

中图分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)12-2133-07

论文索引信息: 杨春玲, 徐小琳. 重视边缘区域的结构相似度图像质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(12): 2133-2139

重视边缘区域的结构相似度图像质量评价

杨春玲, 徐小琳

(华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640)

摘要: 基于结构相似度的图像质量评价方法简单高效、准确性较高, 但是对严重失真和交叉失真类型评价不够准确。考虑到边缘是图像的主要信息和能量成分, 人眼对边缘信息的丢失更加关注, 提出一种重视边缘区域的结构相似度图像质量评价方法 (HESSIM), 采用动态阈值 (Otsu) 法提取边缘区域, 结合 JND 确定边缘区域的明显失真, 并对其予以重视。实验结果表明, HESSIM 比 SSIM 有更准确的评价, 特别是对模糊类失真和噪声类失真的评价, HESSIM 的优越性更加明显。

关键词: HESSIM; 边缘区域; Otsu; JND

Structural similarity highlighting edge regions for image quality assessment

Yang Chunling, Xu Xiaolin

(School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640 China)

Abstract: Structural similarity (SSIM) is an image quality assessment algorithm with the advantage of simplicity, high efficiency and better consistency with human subjectivity. However, it often fails when measuring badly distorted or cross distortion images. In this paper, an improved algorithm called structural similarity highlighting edge regions (HESSIM) is proposed based on the idea that edges are the most important information in an image. The humans eye is very sensible for distorted edge information. In the proposed HESSIM, the edge regions are first divided from an image by Otsu's method, then those with obviously perceptual distortion are chosen by the JND model, and their distortion measures are highlighted. Experimental results show that HESSIM is more consistent with HVS than SSIM, especially for distorted images which are blurred or contaminated with white noise.

Keywords: HESSIM (structural similarity highlighting edge regions); edge regions; Otsu; JND (just-noticed distortion)

0 引言

图像信息技术在日益发展的多媒体技术中占有重要地位。图像在整个传输过程中会引入各种各样的失真, 导致信息丢失。图像质量评价方法成为图像处理系统的重要指标, 是测度图像处理、编码和传输技术好坏的重要依据。图像质量评价的方法主要

分为两类: 主观评价方法和客观评价方法。由于图像的最终归宿是人眼, 人眼对图像的判断是最直接最准确的图像质量评价。主观评价方法就是采用这种方式对观察者的评分归一化来评价图像质量。但是由于其在工程应用中耗时耗力, 有些情况下甚至无法采用, 因此经常作为一些客观评价方法的参照和效果评价标准。传统的客观评价方法主要是基于降质图像与原始图像的灰度差异进行研究, 具有代

收稿日期: 2010-12-23; 修回日期: 2011-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60972135); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2009ZM0231); 广东省自然科学基金项目 (06025642)。

第一作者简介: 杨春玲 (1970—), 女, 教授。1999 年于南京理工大学获电子工程系通信与信息工程专业博士学位, 主要研究方向为图像/视频压缩、图像质量评价。E-mail: eeclyang@scut.edu.cn。

表性的方法有 MSE (均方误差)、PSNR (峰值信噪比) 等。这些方法模型简单、物理意义清晰,但没有充分考虑与人眼主观视觉感受的一致性,导致评价结果不尽如人意。

为了寻找更准确的评价方法,研究人员将视觉生理学和视觉心理学融入图像质量评价中,近年得到广泛关注的主要有基于人眼视觉系统(HVS)模型的评价方法和基于结构相似度^[1](SSIM)的评价方法。

基于人眼视觉系统的评价方法自底而上地模拟 HVS 低阶的组成结构进行建模。近年来已提出一些有效的模型,如 HVS 的视觉非线性、多通道结构、对比敏感度、掩盖效应等特性已有相应的计算模型。韦学辉等人^[2]在主观评价过程中提取感知亮度、频率和边缘等 3 种信息,构造出响应函数,拟合成图像感知质量评价模型。还有一些研究者利用 HVS 特征对传统评价算法改进,汪孔桥等人^[3]提出的一种基于视觉兴趣的图像质量评价方法,认为人眼对视觉感兴趣区域的感兴趣程度与面积成反比,并结合人眼感兴趣区域理论对 PSNR 进行修正。

由于人眼视觉系统具有高度的复杂性和非线性,上述基于 HVS 的评价方法算法复杂度高、运算量大,很难取代传统的 PSNR 和 MSE 评价方法。另外,人们对 HVS 认识还不够透彻,当前无法根据视觉生理特性建立精确、统一、高效的模型。

鉴于以上原因,一些学者开始寻找新的途径。Wang 等人^[4-5]在分析了基于 HVS 模型评价方法的局限性后提出结构相似度图像质量评价方法(SSIM),从视觉心理角度出发,认为人们在观察和理解图像时,往往关注的是图像的结构信息,并且对图像质量的判断更多的是依据对结构信息失真的判断,所以可以通过对降质图像与原始图像结构信息的比较得到近似主观评价的效果。SSIM 是一种自顶而下的过程,从整体上模拟 HVS 的功能,不存在模拟 HVS 各个低阶组成结构的复杂过程,算法简单高效,并且评价性能明显优于 PSNR 以及目前一些经典的基于 HVS 的评价方法^[6-8]。但是,SSIM 对交叉失真类型图像的评价欠佳,尤其对严重失真的图像评价准确率低。

针对 SSIM 评价方法的不足,随后出现了一些改进算法,如本研究组提出基于梯度的结构相似度(GSSIM)^[9],是利用梯度能够很好反应图像边缘信息的特性,较好地评判了模糊图像的质量;叶盛楠等

人提出基于结构信息提取的图像质量评价(SIExt)^[10],将图像中的结构信息分离出来给予较大的权重并用 SSIM 估计局部失真;Liao 等人提出双尺度边缘结构相似度(MEDSSIM)^[11],将图像的边缘分为宏观边缘和微观边缘,加权求和后代替结构信息分量得到最终评价;以及基于图像块内容的加权结构相似度(WSSIM)^[12]等。上述方法均在 SSIM 基础上考虑局部区域的特性,所得评价效果均更好地接近人眼的主观判断。

另外,鉴于 SSIM 算法从空间域角度考虑像素间的结构性,一些算法从变换域角度做出改进,如小波域的结构相似度 DWTSSIM^[13-14]、Contourlet 域的结构相似度 CT-SSIM^[15]和 DCT 域的结构相似度 FSSIM 等^[16-17]。这些方法用各变换域函数取代结构信息分量,都取得了优于 SSIM 的效果。

目前还有一类方法是将 SSIM 和基于 HVS 特征的评价方法加权结合进行研究^[18-20],这类方法主要是结合 HVS 特性,将图像质量的评价划分为视觉感兴趣区和非感兴趣区的加权组合评价。然而这些方法主要讨论如何划分视觉感兴趣区域,没有考虑视觉感兴趣区域中严重失真情况对人眼视觉的影响。而正是视觉感兴趣区域中的明显失真能够引发人眼的更多关注,成为评价图像质量的重要因素^[21]。另外,这些方法通常分析影响视觉兴趣性的各因素,给定各区域划分阈值,这样得到的最终区域划分结果不够精准。本文提出一种基于边缘区域的结构相似度图像质量评价 HESSIM (structural similarity highlighting edge regions),采用动态阈值法将图像划分成边缘区域和非边缘区域,利用 JND 判断边缘区域内的明显失真,予以重视,最终通过区域加权得到评价结果。

1 重视边缘区域的结构相似度图像质量评价

人眼对图像的边缘失真非常敏感,对边缘失真的有效度量能更好地反映图像质量。当边缘区域中存在人眼可见的明显失真时,由于视觉的感兴趣性,对这一类失真的评价应严重于考虑全局结构信息的 SSIM 评价。本文提出一种基于边缘区域的结构相似度图像质量评价 HESSIM,采用最大类间方差法^[22]划分出图像的边缘区域和非边缘区域,融合人眼对边缘区域和非边缘区域的感兴趣程度评价边缘

区域内严重失真的失真程度。

1.1 边缘区域划分

对图像边缘区域的划分,本文采用最大类间方差法。这是一种动态阈值法,使边缘区域的划分更为精准。具体划分步骤如下:

1) 初步分类

将图像分成 8×8 的重叠子块,根据原始图像子块的方差大小初步分类。方差是图像像素灰度分布均匀性的一种度量。方差越小说明该图像块均匀性越好,方差越大说明该图像块的内容变化越大。定义方差小于阈值的子块组成的区域为平滑区域,其他区域为非平滑区域,这里选取方差阈值 100。

2) 边缘区域提取

对非平滑区域进行边缘检测,确定每个子块中所含的边缘点个数。采用 Canny 算子检测图像非平滑区域的边缘点,当子块中所含边缘点个数超过阈值时定义该子块为边缘块,采用最大类间方差法确定阈值,最佳阈值的选取方法是

$$Th = \arg \max [\omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2] \quad (1)$$

式中, Th 为最佳阈值, ω_0 、 ω_1 是两类信息的概率, μ_0 、 μ_1 是两类信息的均值, μ 是总均值。非平滑区域中的边缘子块集合称为边缘区域。类间方差越大,边缘区域的分割效果就越好。

3) 非边缘区域确定

平滑区域以及非平滑区域中的非边缘子块统称为非边缘区域。

以 Monarch 图像为例,根据上述方法对其原始图像和失真图像的边缘区域分别进行提取,可以得到结果如图 1 所示。

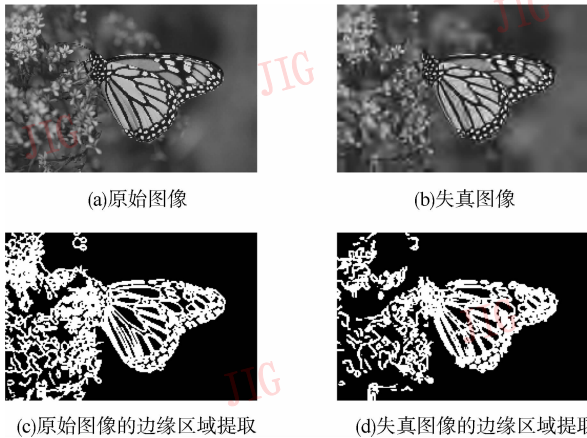


图 1 Monarch 图像及其失真图像的边缘区域提取结果

Fig. 1 Edge regions selection results of monarch image and its distortion image

1.2 边缘区域明显失真图像块的强化处理

根据视觉掩蔽性,人眼对图像边缘信息的丢失非常敏感。而边缘信息的丢失又有不同程度之分。研究中一般采用 JND 作为阈值来判断能够被人眼感知的失真,失真大于阈值时能够被人眼察觉的认为是明显失真。明显失真的存在直接影响人眼对整幅图像的评价,尤其是人眼可察觉的边缘信息的丢失导致主观感受失真更加强烈。

因此,本文提出对边缘区域内明显失真图像块在评分时予以重视的思想。即对于明显失真的边缘块,其失真度是在 SSIM 基础上乘以一个小权值。(注:图像块失真程度越大,SSIM 值越小)具体步骤如下:

1) 确定图像边缘区域的可见失真

采用文献[7]的 JND 模型计算原始图像的 JND 值,当原始图像与失真图像的像素差值大于该点的 JND 值时,可判断该点失真可见,否则不可见。则得到一幅与原始图像等尺寸的二值化图像,表示失真图像中各点的失真可见性,可表示为

$$J = \begin{cases} 1 & |I_1 - I_2| > \text{JND} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中,“1”代表该位置失真可见,“0”代表该位置的失真不可见。

2) 对明显失真的强化处理

由于边缘区域内的可见失真强调的是人眼对边缘信息的重视,因此其失真程度更加突出的是局部对比性,即在整幅图像背景下,强化了人眼对边缘信息的感兴趣程度而淡化非边缘区的影响^[23]。本文对明显失真边缘块的失真度量是在 SSIM 基础上乘以一个小于 1 的权值,表示其失真严重性。建立失真程度模型,对边缘区的可见失真进行评价

$$ssim_1 = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} ssim'_1 & J = 1 \\ ssim'_1 & J = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $ssim'_1$ 是对图像边缘区域计算出的 SSIM 值, $\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$ 是权值。式(3)中, λ_1 、 λ_2 分别是人眼对边缘区和非边缘区的感兴趣程度,它们的确定方法将在 1.3 节中详细阐述。

1.3 评价模型

结构相似的图像质量评价方法是针对全图,没有考虑人眼对图像不同区域的关注程度不同,使得

SSIM 评价与主观判断的一致性难达最佳。因此,本文区分对待图像的各局部区域,并根据人眼的敏感度不同进行不同的处理,图像的最终评价通过不同区域的加权得到。

本文算法是在 SSIM 评价的基础上对边缘区域内可见失真的失真程度进行修正,利用一种简化的图像质量评价模型,认为图像只存在一个边缘区域。简单起见,认为人眼对边缘区域内的所有像素同等重视。利用文献[3]的方法得到人眼对边缘区和非边缘区的感兴趣程度 λ_1 、 λ_2 与面积关系如下

$$\lambda_1 = \frac{M}{M_1}(1 - \lambda_2) + \lambda_2 \quad (4)$$

$$\lambda_2 = 1 - \frac{2}{M} \sqrt{M_1 M_2} \quad (5)$$

式中, M_1 、 M_2 分别是边缘区和非边缘区面积, M 是图像总面积。于是有整幅图像的评价模型修正为

$$\text{HESSIM} = \frac{\frac{\lambda_1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} \text{ssim}_1 + \frac{\lambda_2}{M_2} \sum_{j=1}^{M_2} \text{ssim}_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \quad (6)$$

式中, ssim_2 是对图像非边缘区域计算出的 SSIM 值。

2 实验结果与分析

实验采用美国 TEXAS 大学图像和视频工程实验室提供的图像质量估计数据库^[24]进行仿真实验。该图像库中包括 5 类失真图像: JPEG、JPEG2000、Gaussian blur (高斯模糊)、Fast Fading (在 Fast Fading 通道传输 JPEG2000 码流的过程中发生错误而失真的图像)、White Noise (白噪声), 共 779 幅失真图像。图库中还给出了平均主观评分差值 (DMOS), DMOS 是主观评分 MOS 和满分 (100) 的差值 ($\text{DMOS} = 100 - \text{MOS}$)。因此, DMOS 值越大表示图像质量越差, DMOS 值越小表示图像质量越好, 且 DMOS 的取值范围为 $[0, 100]$ 。

利用评估图像质量评价方法的 4 个常用客观参量作为评价指标, 即非线性回归条件下的相关系数 (CC)、绝对误差均值 (MAE)、均方差的平方根 (RMS) 和秩相关系数 (SROCC)。非线性回归函数采用文献[1]中的 Logistic 函数。CC 值越高说明客观评价方法与 DMOS 相关性越好, MAE 和 RMS 值越小, 说明该客观评价模型的准确度越高。SROCC 可以作为预测单调性的度量, 其值越大, 模型的预测质量值与 DMOS 相关性越好。

计算了 5 个图库 779 幅失真图像的 HESSIM 和 MSSIM (均值结构相似度), 给出了图像库中 Gaussian blur (高斯模糊)、White Noise (白噪声)、Fast Fading (在 Fast Fading 通道传输 JPEG2000 码流的过程中发生错误而失真的图像)、JPEG2000 和 JPEG 5 种失真类型各自的 HESSIM 和 MSSIM 同主观评分的相似度。

实验中 MSSIM 模型中的参数取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$, HESSIM 和 MSSIM 的实验结果都是以 8×8 的重叠块取平均得到的。

2.1 Gaussian Blur 失真图像

高斯模糊图像主要是边缘信息的丢失, 本文的算法将边缘信息单独提取出来作为一个区域, 对边缘信息重点关注, 因此, 能够很好地评判模糊图像的失真程度, 与人眼主观评价有高度一致性。图 2 给出了客观评价方法 MSSIM 和 HESSIM 相对于主观评分 DMOS 的散点图, 其横轴表示客观评价模型 (MSSIM 或 HESSIM) 的评分, 纵轴表示 DMOS 值大小。从图 2 和表 1 的实验结果中可以看出 HESSIM 的各项指标明显优于 MSSIM, 其中 CC 值提高 0.103 8, MAE 值降低了 3.013 3, RMS 值降低了 4.303 7, SROCC 值提高了 0.080 2, 而且对于失真严重的图像评价更加准确。

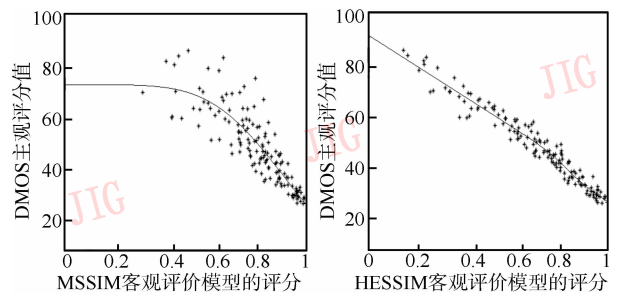


图 2 Gaussian blur 图库重叠块的 MSSIM 散点图和 HESSIM 散点图比较

Fig. 2 Gaussian blur's scatter diagram of MSSIM and HESSIM compared with DMOS

表 1 Gaussian blur 失真图像 HESSIM 和 MSSIM 的性能比较

Tab. 1 Gaussian blur's performance comparison of HESSIM with MSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESSIM	0.976 8	2.743 7	3.364 3	0.975 5
MSSIM	0.873 0	5.757 0	7.668 0	0.895 3

2.2 White Noise 失真图像

White Noise 失真图像是在原始图像中添加高斯白噪声得到的,图像中的噪声点是随机散布在整幅图像上的,与图像的内容、结构没有关系。本文算法中结合了 JND 评价,而 JND 对单个像素灰度级的跃变有很好的判断,因此,采用本文算法能够得到与主观评价很好的一致性。由图 3 和表 2 的实验结果可以看出,HESIM 的各项指标均优于 MSSIM。

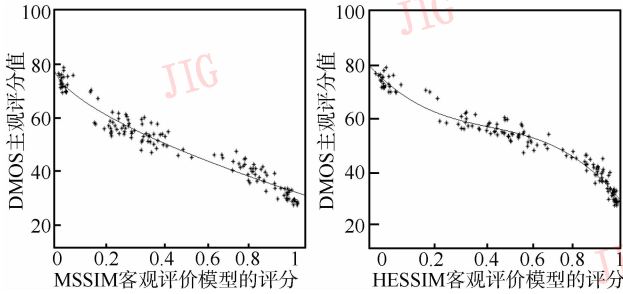


图 3 White Noise 图库重叠块的 MSSIM 散点图和 HESIM 散点图比较

Fig. 3 White Noise's scatter diagram of MSSIM and HESIM compared with DMOS

表 2 White Noise 失真图像 HESIM 和 MSSIM 的性能比较

Tab. 2 White Noise's performance comparison of HESIM with MSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESIM	0.982 6	2.389 6	2.966 9	0.978 0
MSSIM	0.972 4	3.104 9	3.725 9	0.963 3

2.3 Fast Fading 失真图像

Fast Fading 失真是一种全频率的失真,HESIM 是对中高频率的边缘信息进行修正,因此评价结果较 MSSIM 仍有改善。由图 4 和表 3 可看出,HESIM 的散点图在图像失真严重的情况下(DMOS 值较大)与主观评价的一致性要明显优于 MSSIM,且各项指标均优于 MSSIM。

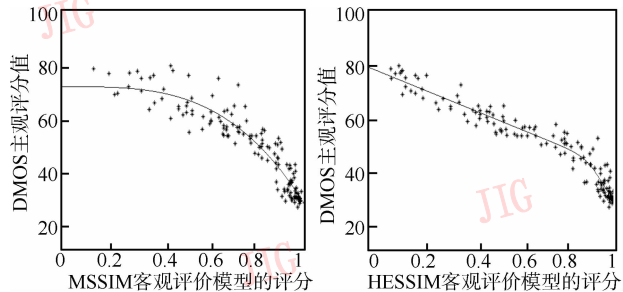


图 4 Fast Fading 图库重叠块的 MSSIM 散点图和 HESIM 散点图比较

Fig. 4 Fast Fading's scatter diagram of MSSIM and HESIM compared with DMOS

表 3 Fast Fading 失真图像 HESIM 和 MSSIM 的性能比较

Tab. 3 Fast Fading's performance comparison of HESIM with MSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESIM	0.969 6	3.143 2	4.023 6	0.966 0
MSSIM	0.940 1	4.444 5	5.608 7	0.940 1

2.4 JPEG2000 失真图像

JPEG2000 是基于小波变换的图像编码方法,其失真主要表现为振铃和模糊现象。JPEG2000 失真没有固定的结构信息,而是与图像内容有关,如振铃现象出现在图像中比较明显的边缘上。而 HESIM 是重点针对边缘信息的评价,从图 5 和表 4 中可以看出,HESIM 评价在一定程度上优于 MSSIM,各项指标均有较大程度的优化。

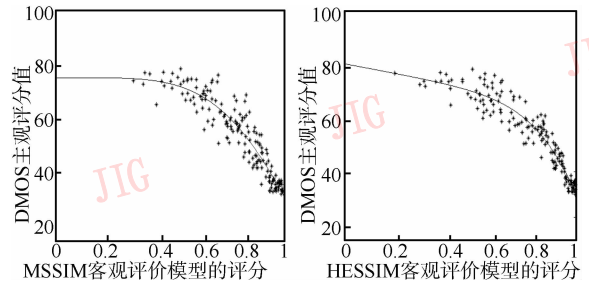


图 5 JPEG2000 图库重叠块的 MSSIM 散点图和 HESIM 散点图比较

Fig. 5 JPEG2000's scatter diagram of MSSIM and HESIM compared with DMOS

表 4 JPEG2000 失真图像 HESIM 和 MSSIM 的性能比较

Tab. 4 JPEG2000's performance comparison of HESIM with MSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESIM	0.959 2	3.614 3	4.582 1	0.951 9
MSSIM	0.936 1	4.459 5	5.696 0	0.931 4

2.5 JPEG 失真图像

从图 6 和表 5 可以看出,在 JPEG 失真下 HESIM 相比于 MSSIM 的结果略有提升,散点图较相似。主要原因在于图像在经过压缩后会产生一些虚假边缘,压缩比越高虚假边缘越明显。虚假边缘的存在导致非边缘区域可能同样存在明显失真边缘,而 HESIM 算法侧重考虑了由原始图像得到的真实边缘区域的明显失真。

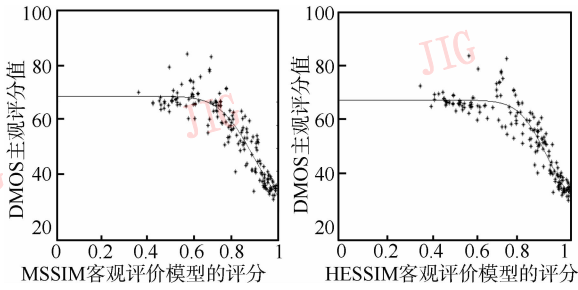


图 6 JPEG 失真图像的 MSSIM 散点图和 HESSIM 散点图比较

Fig. 6 JPEG's scatter diagram of MSSIM and HESSIM compared with DMOS

表 5 JPEG 失真图像 HESSIM 和 MSSIM 的性能比较
Tab. 5 JPEG's performance comparison of HESSIM with MSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESSIM	0.938 1	4.128 2	5.538 5	0.908 7
MSSIM	0.928 4	4.490 1	5.939 7	0.903 0

2.6 所有失真图像

利用文中所提的 HESSIM 方法对所有失真图像 (779 幅) 的实验, 结果示于图 7 和表 6, 从图 7 的散点图和表 6 的客观评价指标可以看出, 本文提出的 HESSIM 各项指标明显优于 MSSIM 算法, 散点图更加密集。为了和以前提出的基于小波域的结构相似度 (DWTSSIM) 进行比较, 把 DWTSSIM 的各项指标也分别列于表 6 中, 可以看到 HESSIM 的性能在各项指标上都优于以前提出的 DWTSSIM。

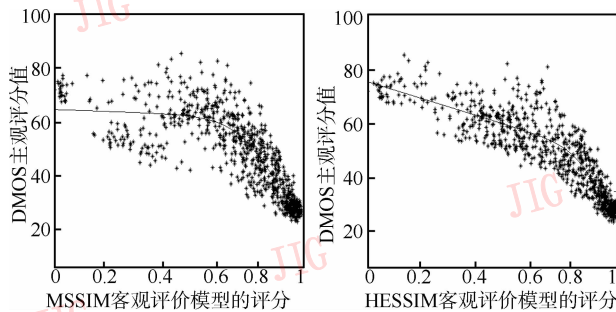


图 7 总图库的 MSSIM 散点图和 HESSIM 散点图比较

Fig. 7 All images' scatter diagram of MSSIM and HESSIM compared with DMOS

表 6 所有图像 HESSIM 和 MSSIM、DWTSSIM 的性能比较
Tab. 6 All images' performance comparison of HESSIM with MSSIM and DWTSSIM

评价模型	CC	MAE	RMS	ROCC
HESSIM	0.911 5	5.104 5	6.624 5	0.907 2
MSSIM	0.863 3	6.267 1	8.126 6	0.850 6
DWTSSIM ^[13]	0.902 4	5.390 8	6.939 4	0.903 2

3 结论

提出一种联合 SSIM 与 HVS 特性的图像质量评价方法——重视边缘区域的图像质量评价方法 (HESSIM)。由于 HESSIM 不仅利用结构相似度评价图像全局结构信息失真, 而且根据人眼视觉特性确定边缘区域能够被人眼察觉的明显失真, 并对其强化处理, 使得其一方面弥补了 SSIM 对严重失真和交叉失真类型评价不准确的不足, 另一方面降低了 HVS 模型算法的复杂度。实验结果表明, 对所有失真类型图像, HESSIM 的准确性均高于 SSIM 和我们以前提出的 DWTSSIM 算法, 与主观评判有更好的一致性。尤其是对严重失真的模糊类图像, 由于更加重视图像的边缘信息, HESSIM 算法的各项性能指标较 SSIM 均有很大程度的改善, 更加符合人眼视觉特性。

参考文献 (References)

[1] Wang Zhou, 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.

[2] Wei Xuehui, Li Junli, Chen Gang. A perception based image quality assessment model[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 12(19): 1540-1545. [韦学辉, 李均利, 陈刚. 一种图像感知质量评价模型[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2007, 12(19): 1540-1545.]

[3] Wang Kongqiao, Shen Lansun, Xing Xin. A quality assessment method of image based on visual interests[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(4): 300-303. [汪孔桥, 沈兰荪, 邢昕. 一种基于视觉兴趣性的图象质量评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(4): 300-303.]

[4] Wang Zhou, Lu Ligang, Bovik A C. Rate scalable video coding using a foveation-based human visual system model [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Salt Lake City, UT, USA: IEEE Press, 2001, (3): 1785-1788.

[5] Wang Zhou, Bovik A C. Why is image quality assessment so difficult? [C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Orlando, USA: IEEE Press, 2002, 4(4): 3313-3316.

[6] Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images [C]//Proceedings of SPIE: Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV. Washington, USA: SPIE, 1993, 1993: 202-216.

[7] Chou C H, Li Y C. A perceptually tuned subband image coder

- based on the measure of just-noticeable-distortion profile [J]. IEEE Trans. Circ. & Syst. for Vid. Techno., 1995, 5(6): 467-476.
- [8] Heeger D J, Teo P C. A model of perceptual image fidelity [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Washington DC, USA; IEEE Press, 1995, (2): 343-345.
- [9] Yang Chunling, Chen Guanhao, Xie Shengli. Gradient information based image quality assessment[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7):1313-1317. [杨春玲,陈冠豪,谢胜利. 基于梯度信息的图像质量评判方法的研究[J]. 电子学报, 2007, 35(7):1313-1317.]
- [10] Ye Shengnan, Su Kaina, Xiao Chuangbai, et al. Image quality assessment based on structural information extraction [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 5(5):856-861. [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, 5(5):856-861.]
- [11] Liao Bin, Chen Yan. An image quality assessment algorithm based on dual-scale edge structure similarity [C]//Innovative Computing, Information and Control. Kumamoto, Japan: IEEE Press, 2007:56-59.
- [12] Li Chaofeng, Bovik Alan C. Content-partitioned structural similarity index for image quality assessment [J]. Signal Processing: Image Communication, 2010, 25(7):517-526.
- [13] Yang Chunling, Gao Wenrui. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4):845-849. [杨春玲,高文瑞. 基于结构相似的小波域图像质量评价方法的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4):845-849.]
- [14] Sampat M P, Wang Zhou, Gupta S, et al. Complex wavelet structural similarity: a new image similarity index [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(11): 2385-2401.
- [15] Yang Chunling, Wang Fan, Xiao Dongqin. Contourlet transform-based structural similarity for image quality assessment [C]//IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Shanghai, China; IEEE Press, 2009, (4): 175-179.
- [16] Li Hang, Lu Yang, Cui Huijuan, et al. Image quality assessment based on frequency domain based structural similarities[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 2009, 4(49):559-562. [李航,路羊,崔慧娟,等. 基于频域的结构相似度的图像质量评价方法[J]. 清华大学学报, 2009, 4(49):559-562.]
- [17] Lv Dan, Bi Duyan, Yuan Wang. Image quality assessment based on DCT and structural similarity [C]// International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing. Chengdu, China; IEEE Press, 2010, (6):1-4.
- [18] Wang Tao, Gao Xinbo, Zhang Duying. An objective content based image quality assessment metric [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 6(12):1002-1007. [王涛,高新波,张都应. 一种基于内容的图像质量评价测度[J]. 中国图象图形学报, 2007, 6(12):1002-1007.]
- [19] Ren Xue, Sun Han, Zhang Jinguo. A novel image quality assessment method based on local character [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 8(15):1236-1243. [任雪,孙涵,张金国. 一种新的基于局部特征的图像质量评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 8(15):1236-1243.]
- [20] Yang Wan, Wu Lehua, Fan Ye, et al. Study on objective digital image quality assessment methods [J]. Communications Technology, 2008, 41(7):244-246. [杨琬,吴乐华,范晔,等. 数字图像客观质量评价方法研究[J]. 通信技术, 2008, 41(7):244-246.]
- [21] Chin Yijen, Berger T. A software-only videocodec using pixelwise conditional differential replenishment and perceptual enhancements [J]. IEEE Trans. Circ. & Syst. for Vid. Techno., 1999, 9(3):438-450.
- [22] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., 1979, 9(1):62-66.
- [23] Karunaseka S A, Kingsbury N G. A distortion measure for blocking artifacts in image based on human visual sensitivity [J]. IEEE Trans. Image Process., 1995, 4(6):713-724.
- [24] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, et al. LIVE Image Quality Assessment Database [DB/OL]. [2006-3-7]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.