

文章编号:1007-2780(2014)06-1050-07

# 基于图像质量评价的显示器色域映射

宋 超<sup>1,2\*</sup>, 王瑞光<sup>1</sup>, 冯英翘<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对显示器图像颜色复现问题,提出了一种基于图像质量评价和图像分割-融合策略的色域映射算法。详细分析了各类色域映射算法的特点并选取 4 种算法作为基本色域映射算法。提出了一种色域映射图像质量评价算法,并选用 SLIC 超像素算法对源图像分割。使用基本色域映射算法对源图像进行映射处理,并计算每个分块内各映射图像与源图像的相似度。根据每个图像分块的相似度,对基本色域映射图像进行选择综合处理并融合成最终图像。最后以 LED 显示屏和 LCD 显示器为例,对本文提出的算法和其他基本色域映射算法进行主观评价对比实验。实验结果证明本文算法在图像颜色保真效果上要明显优于其他算法,但是在计算速度上仍有待优化。

**关 键 词:**图像质量评价;显示器;色域映射;LED 显示

**中图分类号:**TN873 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142906.1050

## Display gamut mapping based on image quality assessment

SONG Chao<sup>1,2\*</sup>, WANG Rui-guang<sup>1</sup>, FENG Ying-qiao<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** To solve the image color reproduction problems for display devices, a gamut mapping algorithm based on image quality assessment and image segmentation-fusion strategy was proposed. Firstly, different sorts of gamut mapping algorithms were analyzed in detail and 4 algorithms were chosen as basic algorithms. And then, a gamut mapping image quality assessment method was proposed, and SLIC superpixel algorithm was used to carry out the source image segmentation. Gamut mapping was applied to the source image with the basic algorithms, and similarity was calculated within each image segment between mapped images and source image. According to the calculated similarities, each mapped image was chosen and comprehensively processed, and fused to the final image. Finally, with LED display panel and LCD display as an example, a subjective evaluation experiment was made to the proposed algorithm and other basic gamut mapping algorithms. Experiment result shows that the proposed algorithm is apparently better than other ones on keeping image color fidelity, and yet the calculation speed still needs to be improved.

**Key words:** image quality assessment; display panel; gamut mapping; LED display

收稿日期:2014-02-11;修订日期:2014-03-05.

基金项目:国家科技支撑计划(No. 2009BAE73B00)

\* 通信联系人, E-mail: troysung@163.com

1 引言

随着计算机、多媒体和显示技术的不断发展,各种彩色显示设备如 CRT 显示器、LCD 显示器、OLED 显示器、PDP 显示器和 LED 显示屏<sup>[1-2]</sup>等在人们的生活生产中得到了广泛使用。由于各种显示器的颜色显示原理和参数配置不尽相同,彩色图像在传递和复现过程中均存在不同程度的跨媒体颜色复现问题,而在不同显示器之间使彩色图像能够尽量保持颜色复现一致性必须进行色域映射处理。

目前的色域映射算法可以分为 3 类:第 1 类根据源设备和目标设备的色域边界相对位置关系设计色域映射算法,运算速度较快但不具备图像适应性,会导致图像细节或整体的色彩对比度损失<sup>[3]</sup>;第 2 类算法以源图像色域作为源色域,以保持图像空间细节特征为目标设计映射算法,这类算法可以获得更佳的匹配效果,但存在运算量大等问题;第 3 类根据图像类型或者某些图像特征,在已有的色域映射算法中选择一种最合适的方法,图像质量得到较好的改善。

本文对第 3 类算法思路进一步发展,提出了一种基于图像质量评价和图像分割-融合策略的色域映射算法。首先选取几种不同类型的色域映射算法并对源图像完成色域映射。然后将源图像进行图像分割,使用图像质量评价算法计算每个分块内各个映射图像与源图像的相似度。根据每个图像分块的相似度,在每个分块内对基本色域映射图像进行选择综合处理并融合成最终图像,从而达到提高整幅图像色域映射效果的目的。

2 基本色域映射算法选择

2.1 色域压缩类算法

色域压缩类算法可以分为顺序压缩类、同时压缩类和综合压缩类等压缩方式。顺序压缩类算法如 LLIN、LNLIN 和 LSLIN 等,这 3 种色域映射算法都是首先进行明度压缩,且明度压缩算法相同,然后使用不同方式的彩度压缩映射。同时压缩算法是指在等色相面内,向着明度轴上选定的一个中心点对明度和彩度同时进行色域压缩,如 SLIN 算法和 CUSP 算法等。综合压缩算法如

CIE 推荐的 SGCK 算法等。

在 Morovic 所做的视觉评价实验<sup>[3]</sup>中,通过对比 CUSP 算法、SLIN 算法和 LLIN、LSLIN、LNLIN 算法的总体复现效果,证明了同时压缩算法要优于顺序压缩算法。同时压缩算法更多的保持了高彩度区域的颜色,但该算法在深色和消色轴上过多的明度压缩使部分区域复现效果较差。SGCK 等综合算法则同时兼顾了同时压缩算法和顺序压缩算法的特点和优势,在深色区和消色区采用明度压缩以减少该部分颜色明度过多的压缩,而在高彩度区域采用同时压缩算法以尽量保持彩度不变。本文中选用 SGCK 作为一种基本色域映射算法。

2.2 色域剪切类算法

色域剪切算法是指用目标色域边界上的颜色来代替目标色域外颜色的色域映射方式。此类算法的优点是可以使目标色域内颜色保持不变。常见的剪切类算法如 LCLIP 算法和 CIE 推荐的 HPMInDE 算法。

HPMInDE 是 CIE 推荐的一种剪切类算法。HPMInDE 算法的原理如图 1 所示。在等色相面上对应的色域中,实线部分与  $L^*$  轴所围三角形区域为源设备对应色域。对于待映射图像处于目标色域中的颜色,其色域映射后的颜色与源图像颜色相同;而对于处于目标色域边界外的颜色,需要沿着等色相面将其映射到目标色域边界上与源颜色色差最小的点。例如图 1 中从点  $O$  映射到点  $R$ 。

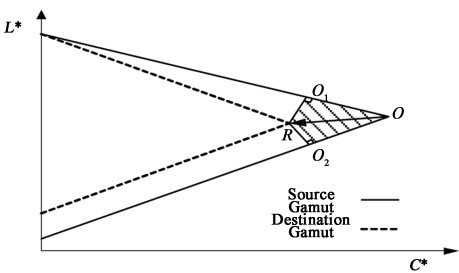


图1 HPMInDE 算法示意图  
Fig. 1 HPMInDE algorithm schematic

HPMInDE 映射后颜色与源颜色的色差最小,同时色调一致性较好。本文选用 HPMInDE 算法为第二种基本色域映射算法。

2.3 保持图像细节特征类算法

该类算法可以分成细节补偿法和最优化法。

最优化法需要进行迭代运算,消耗大量的时间资源,实践中应用较少。细节补偿法是在色域剪切或者色域压缩类算法的基础上,再在初始映射图像中添加源图像的空间细节部分,达到提高色域映射效果的目的。Bonnier<sup>[4]</sup>对局部亮度保持法、迭代滤波法和 Retinex 模型法进行的主观实验结果表明,保持图像细节特征类算法比 CIE 推荐的算法具有一致优越的色域映射效果。

Zoliker<sup>[5]</sup>的保持局部对比度法在基本色域剪切或色域映射类算法的基础上,使用其提出的边缘保护高斯滤波方法<sup>[6]</sup>,增加源图像的局部对比度信息,在运算时间和提高色域映射效果上获得了良好的平衡。其主观评价实验证明,保持局部对比度法比 CIE 推荐的两种色域映射方法具有更好的映射效果。

本文选用基于 SGCK 的保留局部对比度法和基于 HPMInDE 的保留局部对比度法作为本文的两种基本色域映射算法,分别命名为 CONTRAST-S 和 CONTRAST-H。

### 3 色域映射算法原理

#### 3.1 色域映射图像质量评价算法

传统图像质量评价算法仅仅使用亮度信息或者未能正确处理图像中的颜色信息<sup>[7]</sup>,它们在色域映射失真图像上的性能需进一步提高。本文在 FSIM 算法<sup>[8]</sup>的基础上,提出了一种能够提高色域映射失真图像预测准确性的图像质量评价方法。首先将源图像和映射图像转换到 CIELAB 均匀颜色空间中。对图像的明度分量,提取分别相位一致性信息和梯度信息作为图像特征。对图像彩度和色调分量,根据色域映射的特点,分别提取彩度和色调分量的彩度差和色调差作为图像的

另外两个图像特征。

根据 FSIM 算法,明度图像在像素位置  $i$  处的相位一致性特征为

$$PC(i) = \frac{\sum_j E_{\theta_j}(i)}{\epsilon + \sum_n \sum_j A_{n,\theta_j}(i)}. \quad (1)$$

同样使用 Scharr 算子提取图像在每个像素位置处的梯度特征  $G(i)$ 。则源图像  $O$  和映射图像  $R$  的相位一致性特征和梯度特征相似性分别定义为:

$$S_{PC}(i) = \frac{2PC(O,i) \cdot PC(R,i) + Q_1}{PC(O,i)^2 + PC(R,i)^2 + Q_1}, \quad (2)$$

$$S_G(i) = \frac{2G(O,i) \cdot G(R,i) + Q_2}{G(O,i)^2 + G(R,i)^2 + Q_2}, \quad (3)$$

其中: $Q_1$  和  $Q_2$  均为正实数,其作用为分别提高  $S_{PC}$  和  $S_G$  的稳定性。

取源图像  $O$  和映射图像  $R$  相位一致性的最大值作为权重,用于图像明度分量的相似性度量。图像明度分量的相似性权重定义为

$$PC_m(i) = \max(PC(O,i), PC(R,i)). \quad (4)$$

则图像明度分量的相似性可定义为

$$S_L(i) = \frac{PC_m(i) \cdot [S_{PC}(i)]^\alpha \cdot [S_{ES}(i)]^\beta}{\sum_i PC_m(i)}, \quad (5)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  用来表示  $PC$  特征和梯度特征重要性的参数。

色相是感知和辨别颜色中最主要的颜色属性。大部分色域映射算法都是以保持色相不变为原则,并且基本上都是在 CIELAB 均匀颜色空间中保持色相角不变来实现,然后在明度和彩度分量上进行颜色映射。

为了表征色域映射图像与源图像在彩度和色相分量的相似性,分别提取源图像和映射图像在像素位置  $i$  的彩度差和色调差

$$\Delta C(i) = C(O,i) - C(R,i), \quad (6)$$

$$\Delta H(i) = \sqrt{(a(O,i) - a(R,i))^2 + (b(O,i) - b(R,i))^2 - \Delta C^2(i)}, \quad (7)$$

其中: $C(O,i)$ 、 $C(R,i)$  分别为源图像和映射图像在像素  $i$  的彩度分量, $a(O,i)$ 、 $a(R,i)$ 、 $b(O,i)$ 、 $b(R,i)$  分别为对源图像和映射图像在 CIELAB 均匀颜色空间中分解对应的  $a$  和  $b$  分量。 $C(O,i)$ 、 $C(R,i)$  使用以下公式计算:

$$C(O,i) = \sqrt{a^2(O,i) + b^2(O,i)}. \quad (8)$$

$$C(R,i) = \sqrt{a^2(R,i) + b^2(R,i)}. \quad (9)$$

图像彩度分量和色相分量的相似性定义为

$$S_C(i) = \frac{1}{1 + Q_3 \cdot \Delta C^2(i)}, \quad (10)$$

$$S_H(i) = \frac{1}{1 + Q_4 \cdot \Delta H^2(i)}, \quad (11)$$

其中:参数  $Q_3$  和  $Q_4$  用于调整所检测的彩度差和色相差大小。

将所有相似性定义结合在一起,即可得到源图像  $O$  和映射图像  $R$  的相似值如下

$$\text{GMSIM} = \sum_i S_L \cdot \frac{\sum_i S_C}{N} \cdot \frac{\sum_i S_H}{N}. \quad (12)$$

使用已有色域映射算法主观对比实验中形成的 3 个图像集 Basic Study、Local Contrast 和 Image Gamut<sup>[9]</sup>,作为 GMSIM 算法参数调试和性能验证的图像源。这几个图像集包含约 15 种色域映射算法及其组合,共有 234 幅源图像,2 136 幅色域映射图像,共有 14 106 次有效主观对比评价。对各种图像质量评价算法得到的结果进行命中率分析,如表 1 所示。

表 1 图像质量评价算法命中率对比

Tab. 1 Hit rates comparison for IQAs

|     | S-CIELAB | SSIM    | FSIM    | GMSIM   |
|-----|----------|---------|---------|---------|
| $p$ | 0.459 5  | 0.679 6 | 0.687 4 | 0.710 5 |

从表 1 可以看出,S-CIELAB 在预测色域映射失真图像主观评价的效果很差,比完全随机预测略好,而传统的 SSIM 和 FSIM 算法的预测准确性已经比较高。本文提出的 GMSIM 算法的预测性能比 SSIM 和 FSIM 算法有了较大的提高,比 SSIM 算法运算结果提高了约 4.5%。

3.2 SLIC 超像素分割

本文选用 SLIC 超像素分割算法<sup>[10]</sup>用于源图像的分割。SLIC(simple linear iterative clustering)超像素分割算法,是一种简单的线性迭代聚类算法,具有原理简单、计算效率高、占用内存资源少和能够较好得保留图像边界够优点。该算法以 CIELAB 均匀颜色空间中的颜色相似距离和二维空间距离进行加权,不断进行迭代,最终实现该图像的超像素分割,能够将图像分割为图像颜色特征区别较大的分块。

文中使用 VLFeat 中对 SLIC 算法的实现方式。图 2 为使用不同参数设置组合对 SKI 图像进行图像分割,形成的超像素分割对比图。

从图可以看出,为了获得良好的效果,在使用 SLIC 算法进行超像素分割时需要对参数进行合

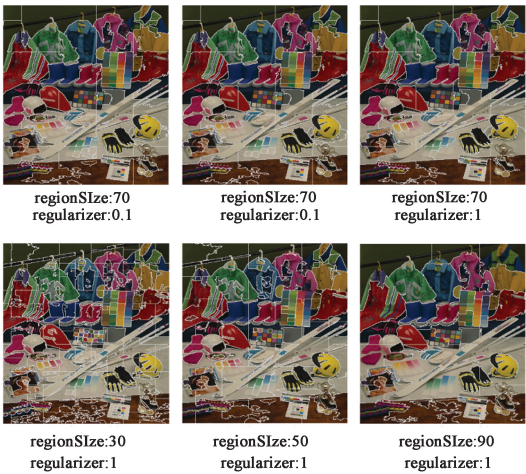


图 2 不同参数设置对应的超像素图

Fig. 2 Superpixel maps with different configurations

理的设置。

3.3 色域映射图像融合

首先分别使用 SGCK 算法、HPMinDE 算法、CONTRAST-S 算法和 CONTRAST-H 算法等 4 种色域映射算法对源图像  $O$  完成色域映射,获得 4 幅初始映射图像  $R(j), j=1, \dots, 4$ 。

$$\begin{cases} R(1) = \text{SGCK}(O) \\ R(2) = \text{HPMinDE}(O) \\ R(3) = \text{CONTRAST-S}(O) \\ R(4) = \text{CONTRAST-H}(O) \end{cases} \quad (13)$$

对源图像在 CIELAB 均匀颜色空间中,使用 SLIC 超像素分割算法进行图像分割,获得超像素标签图 labelMap。labelMap 标记了对源图像进行分割的情况,属于同一个超像素的像素在 labelMap 标记为相同的数字,label 取值范围为  $\text{label} \in [0, \text{maxLabel}]$ ,其中 maxLabel 为标签图中的最大值,对应于该图像中的超像素个数。记具有相同 label 的像素个数为  $n_{\text{label}}$ ,由于每个超像素的大小不同,所以每个 label 中像素的个数不尽相同。

对源图像和 4 幅映射图像在 CIELAB 均匀颜色空间中使用 GMSIM 图像质量评价算法分别进行相似性运算,对每幅映射图像分别得到图像明度、彩度和色相分量的相似图  $S_L(j,i)$ 、 $S_C(j,i)$  和  $S_H(j,i), i=1, \dots, N$  表示图像中像素的位置。根据超像素标签图 labelMap,分别计算每个标签对应的 4 个映射超像素与源超像素的相似值:

$$S(j, \text{label}) = \sum_{i \in \text{label}} S_L(j, i) \cdot \frac{\sum_{i \in \text{label}} S_C(j, i)}{n_{\text{label}}} \cdot \frac{\sum_{i \in \text{label}} S_H(j, i)}{n_{\text{label}}} \quad (14)$$

为了在每个标签内提高相应超像素的色域映射效果,首先在同一个标签内对 4 个超像素相似值取平均值,得到平均相似值

$$S(\text{label}) = \frac{1}{4} \sum_j S(j, \text{label}). \quad (15)$$

如果超像素相似值  $S(j, \text{label})$  不小于平均相似值,则该超像素相似值置为  $S(j, \text{label}) - S(\text{label})$ ;反之,如果超像素相似值  $S(j, \text{label})$  小于平均相似值,则该超像素相似值置为 0。这样在每个标签内,得到 4 个超像素权重值为  $\bar{W}(j, \text{label})$ 。在每个标签内,将对应的超像素权重值  $\bar{W}(j, \text{label})$  除以该标签内的像素个数  $n_{\text{label}}$ ,得到该标签内每个像素的权重值,也即得到 4 幅权重图  $\bar{W}(j, i)$  为

$$\bar{W}(j, i) = \frac{\bar{W}(j, \text{label})}{n_{\text{label}}}. \quad (16)$$

为了减少融合后的色块现象,使用引导图像滤波器<sup>[11]</sup>对 4 种基本色域映射算法对应的权重图  $\bar{W}(j, i)$  进行平滑滤波,得到对应的平滑权重图  $F(j, i)$ 。引导滤波算法能够避免传统的双边滤波中的梯度反转伪影现象,而且运算效率得到很大提高。对 4 幅平滑权重图的相同位置像素的平滑权重值归一化处理,得到 4 幅归一化权重图  $W(j, i)$  为

$$W(j, i) = \frac{F(j, i)}{\sum_{j=1}^4 F(j, i)}. \quad (17)$$

最后根据归一化权重图,直接对 4 幅色域映射图像的每个像素进行权重相加运算,得到最终的映射图像

$$R(i) = \sum_j R(j, i) \times W(j, i). \quad (18)$$

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验准备

本文选择 SKI 图像并分别采用文中使用的 4 种算法,以及本文给出的色域映射算法一共 5 种算法,将图像从 LED 显示屏映射到 LCD 显示器上进行主观评价实验。对比实验所用图像如图 3



SKI

图 3 主观实验所用图像

Fig. 3 Image used in the subjective evaluation

所示。

对比实验装置如图 4 所示,其中显示屏上的横纹是由于 LED 的显示刷新率不够造成的,使用数码相机拍摄时会形成此类横纹现象,但人眼不会察觉这种现象,因此对主观评价实验几乎没有影响。

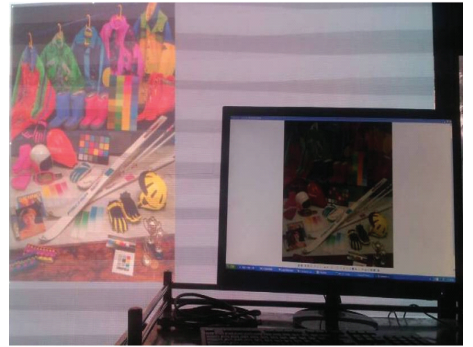


图 4 主观实验装置

Fig. 4 Subjective evaluation devices

在对比中使用希达公司点间距为 1.875 mm 的 LED 显示屏,显示器为 AOC 的 58 cm(23 in) 型号为 E231F 液晶显示器。由于 LED 显示屏的尺寸比实验中使用的液晶显示器尺寸大,所以 LED 显示器放在液晶显示器的后方,且人眼离液晶显示器的距离要比 LED 显示屏的距离要近。

由于数码相机分辨率和使用数码相机对显示器进行采集时产生的摩尔条纹问题,数码相机采集的图像在细节上很难分辨。因此在文中给出图

像在 5 种算法映射到 LCD 上未经数码相机采集的图像部分放大图,以评价本文算法色域映射效果以及在消除色块方面的效果。然后给出图像在 5 种算法映射到 LCD 上为经数码相机采集的完整图像及相应的主观实验评价结果。

4.2 实验结果分析

源图像在 5 种映射算法后,部分放大图映射结果如图 5 所示,完整图像如图 6 所示。在上述两组图像中,每组图像的上左 1 为 SGCK 映射图像,下左 1 为 HPMinDE 映射图像;上左 2 为 CONTRAST-S 映射图像,下左 2 为 CONTRAST-H 映射图像;上左 3 为本文色域映射算法处理后的图像,下左 3 为源图像。

本章中给出的成对比较法对这几种色域映射

算法进行评价,10 个色觉正常的观察者参与了该实验并分别重复 2 次,将 2 次的实验结果转换为对应 95%置信区间的  $z$  分数以定量比较这几种算法的性能,图 7 为对应  $z$  分数。

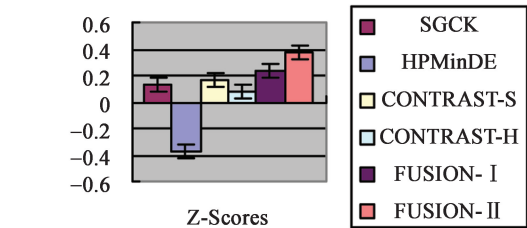


图 7 SKI 色域映射  $z$  分数评价  
Fig. 7  $z$  scores for mapped images

从 SKI 图像的各种色域映射算法处理的局部放大图和完整的色域映射图及相应的  $z$  分数,可以看出本文算法的色域映射效果要明显高于各种基本算法。本文基于图像质量评价和图像分割-融合策略的色域映射思路,能够选择综合利用各类色域映射算法的优点,提高色域映射效果,但在应用中要注意基本色域映射算法的选择以及防止在图像分割-融合过程中产生色块现象。

相对于基本色域映射算法,本文所提出的算法需要额外进行图像质量评价和图像分割等步骤,增加了运算时间,在实际应用中可选择更高效的图像处理算法和采用并行处理算法等措施以减少时间消耗。

5 结 论

本文对基于图像质量评价的色域映射算法展开了研究,并以 LED 显示屏和 LCD 显示器为例对算法进行了验证。首先详细分析了各类色域映射算法的特点并进行了比较。提出了一种基于 GMSIM 图像质量评价算法和 SLIC 超像素图像分割与权重图融合的色域映射算法。对本文提出的算法和其他基本色域映射算法进行主观评价实验,结果证明本文算法在图像颜色保真效果上明显优于其他算法,但是在计算速度上仍有待优化。

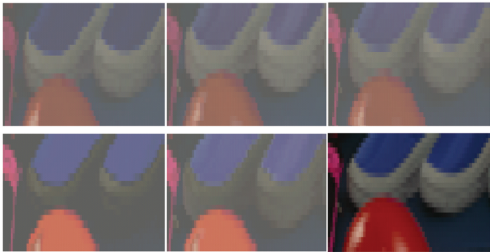


图 5 SKI 色域映射局部放大对比图  
Fig. 5 Local enlarged images for mapped SKI



图 6 SKI 色域映射对比图  
Fig. 6 Gamut mapping images for SKI

参 考 文 献:

[1] 宋超,王瑞光,冯英翹. LED 大屏幕显示校正系数配置系统[J]. 液晶与显示,2013,28(3):392-397.

- Song C, Wang R G, Feng Y Q. Display calibration coefficient configuration system used in LED panel [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28 (3): 392-397. (in Chinese)
- [2] 宋超, 王瑞光, 陈宇, 等. LED 显示屏色域边界的快速计算 [J]. *发光学报*, 2013, 34(7): 924-929.
- Song C, Wang R G, Chen Y, *et al.* Fast calculation of color gamut boundary for LED display panel [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34 (7): 924-929. (in Chinese)
- [3] Morovic J, Luo M R. The fundamentals of gamut mapping: A survey [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2001, 45(3): 283-290.
- [4] Bonnier N, Schmitt F, Brette H, *et al.* Evaluation of spatial gamut mapping algorithms [C]. *14th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings*, 2006: 56-61.
- [5] Zoliker P, Simon K. Retaining local image information in gamut mapping algorithms [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(3): 664-672.
- [6] Bala R, de Queiroz R, Eschbach R, *et al.* Gamut mapping to preserve spatial luminance variations [C]. *Proceeding of IS&T and SID's 8<sup>th</sup> Color Imaging Conference: Color Science and Engineering*, 2000: 122-126.
- [7] 王宇庆. 局部方差在图像质量评价中的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 531-536.
- Wang Y Q. Application of local variance in image quality assessment [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 531-536. (in Chinese)
- [8] Zhang L, Zhang L, Mou X, *et al.* FSIM: A feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [9] Lichtenauer M S, Zoliker P, Lissner I, *et al.* Learning image similarity measures from choice data [C]. *Conference on Color in Graphics, Imaging, and Vision, CGIV 2012 Final Program and Proceedings*, 2012: 24-30.
- [10] Achanta R, Shaji A, Smith K, *et al.* SLIC Superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2274-2282.
- [11] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [C]. *11<sup>th</sup> European Conference on Computer Vision, Greece*, 2010: 1-14.

**作者简介:** 宋超(1986—), 男, 山东高密人, 博士研究生, 研究方向为 LED 显示控制及颜色校正技术。E-mail: troysung@163.com