

基于小波第二级系数误差的图像质量评价模型

郑江云,江巨浪

(安庆师范学院物理与电气工程学院,安徽安庆 246011)

摘要: 图像质量研究的目的是设计客观评价算法,它与主观评价有很强的相关性.本文根据人眼对图像高低频失真的敏感度不同,采用不同方法分别计算图像高频和低频失真量,然后将两种失真量直接相乘得到客观评价价值.实验结果表明,这种客观评价模型能够一致评价各种失真类型、各种失真强度的图像质量,与 LIVE 图库上差异主观评价分(DMOS)的线性相关性优于 PSNR、LMSE 和 SSIM 算法.

关键词: 图像质量评价;小波变换;小波第二级系数误差(WSCCE);差异主观评价分(DMOS)

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2012)03-0559-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.03.024

A Model of Image Quality Assessment Based on Wavelet Second Coefficient Error

ZHENG Jiang-yun, JIANG Ju-lang

(School of Physics and Electronic Engineering, Anqing Teachers College, Anqing, Anhui 246011, China)

Abstract: The goal of quality assessment research is to design algorithms for objective evaluation of quality in a way that is consistent with subjective human evaluation. Based on the human visual system(HVS) with different sensitivities in the frequency domain, low frequency coefficient error and high frequency coefficient error are calculated by different methods. The product of two errors is adopted as objective evaluation of quality. The new method is validated with subjective quality scores on LIVE database which containing 982 images. Experimental results show that the performance of the new method is superior to the algorithms of PSNR, LMSE and SSIM.

Key words: image quality assessment; wavelet transform; wavelet second coefficient error(WSCCE); differential mean opinion score(DMOS)

1 引言

对图像质量的正确评价是图像信息工程领域内一项很有意义的研究课题^[1].人眼是视觉的终端,所以图像的质量评价应该以人的主观评价为准,但是,主观评价复杂性高,费时费力,且很难直接应用于实时图像处理系统中,主观评价方法的这些弊端促使了对客观评价方法的研究.客观评价方法具有简单、便于内置于图像处理系统中的优点.常用的客观评价方法有:(1)峰值信噪比(PSNR, Peak Signal Noise Ratio),它对图像每个像素的权值相同,不能真实反映细节部分的降质;(2)拉普拉斯均方误差(LMSE, Laplacian Mean Square Error),缺点是不能真实反映图像背景部分的变化;(3)均方误差(MSE, Mean Square Error),缺点是不能很好地反映纹理的掩蔽效应,其准确性相对较差,试验表明相关系数MSE/MOS仅为0.4到0.7^[2].

由此,人们提出了基于HVS的图像质量评价方法.根据对HVS模型描述的侧重点不同,图像质量评价模型归结为基于误差灵敏度评价算法和基于结构相似度评价算法两类^[3].基于误差灵敏度的图像质量评价HVS模型已有相应的计算模型.但这些算法复杂、运算量大^[4].文献^[5]中有些参数值需要经验确定或与数据库有关,计算复杂,特别是文献^[5],其中的一项计算就要耗时50s^[5].由于以上的困难,一些研究者开始寻求新的途径.Zhou Wang等提出了结构相似性理论.文献^[6]提出将对对比度失真、亮度失真及相关性损失三项结合的客观评价指标 Q ,它的性能优于MSE,但它不能很好地反映纹理的掩蔽效应.结构相似度(Structural SIMilarity, SSIM)^[7]算法从高层次上模拟HVS的整体功能,由于SSIM的算法简单、准确性较好,提出后受到了国内外学者的广泛关注,并且已被应用到一些相关的领域.但是,SSIM算法在交叉失真类型和失真严重时的准确率还不

够好^[4],以及对于图像的模糊等失真类型的敏感程度较低^[8].文献[9]在 SSIM 的基础上引入了凝视权重和错误百分比,评价性能比 SSIM 略有提高.

文献[10]提出用小波的高低频系数的变化分别作为结构错误和低频的比较,它的优点是用结构的失真代替了可见错误的度量,它的不足是要计算所有高频级的边缘降级.文献[11]在小波域直接用 SSIM,它对图像进行 5 级小波分解,用非线性相关系数做为各子带的加权系数,对高低频信号基本同等对待.文献[12]将差值图像(失真图像减去参考图像)的 1~3 级小波分解系数加权求和,用和值的对数表示图像质量.该算法不仅加权因子与训练的图像数据库有关^[8],而且虽然评价文献[13]中的所有失真图像的整体指标优于 SSIM,但评价 JPEG 压缩(JPEG)、高斯模糊(GBlur)、瑞利信道失真(FF)时指标都比 SSIM 差.这些方法计算复杂,不利于普遍推广应用.

本文根据人眼对高低频的感觉容量不同的视觉特点,提出了一种基于小波第二级系数误差(Wavelet Second Coefficient Error, WSCE)的图像质量评价模型,采用 LIVE Database Release 2 图库^[13]的 779 幅失真图像进行了实验,实验结果表明该模型能够一致评价各种失真类型、各种失真强度的图像质量,与主观评价分线性相关的程度优于 LMSE、PSNR 和 SSIM 算法.

2 基于小波第二级系数误差的图像质量评价模型

一幅图像由背景(低频)和细节(高频)组成,根据 Weber 定律,对比度门限和原始信号的幅值成比例,只要改变的信号量低于对比度门限,视觉系统就无法感觉到信号的改变,由于低频系数的幅值一般远大于高频系数,从而具有较大的感觉容量^[14].本文就是基于人眼的这种视觉特点,采用不同的方法分别计算高低频部分的失真量,再将两种失真量通过相乘得到图像的客观评价价值.

本节公式中的 M 、 N 指被评价图像的像素个数.

2.1 近似系数误差 ACE

小波变换的近似(低频)系数 C_{LL_p} (p 表示小波变换的级数)代表它所在小波块对应的图像块的平均亮度^[14],即图像的背景部分.随着小波变换层次 p 的增加,小波块的大小 $2^p \times 2^p$ 也越大,低频系数对图像背景的考察就越粗糙,其对图像背景描述的精细程度也越低,因此本文选取 $p = 2$.式(1)所示 ACE(Approximation Coefficient Error)是第二级近似系数变化量的平方和,代表低频的累积失真量,ACE 越大,图像低频部分的失真量就越大.

$$ACE = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [C_{LL_2}(i, j) - \hat{C}_{LL_2}(i, j)]^2 \quad (1)$$

$C_{LL_2}(i, j)$ 、 $\hat{C}_{LL_2}(i, j)$ 分别表示原始图像和被评价图像的第二级小波近似系数.

2.2 细节系数误差 DCE

对图像进行小波变换后,除了产生低频系数外,还会生成水平 C_{LH} 、垂直 C_{LH} 和对角线 C_{HH} 细节系数,本文采用类似图像的拉普拉斯变换计算方法,获得细节(高频)系数误差 DCE(Detail Coefficient Error),计算方法如式(2)所示,它的值与图像高频信号的失真量及原始图像的纹理有关,DCE 越大,图像的降质越大.

$$DCE = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{E_{HH}(i, j) + E_{LH}(i, j) + E_{HL}(i, j)\}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [C_{LH_2}(i, j)^2 + C_{HL_2}(i, j)^2 + C_{HH_2}(i, j)^2]} \quad (2)$$

其中: $E_{HH}(i, j) = [C_{HH_2}(i, j) - \hat{C}_{HH_2}(i, j)]^2$

$$E_{LH}(i, j) = [C_{LH_2}(i, j) - \hat{C}_{LH_2}(i, j)]^2$$

$$E_{HL}(i, j) = [C_{HL_2}(i, j) - \hat{C}_{HL_2}(i, j)]^2$$

$\hat{C}_{HH_2}(i, j)$ 、 $\hat{C}_{LH_2}(i, j)$ 和 $\hat{C}_{HL_2}(i, j)$ 表示原始图像的第二级水平、垂直和对角线细节系数, $\hat{C}_{HH_2}(i, j)$ 、 $\hat{C}_{LH_2}(i, j)$ 和 $\hat{C}_{HL_2}(i, j)$ 分别表示被评价图像的第二级水平、垂直和对角线细节系数.

2.3 基于小波第二级系数误差的图像质量评价模型

基于小波第二级系数误差的图像质量评价模型如式(3)所示,单位为 dB. WSCE 值越大,图像失真量就越大.

$$WSCE = 10 \times \text{Log}_{10}(ACE \times DCE) \quad (3)$$

式(3)将图像的低频、高频的失真量通过相乘结合起来,综合评价图像的质量.因为 ACE、DCE 的计算方式不同,保证了两者的相对独立性.理论上,将两者相乘符合人眼的视觉特性:ACE 是低频系数误差的平方和,一般较大,相当于放大细节的降质 DCE,与人对高频失真敏感一致;而 DCE 的值一般较小,弱化低频失真量 ACE,这符合人眼对低频失真不敏感的特性.这种相互加权的方法,不仅简单,避免了求解加权因子的复杂运算,而且后面的实验也表明这种客观评价模型是有效的.

为了说明小波第二级系数误差的有效性,将小波第一级系数误差(Wavelet First Coefficient Error, WFCE)在 3.1 节实验部分做了对比实验,WFCE 的计算方法与式(1)~(3)相似,只要将小波第二级系数换成第一级系数就可以了.

3 实验结果及分析

3.1 本文方法与主观感知一致性实验

实验采用 LIVE Database Release 2 图库^[13],该图库选取 29 幅高精度、高质量彩色图像作为原始图像,再模拟 JPEG2000 压缩(JP2K)、JPEG 压缩(JPEG)、高斯白噪声(WN)、高斯模糊(GBLur)、瑞利信道失真(FF),这些失真类型形成 5 个子图库,共 982 幅图像.另外,图库提供了每幅图像的差异主观评价分 DMOS(Differential Mean Opinion Score),DMOS 作为客观质量评价比较的标准.DMOS 值越大,表示图像质量越差,DMOS 值越小,表示图像质量越好,DMOS 的取值范围是 $[0,100]$.

图 1 为 PSNR、LMSE、SSIM 和 WSCE 评价全体图像的 DMOS 散点图.由图 1 的散点图可知,WSCE 与主观评分 DMOS 的线性相关程度明显优于 LMSE、PSNR 和 SSIM.

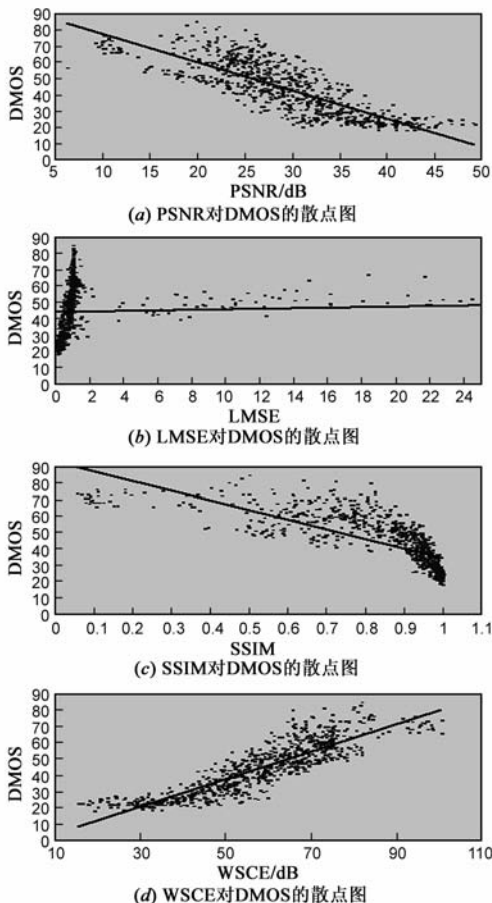


图1 PSNR、LMSE、SSIM和WSCE评价全体图像的DMOS散点图

本文对主、客观评价直接进行线性回归分析,回归直线与客观评价分的统计指标作为评估客观评价方法性能的指标,包括:(1)回归方程的斜率 a 和截距 b ; (2)线性相关系数 CC (Correlation Coefficient);(3)均方差

的平方根 $RMSE$ (Root Mean Square Error);(4)离出率 OR (Outlier Ratio, 预测值与 DMOS 的绝对误差高于 DMOS 标准差的图像数量与全体图像数量的比)4 个方面比较 PSNR、LMSE、SSIM(文献[8]的方法)、WFCE 和 WSCE 的性能.其中,值 a 、 b 的稳定性代表了客观评价模型对不同失真类型的适应性,值 CC 表征了评价方法的正确性, OR 和 $RMSE$ 表征了评价方法的一致性.

表 1 为 PSNR、LMSE、SSIM、WFCE 和 WSCE 回归方程的斜率 a 和截距 b .从表 1 中 a 、 b 值的变化情况看,WSCE 模型在不同的失真类型下,变化范围最小,特别是 a ,基本都是在 1 附近波动.其次是 WFCE 和 PSNR,而不同的失真类型对 LMSE、SSIM 的 a 、 b 取值影响较大.

表 1 线性回归直线的斜率、截距(a, b)

	PSNR	LMSE	SSIM	WFCE	WSCE
GBLur	-2.7, 118.7	49.8, 6.8	-114.8, 145.0	1.6, -69	1.3, -32.6
FF	-2.0, 103.2	33.5, 19.8	-69.1, 101.0	1.2, -36	0.9, -11.2
WN	-1.5, 80.8	0.2, 39.3	-50.1, 77.4	0.8, -17	0.8, -4.6
JPEG	-2.1, 111.6	36.2, 17.1	-94.0, 127.4	1.2, -29	0.9, 0.2
JP2K	-2.1, 112.2	47.9, 20.3	-120.2, 151.0	1.2, -28	1.0, -10.1
ALL	-1.7, 94.4	0.2, 43.9	-58.9, 93.5	0.9, -18	0.8, -4.2

表 2 线性相关系数(CC)

	PSNR	LMSE	SSIM	WFCE	WSCE
GBLur	0.7740	0.8392	0.8887	0.8680	0.9181
FF	0.8754	0.8341	0.8622	0.9210	0.9306
WN	0.9623	0.6189	0.9583	0.9793	0.9831
JPEG	0.8430	0.8723	0.7895	0.8990	0.9166
JP2K	0.8736	0.9315	0.8705	0.9061	0.9212
ALL	0.7980	0.2466	0.7442	0.8264	0.8805

表 3 标准差($RMSE$)

	PSNR	LMSE	SSIM	WFCE	WSCE
GBLur	9.9542	8.5515	7.2094	7.8062	6.2293
FF	7.9513	9.0723	8.3310	6.4422	6.0190
WN	4.3055	12.5419	4.5609	3.2278	2.9204
JPEG	8.5993	7.8056	9.8115	7.0011	6.3937
JP2K	7.8812	5.8893	7.9712	6.8535	6.3035
ALL	9.7047	15.6066	10.7574	9.0671	7.6360

表 4 离出率(OR)

	PSNR	LMSE	SSIM	WFCE	WSCE
GBLur	0.1241	0.0690	0.0207	0.0552	0.0069
FF	0.0552	0.0828	0.0138	0.0069	0.0207
WN	0.0069	0.2069	0	0	0
JPEG	0.0571	0.0571	0.0686	0.0343	0.0229
JP2K	0.0237	0.0059	0.0414	0.0059	0
ALL	0.0950	0.3979	0.0963	0.0539	0.0372

表 2~4 中数据表明:(1)WSCE 的各项指标都优于 PSNR,特别是对于高斯模糊(GBLur)失真.高斯模糊图像主要是边缘信息的丢失,边缘属于中高频信息^[12],而

PSNR 对图像每个像素的权值相同,不能真实反映高频部分的降质,所以 PSNR 对 DMOS 的相关系数只有 0.774.由于 WSCE 模型结合了高频失真,相关系数提高到了 0.9181;(2)除了评价 JP2K 失真,WSCE 的性能略低于 LMSE,而对于另四种失真类型,WSCE 性能指标更好,特别是高斯白噪声(WN),WSCE 的 CC 值达到 0.9831,而 LMSE 只有 0.6189;(3)与 SSIM 比较.只有评价 FF 失真时,离出率这一项指标 WSCE 略低于 SSIM,而对于其它所有指标,WSCE 都优于 SSIM;(4)对于综合评价 779 幅失真图像 ALL,表 2~4 中的数据都是 WSCE 最好,整体线性相关系数 CC 值达到 0.8805.

以上的实验结果表明:WSCE 模型很好地反映了主观评价,总体评价性能明显优于 PSNR、LMSE 和 SSIM.表 2~4 中数据也表明 WSCE 的性能优于 PSNR、LMSE 和 SSIM,但 WSCE 比 WFCE 整体性能更好,所以用第二级系数误差做为图像质量评价指标比用第一级系数误差会更好地反映主观感知,这与 HVS 在中频区域表现出较为敏感的特性,而在低频和高频区域,敏感度有所下降一致^[4].

3.2 本文方法的敏感性测试实验

目前,最常用的图像评价方法依然是 PSNR.然而,在很多情况下 PSNR 并不能真正有效地反映图像的视觉效果.图 2 和图 3 给出两组退化图像,每组中的两幅图像的 PSNR 基本相同,但我们可以明显地感觉到其视觉效果有较大差异.图 2 是在“Lena”图像不同的部位有相同面积的划痕,由于图 2(a)是划在了脸部,给人的不



图2 不同划伤部位的图像

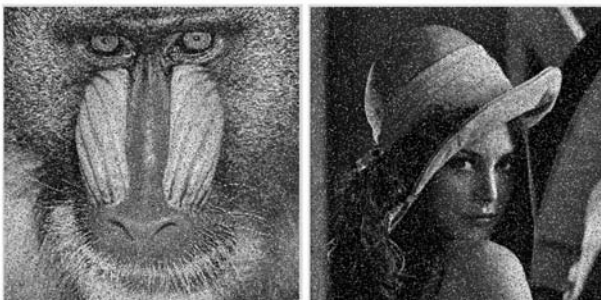


图3 相同椒盐噪声污染的图像

适感比较明显,WSCE = 73.3335;图 2(b)的划痕在图像的次要部位,主观感觉受到的影响要小一些,WSCE = 69.4737,而它们的 PSNR 都约为 42.图 3 是将“Lena”和“Baboon”图像进行了噪声密度为 0.1 的椒盐污染,它们的 PSNR 都约为 37,而实际上由于图 3(a)的 Baboon 细节比较丰富,具有纹理掩蔽效应,视觉效果比 Lena 好,它们的 WSCE 分别为 77.3623 和 84.4778,与主观效果一致.这表明本文提出的 WSCE 模型具有良好的敏感性.

4 小结

本文提出了基于小波第二级系数误差的图像质量评价模型 WSCE,它是根据人眼对图像的高、低频失真的敏感度不同而设计的.用不同的方式分别计算高、低频失真量,并将二者通过相乘结合起来.它的计算复杂度低、物理意义清晰.实验结果表明,WSCE 性能明显优于 PSNR、LMSE 及 SSIM 算法,与人的主观评价分相关性很强.

参考文献

- [1] 杨威,赵剡,许东.基于人眼视觉的结构相似度图像质量评价方法[J].北京航空航天大学学报,2008,34(1):1-4. Yang Wei, Zhao Yan, Xu Dong. Method of image quality assessment based on human visual system and structural similarity [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(1): 1-4. (in Chinese)
- [2] Wifried Osberger. Perceptual Vision Models for Picture Quality Assessment and Compression Applications [D]. Queensland: Department of Computer Science & Computer Engineering, Queensland University of Technology, 1999.
- [3] 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):219-226. Jiang Gang-yi, Huang Da-jiang, Wang Xu, et al. Overview on image quality assessment methods [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(1): 219-226. (in Chinese)
- [4] 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):856-861. 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): 856-861. (in Chinese)
- [5] Eric C Larson, Damon M Chandler. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy [J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(1): 011006_1-011006_21.
- [6] Z Wang, A C Bovik. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.
- [7] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.

- [8] 王宇庆,刘维亚,王勇.一种基于局部方差和结构相似度的图像质量评价方法[J].光电子·激光,2008,19(11):1546-1553.
WANG Yu-qing, LIU Wei-ya, WANG Yong. Image quality assessment based on local variance and structure similarity[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2008, 19(11): 1546-1553. (in Chinese)
- [9] Anush Krishna Moorthy, Alan Conrad Bovik. Visual importance pooling for image quality assessment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(2): 193-201.
- [10] Min Zhang, Xuanqin Mou. A psychovisual image quality metric based on multi-scale structure similarity[A]. ICIP 2008 [C]. San Diego: IEEE, 2008. 381-384.
- [11] 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.
YANG Chun-ling, GAO Wen-ru. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 845-849. (in Chinese)
- [12] Emil Dumic, Sonja Grgic, Mislav Grgic. New image-quality measure based on wavelets[J]. Journal of Electronic Imaging,

2010, 19(1): 011018-1-19.

- [13] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, et al. Live image quality assessment database release 2 [DB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2005.
- [14] 黄达人,刘九芬,黄继武.小波变换域图像水印嵌入对策和算法[J],软件学报,2002,13(7):1290-1297.
HUANG Da-ren, LIU Jiu-fen, HUANG Ji-wu. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain[J]. Journal of Software, 2002, 13(7): 1290-1297. (in Chinese)

作者简介



郑江云 女,1973年生于安徽怀宁.1996年、2007年分别在北京理工大学、合肥工业大学获学士、硕士学位,安庆师范学院副教授,从事图像水印、图像质量评价方面的研究工作.

E-mail: zhengjiangyun@aqtc.edu.cn

江巨浪 男,1967年生于安徽潜山,合肥工业大学博士,现为安庆师范学院教授,主要从事计算机图形学与图像处理等方面的研究工作.