-li, WANG Jia-hui, LIU Wen-xia, WANG Xiu-yue, CHEN Lu-yao  
(Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

**ABSTRACT:** The work aims to solve the color correction problem of multi-light scene images. First of all, mesh generation and key-point sampling were used to divide the multi-light image into a number of regions. Then, the light source of the divided region was estimated with the color constancy algorithm of a single light source. The contribution of each region made to the scene light source color was integrated as the composite light source color to be the approximate estimate of the multi-light scene. Finally, the correction was applied with the diagonal model. Such method was compared with the estimation independently made based on the single light source color constancy algorithm. The effect of multiple light sources on the image could be weakened by dividing the multi-light image into several regions. Compared with the estimation independently made based on the single light source color constancy algorithm, the correction effect of the image was significant. Through the locally estimated multi-light source image, the proposed method can effectively solve the problem of color constancy for multi-light images of outdoor scenes.

**KEY WORDS:** color constancy; multi-light source; scene light source estimation; color correction

在计算机视觉领域，光源的颜色对场景中物体图像颜色有重要的影响<sup>[1]</sup>。若在不同的光源下，用同一个相机拍摄同一个物体，测量出的图像颜色值各有差别，这种图像的颜色差异对数字图像的应用带来极大影响。现有的大多数颜色恒常性算法通常假设场景中光源的光谱分布相对均匀。在现实环境中，由于受多光源非均匀光照、物体表面反射特性以及“内部反射”的影响，这种假设很难满足。为了保证图像检索、分

类<sup>[2]</sup>以及物体识别的鲁棒性，对多光源图像的颜色恒常性计算是关键所在<sup>[3]</sup>。

多光源图像的颜色恒常性计算较单光源复杂，现有的多光源颜色恒常性算法主要有 E.Land<sup>[4]</sup>提出的 Retinex 算法，该算法假设色度突变由物体表面反射特性的改变引起，图像的光源在邻近或相近区域的变化趋于平滑。在此基础上，Finlayson 等<sup>[5]</sup>和 Barnard 等<sup>[6]</sup>提出基于 Retinex 的方法去识别 2 个不同光源照

收稿日期：2016-11-21

基金项目：国家级大学生创新创业训练计划（201610057008）

作者简介：王谦（1991—），男，天津科技大学硕士生，主攻数字图像色彩管理。

通讯作者：陈永利（1978—），男，博士，天津科技大学教授、硕导，主要研究方向为颜色科学和光学防伪。

射的物体表面颜色,但要求物体表面有足够的反射特性和光源变化。Xiong 等<sup>[7]</sup>用三维立体图像去提取图像的表面信息,这些信息用于精确区分光源的变化,但是此类信息的获得相对困难。Ebner<sup>[8]</sup>提出一个局部光源平均颜色估计方法,然而,上述方法均假设光源变化平滑,对光源的光谱能量分布和物体表面的反射特性做出严格假设和人为干预,以使算法容易成立,但是却缩小了算法适用性的范围。

文中提出一种新颖的多光源图像颜色恒常性计算算法,无需人为干预,无需对光源的光谱能量分布和表面反射特性过多的假设,主要采取“化整为零”的方法,即对一幅多光源图像划分区域,提取色块,并假设每一个色块光照均匀,然后对每个色块用现有的颜色恒常性算法进行光源估计,最后把所有区域的光源估计整合起来作为最后的估计结果,利用对角模型矫正到标准光源下。

## 1 颜色恒常性

颜色恒常性计算的主要目的就是消除光源对图像的影响,得到与光源无关的表面颜色特性,把未知光源下的图像矫正到标准白光下,重构物体表色,实现颜色恒常性,下面简要介绍颜色恒常性计算的步骤。

### 1.1 场景图像光照估计

一般情况下,朗伯特世界物体的表色  $I=(I_R, I_G, I_B)^T$  可以由式(1)表示。

$$I_C(x) = \int_{\omega} E(\lambda, x) S(\lambda, x) \rho_c(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中:  $C \in \{R, G, B\}$ ,  $E(\lambda, x)$ ,  $S(\lambda, x)$  和  $\rho(\lambda)$  分别为光源的光谱能量分布、物体表面反射特性和相机的光敏度;  $\omega$  为可见光谱范围(380~780 nm),给定一个图像二维空间像素点  $x$ ,以通过式(2)计算光源的颜色:

表 1 Grey-Edge 框架下的颜色恒常性算法实例<sup>[10]</sup>  
Tab.1 Examples<sup>[10]</sup> of color constancy algorithm under the framework of Grey-Edge

算法名称	符号	公式	算法假设
Grey-World	$e^{0,1,0}$	$\left( \int f(x) dx \right) = ke$	场景中的平均反射无色差
max-RGB	$e^{0,\infty,0}$	$\left( \int  f(x)  dx \right)^{\frac{1}{\infty}} = ke$	场景中最大反射率无色差
Shades of Grey	$e^{0,p,0}$	$\left( \int  f(x) ^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = ke$	场景中 $P$ 阶明可夫斯基范数无色差
General Grey-World	$e^{0,p,0}$	$\left( \int  f^\sigma(x) ^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = ke$	局部平滑后 $P$ 阶明可夫斯基范数无色差
Grey-Edge	$e^{0,p,\sigma}$	$\left( \int  f_x^\sigma(x) ^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = ke$	图像导数的 $P$ 阶明可夫斯基范数无色差
max-Edge	$e^{1,\infty,\sigma}$	$\left( \int  f_x^\sigma(x) ^\infty dx \right)^{\frac{1}{\infty}} = ke$	场景中的最大反射差异无色差
2nd order Grey-Edge	$e^{2,p,\sigma}$	$\left( \int  f_{xx}^\sigma(x) ^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = ke$	图像二阶导数的 $P$ 阶明可夫斯基范数无色差

$$L(x) = \begin{pmatrix} L_R(x) \\ L_G(x) \\ L_B(x) \end{pmatrix} = \int_{\omega} E(\lambda, x) \rho(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

由式(2)可以看出,由于  $E(\lambda, x)$  和  $\rho(\lambda)$  未知,因此图像的光照估计本身就是一个病态的问题,必须引入一些假设条件。现有颜色恒常性算法都是基于一定假设条件提出的,比如 White-Patch<sup>[2]</sup> 算法,该算法假设场景中永远存在一个白色表面并且 RGB 三通道的最大响应值是由该白色表面引起。max-RGB<sup>[9]</sup> 算法认为场景中各通道最大响应值就是光源的颜色。Grey-World 算法假设场景中的平均颜色是消色的。Grey-Edge 算法假设场景中平均边缘的差异是消色的,该假设是灰度世界算法的补充,上述算法均属于底层特征驱动,简单快速,效果很好,并且此类算法均可用一个统一的框架结构表示,公式为:

$$\left( \int \left| \frac{\partial^n f^\sigma(x)}{\partial x^n} \right|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = k e^{n,p,\sigma} \quad (3)$$

式中:  $e^{n,p,\sigma}$  改变  $n, p, \sigma$  可以获得不同的算法,由式(3)可以得出一系列算法,见表 1。

### 1.2 图像颜色矫正

给定一个未知光源下的图像,当场景光源估计完成后,则可通过对角模型或 von Kries 模型实现未知光源到标准光源下的转换,公式为:

$$I^c = A^u I^u \quad (4)$$

式中:  $I^u$  为未知光源下采集的图像;  $I^c$  为经对角模型转换后的标准光源图像;  $A^{u,c}$  为对角矩阵,见式(5)。

$$A^{u,c} = \begin{pmatrix} \alpha & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{L_R^c}{L_R^u} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_G^c}{L_G^u} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_B^c}{L_B^u} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中:  $L^c$  为标准光源;  $L^u$  为未知光源。需要提出的是, 由于这一步只是简单的矫正, 所以大多数颜色恒常性算法都只关注图像的光照估计问题, 光照估计得越准确, 纠正图像越准确。

## 2 基于局部估计的多光源图像颜色恒常性计算

大多数颜色恒常性算法假设光源的光谱分布均匀, 然而, 在现实情况这个假设很难满足, 比如室内图像, 不仅受到室内光源的照射, 还会受到室外光的影响。室外图像同时受到太阳光和天空光的照射。文中提出一个解决多光源图像的计算方法, 把图像划分区域, 并假设每个小区域近似等于单光源照射, 然后利用现有的单光源颜色恒常性算法进行光源估计, 下面是具体的计算步骤。

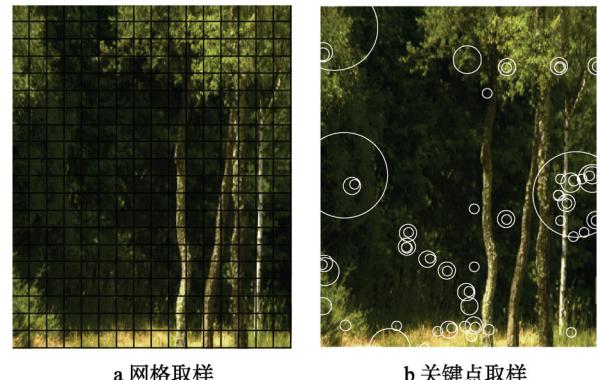
### 2.1 场景图像划分

把自然场景图像划分成若干个区域, 相对于整个图像而言, 每一个小区域仅受一种光源的影响, 利用这种方式去减弱多光源对整个图像的多重影响。假设每个区域的光源光谱分布均匀, 这些光源产生的共同效果可以利用线性或非线性方法拟合, 因此, 相对复杂的多光源图像光照估计问题便转化为对单光源均匀图像的光照估计问题, 此时可以用 1.1 节所述的单光源颜色恒常性算法对每个区域进行光照估计。

首先, 利用图像取样方法对图像划分。取样方法主要有基于网格取样、分割取样和关键点取样等。基于网格的取样方法可以确保分割后所有的色块能覆盖整个图像, 基于分割的取样对图像边缘光源的变化比较敏感, 而网格取样可以弥补这个劣势。关键点取样比较适合基于边缘的颜色恒常性方法。文中主要采取基于网格取样和关键点取样这 2 种方法对图像进行划分, 见图 1。

### 2.2 光源颜色估计与图像矫正

因为图像划分后的区域可以近似假设光源的光谱分布相对均匀, 所以, 用 1.1 节所述的单光源颜色恒常性算法对每一个区域进行光源估计, 比如 Grey-World 算法、Shades of Grey 算法、max-RGB 算法和 Grey-Edge 算法进行光源估计。由于每个小区域



a 网格取样    b 关键点取样

Fig.1 Examples of grid-based sampling and key-point sampling

包含的图像信息相对有限, 区域光源估计结果不能作为整个图像的光源估计, 结果有误差, 为了解决这个问题, 文中利用聚类算法(比如 K-means algorithm<sup>[11]</sup>)对每个区域的光照估计聚类, 需要指出的是, 文中假设聚类中心为 2, 即假设图像同时受 2 种光源照射。显然, 用任何一种聚类算法进行聚类都会得到 2 个聚类中心, 因此, 对每个色块的估计结果, 利用反向投影算法找到与原图像中相对应的区域, 通过此方法便会获得一个鲁棒性很好的光源估计结果。

根据场景光源估计结果, 利用 1.2 节所述的对角模型<sup>[12]</sup>便可将未知光源场景下的图像矫正到标准光源下, 实现图像的颜色恒常性。

## 3 实验与结果分析

对提出的方法在多光源高光谱图像数据集进行实验, 并采用角度误差作为各算法性能比较的度量标准, 文中所采用的实验数据集是 Foster<sup>[13]</sup>等的高光谱自然场景图像数据集, 此数据集包含丰富的场景。

### 3.1 角度误差

检验估计结果最常用的度量标准是角度误差<sup>[14]</sup>。假设图像的真实光照是  $L_t(x)$ , 颜色恒常性算法估计光照是  $L_e(x)$ , 估计光照  $L_e(x)$  越接近真实光照  $L_t(x)$ , 则该颜色恒常性算法的性能越好。角度误差公式为:

$$\varepsilon(X) = \cos^{-1}(\hat{L}_t(X) \cdot \hat{L}_e(X)) \quad (6)$$

为了更好地说明问题, 文中采用角度误差的中值作为最后的评价标准。

### 3.2 检验估计结果

为了检验所提出方法的性能, 文中采取 Foster 数据集中的多光源高光谱自然场景图像进行实验, 首先假设场景仅存在一种光源, 然后采用单光源颜色恒常性算法估计, 得出的估计结果作为后面对比的一个标准, 不同的颜色恒常性算法的结果见表 2, 从表 2 中可以看出, 文中所提出的方法有了一定的改进。基

表2 高光谱数据集上不同算法角度误差对比

Tab.2 Angle error comparison of different algorithms on hyperspectral data sets

类别	实验算法	中值/(°)
标准	Do Nothing	26.6
	Grey-world	14.5
	max-RGB	12.1
	Shades of Grey	13.4
	Grey-Edge	16.8
基于网格划分方法 (patch-size=16)	2nd order Grey-Edge	16.7
	Grey-world	10.1
	max-RGB	11.0
	Shades of Grey	9.5
	Grey-Edge	15.4
基于关键点取样方法	2nd order Grey-Edge	15.0
	Grey-world	10.6
	max-RGB	12.9
	Shades of Grey	10.3
	Grey-Edge	15.9
	2nd order Grey-Edge	15.4

于网格划分的各颜色恒常性算法的角度误差中值均比关键点取样的方法小,这说明基于网格划分的颜色矫正效果比关键点更接近于光源真实值,因为经网格划分后,所有色块的信息覆盖了整个图像,而关键点取样策略并不包括图像的所有像素信息,故估计结果

误差较网格划分偏大。

### 3.3 色块尺寸对算法性能的影响

基于网格划分方法对颜色恒常性算法性能影响的一个主要因素就是色块的大小,因此,本节将讨论色块尺寸与角度误差大小的关系,实验结果见图2。从图2可以看出,在5种颜色恒常性算法中,随着色块尺寸的增加,角度误差并不是随之增大的。通常会认为色块越大,包含的颜色信息就越多,但是场景图像因受多光源影响,当色块增大的时候,色块所受的光照就越发变得不均匀,故误差也会相应增大。

### 3.4 多光源自然场景图像矫正效果对比

多光源室外自然场景图像<sup>[15]</sup>的矫正效果对比见图3—4。为了更直观地对比,在图片的右下角是角度误差,数值越小,说明矫正效果越好。图3b有一定的矫正效果,图3c明显整体偏黄,色差较大,图3d与图3b矫正效果相差不大,图3e是基于网格划分的Grey-World算法,可以看出角度误差最小,矫正效果比其他算法要好,图3f矫正效果较好,但不如基于网格划分的算法效果好,这可能是由于场景颜色单一,对关键点的取样有一定的影响造成的。同样,由图4可知,图4b有一定的矫正效果,图4c效果稍微差,图4d与图4b矫正效果相差不大,图4e的角度误差最小,也是矫正效果最好的一个,图4f与图4e相比,效果稍差,但比其他的算法效果要好。

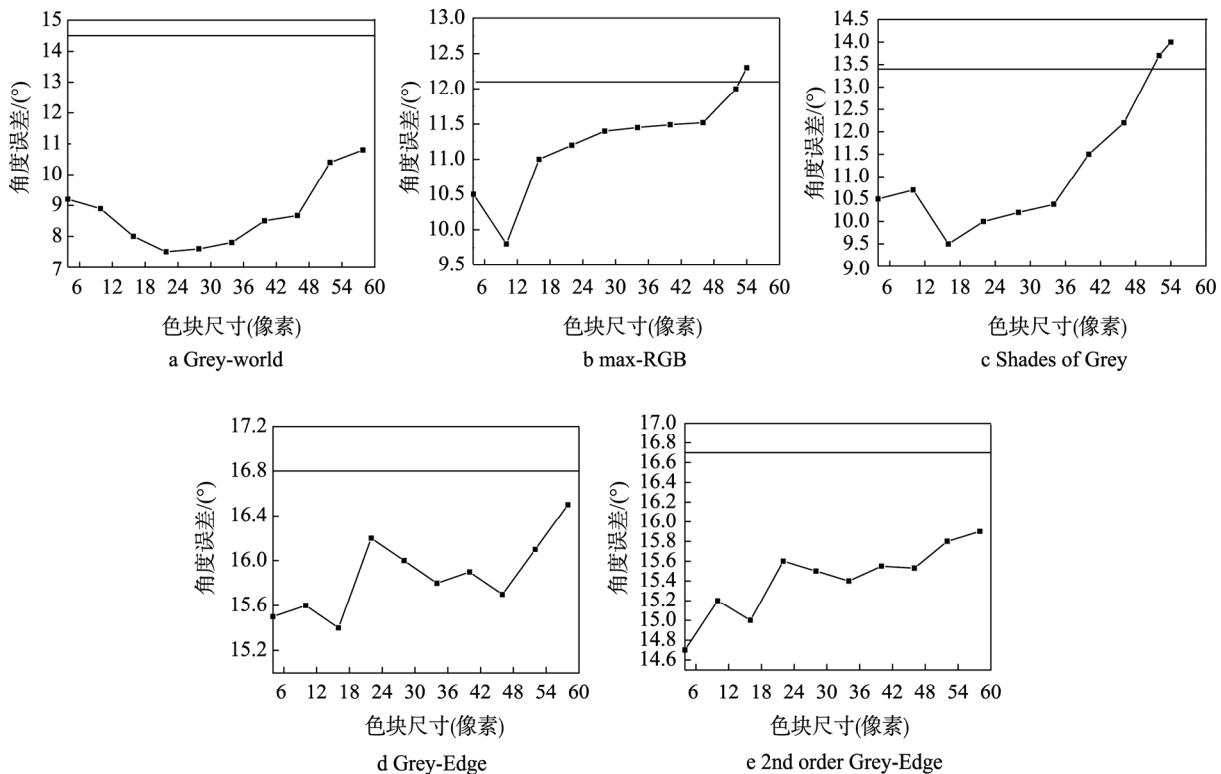


图2 色块尺寸与角度误差的关系  
Fig.2 Relationship between patch-size and angle error

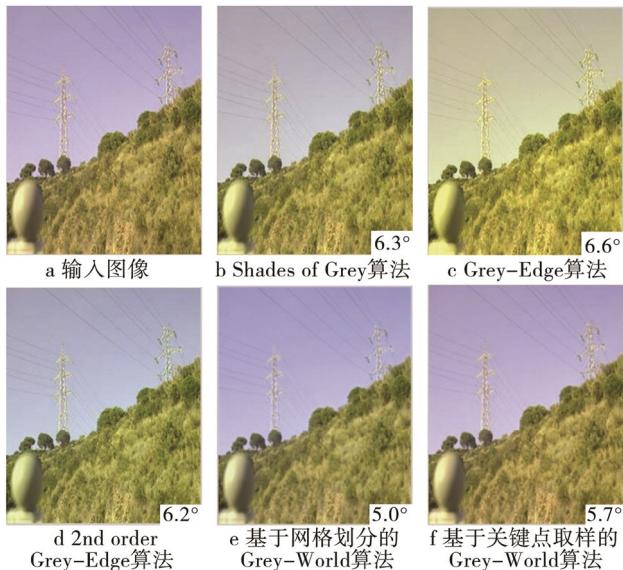


图3 第1组图片室外场景不同方法的矫正效果  
Fig.3 Correction effect of different methods for outdoor scenes in the pictures of group 1

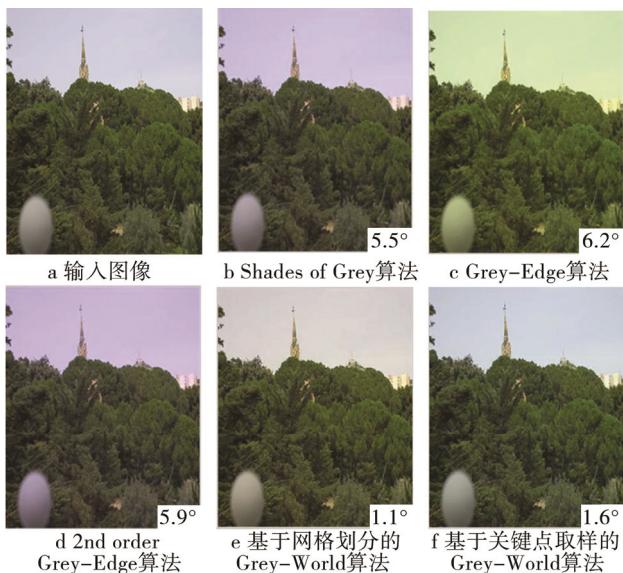


图4 第2组图片室外场景不同方法的矫正效果  
Fig.4 Correction effect of different methods for outdoor scenes in the pictures of group 2

#### 4 结语

针对多光源场景图像的光源估计,提出一种基于局部估计的颜色恒常性计算方法,该方法弱化传统算法对光源光谱能量分布和物体表面反射属性的假设限制,通过对基于网格划分和关键点取样方法与其他算法实验相比较,文中提出的方法可以有效地解决室外复杂多光源图像的颜色恒常性计算问题。因为基于网格划分的方法对色块尺寸的要求较为严格,不同算法对尺寸的敏感度各有差异,所以,如何更好地选择色块尺寸还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] HURLBERT A. Color Constancy[J]. Current Biology, 2007, 17(21): 115—119.
- [2] OH S W, KIM S J. Approaching the Computational Color Constancy as a Classification Problem Through Deep Learning[J]. Pattern Recognition, 2016, 61: 405—416.
- [3] LU R, GEVERS T, GIJSENIJ A. Color Constancy for Multiple Light Sources[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Public of the IEEE Signal Processing Society, 2011, 21(2): 697—707.
- [4] LAND E H. The Retinex Theory of Color Vision[J]. Scientific American, 1977, 237(6): 108—128.
- [5] FINLAYSON G D, FUNT B V, BARNARD K. Color Constancy under Varying Illumination[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, 1995: 720—725.
- [6] BARNARD K, FINLAYSON G D, FUNT B V. Colour Constancy for Scenes with Varying Illumination[C]// European Conference on Computer Vision, 1996, 65(2): 1—15.
- [7] XIONG W, FUNT B V. Stereo Retinex[J]. Image and Vision Computing, 2009, 27(1/2): 178—188.
- [8] EBNER M. Color Constancy Based on Local Space Average Color[J]. Machine Vision and Applications, 2009, 20(5): 283—301.
- [9] GIJSENIJ A, GEVERS T, VAN D. Computational Color Constancy: Survey and Experiments[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Public of the IEEE Signal Processing Society, 2011, 20(9): 2475—2489.
- [10] WEIJER J V, GEVERS T, GIJSENIJ A. Edge-Based Color Constancy[J]. IEEE Transactions on Image Processing A Public of the IEEE Signal Processing Society, 2007, 16(9): 2207—2214.
- [11] ERISOGLU M, CALIS N, SAKALLIOGLU S. A New Algorithm for Initial Cluster Centers in K-means Clustering[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(14): 1701—1705.
- [12] 鹿瑞. 自然图像颜色恒常性计算研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [13] LU Rui. Research on Computational Color Constancy for Natural Images[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [14] NASCIMENTO S M, AMANO K, FOSTER D H. Spatial Distributions of Local Illumination Color in Natural Scenes[J]. Vision Research, 2015, 120: 39—44.
- [15] GIJSENIJ A, FINLAYSON G D, ZAKIZADEH R. The Reproduction Angular Error for Evaluating the Performance of Illuminant Estimation Algorithms[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2016, 99: 1.
- [16] BARNARD K, MARTIN L, FUNT B V, et al. A Data Set for Colour Research[J]. Color Research and Application, 2002, 27(3): 147—151.