

# 基于小波高频结构相似的无参考高斯图像质量评价

黄晓生<sup>1\*</sup>, 严浩<sup>1</sup>, 曹义亲<sup>2</sup>

(1. 华东交通大学 信息工程学院, 南昌 330013; 2. 华东交通大学 软件学院, 南昌 330013)

(\* 通信作者电子邮箱 271541580@qq.com)

**摘要:**针对传统无参考图像质量评价方法计算复杂、难以应用的问题,提出一种简单、直接的小波高频结构相似性的无参考高斯图像质量评价方法。该方法根据自然图像同尺度高频子带间结构相似度(SSIM)随着失真程度的增加而降低的性质,利用小波变换获取图像的同尺度不同方向的三个高频分量,通过分别计算图像高频子带间的峰值信噪比(PSNR)与结构相似度得出图像高频结构差异作为最终的图像客观评价指数。通过与三个公开图像数据库实验验证可知,提出的方法与主观评价具有较好的一致性,并且算法结合了物理意义明确的峰值信噪比与结构相似度,比传统方法算法运行更为简单快捷,评价一幅图像只需0.2s左右,具有良好的实用性。

**关键词:**无参考图像质量评价;小波变换;峰值信噪比;结构相似度;高斯失真图像

**中图分类号:** TN911.73 **文献标志码:** A

## No-reference Gaussian image quality assessment based on wavelet high frequency structural similarity

HUANG Xiaosheng<sup>1\*</sup>, YAN Hao<sup>1</sup>, CAO Yiqin<sup>2</sup>

(1. School of Information Engineering, East China Jiao Tong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. School of Software, East China Jiao Tong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the high computation and application difficulty in traditional no-reference image assessment methods, a simple and direct no-reference Gaussian image quality assessment algorithm based on wavelet high frequency Structural SIMilarity (SSIM) was proposed. The proposed algorithm took into account the similarity among the natural images' high frequency in the same scale which would be reduced with the distortion deepening. Three different directional sub-bands of high frequencies were obtained by the wavelet transform firstly, and then the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and SSIM were combined for calculating the differences of sub-bands respectively as the last objective assessment index. The simulation results show that the proposed method has good consistence with the subjective assessment on three common image databases, in addition, the algorithm only needs about 0.2 s for evaluating an image, which has good practicality.

**Key words:** no-reference image quality assessment; wavelet transform; Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR); Structural SIMilarity (SSIM); Gaussian distorted image

## 0 引言

随着多媒体技术的快速发展,图像已经成为人们在日常生活当中获取信息的主要来源。然而在图像处理领域中如图像的采集、压缩、传输、重构等处理方法会对图像造成不可避免的失真,其中高斯失真图像是最为常见的失真类型之一,它主要包括高斯噪声图像和高斯模糊图像。例如数码相机在拍摄时,由于手持设备不稳以及聚焦不准等都会引起图像的模糊失真;而在交通视频监控系统中,由于传输带宽的限制以及传输元件自身的瑕疵则会产生噪声图像,因此在成像系统中如何自动地、即时有效地对图像质量进行评价,自动地摒弃失真严重的图像,对于节省设备存储空间以及人们对图像内容的理解,都具有重要意义。

一般地,图像质量评价分为主观评价方法和客观评价方

法。由于人类是图像的最终接受者,所以主观评价最为准确,但主观评价耗费人力物力,且不能嵌入实时系统,因此研究即时有效计算方便并能嵌入实时系统的客观图像质量评价尤为重要。根据是否有原始参考图像,客观评价方法又可以分为3类:全参考图像质量评价、部分参考型图像质量评价和无参考图像质量评价。其中全参考和部分参考型分别需要原始参考图像和参考图像的部分特征信息,而在图像处理领域中,大多数情况下无法获取原始参考图像,因此无需原始图像的无参考图像质量评价最具有实用价值,是客观质量评价方法中的研究热点。

近年来,无参考图像质量评价算法的研究较为活跃,其中针对模糊失真类型比较多,如: Ferzli 等<sup>[1]</sup>使用恰可觉察模糊的概念对模糊图像进行评价; Hassen 等<sup>[2]</sup>利用局部相位一致的方法对模糊图像进行评价; 谢小甫等<sup>[3]</sup>通过将模糊图像经

**收稿日期:** 2014-04-16; **修回日期:** 2014-05-22。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61365008); 江西省科技支撑计划项目(20123BBE50093); 江西省教育厅科技项目(GJJ12306)。

**作者简介:** 黄晓生(1972-),男,江西于都人,副教授,博士,主要研究方向:图像处理、机器视觉; 严浩(1991-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向:图形图像处理; 曹义亲(1964-),男,江西都昌人,教授,主要研究方向:图像处理、模式识别。

低通滤波器构造近似参考图像结合结构相似度 (Structural SIMilarity, SSIM) 进行评价; Chen 等<sup>[4]</sup> 采用多尺度梯度的方法对模糊图像进行评价; 桑庆兵等<sup>[5]</sup> 根据图像相位一致性原理, 通过获取相位一致图像的信息熵、能量、对比度等五个特征, 结合支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 训练建立评价模型; Ciancio 等<sup>[6]</sup> 利用多种空域图像特征, 采用神经网络模型对模糊图像进行评价。而针对噪声失真图像, Li<sup>[7]</sup> 认为, 噪点会破坏图像的局部平滑度, 通过对一个像素点与其周围八个像素点的信息比较判断其是否为噪点, 作为评价依据。肖文<sup>[8]</sup> 提出一种快速的高斯噪声估计方法, 结合基于分块算法和基于滤波算法的特点, 首先对图像进行预滤波, 去除图像内容的影响; 然后对图像分块, 根据局部块的方差确定原始噪声的方差。

以上提出方法大多数都是从图像空域出发, 结合高斯失真造成的图像质量损失对人眼视觉感受上的影响, 建立客观评价算法, 例如文献[1-4], 这些方法忽视了高斯失真对图像频域信息的影响, 建立的评价方法均需要结合某种人类视觉特性, 算法计算量大; 而文献[5-6] 结合机器学习的方法, 这类方法好处在于降低对先验经验的依赖, 通过训练学习建立评价算法, 当然明显的缺陷是训练增加了时间消耗。本文从高斯失真图像的频域角度考虑, 根据自然无失真图像经小波变换后高频子带结构具有相似性、子带间差异较小, 而高斯失真图像高频结构差异较大的性质, 分别结合峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) 与 SSIM 计算失真图像在小波变换下同尺度高频子带之间结构差异, 作为客观测评估, 提出的无参考评价方法计算简便、无需训练, 而且结合了理论成熟的 PSNR 与 SSIM 的评价方法, 通过与三个公开的图像数据库进行比较, 验证了评价结果的准确性。

## 1 图像的小波高频结构相似性

按照图像的数据来源和采集方法可将图像分为自然图像和人工图像。自然图像是指通过高清晰度采像设备获取的客观世界的图形化表述, 如室外风景照、遥感图像等; 而人工图像则是利用人为手段, 经过主观意念得到的图像, 如绘画作品、计算机绘制的图像等。自然图像与人工图像之间存在很大差异, 例如针对  $1024 \times 1024$  大小的 24 位彩色图像而言, 可以人工地产生所有  $2^{25\ 165\ 824}$  种图像, 但自然图像却不同, 它是对外在客观世界的真实反映, 由于自然界万事万物所呈现的形态都是经过上亿年自然选择的结果, 因此自然图像具有潜在的统计规律性质。

自然无失真图像具有较高的锐利度、清晰的纹理边缘等特性, 经小波变换后其同尺度不同方向的子带小波系数具有较强的相关性, 尤其是在图像的边缘结构信息中, 相关性更为明显, 而经历高斯失真产生的模糊和噪声主要是随机分布在图像高频信息中, 导致高斯失真图像小波高频子带间只具有弱相关性或者无相关性<sup>[9]</sup>, 这种相关性在图像空间上则反映了图像高频子带间的边缘结构具有相似性, 自然图像的小波金字塔也显示了各尺度各子带在空间上具有结构相似性<sup>[10]</sup>。如图 1(b) ~ (h) 所示分别为 “parrots” 原始无失真图像与高斯失真图像的三层小波分解图, 并给出了所有图像一层小波分解后三个高频分量之间的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 之和  $\sum MSE_h$ , 从图 1(b) 可以看出原始图像同尺度不

同方向的高频子带之间的边缘结构相似,  $\sum MSE_h$  最小, 而图 1(c) ~ (e) 高斯模糊失真图像以及图 1(f) ~ (h) 高斯白噪声失真图像的同尺度不同方向高频子带间的边缘结构差异较大, 且  $\sum MSE_h$  随着高斯函数标准差  $\sigma$  的增加 (失真程度的加深) 而变大。这是由于模糊失真图像丢失了高频细节, 使图像变得平滑, 图像的边缘纹理变宽, 而噪声失真图像则相反, 主要是噪点增加了图像的无意义高频信息, 这两种失真都影响了图像的高频细节信息, 使得自然图像小波子带的相关性降低, 从而破坏了自然图像高频结构相似性 (High Frequency Structural Similarity, HFSS), 且差异的大小在一定程度上反映了图像失真的程度, 因此通过度量高频子带间的差异可作为图像的客观质量评价价值。

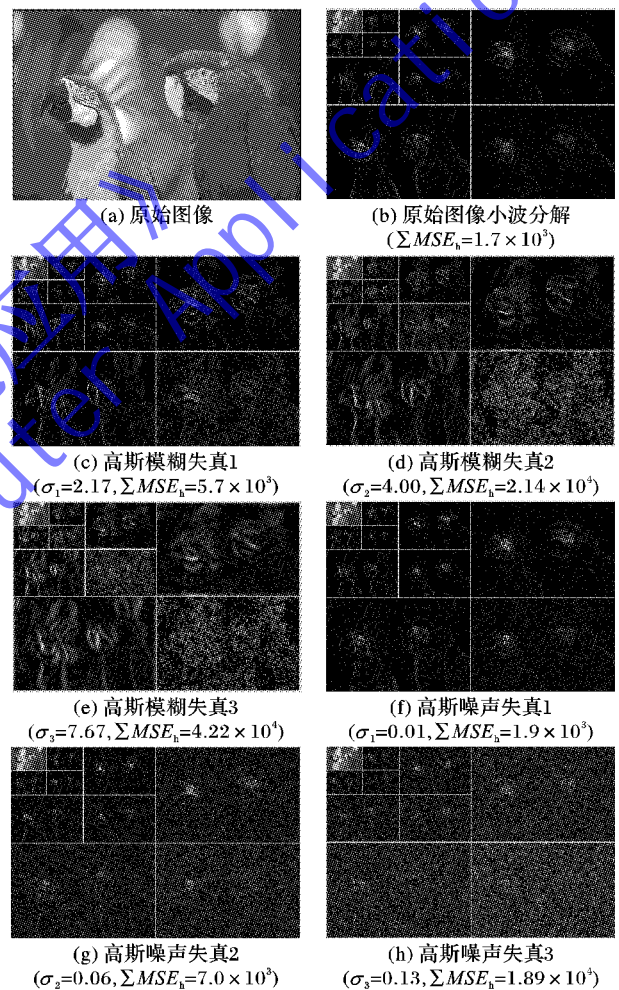


图1 原始图像与高斯失真图像的小波分解

## 2 基于高频结构相似性的图像质量评价方法

失真图像主要改变了图像的高频信息, 低频信息变化相对较少。将原始图像与失真图像分别定义为  $I_o$ 、 $I_d$ , 经小波变换后可得出图像的低频信息与高频信息,  $I_o = I_o^L + I_o^H$ 、 $I_d = I_d^L + I_d^H$ , 其中:  $I^L$  表示图像低频信息 (Low frequency),  $I^H$  表示图像高频信息 (High frequency)。假设图像经历失真后低频信息没有变化或变化很小, 则认为原始图像低频信息  $I_o^L$  与失真图像  $I_d^L$  相似, 质量损失主要在高频细节上, 为此通过计算参考图像与失真图像同尺度同方向子带之间的 PSNR ( $I_o^H$ ,

$I_d^H$ )<sup>[11-12]</sup> 或者  $SSIM(I_o^H, I_d^H)$ <sup>[13-14]</sup> 作为客观评价在全参考图像质量评价中取得了一定成果。然而在无参考图像评价不能获取参考图像的高频信息,无法计算不同方向高频信息的变化,但根据第 1 章自然图像高频结构具有相似性质可知,自然图像在理想状态下同尺度不同方向子带具有相似边缘结构,而高斯失真图像随着失真程度加深高频子带差异加大,为此本文分别结合 PSNR 与 SSIM 计算同尺度下高频子带间的差异作为客观测评值来反映图像质量。

## 2.1 结合 HFSS 与 PSNR 的评价方法

在传统全参考图像质量评价算法中,最常见方法就是基于统计误差的 MSE 和 PSNR,由于这两种方法计算简单、物理意义明确,而且能较为准确地反映图像的质量,长期以来受到人们的青睐,其中 PSNR 算法当前普遍用来检验图像处理(如压缩、重构等)算法的性能优劣。在本质上 PSNR 与 MSE 是相同的,VQEG (Video Quality Experts Group)<sup>[15]</sup> 规定用 PSNR 和 MSE 这两个评价算法作为标准,定义如下:

$$\begin{cases} MSE(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - y_{ij})^2}{M * N} \\ PSNR(x, y) = 10 \lg \frac{L^2}{MSE(x, y)} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x, y$  分别代表原始图像与待评价图像, $M, N$  代表图像的宽和高, $L$  表示图像的灰度范围,对于 8 位的灰度图  $L$  为 255。基于高频结构相似性提出的无参考 HFSS-PSNR 评价算法步骤如下:

1) 将待测高斯失真图像经小波变换获取失真主要改变的高频部分  $I^H$ 。本文利用 Harr 小波变换获取图像的三个不同方向的高频分量,如图 2 所示,其中:  $LH$  为垂直 (Vertical) 分量  $I^v$ ,  $HL$  为水平 (Horizontal) 分量  $I^h$ ,  $HH$  为对角线 (Diagonal) 分量  $I^d$ 。

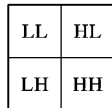


图 2 Harr 小波分解示意图

2) 分别计算三个高频之间的 PSNR。其中:  $PSNR(I^v, I^h)$ 、 $PSNR(I^v, I^d)$ 、 $PSNR(I^h, I^d)$  分别表示垂直分量与水平分量的 PSNR、垂直分量与对角线分量的 PSNR、水平分量与对角线的 PSNR。

3) 最后待测图像的客观质量测评值  $HFSS-PSNR = \sum_{i \neq j} PSNR(I^i, I^j)$ , 其中  $i, j \in \{v, h, d\}$ 。

## 2.2 结合 HFSS 与 SSIM 的评价方法

Zhou 等<sup>[16]</sup> 利用图像像素间的相关特性,认为人眼视觉的主要功能是提取场景中的结构信息,提出了一种基于结构相似度的图像质量评价方法,通过分别计算失真图像与参考图像之间的亮度因子、对比度因子与图像块结构信息之间的相似度,从而计算失真图像的质量。文献[16]中将失真图像与参考图像相同位置处的对应的图像块  $x, y$  作为两个输入信号,它们的亮度  $l(x, y)$ 、对比度  $c(x, y)$  以及结构  $s(x, y)$  相似度分别定义为:

$$\begin{cases} l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \\ c(x, y) = \frac{2\delta_x\delta_y + c_2}{\delta_x^2 + \delta_y^2 + c_2} \\ s(x, y) = \frac{\delta_{xy} + c_3}{\delta_x\delta_y + c_3} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mu_x, \mu_y$  分别为参考图像与失真图像的亮度均值; $\delta_x, \delta_y$  分别为参考图像与失真图像的亮度标准差; $\delta_{xy}$  为参考图像与失真图像的相关系数; $c_1, c_2$  和  $c_3$  为很小的正数,以避免分母为零。联合这三种相似性准则构成相似性客观测度为:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (3)$$

其中: $\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0$ 。基于 HFSS 提出的无参考 HFSS-SSIM 评价算法步骤如下:

1) 与 2.1 节相同,将高斯失真图像经单尺度 Harr 小波变换获取图像的三个不同高频细节分量图像灰度图:垂直分量  $I^v$ 、水平分量  $I^h$  以及对角线分量  $I^d$ 。

2) 分别计算三个高频之间的  $SSIM$ :  $SSIM(I^v, I^h)$ 、 $SSIM(I^v, I^d)$ 、 $SSIM(I^h, I^d)$  分别表示垂直分量与水平分量的  $SSIM$ 、垂直分量与对角线分量的  $SSIM$ 、水平分量与对角线的  $SSIM$ 。采用文献[16]中提供的结构相似度的一种特殊形式:

$$SSIM(I^i, I^j)_{i \neq j} = \frac{(2\mu_i\mu_j + c_1)(2\delta_i\delta_j + c_2)}{(\mu_i^2 + \mu_j^2 + c_1)(\delta_i^2 + \delta_j^2 + c_2)} \quad (4)$$

其中: $c_1 = (k_1 L)^2, c_2 = (k_2 L)^2$  为调节参数,防止式中分母为零; $k_1, k_2$  为很小的正数,实验中采用文献[16]取  $k_1 = 0.01, k_2 = 0.03; i, j \in \{v, h, d\}; L$  为图像亮度范围为 255。

3) 最后待测图像的客观质量测评值  $HFSS-SSIM = \sum_{i \neq j} SSIM(I^i, I^j)$ , 其中  $i, j \in \{v, h, d\}$ 。

## 3 实验结果与分析

为了分析比较本文提出的 HFSS-PSNR 与 HFSS-SSIM 无参考高斯图像质量评价方法的性能,与目前在图像质量评价领域中最常用的三个图像公开数据库:美国德州大学奥斯汀分校的 LIVE2 (<http://live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm>)、乌克兰航空航天大学 TID2013 (<http://www.ponomarenko.info/tid2013.htm>) 以及美国俄克拉荷马州立大学的 CSIQ (<http://vision.okstate.edu/?loc=csiq>) 进行实验,其中 LIVE2 数据库提供的模糊 (Gblur) 图像与白噪声 (White Noise, WN) 图像均为 174 幅,各自包含 29 幅原始图像以及 145 幅经历不同程度的失真图像,并给出了所有图像的差分主观评分 (Differential Mean Opinion Score, DMOS) 值,范围为 0~100,其值越大代表图像的质量越差;CSIQ 数据库提供的模糊图像与白噪声图像均为 150 幅,由 30 幅原始图像经历 5 种不同水平失真获得,给出的主观评分 DMOS 范围为 0~1;而 TID2013 数据库提供的模糊图像与白噪声图像均为 125 幅,由 25 幅原始图像经历 5 级不同程度的失真获得,并给出了所有图像的主观评分 (Mean Opinion Score, MOS),范围为 0~9,其值越大代表图像质量越好。将提出的 HFSS-PSNR 与 HFSS-SSIM 运用在三个公开数据库中进行实验,最终获得的图像客观测评与各自图像数据库提供的主观评价的



散点图如图3~4所示,从图中可以看出本文提出的两种算法的评价结果与主观评价都具有较好的一致性。

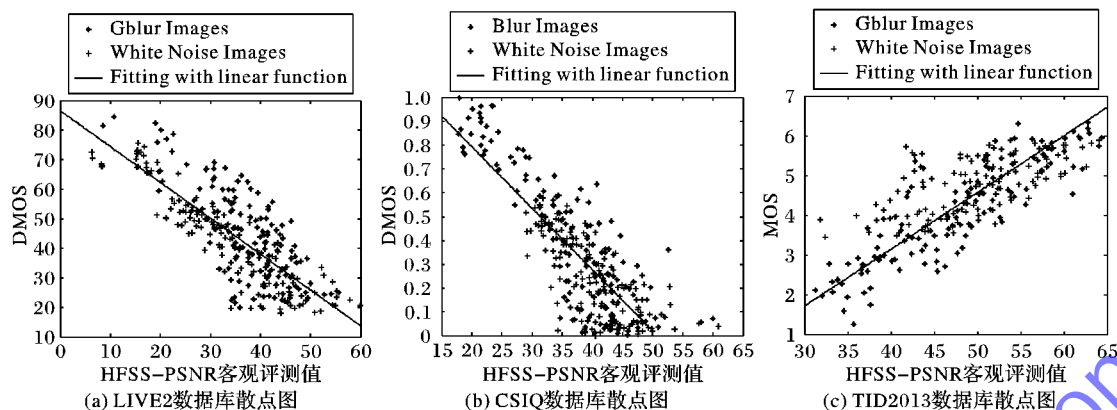


图3 HFSS-PSNR与高斯失真图像主观评价散点图

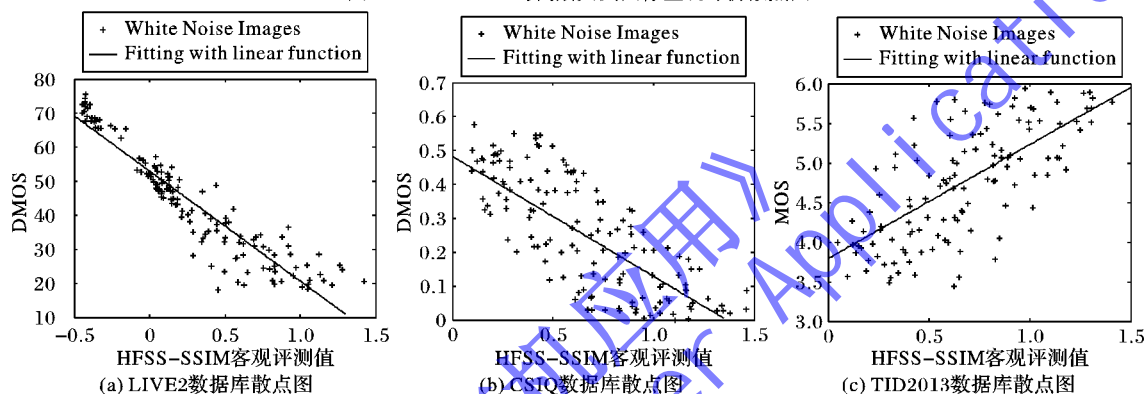


图4 HFSS-SSIM与高斯白噪声图像主观评价散点图

为进一步获得两种算法的客观评价与主观评分的一致性,将客观评价与数据库提供的主观评分运用以下的带五个参数的logistic函数进行非线性回归:

$$Quality(x) = \beta_1 \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \exp(\beta_2(x - \beta_3))} \right) + \beta_4 x + \beta_5 \quad (5)$$

采用两种评价准则计算本文提出的两种算法的性能:

1)非线性回归后的线性相关系数(Correlation

Coefficient, CC)反映客观预测评分相对主观评

分的准确性;2)预测评分与主观评分的

Spearman相关系数(Spearman Rank Order

Correlation Coefficient, SROCC)反映客观预测

评分与主观评分单调性的一致性,两者的值在

0~1,越大代表算法的性能越好。表1为两种算法的性能对

比,从表1中可知HFSS-SSIM算法在评价高斯白噪声图像要

优于HFSS-PSNR算法,但HFSS-SSIM算法不适合评价模糊图

像,这是由于Chen等<sup>[17]</sup>通过实验说明SSIM方法在评价模糊

较严重的图像时存在局限性,其性能不如PSNR;表2为本文

提出的两种算法与文献中部分算法的性能比较(其中HFSS-

PSNR为预测所有高斯失真图像的性能),本文提出的两种算

法在三个数据库的平均性能要优于文献[1],比文献[5]稍

差;但文献[5]的算法需要训练,增加了时间消耗,且不能评

价噪声失真图像,而本文建立的算法结合了相对成熟的

PSNR与SSIM算法,物理意义明确,计算简单快捷,在2.1GHz

的Core2 Duo CPU的Matlab运行1s大约可评价5~6幅分辨

率为768×512的图像,具有较好的推广性。

表1 HFSS-PSNR与HFSS-SSIM对不同图像评价性能对比

数据库	HFSS-PSNR				HFSS-SSIM	
	Gblur		WN		WN	
	SROCC	CC	SROCC	CC	SROCC	CC
LIVE2	0.6817	0.7595	0.9208	0.9133	0.9468	0.9457
CSIQ	0.7975	0.8540	0.7375	0.7181	0.7286	0.7371
TID2013	0.8089	0.8006	0.6083	0.5857	0.6684	0.6737

表2 各个算法的平均性能对比

数据库	HFSS-PSNR		HFSS-SSIM		文献[1]算法		文献[5]算法	
	SROCC	CC	SROCC	CC	SROCC	CC	SROCC	CC
LIVE2	0.7976	0.8151	0.9468	0.9457	0.7876	0.8189	0.9665	0.9611
CSIQ	0.7632	0.8227	0.7286	0.7371	0.7625	0.8572	0.8965	0.9215
TID2013	0.8250	0.7475	0.6684	0.6737	0.6667	0.6567	0.8959	0.8927

## 4 结语

自然无失真图像是经上亿年自然选择的结果,自然图像本身具有较高的锐利度、清晰的纹理边缘等特点,因此自然图像具体潜在的规律性,根据自然图像小波子带的相关性、同尺度不同方向高频子带间具有相似结构,而随着高斯失真程度的加深图像高频分量之间的差异逐渐变大的性质,分别结合理论成熟的PSNR算法与SSIM算法计算高斯失真图像经Harr小波变换下三个不同方向高频子带之间的结构差异,作为图像的客观评价指数,与三个公开数据库进行验证可知,表明了两种算法的评价结果均与主观评价具有较好的一致性而且无需训练计算简捷。但目前图像的失真类型有很多种,不

仅仅只是高斯模糊图像与高斯白噪声图像,常见的失真图像还包括 JPEG 压缩、JPEG2000 压缩图像以及同时含有多种失真类型的图像等,如何有效、准确地评价其他类型的失真图像的质量将是进一步研究方向。

#### 参考文献:

- [1] FERZLI R, KARAM L J. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of Just Noticeable Blur (JNB) [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(4): 717–728.
  - [2] HASSEN R, WANG Z, SALAMA M. No-reference image sharpness assessment based on local phase coherence measurement [C]// *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2010: 2434–2437.
  - [3] XIE X, ZHOU J, WU Q. No-reference quality index for image blur [J]. *Journal of Computer Applications*, 2010, 30(4): 921–924. (谢小甫, 周进, 吴钦章. 一种针对图像模糊的无参考质量评价指标 [J]. *计算机应用*, 2010, 30(4): 921–924.)
  - [4] CHEN M J, BOVIK A C. No-reference image blur assessment using multiscale gradient [J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2011(3): 1–11.
  - [5] SANG Q, LI C, WU X. No-reference blurred image quality assessment based on gray level co-occurrence matrix [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2013, 26(5): 492–497. (桑庆兵, 李朝锋, 吴小俊. 基于灰度共生矩阵的无参考模糊图像质量评价方法 [J]. *模式识别与人工智能*, 2013, 26(5): 492–497.)
  - [6] CIANCIO A, da COSTA A L N. No-reference blur assessment of digital pictures based on multifeature classifiers [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 64–75.
  - [7] LI X. Blind image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2002, 1: 449–452.
  - [8] XIAO W. Spatial no-reference image quality assessment [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2006. (肖文. 空域无参考的图像质量评价 [D]. 南昌: 江西财经大学, 2006.)
  - [9] HU X, ZHANG X, CHEN J. An image edge detecting algorithm fused with wavelet transform and mathematical morphology [J]. *Journal of China Railway Society*, 2011, 33(3): 45–48. (胡晓辉, 张晓颖, 陈俊莲. 一种融合小波变换和数字形态学的图像边缘检测算法 [J]. *铁道学报*, 2011, 33(3): 45–48.)
  - [10] GUO Y, YU M, ZHU Q. No reference image quality assessment based on sub-bands similarity and statistical analysis for JPEG2000 [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(6): 1496–1500. (郭迎春, 于明, Zhu Qiu-ming. 基于子带结构相似性分析的 JPEG2000 图像无参考质量评价 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(6): 1496–1500.)
  - [11] JIANG M, MA Z, XIN Y, *et al.* Image quality evaluation method base on digital wavelet transform and vision weighted [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(9): 130–136. (蒋铭, 马兆丰, 辛宇, 等. 基于 DWT 和视觉加权的图像质量评价方法研究 [J]. *通信学报*, 2011, 32(9): 130–136.)
  - [12] MA W, ZHAO B, REN H, *et al.* A criterion of image quality assessment based on wavelet frequency band partition and CSF property [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(7): 688–690. (马文波, 赵保军, 任宏亮, 等. 基于小波频带划分及 CSF 特性的图像质量评价方法 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(7): 688–690.)
  - [13] YANG C-L, CAO W-R, PO L-M. Discrete wavelet transform-based structural similarity for image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2008: 377–380.
  - [14] XU Y, YIN D. An image quality assessment algorithm based on contourlet transform [J]. *Electronic Technology*, 2010, 47(7): 23–26. (徐云生, 尹东. 一种基于 Contourlet 变换的图像质量评价算法 [J]. *电子技术*, 2010, 47(7): 23–26.)
  - [15] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [EB/OL]. [2014-01-12]. <http://www.vqeg.org/>.
  - [16] ZHOU W, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600–612.
  - [17] CHEN G-H, YANG C-L, PO L-M, *et al.* Edge-based structural similarity for image quality assessment [C]// *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. Piscataway: IEEE Press, 2006, 2: 933–936.
- 
- (上接第 2924 页)
- [9] GAO S, LU H, ZHOU W. A fast algorithm for surface reconstruction from unorganized points [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, 7(12): 108–112. (高山, 卢汉清, 周万宁. 散乱点的快速曲面重建方法 [J]. *中国图象图形学报*, 2002, 7(12): 108–112.)
  - [10] NI T, YANG C. A fast surface reconstruction algorithm based on border-estimation for 3D unorganized points [J]. *Journal of Computer Applications*, 2006, 26(7): 1580–1582. (倪彤光, 杨长春. 基于边界检测的三维散乱点快速曲面重建算法 [J]. *计算机应用*, 2006, 26(7): 1580–1582.)
  - [11] DEY T K. Curve and surface reconstruction: algorithms with mathematical analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 14–16.
  - [12] AMENTA N, BERN M, KAMVYSSELIS M. A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm [C]// *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM, 1998: 415–421.
  - [13] DEY T K, SUN J. Normal and feature approximations from noisy point clouds [C]// *Proceedings of the 26th International Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science*. Berlin: Springer-Verlag, 2006: 21–32.
  - [14] CGAL. Computational geometry algorithm library [EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.cgal.org>.
  - [15] VTK. Visualization toolkit [EB/OL]. [2014-06-20]. <http://www.vtk.org>.