

doi: 10.3788/gzxb20134201.0110

# 基于边缘的 SSIM 图像质量客观评价方法

田浩南, 李素梅

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要:** 在图像处理领域中, 准确判断所处理图像的质量是一项关键技术. 本文在基于结构相似度的图像质量评价方法的基础上, 考虑了边缘信息对人眼感知结构的重要性, 提出了基于边缘结构相似度的图像质量评价方法. 实验中, 对实验图像进行客观指标的提取与计算, 最后统计分析实验数据. 结果表明, 该方法对图像质量的评价结果优于基于结构相似度的图像质量评价方法, 能够正确反映图像质量且更加符合人眼的主观感受.

**关键词:** 图像处理; 质量评价; 边缘; 结构相似度

**中图分类号:** TP391.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2013)01-0110-5

## Objective Evaluation Method for Image Quality Based on Edge Structure Similarity

TIAN Hao-nan, LI Su-mei

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In the image-processing area, accurate evaluation of the processed quality is a key technique. In this paper, a new method using image edge combined with structural similarity, which takes the importance of the edge information to eye perception structure into account, is presented. The objective indexes of experimental images are extracted and calculated, and the experimental data are statistically analysed. The results show that, the new method is better than the structural similarity image quality assessment method and is better fit with the subjective feeling of human visual perception.

**Key words:** Image processing; Image quality assessment; Edge; Structural similarity

## 0 引言

视觉是人类获取信息最有效的途径, 通过视觉所感知的图像信息是人类感知事物和机器模式识别的重要信息源, 其质量对所获取信息的准确性起着决定性作用. 因此, 在图像的采集、编码压缩、传输及显示等领域建立有效的图像质量评价机制具有长远意义.

近些年来, 随着图像处理技术的飞速发展, 该领域的研究已吸引了研究人员的广泛关注. 同时, 图像质量评价算法层出不穷<sup>[1]</sup>, 典型的平面图像质量客观评价方法有均方差 (Mean Squared Error, MSE)、峰值信噪比 (Peak Signal-Noise Ratio,

PSNR) 等方法, 这些方法从统计意义上对图像进行分析, 没有考虑到像素之间的相关性, 因此, 其评价结果与人的主观感知不能取得完全一致. 改进的平面图像质量客观评价方法有: 基于人眼视觉特性的评价方法<sup>[2-6]</sup> 和基于结构相似度 (Structural Similarity, SSIM) 的评价方法<sup>[7-13]</sup>. 文献[2]在研究人眼视觉模型和人眼视觉特性的基础上, 提出了一种自顶向下的无参考图像客观质量评价方法. 文献[3]根据人眼视觉系统 (Human Visual System, HVS) 提出一种损伤模型来评价视频中的块效应. 文献[4]根据人眼视觉特性提出了一种基于方向差异性的评价模型. 文献[5]提出了一种基于 DWT 变换和人眼对比度敏感度特性的评价方法. 文献[6]提

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 61002028)、国家重点基金 (No. 60932007)、天津市重点基金 (No. 09JCZDJC17000) 和天津市基金 (No. 11ZCKFJX02000) 资助

**第一作者:** 田浩南 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为图像质量评价和图像处理. Email: tju. ee. tianhaonan@gmail.com

**导师 (通讯作者):** 李素梅 (1975-), 女, 副教授, 博士后, 主要研究方向为立体图像处理、神经网络和机器学习等. Email: tjnklsn@163.com

**收稿日期:** 2012-08-07; **录用日期:** 2012-09-11

出了一种基于小波变换和对比度敏感度特性的评价方法. 文献[7]提出了一种基于结构相似度的图像融合质量评价方法. 文献[8-11]主要考虑了亮度、对比度、结构相似度三个指标, 最后将三个指标综合作为图像质量的客观评价. 文献[12]提出了一种基于 HVS 的 SSIM 的图像质量评价方法. 文献[13]从新的角度将 SSIM 理解为一种更好的局部误差度量方式, 提出一种基于结构信息提取的图像质量评价方法. Z. Wang 等人提出的基于 SSIM 的图像质量评价方法忽视了图像中携带着重要信息的边缘特征, SSIM 算法在评价噪音和模糊降质图像时暴露了一些问题.

本文在 SSIM 评价方法的基础上, 考虑了边缘信息对人眼主观感受的影响, 提出了基于边缘的 SSIM 图像质量评价方法. 实验结果表明, 该方法的评价结果优于 SSIM 评价方法, 能够反映图像质量且更加符合人眼的主观感受.

## 1 基于边缘的 SSIM 图像质量评价方法

### 1.1 基于 SSIM 的图像质量评价方法

SSIM 质量评价算法<sup>[8]</sup>框图如图 1 所示. 假设  $X$  和  $Y$  是两个非负的图像信号,  $X$  是参考图像,  $Y$  是降质图像. 该评价系统将结构相似性度量划分为三个部分的比较: 亮度函数  $l(x, y)$ 、对比度函数  $c(x, y)$ 、结构比较函数  $s(x, y)$ .

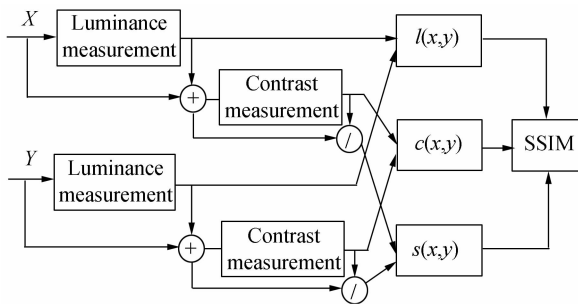


图 1 SSIM 评价算法框图

Fig. 1 Flow chart of SSIM objective evaluation

### 1.2 基于小波变换的图像边缘提取

基于小波变换的边缘检测原理就是用平滑函数, 在不同的尺度下平滑所检测的信号, 根据一次或二次微分找出它的突变点. 小波变换模的局部极大值点能够刻画信号突变点的位置<sup>[14]</sup>, 即图像边缘的位置. 因此可以通过小波变换模的局部极大值检测方法检测图像的边缘.

#### 1.2.1 算法原理

设  $\theta(x, y)$  是一适当光滑的二元函数, 满足如式 (1) 的条件为

$$\iint_{RR} \theta(x, y) dx dy = 1 \quad \lim_{x^2+y^2 \rightarrow \infty} \theta(x, y) \rightarrow 0 \quad (1)$$

引入记号

$$\theta_s(x, y) = \frac{1}{s^2} \theta\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right)$$

式中  $s$  为尺度. 则二维子波在尺度  $s$  下定义为

$$\phi_s^x(x, y) = \frac{\partial \theta_s(x, y)}{\partial x} = \frac{1}{s^2} \phi^x\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right) \quad (2)$$

$$\phi_s^y(x, y) = \frac{\partial \theta_s(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{s^2} \phi^y\left(\frac{x}{s}, \frac{y}{s}\right)$$

图像  $f(x, y)$  经平滑函数  $\theta_s(x, y)$  在尺度  $s=2^j$  作用下的二维二进小波变换有两个分量, 即

$$\begin{bmatrix} \omega_{2^j}^x f(x, y) \\ \omega_{2^j}^y f(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f * \theta_{2^j})(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f * \theta_{2^j})(x, y) \end{bmatrix} = 2^j \vec{\nabla} (f * \theta_{2^j})(x, y) \quad (3)$$

式中  $\omega_{2^j}^x f(x, y)$ ,  $\omega_{2^j}^y f(x, y)$  分别为  $f * \theta_{2^j}(x, y)$  沿水平方向及垂直方向的梯度矢量. 向量  $\begin{bmatrix} \omega_{2^j}^x f \\ \omega_{2^j}^y f \end{bmatrix}$  的模取局部极大值的点对应  $f * \theta_{2^j}(x, y)$  相应位置的突变点, 梯度  $\vec{\nabla} (f * \theta_{2^j})(x, y)$  对应于模极大值点的方向. 模值和梯度方向可以分别表示为

$$\begin{cases} \text{模值} \\ M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{|\omega_{2^j}^x f(x, y)|^2 + |\omega_{2^j}^y f(x, y)|^2} \\ \text{梯度方向} \\ A_{2^j} f(x, y) = \arctan \left[ \frac{\omega_{2^j}^y f(x, y)}{\omega_{2^j}^x f(x, y)} \right] \end{cases} \quad (4)$$

#### 1.2.2 小波基的选取

在选择小波函数时, 小波函数不是唯一的, 因此合理地选择小波函数相当重要. B 样条函数可以构造出具有任意阶正则性的小波函数, 并且具有全正性、紧支撑性、可递推性, 并满足光滑函数条件. 与其它样条相比, B 样条是同阶样条函数空间中一组具有最小支撑基底的函数. Mallat 将三次 B 样条函数作为平滑函数构造出一类小波函数, 这类小波边缘检测算子在边缘检测综合性能指标上是较佳的<sup>[15]</sup>. 因此, 本文以三次 B 样条函数为小波基函数, 采用小波变换模的局部极大值检测方法得到原始图像和降质图像的边缘图像, 从而给出边缘结构失真度这一指标.

### 1.3 基于边缘的 SSIM 图像质量评价方法

图像边缘是图像中最基本的特征, 是分析理解图像的根本, 边缘检测<sup>[16]</sup>是数字图像分析处理的前提, 图像边缘的好坏对人眼的主观感受都有很大的影响, 图像边缘信息的改变意味着图像基本内容或结构的改变. 同时, 人眼视觉的掩盖效应使人眼对边缘失真很敏感. 因此, 图像的边缘在人眼对图像信息的理解中有重要的作用, 是评价图像质量的重要因

素. 本文将边缘失真度与 SSIM 相结合, 形成一种优于 SSIM 的评价指标 E-SSIM(Edge-SSIM). 具体的算法结构如图 2.

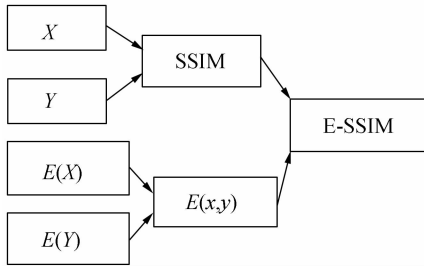


图 2 E-SSIM 评价算法框图

Fig. 2 Flow chart of E-SSIM evaluation

设  $X$  为原始图像,  $Y$  为降质失真图像,  $E(X)$  和  $E(Y)$  分别为原始图像和降质图像的边缘图像. 与 SSIM 评价算法相比, 不同点在于除了提取亮度、对比度、结构失真度, 还提取了边缘失真度, 原始图像和失真图像的边缘通过小波变换模极大值算法提取, 该方法具有克服一般边缘提取算法所带来的噪音敏感问题从而使误判率降低的优点. 将亮度、对比度、结构失真度和边缘失真度四个比较函数综合在一起, 便得到图像质量评价的综合指标 E-SSIM.

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \quad (5)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \quad (6)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3} \quad (7)$$

$$e(x, y) = \frac{\theta_{xy} + c_4}{\theta_x\theta_y + c_4} \quad (8)$$

$$E-SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma [e(x, y)]^\kappa \quad (9)$$

式中,  $l(x, y)$  为亮度比较函数,  $c(x, y)$  为对比度比较函数,  $s(x, y)$  为结构比较函数,  $e(x, y)$  为边缘比较函数.  $\mu_x$  和  $\mu_y$  表示图像  $X, Y$  的灰度均值;  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  表示图像  $X, Y$  的灰度方差;  $\sigma_{xy}$  表示图像  $X, Y$  的灰度协方差;  $\theta_x$  和  $\theta_y$  表示图像  $X, Y$  的边缘图像的灰度方差.  $\alpha, \beta, \gamma, \kappa > 0$  四个参量用于调整亮度、对比度、结构失真度、边缘失真度这四个分量的相对重要性; 引入常量  $c_1, c_2, c_3, c_4$  是为了避免当分母十分接近零时出现的不稳定性. 当  $\alpha, \beta, \gamma, \kappa = 1, c_1, c_2, c_3, c_4 = 0$  时, 有

$$E-SSIM(x, y) = \frac{4\mu_x\mu_y\sigma_{xy}\theta_{xy}}{(\mu_x^2 + \mu_y^2)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)\theta_x\theta_y} \quad (10)$$

式(10)为本文所得到的图像质量评价的综合指标.

## 2 实验数据及结果分析

在采集、传输和存储过程中, 图像会因各种干扰而降质, 本文针对实际应用中常见的噪音类型(高斯噪音、椒盐噪音)和模糊类型(高斯模糊、运动模糊)进行实验, 以验证指标性能的好坏. 实验数据为  $256 \times 256$  的 Lena、Cameraman、Pears 三幅图像, 通过 Matlab 和 Photoshop 对三幅图进行不同程度的降质处理, 共得到 165 幅图像进行仿真实验. 原始图像如图 3. 实验结果以 Lena 图为例, 如图 4 和图 5 给出了 Lena 图像采用三种方法(PSNR, SSIM 及本文方法 E-SSIM)所得实验结果.

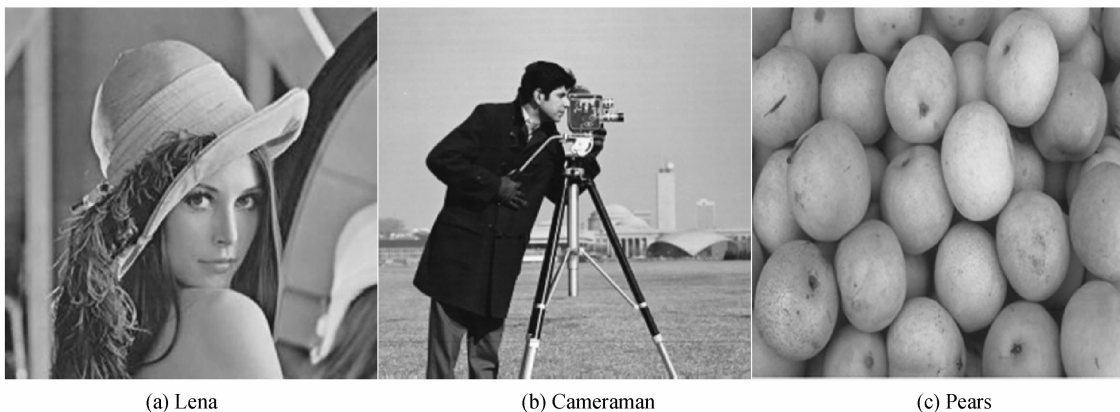


图 3 原始图像

Fig. 3 The original images

由算法可知, 当 PSNR、SSIM、E-SSIM 的值越大, 说明图像质量越好, 反之, 说明图像的质量越差. 图 4 列出了三种评价方法在不同降质方法及不同降质程度下的实验结果. 从图 4 可以看出: 当高斯噪音和椒盐噪音的噪音等级由低向高递增时, 三种算法

体现出一致的趋势, 在同等噪音级别下, 本文算法的数值变化更显著, 对质降体现出更好的敏感性; 从图 4(c)和(d)可以看出: 在评价高斯模糊和运动模糊时, 高斯模糊半径由 0.5 增大到 11(SSIM 值由 0.961 1 下降到 0.488 5), 而本文算法评价由

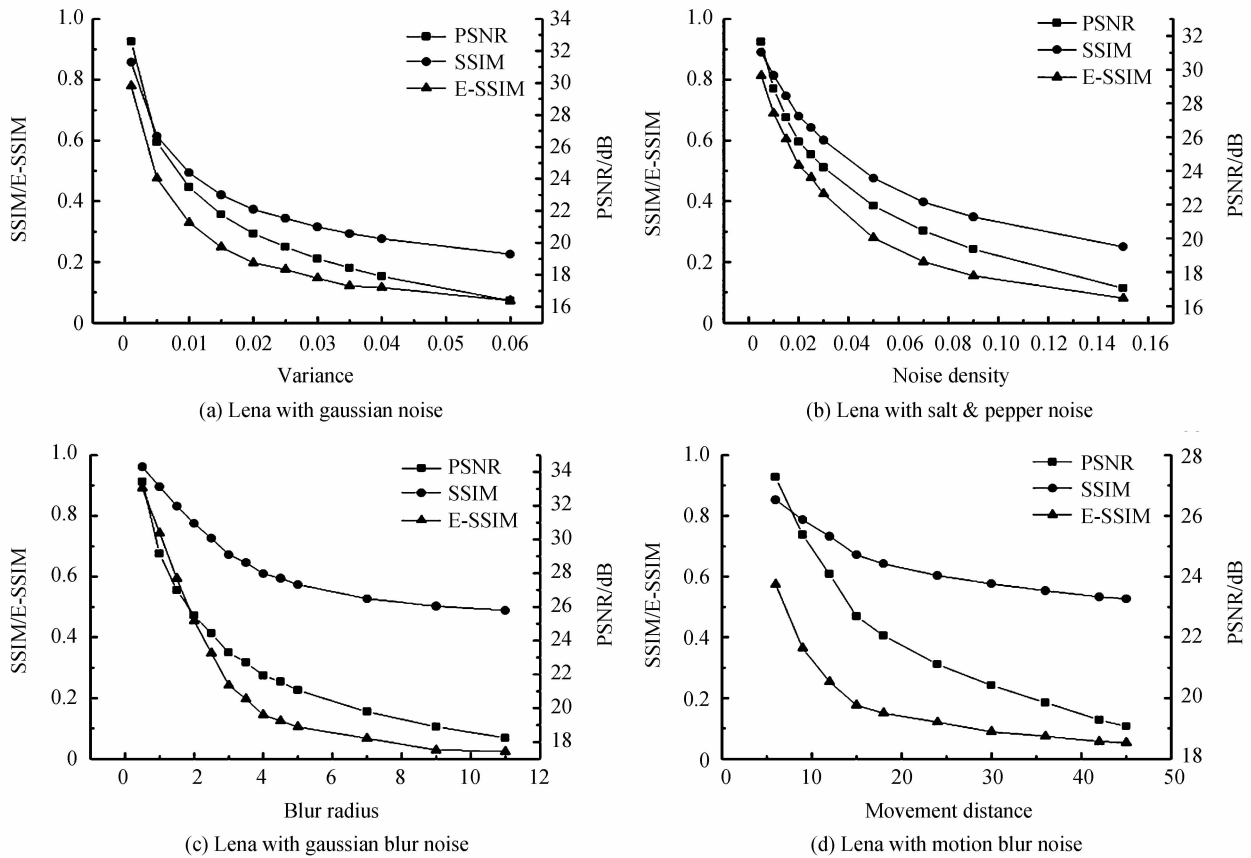


图 4 Lena 图像不同失真类型实验数据图

Fig. 4 Data figure of the Lena image with different distortion types

0.891 2 下降到 0.024 2); 运动模糊运动距离由 6 像素增大到 45 像素 (SSIM 值由 0.852 3 下降到 0.526 9), 而本文算法评价则由 0.573 7 下降到 0.053 3. 由此可以看出, SSIM 评价算法对高斯模糊和运动模糊降质评价不敏感, 本文算法体现出明显的优势.

由于图像的最终信宿是人, 而主观评价方法利用人直接评判图像的质量, 得到的结果更直接, 能较好地反映出图像的直观质量. 因此, 任何图像质量的客观评价方法能否与主观测试达到较高的一致性, 是评价该客观评价方法的重要依据. 如图 5 所示, 本文将针对具体图像及其数据做进一步的分析.

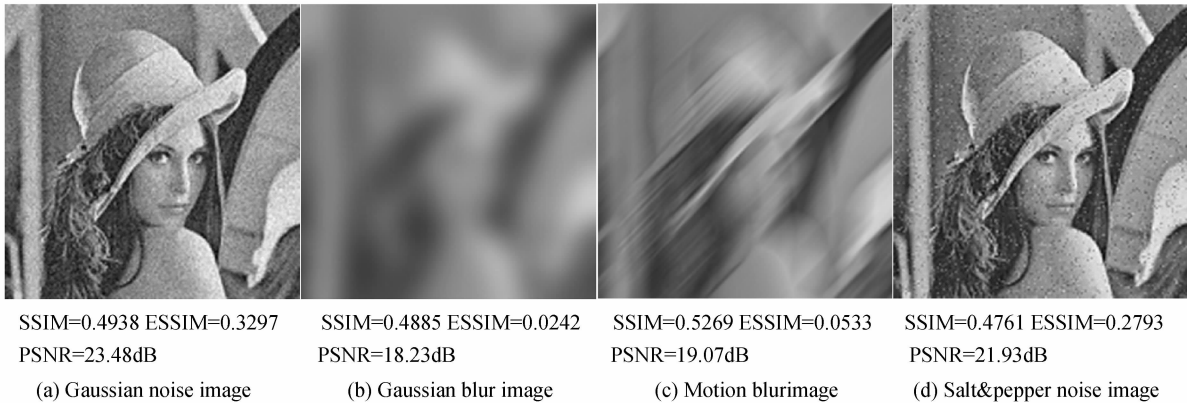


图 5 Lena 图像各种失真类型对比

Fig. 5 Contrast of the Lena image with different distortion types

图 5 分别列出了叠加四种噪音的 Lena 图像, 为了便于对比说明三种算法的性能差异, 故选取 SSIM 数值接近的四幅降质图像, 从图像的主观感受再结合三种算法评价 (评价越高, 代表图像质量越好) 就可以得出 E-SSIM、SSIM、PSNR 评价性

能的优劣. ESSIM 和 SSIM 的比较: 从 SSIM 值来看, 这 4 幅图像的质量相差不大, 但从图 5 可以看出这几幅图像的主观质量差距很明显, 例如图 (a) 和图 (b), 从 SSIM 数值来看这两幅图像的质量几乎一样, 但从图 5 可以明显地看出图 (a) 的质量要好于图

(b),而 E-SSIM 数值却很好地体现了这一点图(a)的 E-SSIM 值远大于图(b),由此可以得出 E-SSIM 比 SSIM 更加符合人眼的主观感受.这是由于 SSIM 算法中没有考虑边缘结构变化对人眼感受的影响,而且模糊效应对图像边缘的影响很大,因此 SSIM 算法对模糊图像的评价结果不能很好地体现人眼的主观感受.对于高斯噪声和椒盐噪声,SSIM 和 ESSIM 值变化的整体趋势是一致的,但 E-SSIM 对于图像质量的变化更加敏感;ESSIM 和 PSNR 的比较:结合图 4 和图 5 的四幅图像的 PSNR 值来看,PSNR 与 ESSIM 在总体趋势上趋于一致,但是对于图像质量优劣的区分不明显,四幅图视觉感受的明显变化无法在 PSNR 值上体现出来,例如图 5 中的(b)和(c),主观质量明显很差,E-SSIM 值分别为 0.024 2和 0.053 3,而 PSNR 值却高达 18 dB 和 19 dB,仅比图(d)低 2 dB(图(d)的 E-SSIM 值为 0.279 3),由此可以看出 PSNR 的评价值过高,随降质变化不明显,不能很好地体现人眼的真实感受,而 E-SSIM 能够较好地体现人眼的真实感受.总而言之,E-SSIM 在评价噪声和模糊质降图像都优于 SSIM 算法和 PSNR 算法,更加符合人眼的主观感受,而且算法简单易于操作实现,克服了主观评价的诸多缺点,可以较准确地给出符合人眼主观感受的评价.

### 3 结论

本文提出了基于边缘的 SSIM 的图像质量评价算法,该指标由亮度,对比度,结构和边缘四个因子决定,计算这四个因子的乘积便得到了图像质量的综合指标 E-SSIM.实验结果表明,该算法能够较为准确地评价图像,与人眼主观感受相一致,克服了 SSIM 评价模糊图像时评价结果与主观感受相矛盾的缺点,并且提高了 SSIM 评价噪声图像时的敏感度.

#### 参考文献

- [1] JIANG Gang-yi, HUANG Da-jiang, WANG Xu, *et al.* Overview on image quality assessment [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(1): 219-226.  
蒋刚毅,黄大江,王旭,等.图像质量评价方法研究进展[J].电子与信息学报,2010,**32**(1):220-226.
- [2] HU Xu-ming, ZHANG Deng-fu, NAN Dong, *et al.* Method of image visual quality evaluation based on human visual characteristics[J]. *Journal of Computer Applications*, 2012, **32**(7): 1882-1884.  
胡许明,张登福,南栋,等.基于人眼视觉特性的图像视觉质量评价方法[J].计算机应用,2012,**32**(7):1882-1884.
- [3] YU Z, WU H R, WINKLER S, *et al.* Vision-model-based impairment metric to evaluate blocking artifact in digital video [J]. *Proceeding of the IEEE*, 2002, **90**(1): 154-169.
- [4] NILL N B, BOUZAS B H. Objective image quality measure derived from digital image power spectra [J]. *IEEE Signal Processing Letter*, 2002, **9**(3): 388-392.
- [5] JIANG Ming, MA Zhao-feng, YANG Yi-xian, *et al.* Image quality evaluation method base on digital wavelet transform and vision weighted [J]. *Journal on Communications*, 2011, **32**(9): 129-136.  
蒋铭,马兆丰,杨义先,等.基于 DWT 和视觉加权图像质量评价方法研究[J].通信学报,2011,**32**(9):129-136.
- [6] MA Wen-bo, ZHAO Bao-jun, REN Hong-liang. A criterion of image quality assessment based on wavelet frequency band partition and CSF property [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(7): 687-69.  
马文波,赵保军,任洪亮.基于小波频带划分及 CSF 特性的图像质量评价方法[J].激光红外,2007,**37**(7):687-690.
- [7] DI Hong-wei, LIU Xian-feng. Image fusion quality assessment based on structural similarity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 766-771.  
狄红卫,刘显峰.基于结构相似度的图像融合质量评价[J].光子学报,2006,**35**(5):766-771.
- [8] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: From error measurement to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-612.
- [9] WANG Z, BOVIK A C, LIGANG L. Why is image quality assessment so difficult? [C]. Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Processing, 2002: 3313-3316.
- [10] WANG Z, BOVIK A C, SIMONCELLI E P. Structural approaches to image quality assessment [C]. Handbook of Image and Video Processing, BOVIK A C ed. Academic Press, 2005.
- [11] WANG Z, BOVIK A C, SIMONCELLI E P. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C]. 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2003.
- [12] WANG B, WANG Z, LIAO Y, *et al.* HVS-based structural similarity for image quality Assessment [C]. Proc. of 9th International Conference on Signal Processing, Beijing, pp. 1194-1197, December 2008: 1194-1197.
- [13] YE Sheng-nan, SU Kai-na, XIAO Chuang-bai, *et al.* Image quality assessment based on structural information extraction [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(5): 856-860.  
叶盛楠,苏开娜,肖创柏,等.基于结构信息提取的图像质量评价[J].电子学报,2008,**36**(5):856-860.
- [14] GAO Guo-rong, LIU Ran, YI Xu-ming. A revised image edge detection method based on wavelet [J]. *Journal of Wuhan University(Natural Science Edition)*, 2005, **15**(5): 615-619.  
高国荣,刘冉,羿旭明.一种改进的基于小波变换的图像边缘提取算法[J].武汉大学学报:理学版,2005,**15**(5):615-619.
- [15] LIANG Yan. A study on an image edge detector based on B-spline wavelet [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.  
梁艳.基于 B 样条小波变换的图像边缘检测技术研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [16] DUAN Rui-ling, LI Qing-xiang, LI Yu-he. Summary of image edge detection [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(3): 415-419.  
段瑞玲,李庆祥,李玉和.图像边缘检测方法研究综述[J].光学技术,2005,**31**(3):415-419.