

# 基于最优色空间和视觉掩蔽的彩色图像评价算法

谢德红, 朱文凤, 李蕊  
(南京林业大学, 南京 210037)

**摘要:** **目的** 针对当前色差算法在评价彩色图像时未考虑图像中像素之间颜色在视觉上的空间效应, 提出基于最优色空间和视觉掩蔽效应的彩色图像质量评价算法。 **方法** 通过分析色空间通道间的相关性, 选取最优正交、对立空间作为评价的工作色空间, 在此基础上, 利用色空间各颜色通道的掩蔽函数, 去除图像颜色与颜色之间在视觉上的空间关联性, 最后构建图像颜色差别公式, 以评价彩色图像质量。 **结果** 在验证实验中, 通过利用 Pearson 相关系数、Spearman 等级相关系数以及 Kendall 等级相关系数, 分析各算法评价与图像主观评价之间的关系发现, 该算法评价与主观评价的 Pearson 相关系数、Spearman 等级相关系数和 Kendall 等级相关系数分别可达到 0.3948, 0.5840 和 0.4814, 且分别大于现有其他色差算法评价与主观评价的相关系数。 **结论** 该算法评价结果与人眼视觉主观评价相对一致。

**关键词:** 彩色图像; 质量; 评价; 色空间; 掩蔽效应

**中图分类号:** TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)21-0086-05

## Color Quality Assessment Algorithm Based on Optimal Color Space and Visual Masking

XIE De-hong, ZHU Wen-feng, LI Rui  
(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**ABSTRACT: Objective** The spatial visual effects of image colors among different pixels are not considered when using the typical color difference formula to assess the quality of color images. Targeting at this problem, a color image quality assessment algorithm based on optimal color space and visual masking effects was presented. **Methods** In this algorithm, an orthogonal and opponent color space, determined by analyzing correlation coefficient matrices of color spaces, was selected as its optimal working space. Visual masking functions for each channel of the color space were then used to de-correlate the spatial correlation caused by the interplay among colors in human vision. Finally, an image color difference formulae was constructed to assess the quality of color images. **Results** In the testing experiment, Pearson Correlation Coefficient (PCC), Spearman Rank-Order Correlation Coefficient (SROCC) and Kendall Rank-Order Correlation Coefficient (KROCC) were used to figure out the relationship between the objective assessment and the subjective visual assessment. In relation to the subjective assessment values, the PCC, SROCC and KROCC values of the objective assessment algorithms were 0.3948, 0.5840 and 0.4814, respectively, which were higher than those for other assessment algorithms. **Conclusion** The final results of the experiment showed that the proposed algorithm was essentially consistent with the subjective visual assessment.

**KEY WORDS:** color image; quality; assessment; color space; visual masking

收稿日期: 2014-01-10

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项(201310298043); 江苏省高等学校大学生实践创新训练计划重点项目(20131029843Z)

作者简介: 谢德红(1979—), 女, 江苏南京人, 博士, 南京林业大学讲师, 主要研究方向为颜色复制及图像处理。

图像质量评价是图像处理领域经久不衰的研究领域之一,应用也相当广泛。当前,存在许多优秀的图像质量评价算法(如纹理相似性指数)<sup>[1-5]</sup>,它们在众多的应用中被证实其性能优越。众多研究发现,由于这些评价算法很少考虑颜色本身以及颜色对纹理和对比度的影响,因而,在彩色图像评价中略显不足。由此,从考察图像色差的角度评价图像质量成为不可忽视的研究方向。

图像色差指一幅图像相对于另一幅图像的颜色差别。传统上,国际照明委员推荐用 $\Delta E_{ab}^{*}$ <sup>[6]</sup>、CIE94<sup>[7]</sup>或CIEDE2000<sup>[8]</sup>等色差公式来衡量一独立色块相对于另一独立色块的颜色差别。此方法也被印刷行业以及颜色复制研究领域确定为衡量复制图像颜色差别的主要方法。衡量对象必须是独立色块的颜色是目前一些色差公式的假设前提,即这些色差公式实际上并不适用于衡量图像的颜色复制差别。通常图像的颜色之间在视觉中相互作用,构成和影响图像纹理或边缘;反之,纹理及对比度的变化也影响图像的颜色,如颜色对比现象或颜色同化现象就是证明。

图像的颜色之所以能构建纹理或边缘,或对比度之所以能影响颜色,是由于颜色之间在视觉中的相互作用,即颜色视觉的空间性。其中,颜色的视觉掩蔽效应是描述此视觉特性的重要规律之一。考虑颜色对比和颜色同化这2种视觉掩蔽效应在图像颜色评价中并存的情况,利用扩展对比度敏感函数(Extended Contrast Sensitivity Function, ECSF)<sup>[9]</sup>作为色空间各通道的视觉掩蔽函数,在正交、对立的色空间中构建图像颜色差别公式,以评价彩色图像质量。

## 1 图像质量评价方法

通常,颜色信息所在的空间称为色空间(一般为三维空间),色空间中2颜色色差用空间距离表示,而空间距离计算方式由空间特性决定。例如,色差公式 $\Delta E_{ab}^{*}$ 为欧几里德距离,表示其色空间是欧几里德空间;CIEDE2000<sup>[8]</sup>接近黎曼空间距离表达方式,那么其色空间也比较接近黎曼空间。由此可见,无论是欧几里德空间还是黎曼空间,其空间的各维向量都满足线性无关且正交的关系,而彩色图像的颜色信息通常用RGB表示,RGB色空间并不满足上述条件,因此,图像颜色评价的第1步是寻求正交的色空间作

为评价的工作空间,并把图像的RGB信息转换到正交的色空间。此外,由于颜色的视觉掩蔽效应(如颜色对比和颜色同化现象)实际上也是发生在正交色空间中<sup>[10]</sup>。由此,首先选择图像颜色评价的色空间,再利用ECSF作为颜色的视觉掩蔽函数,以去除图像中颜色与颜色在视觉上的空间关系,最后构建图像颜色差别的计算方式。

### 1.1 最优工作色空间选取

主成份分析(Principle Component Analysis, PCA)<sup>[11]</sup>是构建正交空间最常见的方法,它可从数学上严格确保空间的正交性,却无法与颜色信息的物理意义相对应,因而在许多应用中并不采用PCA构建色空间,而采用颜色科学领域建立的色空间,如 $L\alpha\beta$ <sup>[12]</sup>、CIELAB<sup>[6]</sup>、CIELAB2000HL、HSV<sup>[6]</sup>、YCbCr<sup>[6]</sup>和HIS<sup>[6]</sup>等。然而,这些色空间在建立时并未从数学上保证其正交性。如上述分析,色空间非正交,其各通道之间存在相关性,会导致在此色空间上的色差计算不准确。由此,首先通过对这些色空间通道之间的相关性进行分析,然后选取最优的正交空间作为该算法的工作色空间。

在工作色空间的选取中,首先选用TID2008图像数据库<sup>[13]</sup>中25幅彩色参考图像,再把其图像的颜色信息由RGB色空间转换到HSV、YCbCr、HIS、 $Luv$ 、 $L\alpha\beta$ ,以及D65和D50标准光源下的CIELAB和CIELAB2000HL色空间中,具体为:

$$\mathbf{I}_{os} = \text{CT}(\mathbf{I}_{RGB}) \quad (1)$$

式中,CT()表示色空间转换函数; $\mathbf{I}_{RGB}$ 表示RGB色空间的图像矩阵; $\mathbf{I}_{os}$ 表示上述列举的色空间的图像矩阵。

将其维数为3、大小为 $n \times m$ 的图像矩阵 $\mathbf{I}_{os}$ 转换为 $N \times 3$ 的图像矩阵 $\mathbf{I}'_{os}$ :

$$\mathbf{I}'_{os} = \text{RM}(\mathbf{I}_{os}) \quad (2)$$

其中, $N$ 为图像像素总个数,即 $N = n \times m$ ,3表示色空间的维数。

计算 $N \times 3$ 图像矩阵的协方差,得到 $3 \times 3$ 的协方差矩阵 $\Sigma$ :

$$\Sigma = E\{(\mathbf{I}'_{os} - E)\mathbf{I}'_{os}(\mathbf{I}'_{os} - E[\mathbf{I}'_{os}]^T)\} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $E[\cdot]$ 表示期望值计算, 上标T表示矩阵转换。计算出色空间通道之间的相关系数矩阵  $\mathbf{P}$ :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & 1 & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & 1 \end{bmatrix}, \rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}}, i, j=1, 2, 3 \quad (4)$$

式中, 矩阵非对角线上的数据表示色空间中不同通道之间的相关性。当矩阵  $\mathbf{P}$  非对角线上的数据均为0时, 则表示对应的色空间为正交空间。因此, 这里采用矩阵  $\mathbf{P}$  非对角线上数据的平均值作为色空间正交性衡量指标。由此, 指标的值越趋于0, 说明对应色空间越接近正交空间。

通过统计所选25幅图像的测试结果, 获得各色空间正交性衡量指标的平均值和标准偏差, 见表1。通过分析表1的数据发现: 所有测试的色空间中没有一个理想的正交空间; 标准光源D65下CIELAB色空间的正交性衡量指标的平均值最小, 表明其色空间相对最接近正交空间; 标准光源D65下CIELAB色空间的正交性衡量指标的标准偏差虽然不是最小, 但它与最小标准偏差0.002 595只相差了0.000 201, 表征其色空间的正交性衡量指标随测试图像的波动性较小, 相对较为稳定。此外, 根据前面的分析, 下面的掩蔽函数要求工作色空间还必须是颜色对立的色空间, 而测试的色空间中相对只有  $L\alpha\beta$ 、CIELAB和CIELAB2000HL色空间满足此要求。综上所述, 这里选取标准光源D65下CIELAB色空间作为评价的最优工作空间。

表1 色空间的正交性衡量指标  
Tab.1 Orthogonal index of color space

色空间名称	平均值 ( $\times 10^{-3}$ )	标准偏差 ( $\times 10^{-3}$ )
CIELAB(D65)	5.181	2.796
CIELAB2000HL(D65)	6.686	3.299
HSV	7.814	3.768
YCbCr	5.828	3.146
HSI	8.138	5.614
Luv	5.529	2.595
$L\alpha\beta$	6.829	1.976
CIELAB(D50)	5.814	4.084
CIELAB2000HL(D50)	7.971	4.82

## 1.2 颜色的视觉掩蔽处理

视觉掩蔽效应是指人眼对某一颜色或亮度的感

知在其背景颜色或亮度影响下的现象, 即描述了颜色或亮度在视觉上的空间相关性。根据颜色的视觉掩蔽效应, 相邻颜色在视觉中不可避免地要发生相互作用。如果目标颜色与其背景颜色趋于相同, 则为颜色同化; 如果目标颜色偏向背景颜色的补色, 则为颜色对比。就图像而言, 在颜色平坦区域, 目标颜色在视觉上会偏向其背景颜色的补色, 即发生所谓颜色对比现象; 而在图像边缘或场景复杂的区域, 目标颜色在视觉上则会偏向背景颜色, 即发生所谓颜色同化现象。当出现颜色对比时, 会加剧颜色变化的程度, 导致边缘增强; 当出现颜色同化时, 则会减弱颜色的变化, 导致边缘模糊。

基于颜色的视觉掩蔽原理, 一些学者<sup>[14-16]</sup>提出一种图像颜色的掩蔽处理方式:

$$g^m(x, y) = g(x, y) * h(x, y) \quad (5)$$

式中,  $g(x, y)$ 为彩色图像的某个颜色通道的图像值;  $g^m(x, y)$ 表示掩蔽函数处理后的图像值;  $(x, y)$ 表示图像像素的位置;  $*$ 表示卷积操作符;  $h(x, y)$ 表示色空间中某个颜色通道的掩蔽函数。

由式(5)可知, 当掩蔽函数为低通函数时, 则可减弱颜色之间的对比模糊边缘, 即起到颜色同化的效果; 当掩蔽函数为带通函数时, 则可增强颜色之间的对比, 增强边缘, 即起到颜色对比的效果。

在文献[14—16]中的掩蔽函数都为低通性质的对比度敏感函数(Contrast Sensitivity Function, CSF)或低通的高斯滤波器。由此可见, 经此方式处理后, 图像所有区域的颜色均发生不同程度的颜色同化。对于图像颜色变化激烈的复杂场景或边缘区域, 此处理符合视觉掩蔽效应, 但对于图像颜色平坦区域, 此处理则不可避免地会产生边缘过渡模糊和颜色过度同化, 从而可能导致此区域颜色变化程度被低估。但是, 如果用高斯差分(Difference of Gaussian, DOG)滤波器代替参考文献[14—16]中涉及的低通滤波器, 则会出现另外一个极端, 即可能导致图像颜色变化激烈的复杂场景或边缘区域的边缘过度增强和颜色差别的夸大现象。

一幅彩色图像, 通常既有颜色平坦区域, 也有颜色变化激烈的复杂场景或边缘区域, 因而, 增强效果的视觉掩蔽(即颜色对比)和减弱效果的视觉掩蔽(即颜色同化)一般同时存在。由此可见, 单独使用满足某一效果的掩蔽函数, 无法达到去除彩色图像

颜色之间视觉相关性的要求。这里选用满足2种视觉掩蔽效果的数学模型(即扩展对比度敏感函数ECSF)<sup>[9]</sup>作为掩蔽函数:

$$\text{ECSF}(f,r) = \begin{cases} \frac{r^2}{1+r^2}e^{-\left(\frac{f_0+r}{\sigma_2}\right)} + \text{ECSF}_{\min}, & f \geq f_0 \\ \frac{r^2}{1+r^2}e^{-\left(\frac{f_0+r}{\sigma_3}\right)} + \text{ECSF}_{\min}, & f < f_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{ECSF}_{\min}(f,r) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{f_0+r}{\sigma_2}\right)}, & f \geq f_0/4 \\ 1, & f \geq f_0/4 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 为常数,分别为1.25和2。参数 $\sigma_1$ 的值在色空间不同通道中略有不同,在亮度通道中为1.23,在红-绿通道和蓝-绿通道中则为2; $r$ 表示图像中目标像素颜色所在视场(Receptive Field, RF)的中心区域与周围背景区域的颜色对比度变化率之比,其范围为[0 1]。根据颜色科学的视场定义:10° 视角范围内的区域即为视场的范围,其中2° 视角范围的区域为其中心区域,2° ~ 10° 视角范围的区域为其背景区域。由此,采用此2区域内像素颜色对比度偏差的比值计算 $r$ ;  $f$ 表示频率,单位为cpd(即cycles per degree),它主要由观察图像的视距和图像的显示分辨率所决定,其计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$f = \frac{R}{\frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{1}{d}\right)} \quad (8)$$

式中, $R$ 为图像的显示分辨率,单位为dpi; $d$ 为视距; $f_0$ 表征视觉上颜色对比与颜色同化过渡的频率。在色空间的亮度通道中, $f_0=4$ ;在色空间的红-绿和蓝-绿通道中, $f_0=2$ 。

这里利用ECSF作为公式(5)中的视觉掩蔽函数,在工作色空间中对图像各通道颜色进行处理,以去除图像颜色之间在视觉中的空间相关性,其计算如公式为:

$$(I_{0s}^M)_c = \text{FS}^{-1}(\text{FS}(I_{0s})_c \times (\text{ECSF})_c) \quad (9)$$

式中, $I_{0s}$ 表示公式(1)所得正交色空间中的图像矩阵,下标 $c$ 表示正交色空间的通道,该算法中分别为亮度(L)通道、红-绿颜色(R-G)通道和黄-蓝颜色(Y-B)通道; $I_{0s}^M$ 表示掩蔽函数处理后的图像矩阵,其上标M表示掩蔽处理。FS表示傅里叶变换,FS<sup>-1</sup>表示傅里叶逆变换。操作符 $\times$ 表示相乘操作。

### 1.3 图像色差计算

在正交、对立的色空间中,图像经过视觉掩蔽函数处理后,图像中颜色则可以满足传统色差公式的假设前提。在公式(1)和公式(9)操作的基础上,借鉴传统色差公式的构建思想,构建图像色差公式作为彩色图像质量的评价算法。

$$\Delta E_{\text{opt}} = \Delta E_{00}(I_1, I_2) \quad (10)$$

式中, $I_1$ 和 $I_2$ 分别表示2幅RGB模式的彩色图像经过公式(1)的RGB到CIELAB色空间转换和公式(9)的视觉掩蔽处理后的图像矩阵。

由上述1.1的结论可知,算法的工作空间为标准光源D65下的CIELAB色空间。依据颜色科学的研究<sup>[6]</sup>,CIELAB色空间并非严格的均匀空间(欧几里德空间)。如果在认同其正交特性的情况下,从空间的均匀性看,此色空间更接近黎曼空间<sup>[8]</sup>。因此,相对于欧几里德空间距离描述方式 $\Delta E_{\text{ab}}$ <sup>[6]</sup>,黎曼空间距离描述方式CIEDE2000<sup>[8]</sup>更能准确地描述此色空间的颜色差别。同时,一些测试<sup>[15]</sup>也证实,在CIELAB色空间下的CIEDE2000色差公式测量色差精度更高。由此,公式(10)中的函数 $\Delta E_{00}()$ 表示CIELAB色空间中图像各对应像素颜色的CIEDE2000值。

## 2 实验结果与分析

为了验证算法的有效性进行了测试实验,利用Pearson相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC)、Spearman等级相关系数(Spearman Rank-Order Correlation Coefficient, SROCC)<sup>[17]</sup>和Kendall等级相关系数(Kendall Rank-Order Correlation Coefficient, KROCC)<sup>[17]</sup>,分别分析提出算法的测试结果与其视觉主观评价(Mean Opinion Score, MOS)<sup>[18]</sup>值的相关性。并且比较了色差公式 $\Delta E_{\text{ab}}$ <sup>[6]</sup>、CIE94( $\Delta E_{94}$ )<sup>[7]</sup>、CIEDE2000( $\Delta E_{00}$ )<sup>[8]</sup>、基于S-CIELAB颜色空间的色差公式( $\Delta E_{\text{S-CIELAB}}$ ),以及提出的算法。

在测试实验中,选用了TID2008图像数据库<sup>[13]</sup>。TID2008图像数据库包含25幅彩色参考图像,每幅参考图像对应着17种图像处理方式、4个不同等级,以及图像的MOS值。其中,MOS值表示处理后图像相对于原参考图像的主观视觉质量值,范围在0.0~9.0之间,其值越大表示与原参考图像在视觉上越相近,质量越

好,反之则质量越差。

根据研究<sup>[19-20]</sup>指出,当图像各对应像素颜色色差的平均值小于2.15个色差单位时,可认为一幅图像相对于另一幅图像在颜色的变化上基本不会引起视觉察觉,即定义为质量好的图像。参考图像及对比度不同程度调整的图像见图1,平均色差见表2。由上述MOS值表示的含义,MOS值越大则各算法所得平均色差值小,反之则大。由图1和表2可见,图1b、图1c、图1e基本符合此规律。例如,图1b的MOS值为7.0313,距离最大MOS值9.0较近,说明其视觉质量相对也最好,因而平均色差值也应该距离图像颜色识别阈值2.15较近。表2中的CIE94( $\Delta E_{94}$ ),CIEDE2000( $\Delta E_{00}$ )和提出的算法( $\Delta E_{our}$ )所得平均色差值分别为3.6781,3.0368和3.8892,都比较接近2.15。值得注意的是,从MOS值看,图1d的质量要好于图1c,但除了该算法外,其他算法的评价结果见表2,其与MOS值所表示含义相反。因此,从1幅图像(图1)的测试结果看,提出的算法评价与视觉评价更一致。

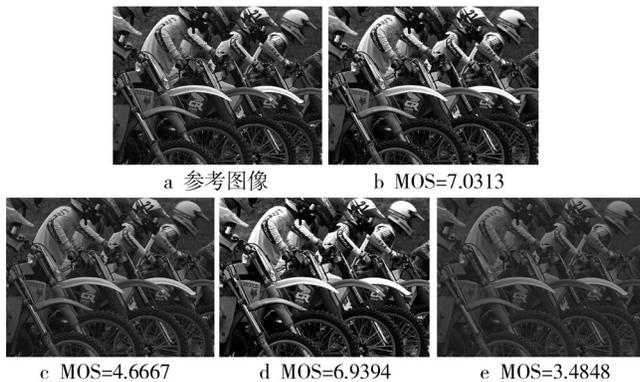


图1 参考图像及对比度调整后图像

Fig.1 Reference image and the corresponding images after contrast adjustment

表2 参考图像图与对比度调整后图像的平均色差

Tab.2 Mean values of color difference between the reference image and the corresponding images after contrast adjustment

色差算法	图1b	图1c	图1d	图1e
$\Delta E_{ab}$	4.8009	6.659 96	9.6403	13.3673
$\Delta E_{94}$	3.6781	5.1258	7.3781	10.3251
$\Delta E_{00}$	3.0368	4.2692	6.1492	8.9927
$\Delta E_{S-CIELAB}$	6.0450	8.9375	12.0121	16.7348
$\Delta E_{our}$	3.8892	5.8911	4.5826	12.0115

为了排除单幅图像测试结果的偶然性,对

TID2008库中所有图像进行了测试,并分析各算法下的平均色差值与MOS值的PCC,SROCC和KROCC的相关系数,见表3,发现 $\Delta E_{ab}$ ( $\Delta E_{ab}$ ),CIE94( $\Delta E_{94}$ ),CIEDE2000( $\Delta E_{00}$ )算法的评价结果与MOS值的各类相关系数都明显较低,基于S-CIELAB颜色空间算法的评价结果与MOS值的PCC,SROCC和KROCC值都有所提高,而提出的算法其评价结果与MOS值之间的3种相关系数最高,可见,提出的算法较适合彩色图像质量评价。

表3 评价结果与MOS的相关系数

Tab.3 Correlation between assessment by different algorithms and MOS values

色差算法	PCC	SROCC	KROCC
$\Delta E_{ab}$	-0.1936	-0.1771	-0.1229
$\Delta E_{94}$	-0.1972	-0.1931	-0.1329
$\Delta E_{00}$	-0.2011	-0.1678	-0.1203
$\Delta E_{S-CIELAB}$	-0.2741	-0.4729	-0.3744
$\Delta E_{our}$	-0.3948	-0.5840	-0.4814

### 3 结语

提出一种图像色差公式作为彩色图像质量的评价算法,该算法通过统计分析的方法选取正交、对立的色空间作为评价的最优工作空间,并利用视觉掩蔽函数ECSF去除图像颜色与颜色在视觉上对比和同化的空间相关性,最后根据工作空间CIELAB的特性建立图像色差公式,作为彩色图像质量的评价算法。实验结果表明:该算法能从颜色角度很好地将人的主观评价用数学公式加以表达,效果优于同类型的其他算法。

### 参考文献:

- [1] EGIAZARIAN K, ASTOLA J, PONOMARENKO N, et al. On Between-coefficient Contrast Masking of DCT Basis Functions [C]// Proceedings of Third International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics VPQM-07. Scottsdale; Morgan Kaufman, 2007: 1-4.
- [2] CHANDLER D M, HEMAMI S S. VSNR: A Wavelet-based Visual Signal-to-noise Ratio for Natural Images[J]. Ieee Transactions on Image Processing, 2007, 16(9): 2284-2298.
- [3] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, et al. FSIM: A Feature Sim

(下转第112页)

- Image Encoding Method with Data Lossless Information Hiding[J]. *Journal of Networks*, 2011, 6(3):400—407.
- [11] LEE C W. Efficient Bit Rate Control Method for Distributed Video Coding System[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, 12(1):1—12.
- [12] SAKKARA S, AKKAMAHADEVI D H, SOMASHEKAR K. Integer Wavelet Based Secret Data Hiding by Selecting Variable Bit Length[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 48(19):7—11.
- [13] VAJIHEH S, SHADROKH S, SHAHRAM S. An Adaptive LSB Matching Steganography Based on Octonary Complexity Measure[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2013, 64(3):777—793.
- [14] ZHU Wei-na, DREWES J, GEGENFURTNER K R. Animal Detection in Natural Images: Effects of Color and Image Database[J]. *PLoS One*, 2013, 8(10):78516—78522.
- [15] 谢勇,冯起芹,单武扬. 数字全息水印在印刷半色调图像中的应用[J]. *包装工程*, 2013, 34(1):101—105.
- XIE Yong, FENG Qi-qing, SHAN Wu-yang. Application of Digital Hologram Watermark in Printing Halftone Image[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(1):101—105.

(上接第90页)

- ilarity Index for Image Quality Assessment[J]. *Ieee Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8):2378—2386.
- [4] 徐敏,郑元林. 基于SSIM的印刷图像质量评价研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(5):98—101.
- XU Min, ZHENG Yuan-lin. Research of Printed Image Quality Based on SSIM[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(5):98—101.
- [5] 陈丽娜,刘真. 基于半色调特性的图像质量评价方法的研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(17):98—101.
- CHEN Li-na, LIU Zhen. Study of Image Quality Assessment Based on Halftone Characteristics[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(17):98—101.
- [6] WYSZECKI G, STILES W S. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*[M]. New Jersey: Wiley-Interscience, 2000:131—173.
- [7] CIE Publication No. 116-1995, *Industrial Color Difference Evaluation*[S].
- [8] SHARMA G, WU W C, DAA E N. The CIEDE2000 Color-difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations[J]. *Color Research and Application*, 2005, 30(1):21—30.
- [9] OTAZU X, PARRAGA C A, VANRELL M. Toward a Unified Chromatic Induction model[J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(12):1—24.
- [10] BROWN M, SÜ SSTRUNK S, FUA P. Spatio-Chromatic Decorrelation by Shift-Invariant Filtering[C]// *Colorado: Colorado Springs*, 2011:9—16.
- [11] VERA E, TORRES S. Adaptive Color Space Transform Using Independent Component Analysis[J]. *Image Processing: Algorithms and Systems V*, 2007, 6497(1):4970—4970.
- [12] RUDERMAN D, CRONIN T, CHIAO C. Statistics of Cone Responses to Natural Images: Implications for Visual Coding [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(8):2036—2045.
- [13] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al. TID 2008-A Database for Evaluation of Full-Reference Visual Quality Assessment Metrics [J]. *Advances of Modern Radioelectronics*, 2009, 10(2):30—45.
- [14] ZHANG X, SILVERSTEIN D A, FARRELL J E, et al. Color Image Quality Metric S-CIELAB and Its Application on Halftone Texture Visibility[C]// *San Jose: IEEE Computer Society*, 1997:44—48.
- [15] JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. A Top down Description of S-CIELAB and CIEDE2000[J]. *Color Research and Application*, 2003, 28(6):425—435.
- [16] YANG Y, MING J, YU N. Color Image Quality Assessment Based on CIEDE2000[C]// *Proceedings of the International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas: IEEE Consumer Electronics Society*, 2008:1—2.
- [17] KENDALL G M. *The Advanced Theory of Statistics: Vol. 1* [M]. London: Charles Griffin & Company Limited, 1945:307—445.
- [18] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms[J]. *Ieee Transactions on Image Processing*, 2006, 15(11):3440—3451.
- [19] STOKES M, FAIRCHILD M D, BERNS R S. Precision Requirements for Digital Color Reproduction[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1992, 11(4):406—422.
- [20] BRAINARD H D. *Color Appearance and Color Difference Specification*[M]. Washington D.C.: Optical Society of America, 2003:191—216.