

基于亮度阈值效应的无参考图像质量评价方法

邵雪, 曾台英, 汪祖辉

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 图像质量的优劣不仅与失真有关, 同时与亮度图像的质量有关, 而无参考图像质量评价中未考虑到亮度图像的质量对图像整体质量评价的影响, 因此引入亮度阈值效应对其亮度图像的质量进行量化评价。**方法** 在 BRISQUE 算法的基础上进行改进, 以快速衰落失真为例, 在调整亮度后获取的 50 幅图像库中进行实验, 将失真图像分层为入射分量和反射分量, 对入射分量(亮度图像)采用亮度阈值算法, 反射分量(反射图像)采用 BRISQUE 算法, 提出一种新的无参考图像质量评价方法。**结果** 文中算法的皮尔逊相关系数(PCC)为 0.9982, 斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)为 0.9741。**结论** 由实验数据可知, 文中算法在人眼视觉的主观评价上相较于 BRISQUE 算法有更好的一致性, 符合人眼的视觉感知。

关键词: 无参考图像质量评价; 亮度阈值; BRISQUE; 主观评价

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)15-0040-06

A Method for Quality Evaluation of No-reference Image Based on Luminance Threshold Effect

SHAO Xue, ZENG Tai-ying, WANG Zu-hui

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Image quality is not only related to distortion, but also with the quality of the luminance image. No-reference image quality evaluation has not considered the impact of the quality of the luminance image on the image's whole quality. Therefore, the luminance threshold effect is introduced to quantify the evaluation of the image's luminance image. Based on the BRISQUE algorithm and with fast fading distortion as an example, experiments were carried out for the 50 images acquired by adjusting their background luminance. The distortion image was stratified into the incident and reflected components. Luminance threshold algorithm was adopted for the incident component (luminance image) and BRISQUE algorithm for the reflection component (reflect image). A new method for evaluating the quality of no reference image was put forward. The Pearson correlation coefficient (PCC) of the proposed algorithm was 0.9982, and the Spearman's Rank ordered Correlation Coefficient (SROCC) value was 0.9741. According to the experimental data, this algorithm has better consistency with the subjective evaluation of human vision than the BRISQUE algorithm and fits the human visual perception.

KEY WORDS: no-reference image quality evaluation; luminance threshold; BRISQUE; subjective evaluation

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 新闻出版总署数字印刷工程研究中心数字传播重点实验室基金(10-00-309-000)

作者简介: 邵雪(1994—), 女, 河南人, 上海理工大学硕士生, 主攻图像质量评价。

通讯作者: 曾台英(1978—), 女, 浙江人, 博士, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为印刷质量检测与控制。

图像质量评价一般分为两大类：主观评价方法和客观评价方法。图像视觉信息的接受者最终是人，故利用主观评价实验来评价图像质量是最准确、最可靠的方法^[1]。客观评价方法在大体上分为三大类，全参考、半参考和无参考质量评价。全参考和半参考质量评价方法需要借助无失真图像作为参考图像，与失真图像进行对比来评价失真图像的质量，而实际应用中并不是总能得到参考图像的特征信息，因此对于无参考图像质量评价方法的研究显得尤为重要。

无参考图像质量评价在近几年里的研究主要分为两大类：特定失真类型的评价和多种失真类型的评价。针对特定失真类型的评价方法，如模糊失真，桑庆兵等人^[2]提出基于梯度结构相似度的评价方法，将原始模糊图像再模糊作为参考图像，计算原始模糊图像和再模糊图像中所有对应到边缘膨胀图中边缘膨胀块的相应子块的梯度相似度值，最后得到整幅图像的模糊值作为评价标准。针对多种失真类型的评价方法，其中有两段框架模型，如 Moorthy 等人^[3]提出的 BIQI 评价模型，从图像的小波域统计特性，提取统计特征并利用分类器判断失真类型，然后利用对应回归模型估算质量；全局框架模型中如 Mittal 等人^[4]提出的 BRISQUE 评价模型，从空间域的角度研究图像统计特性，采用支持向量回归的方式建立统计特征与主观评价的映射，估算图像质量^[5]，BRISQUE 算法在无参考质量评价方法中性能较优，计算复杂度较低。

这里在分析 BRISQUE 评价模型中没有考虑亮度图像的质量对图像整体质量评价的影响的基础上，提出一种基于亮度阈值效应的无参考图像质量评价方法。该算法对失真图像的入射分量（亮度图像）质量和反射分量（反射图像）质量赋予不同的权重求和来预测失真图像综合质量分数。在调整背景亮度后得到的 50 幅 FF 失真图像上实验结果表明，文中在充分考虑到人眼的亮度阈值效应的情况下，预测模型得到的质量分数与主观评价一致性更好，算法整体上优于 BRISQUE 质量模型。

1 相关理论介绍

1.1 BRISQUE 质量评价模型

BRISQUE 质量评价模型通过提取空域统计特征，采取支持向量回归方法构建特征与主观质量分

数的映射关系来预测图像的感知质量^[5]。该算法具体步骤可参考文献[4]，文中对特征提取的步骤简单说明如下。

1) 采用分离归一化^[6]方法对一幅图像 $I(i, j)$ 进行归一化预处理：

$$\hat{I}(i, j) = \frac{I(i, j) - \mu(i, j)}{\sigma(i, j) + C} \quad (1)$$

$$\mu(i, j) = \sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L \omega_{k,l} I_{k,l}(i, j) \quad (2)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L \omega_{k,l} (I_{k,l}(i, j) - \mu(i, j))^2} \quad (3)$$

式中： $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ； $j \in \{1, 2, \dots, n\}$ ； m 和 n 分别为图像的维数； $C = 1$ ； $\mu(i, j)$ 为均值， $\sigma(i, j)$ 为方差； $\omega = \{\omega_{k,l} | k = -K, \dots, K, l = -L, \dots, L\}$ ， $K = L = 3$ ，它是中心对称的高斯加权函数。称归一化后的亮度值 $\hat{I}(i, j)$ 为 MSCN 系数，归一化后的 $\hat{I}(i, j)$ 比 $I(i, j)$ 减少了像素之间的相关性。

2) 空域统计特征提取，归一化系数特征包括广义高斯分布特征和相邻系数相关性特征。广义高斯分布特征 (α, σ^2) 采用快速匹配法^[7]估计得到，其中广义高斯分布模型的表达式为：

$$f(x; \alpha, \sigma^2) = \frac{\alpha}{2\beta\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left(\frac{|x|}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (4)$$

其中，形状参数 α 控制着广义高斯分布模型的部分形状， σ^2 为方差， $\beta = \sigma \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$ ， $\Gamma(\alpha)$ 为 gamma 函数：

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt, \alpha > 0 \quad (5)$$

3) 相邻系数相关性特征提取。从水平、垂直、主对角线和次对角线 4 个定向得到相关性图像^[8]，采用非对称广义高斯分布拟合模型^[9]进行拟合，模型的表达式如下：

$$f(x; v, \sigma_l^2, \sigma_r^2) = \begin{cases} \frac{v}{(\beta_l + \beta_r)\Gamma(\frac{1}{v})} \exp\left(-\left(\frac{-x}{\beta_l}\right)^v\right), & x < 0 \\ \frac{v}{(\beta_l + \beta_r)\Gamma(\frac{1}{v})} \exp\left(-\left(\frac{-x}{\beta_r}\right)^v\right), & x \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\beta_l = \sigma_l \sqrt{\frac{\Gamma(1/v)}{\Gamma(3/v)}} \quad (7)$$

$$\beta_r = \sigma_r \sqrt{\frac{\Gamma(1/\nu)}{\Gamma(3/\nu)}} \quad (8)$$

式中： ν 为形状参数； σ_l^2 为左方差； σ_r^2 为右方差。每个方向有4个估计参数($\eta, \nu, \sigma_l^2, \sigma_r^2$)，其中 $\nu, \sigma_l^2, \sigma_r^2$ 这3个参数可以用快速匹配算法^[7]来估计， η 为分布均值，计算公式 $\eta = (\beta_r - \beta_l) \frac{\Gamma(2/\nu)}{\Gamma(1/\nu)}$ 。得到4个方向估计的16个参数作为相邻系数相关性特征。

4) 图像质量计算。由于自然图像统计特性的多尺度性，分别在2个尺度下提取2个广义高斯分布特征和16个相邻系数相关性特征，所以共提取36个统计特征。然后利用支持向量机回归得到回归模型，训练出图像特征与主观图像质量分数之间的映射关系。对于失真待测图像，提取其特征向量代入训练好的SVR回归模型来计算图像质量^[10]。

1.2 亮度阈值效应

人眼的分辨能力无法区分相邻的灰度级差别，只有当单个像素的灰度级与其局部背景平均亮度的偏差超过某一阈值（通常阈值 ≥ 4 ）时，才能被人眼所感知，称该现象为视觉的亮度阈值效应^[11]。人眼视觉在不同亮度背景条件下的感知特性曲线见图1。

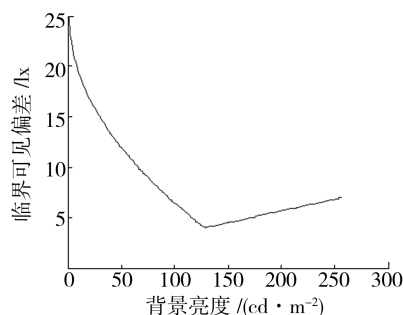


图1 不同亮度背景条件下的视觉阈值曲线

Fig.1 Visual threshold curves under different illumination conditions

亮度阈值曲线的表达式为^[11-12]：

$$J_l(x, y) = \begin{cases} 21 \left[1 - \sqrt{\frac{\bar{I}(x, y)}{127}} \right] + 4, & \bar{I}(x, y) \leq 127 \\ \frac{3}{128} (\bar{I}(x, y) - 128) + 4, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (9)$$

其中， $\bar{I}$ 是以像素点 (x, y) 为中心的局部背景区域的平均亮度值，定义为：

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 f(x-3+i, y-3+j) \circ B(i, j) \quad (10)$$

式中： $\circ$ 表示两者相关算法； $B(i, j)$ 是加权的低通滤波器。

通过亮度阈值效应，将人眼对图像背景亮度的非线性感知进行量化评分，质量分数模型LTEQ如下：

$$\text{LTEQ} = \frac{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \text{matout}(i, j) - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (11)$$

式中： M, N 分别为入射分量的长和宽， $\text{matout}(i, j)$ 为入射分量的亮度适应阈值矩阵， $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别为原失真图像的亮度适应阈值矩阵的最大值和最小值。质量分数越大，图像质量越差。

2 相关实验分析

根据Retinex理论^[13]可知，图像可以分解为入射分量（亮度图像）和反射分量（反射图像）。入射分量主要体现了图像的亮度、颜色等视觉感知信息，而反射分量主要体现了图像的纹理、边缘等本质信息。BRISQUE算法侧重对失真程度的评价，评价的是图像的纹理、边缘等本质信息的缺失程度，在Retinex理论下可以认为BRISQUE算法只对反射图像进行了评价，而没有对亮度图像进行评价。由于亮度图像直接反映了人眼的视觉感知，因此，亮度图像评价过程中会有亮度阈值效应。

针对BRISQUE算法未考虑亮度图像的背景亮度对其图像整体质量的影响，而亮度阈值效应质量模型对亮度图像的背景亮度作了量化评价，文中通过一组实验进行验证分析。

2.1 相同失真不同背景亮度图像

首先，选取LIVE图像数据库^[14]里的快速衰落(FF)失真图像coinsinfountain，采用Photoshop软件分别调整该图像的整体亮度为-80，-40，+40，+80 cd/m^2 ，原失真图像和调整后的图像见图2。

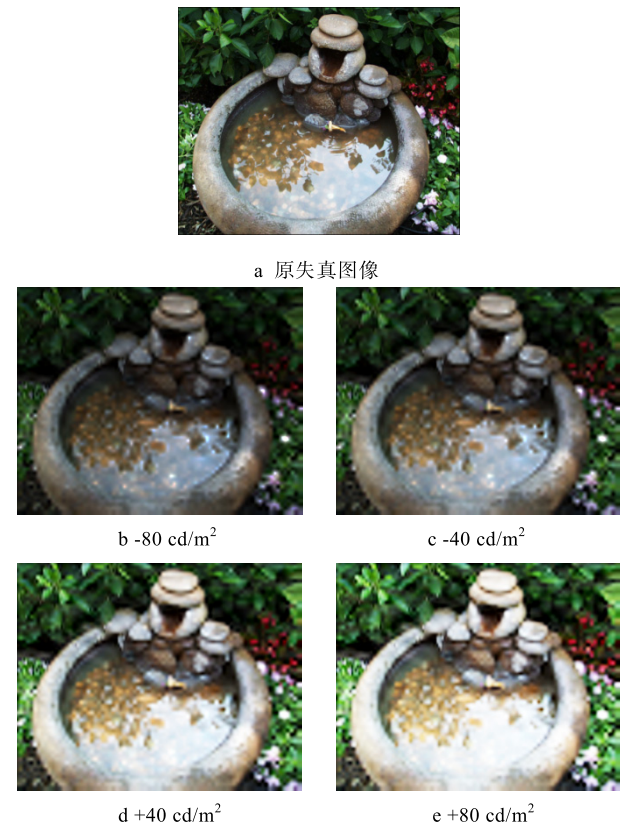


图 2 原失真图像和调整后图像
Fig.2 Original distorted images and images with adjusted brightness

分别对调整后的 4 幅图像以及原失真图像进行 Retinex 分解，分解为 5 幅亮度图像和 5 幅反射图像。然后，将 5 幅亮度图像采用 LTEQ 模型进行质量分数计算，将 5 幅反射图像采用 BRISQUE 算法进行质量分数计算，结果见表 1。

表 1 相同失真不同背景亮度的质量分数结果
Tab.1 Quality score results with same distortion and different background luminance

亮度/(cd·m ⁻²)	BRISQUE	LTEQ
-80	74.1109	0.2846
-40	73.8739	0.2303
0	73.7973	0.1914
+40	74.1099	0.1636
+80	74.4976	0.1420

根据表 1 可知，5 幅不同背景亮度下反射图像的 BRISQUE 值均在 74.11 左右，数值没有达到绝对的一致是因为实际操作中不能完全将图像分解为亮度图像和反射图像，亮度图像作为 1 个预估值来计算。亮度图像的 LTEQ 值随着背景亮度的提高而减小，图像的质量也越好，人眼视觉感知随着背景亮度的提高而提高。由此说明验证结果符合上述

理论分析。

2.2 不同失真相同背景亮度图像

实验将原来的一幅图像扩展为 5 种不同失真程度的图像，在背景亮度同为+40 cd/m² 情况下进行检验，不同失真的图像见图 3。

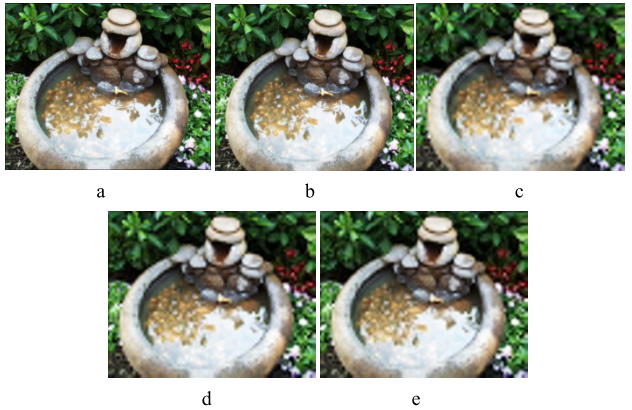


图 3 不同失真程度的图像
Fig.3 The images of different degrees of distortion

图 3a—e 图的信噪比失真程度分别为 16.5, 18.9, 21.3, 23.7, 25.1 db,将这 5 幅图像采用 Retinex 分解为亮度图像和反射图像，通过 BRISQUE 计算反射图像的分值，LTEQ 计算亮度图像的分值，结果见表 2。

表 2 不同失真相同背景亮度的质量分数结果
Tab.2 Quality score results with different distortion and same background luminance

图像	BRISQUE	LTEQ
a	52.6473	0.1673
b	59.6392	0.1668
c	74.1099	0.1636
d	75.2841	0.1686
e	75.6188	0.1687

由表 2 可知，5 幅不同失真程度的反射图像 BRISQUE 分值随着失真程度的增大而增大，代表图像的质量越来越差；亮度图像 LTEQ 分值均在 0.166 左右，上下相差不大，没有达到绝对一致的原因已在文中说明。验证结果与理论分析相一致。

由以上实验结果可知，BRISQUE 算法在背景亮度改变的情况下，其质量分数只与图像的反射分量有关，而 LTEQ 算法对入射分量（亮度图像）的质量作了符合视觉感知的评价。结合 BRISQUE 算法和 LTEQ 算法分别对反射分量和入射分量进行质量评价，能够更加符合实际失真图像中的质量评

价与人眼主观视觉感知的一致性。

3 基于亮度阈值效应的图像质量评价模型

图像质量评价不仅要对图像本身的失真程度进行评价,更要符合人眼视觉感知,BRISQUE 算法与 LTEQ 算法互相补充,因此,文中在考虑人眼亮度阈值效应的基础上,建立图像质量评价模型,其具体实现步骤如下。

1)采用 Retinex 算法^[13]对失真图像进行分层,得到图像的入射分量(亮度图像层)和反射分量(反射图像层)。

2)对入射分量采用亮度阈值效应 LTEQ 质量模型,计算入射分量的质量分数 Q_1 。

3)将反射分量采用 BRISQUE 算法计算其质量分数 Q_2 ,并将入射分量的质量分数与反射分量的质量分数赋予不同的权重,进行加权求和,由于入射分量和反射分量求得的质量分数表示为值越大,失真图像的质量越差,因此,采用单位 1 减去两者加权求和的值,为失真图像最终的质量分数预测值,即 $Q = 1 - (\lambda Q_1 + (1 - \lambda)Q_2)$ 。其中, λ 为质量分数的权重值,经试验,取 $\lambda = 0.2$ 。 Q 的值越大,说明失真图像的质量越好。

4 实验与分析

为验证文中算法的性能,以快速衰落失真为例,选取 LIVE 图像数据库里 FF 失真的 coinsinfountain 5 幅图像。将每一幅失真图像以 20 cd/m^2 为间隔,以 -100 cd/m^2 到 $+100 \text{ cd/m}^2$ 为范围,去除亮度未改变的原失真图像,调整其亮度,获得 50 幅失真图像。

这里将上述的 50 幅失真图像进行主观评价,挑选 10 名(5 男,5 女)观察者在 EIZO Color Edge CG224 显示器上评价图像,色温为 6500 K,亮度 80 cd/m^2 。环境照明采用 5200 K,显色性指数为 96 的光源照明,照度约为 1500 lx ^[15],同时在显示器上向观察者展示每一幅原失真图像和亮度调整后的失真图像,采用主观平均分数(MOS)^[16]评价的方法,在绝对评价尺度下采用质量尺度,即丝毫看不出图像质量变坏、能看出图像质量变化但不妨碍观看、清楚看出图像质量变坏但仅对观看稍有妨碍、对观看有妨碍、严重妨碍观看,其对应的质量等级分别为非常好、好、一般、差、非常差,分别用 1

—5 分表示,1 分代表非常差,2 分代表差,3 分代表一般,4 分代表好,5 分代表非常好,由此进行质量评分。

为了验证文中方法与主观评价得分的一致性,实验采用文献[17]中的非线性回归方程分别对文中预测分值与主观 MOS 分值进行非线性拟合,以及 BRISQUE 算法预测分值与主观 MOS 分值进行非线性拟合。选取平均绝对误差(MAE)、均方根值(RMS)、斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)和皮尔逊相关系数(PCC)4 个指标作为预测误差、单调性和一致性的反映。拟合后的预测结果见图 4,各指标结果见表 3。

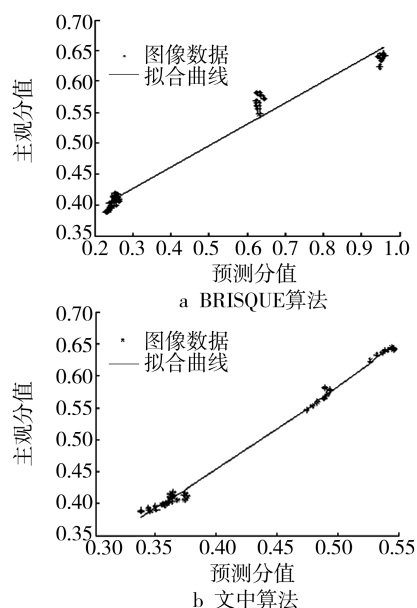


图 4 预测结果

Fig.4 Forecasting results

由图 4 可以看出,BRISQUE 算法的预测结果与主观 MOS 值的聚合度不高,相比之下,文中算法的预测结果与主观 MOS 值的聚合度有所优化,较为接近曲线拟合,说明文中算法与人眼视觉一致性较高。

表 3 预测结果与 MOS 的相关系数

Tab.3 Correlation coefficients of forecasting results and MOS

不同算法	MAE	RMS	SROCC	PCC
BRISQUE 算法	0.0253	0.0293	0.9552	0.9879
文中算法	0.0091	0.0106	0.9741	0.9982

非线性回归后,由于 MAE 和 RMS 的值越小,失真图像的质量越好,SROCC 和 PCC 的值越大,预测结果与主观评价的单调性和一致性越好。从表

3 可以看出, 文中方法相比 BRISQUE 算法与主观 MOS 值相关系数指标中的 MAE 减小了 64%, RMS 减小了 63.8%, SROCC 值提高了 1.98%, PCC 值提高了 1.04%。文中算法在充分考虑了人眼的亮度阈值效应后相比 BRISQUE 算法在整体性能上有了很大的提高, 表明文中算法在评价图像质量时与主观评价具有更好的一致性。

5 结语

这里考虑了人眼的亮度阈值效应, 结合 BRISQUE 算法, 提出了一种新的无参考图像质量评价方法。该方法分别对图像入射分量和反射分量进行质量评价, 既有 BRISQUE 算法的高效优点, 又考虑了亮度图像的背景亮度, 更符合人眼视觉感知, 实验结果表明, 文中方法在与主观评价相关性分析上表现出较好的性能, 在实际失真图像质量评价过程中与主观视觉一致性上能够发挥一定的作用。

参考文献:

- [1] 王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学报, 2015, 41(6): 1062—1074.
WANG Zhi-ming. Review of No-reference Image Quality Assessment[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1062—1074.
- [2] 桑庆兵, 苏媛媛, 李朝锋, 等. 基于梯度结构相似度的无参考模糊图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 573—577.
SANG Qing-bing, SU Yuan-yuan, LI Chao-feng, et al. No-reference Blur Image Quality Assessment Based on Gradient Similarity[J]. Journal of Optoelectronics, Laser, 2013, 24(3): 573—577.
- [3] MOORTHY A K, BOVIK A C. A Two-Step Framework for Constructing Blind Image Quality Indices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 513—516.
- [4] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12): 4695—4708.
- [5] 贾惠珍, 孙权森, 王同罕. 结合感知特征和自然场景统计的无参考图像质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(6): 859—867.
JIA Hui-zhen, SUN Quan-sen, WANG Tong-han. Blind Image Quality Assessment Based on Perceptual Features and Natural Scene Statistics[J]. Journal of Image And Graphics, 2014, 19(6): 859—867.
- [6] SIMONCELLI E P, FREEMAN W T, ADELSON E H, et al. Shiftable Multiscale Transforms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 587—607.
- [7] SHARIFI K, LEON-GARCIA A. Estimation of Shape Parameter for Generalized Gaussian Distributions in Subband Decompositions of Video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1995, 5(1): 52—56.
- [8] WAINWRIGHT M J, SIMONCELLI E P. Scale Mixtures of Gaussians and the Statistics of Natural Images[J]. Gayana, 2004, 68(2): 609—610.
- [9] SAAD M A, BOVIK A C, CHARRIER C. A DCT Statistics-Based Blind Image Quality Index[J]. Signal Processing Letters, 2010, 17(6): 583—586.
- [10] 张淑芳, 张聪, 张涛, 等. 通用型无参考图像质量评价算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(19): 13—23.
ZHANG Shu-fang, ZHANG Cong, ZHANG Tao, et al. Review on Universal No-Reference Image Quality Assessment Algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(19): 13—23.
- [11] 王湘晖, 曾明. 基于视觉感知的图像增强质量客观评价算法[J]. 光电子·激光, 2008, 19(2): 258—262.
WANG Xiang-hui, ZENG Ming. A New Metric for Objectively Assessing the Quality of Enhanced Images Based on Human Visual Perception[J]. Journal of Optoelectronics, Laser, 2008, 19(2): 258—262.
- [12] 曾明, 张建勋, 王湘晖, 等. 基于视觉特性和复杂度加权处理的图像增强新算法[J]. 光电子·激光, 2005, 16(3): 363—367.
ZENG Ming, ZHANG Jian-xun, WANG Xiang-hui, et al. A Novel Algorithm for Image Enhancement Based on Human Visual Properties and Local Spatial Activity Weighted Processing[J]. Journal of Optoelectronics, Laser, 2005, 16(3): 363—367.
- [13] 刘家朋, 赵宇明, 胡福乔. 基于单尺度 Retinex 算法的非线性图像增强算法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(5): 685—688.
LIU Jia-peng, ZHAO Yu-ming, HU Fu-qiao. Nonlinear Image Enhancement Algorithm Based on Single Scale Retinex Algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(5): 685—688.
- [14] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, et al. Live Image Quality Assessment Database Release 2[EB/OL]. (2007-06-03)[2015-10-25]. <http://live.ece.utexas.edu/>.
- [15] 徐敏, 郑元林. 基于 SSIM 的印刷图像质量评价研究[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 26—28.
XU Min, ZHENG Yuan-lin. Research of Printing Image Quality Based on SSIM[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(4): 26—28.
- [16] 刘勇. 基于人类视觉系统的主客观统一的图像质量评价模型[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
LIU Yong. A Unified Objective and Subjective Image Quality Evaluation Model Based on the Human Visual System[D]. Jilin: Jilin University, 2011.
- [17] 楼斌, 沈海斌, 赵武锋, 等. 基于失真模型的结构相似度图像质量评价[J]. 浙江大学学报, 2009, 43(5): 864—868.
LOU Bin, SHEN Hai-bin, ZHAO Wu-feng, et al. Structural Similarity Image Quality Assessment Based on Distortion Model[J]. Journal of Zhejiang University, 2009, 43(5): 864—868.