

小波域中 CSF 频率与方向加权的 图像质量评价方法

米曾真

(重庆理工大学电子信息与自动化学院,重庆 400054)

摘要: 为解决结构相似度算法的图像质量评价缺陷,提出一种在小波域中,根据 CSF 的频率与方向加权的图像质量评价方法.该方法将图像的小波域多分辨率特性与 CSF 的带通特性有机的相结合,得到一种基于结构相似度的评价新方法.算法首先将频率归一化的 CSF 曲线按照 1 倍频程分解成 5 份,然后进行 5 级 CDF 9/7 双正交小波分解与重构,得到一个低频子带 LL 和多个中高频子带 HH_i 、 HL_i 及 LH_i ,根据不同的频率,不同的方向分配不同的权重,分别与相应的子频带 SSIM 值相乘,然后累加运算,得到小波域的加权图像结构相似度 WWSSIM.实验表明,WWSSIM 方法的单调性、一致性、准确性评价指标较高,更接近人类主观视觉感受.

关键词: 图像质量评价; 结构相似度; 对比度敏感函数; 小波分解与重构

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)07-1273-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.005

Image Quality Evaluation Method Based on Frequency and Direction Weighted to CSF in Wavelet Domain

MI Zeng-zhen

(College of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: In order to solve the defects of SSIM algorithm for image quality evaluation, frequency and direction weighed to CSF in Wavelet domain was proposed. This method organic combination the multi-resolution characteristics of wavelet with band-pass characteristic of CSF curve, and get a new algorithm based on SSIM. Firstly, the frequency normalized CSF curves according to 1 octave level into five parts, and then 5 levels CDF 9/7 pairs of orthogonal wavelet decomposition and reconstruction, to get a low-frequency sub-band LL and a plurality of medium or high frequency sub-band HH_i , HL_i and LH_i , then assign different weights according to different frequencies, different directions, which were multiplied with the corresponding sub-band SSIM values, and then do accumulate operations to obtain the weighted structural similarity in wavelet domain named WWSSIM. Experiments show that WWSSIM algorithm has high monotonicity, consistency, accuracy, and closer to human subjective visual experience.

Key words: image quality assessment; structural similarity index measurement (SSIM); contrast sensitivity function (CSF); wavelet decomposition and reconstruction

1 引言

在图像压缩、融合、增强及重建等研究领域,由于信号的衰减、设备的差异性及编码解码等因素的影响,可能产生图像降质退化现象.在这些领域的应用中,大多数的图像处理终端依赖于主观评价方法,图像所赋予的视觉感受是影响用户最终体验的主要因素^[1].因此,主观评价法在图像质量评价中具有重要的参考意义.

但是,主观评价方法耗时长,且依赖于评价主体的

素质,近年来,Waterloo 大学的 Wang Z 团队提出 (Structural Similarity Index Measurement, SSIM) 客观评价算法^[2], SSIM 算法充分考虑了各像素之间的关联性、结构性,评价效果明显优于基于孤立像素点的 MSE、PSNR 等客观评价方法.然而,SSIM 主要存在两点不足:(1)评价噪声污染及严重模糊失真图像时,主客观评价结果可能不一致;(2)结果可能为负值,与逻辑不符.

针对 SSIM 存在的问题,本文在分析人眼视觉系统的频率与方向各异性及小波域的边缘检测能力^[3]的基

基础上,利用(Contrast Sensitivity Function, CSF)曲线与小波变换相结合的结构相似度加权的图像质量评价方法(Weighted Wavelet SSIM, WWSSIM).改进了 SSIM 的结构信息项的计算方法,避免了评价结果可能为负的情况,根据小波低频、中高频成分的分级,对亮度、对比度及结构信息的权重 α, β, γ 进行了合理的分配,另外,还根据 CSF 的频率与方向各异性,对各分辨率的小波重构图像分配不同的权重,提高了主客观评价的一致性.

2 CSF 的加权运算

对比度决定了人眼对亮度变化的视觉感受,人类视觉系统用 CSF 表述人眼辨别亮度的能力,学者 Manos 和 Sakrison 建立了 CSF 的函数表达式^[4]:

$$\text{CSF}(f) = 2.6 \times (0.0192 + 0.114f) \exp[-(0.114f)^{1.1}] \quad (1)$$

式中, f 定义为图像的空间频率, $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$, f_x 及 f_y 分别为水平、垂直方向的空间频率,单位是周期/度. 根据公式(1)计算结果可知,CSF 特性曲线的中频成分的响应值大,高频成分与低频成分的敏感度小,特别是空间频率高于 40 周期/度时,CSF 值已经趋近于零,因此 CSF 具有带通滤波器的性质. 空间频率是图像尺寸、距离的函数,因此需要将空间频率归一化,它们有这样的关系: $f(\text{周期/度}) = f_n(\text{周期/像素}) \times f_s(\text{像素/度})$, 其中, $f \in [0, 0.5f_s]$, 则归一化后的空间频率 $f_n \in [0, 0.5]$. 在 5 级小波分解的条件下,水平(垂直)方向和对角方向的 CSF 响应应具有 6 个加权值,如图 1 所示.

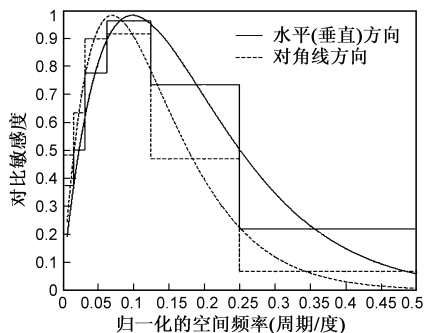


图1 CSF特征曲线及频程加权系数(频率归一化)

CSF 的频带宽度近似为一个倍频程,各频段加权系数不同,水平与垂直方向对称分布,同一级的敏感度值相差不大;不同方向的视觉敏感性不同,对角方向比水平(垂直)方向更难被感知. 人眼主观视网膜图像也是被分解到对数尺度上具有近似带宽的不同频带上,这一结构特征恰好与多分辨滤波器或小波分解相匹配. 可见,小波变换的多分辨率特性与 HVS 的多通道滤波机制类似.

3 小波域频率与方向敏感的结构相似度

人眼视觉的 CSF 倍频程特征、方向选择性与二维小波变换具有高度的一致性,因此可以通过小波变换构造不同方向上的多分辨滤波器,对 CSF 的倍频带特性进行有效的模拟. 小波变换后的低频子带 LL 包含了图像的大部分能量信息,中高频子带包括对角方向 HH_i 、水平方向 HL_i 及垂直方向 LH_i , 代表图像各个方向的边缘的梯度信息^[5]. 对 LIVE 库中的 Coins in fountain 图像进行二维小波 5 级分解,结合 CSF 的权重系数,以对角线方向的低频 LL 分量为基准,将各方向的权重归一化,得到一组可调的塔式多分辨滤波器的模型,进而可以计算各频段的 SSIM 权值. 小波分量结果如图 2 所示.



图2 小波域5级分解示意图

图像经过二维小波变换以后,按照以下步骤计算 WWSSIM: (1)在 SSIM 模型中,协方差作为结构相似程度的度量,作为一种衡量两幅图像相似度的新指标之一,其值越大越好,最大为 1. 可以看出,当 $(x_i - \mu_x)$ 与 $(y_i - \mu_y)$ 异号时,亮度相关系数 σ_{xy} 的结果为负,结构信息因子 $s(x, y)$ 的取值范围是 $[-1, 1]$, 而噪声失真图像与参考图像的亮度相关系数 σ_{xy} 多为负值,不符合客观实际. 为了解决上述弊端,结构项做如下改进:

$$s'(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + \sigma_x \sigma_y + c_3}{2\sigma_x \sigma_y + c_3} \quad (2)$$

c_3 是无穷小的常量,那么

$$s'(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + \sigma_x \sigma_y + c_3}{2\sigma_x \sigma_y + c_3} \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x \sigma_y + c_3} + \frac{1}{2} \frac{\sigma_x \sigma_y + c_3}{\sigma_x \sigma_y + c_3} \quad (3)$$

有 $s'(x, y) \approx 0.5 \times s(x, y) + 0.5$ (4)

$s(x, y)$ 的取值范围是 $[-1, 1]$, 因此, $s'(x, y)$ 的取值范围是 $[0, 1]$; (2) SSIM 的 3 个参量 α, β, γ 用来调整亮度、对比度和结构信息的权重. Wang Z 等近似的认为这 3 个参量具有同等的贡献比,即 $\alpha = \beta = \gamma = 1$, 本文对失真图像进行小波分解与重构运算,得到一个低频子带 LL 和多个中高频子带 HH_i, HL_i 及 LH_i . 低频 LL 包含了

图像的大部分能量信息,可以作为原始图像的近似,以灰度构成的能量成分能够较好的反映出两幅图像的平均亮度差异.因此,考虑将权重设为 $\alpha:\beta:\gamma=2:1:1$;而 LH_i 、 HL_i 、 HH_i 中高频带包含了主要、次要边缘信息,局部像素块的亮度标准差用以体现像素差异,而像素差异大小反映了图像边缘的锐化程度,对比度、结构信息主要反映的是图像的边缘等细节.因此,提高对比度、结构信息的权重,将 3 个参量设为 $\alpha:\beta:\gamma=1:2:2$;(3) 计算原始图像与失真图像的 11 个子频带 LL 及 LH_i 、 HL_i 、 HH_i ($i=1,2,3,4,5$) 的 MSSIM 值,分别为 $MSSIM_{LL}$ 、 $MSSIM_{LH_i}$ 、 $MSSIM_{HL_i}$ 、 $MSSIM_{HH_i}$,将权系 w^{ll} 、 w_i^{hl} 、 w_i^{lh} 、 w_i^{hh} ($i=1,2,3,4,5$) 分别与相应的子频带 SSIM 值相乘,然后累加运算,得到图像的整体结构相似度:

$$WWSSIM = \frac{\sum_{i=1}^{11} w_i \cdot MSSIM_i}{\sum_{i=1}^{11} w_i} \quad (5)$$

第 i 级权重系数 $w_i^{hl} = w_i^{lh}$, 权系数在图 2 中已给出.

4 实验过程与分析

4.1 小波变换子频带评价指标与权重的关系

NASA 于 1998 年发布了一张灰度分布均衡,对比度大的月球图像,对其进行 5 级 CDF 9/7 双正交小波分解与重构,得到 LL 、 HL_i 、 LH_i 及 HH_i 分量,如图 3 所示.用经过非线性回归之后的均方根误差 (RMSE)、Pearson 相关系数 (CC)、Spearman 秩相关系数 (SROCC),背离率 (OR) 4 个客观参量,定量的衡量算法准确性、单调性和一致性.

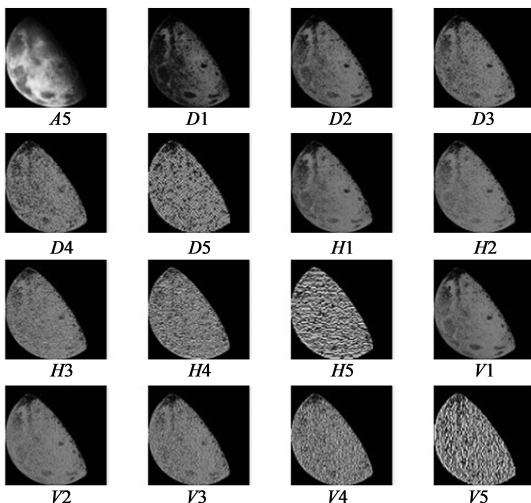


图3 月球表面图像的5级小波分解(A:低频,D:对角,V:垂直,H:水平)

表 1 给出了多分辨率图像之间的客观评价指标,可以看出,在同一分辨率中,水平与垂直方向的评价指标值波动不大,且略高于对角方向;在不同分辨率中,第 3 层及第 4 层的客观评价指标较好,它们与主观评价一致性最高,第 2 层、第 5 层的客观评价指标次之,第 1 层的

评价指标较差,由此可见,中频部分的准确性、单调性和一致性最好,结果与 CSF 特征曲线相符,即图像的中频分量比高频与低频分量更能反映图像的失真.

表 1 子频带的评价指标

频带	评价指标			
	RMSE	CC	SROCC	OR
LL	7.8141	0.7932	0.7848	0.0471
LH_1	8.9767	0.6755	0.6482	0.0383
HL_1	8.9809	0.6831	0.6715	0.0379
HH_1	9.3831	0.6464	0.6366	0.0362
LH_2	7.2627	0.7201	0.7032	0.0422
HL_2	7.2330	0.7890	0.7731	0.0464
HH_2	8.7990	0.6768	0.6598	0.0396
LH_3	6.6972	0.8467	0.8414	0.4423
HL_3	6.7107	0.8998	0.8115	0.0395
HH_3	7.8786	0.8133	0.7032	0.0422
LH_4	7.7421	0.8943	0.8247	0.0501
HL_4	7.2503	0.8648	0.8098	0.0476
HH_4	8.2922	0.7721	0.7681	0.0461
LH_5	8.9286	0.6403	0.6383	0.0425
L_5	10.4762	0.6193	0.6133	0.0396
HH_5	13.3906	0.6930	0.5950	0.0487

4.2 基于 HVS 特征的小波域加权客观评价方法

实验对象为美国 TEXAS 大学提供的图像数据库 LIVE,数据库包括原始参考图像及各种类型的退化图像.每幅图像的 (Difference Mean Opinion Score, DMOS) 值作为比较标准,范围为 $[0, 100]$,其值越大表示图像质量越差,反之,则图像质量越好.表 2 为几种评价方法的评价指标,图 4 表示几种评价方法的 DMOS 的散点分布及曲线拟合情况.

表 2 客观评价方法的评价指标

评价方法	RMSE	CC	SROCC	OR
MSE	9.9416	0.7747	0.7834	0.6483
PSNR	9.7724	0.7834	0.7816	0.6690
IWPSNR ^[6]	6.9407	0.9024	0.9048	0.4339
VIF ^[7,8]	12.6383	0.6198	0.6085	0.7253
SSIM	7.7682	0.8760	0.8704	0.4955
GSSIM ^[5]	7.1032	0.8975	0.8933	0.4198
FSSIM ^[9]	7.0965	0.8977	0.8944	0.4557
WWSSIM	7.0124	0.9274	0.9228	0.4083

图 4 (a ~ c) 表示 MSE、PSNR 及 IWPSNR 的散点图, MSE 的评价指标绝大部分集中在 1/10 的 量程范围内,评价值较低,不易判别失真度大小, PSNR 在量程范围内分布均匀,但是拟合曲线的平滑度不高,散点较为分散,此类方法通过逐像素点比较图像差别,没有考虑像素之间的关联性; VIF 方法对于 LIVE 数据库的评价效果不甚理想;图 4 (e ~ h) 的拟合曲线的平滑性得到改

善,收敛度也得到增强;WWSSIM 算法对于 5 种不同类型的失真图,除了 RMSE 指标差异不明显,其他指标都高于 GSSIM、FSSIM 及 IWPSNR. WWSSIM 在考虑了空间

位置相邻的像素点的关联性的同时,又将人眼主观视觉特性的频率与方向选择性融入其中,能更好地反映图像结构信息,更加接近人类主观视觉感受.

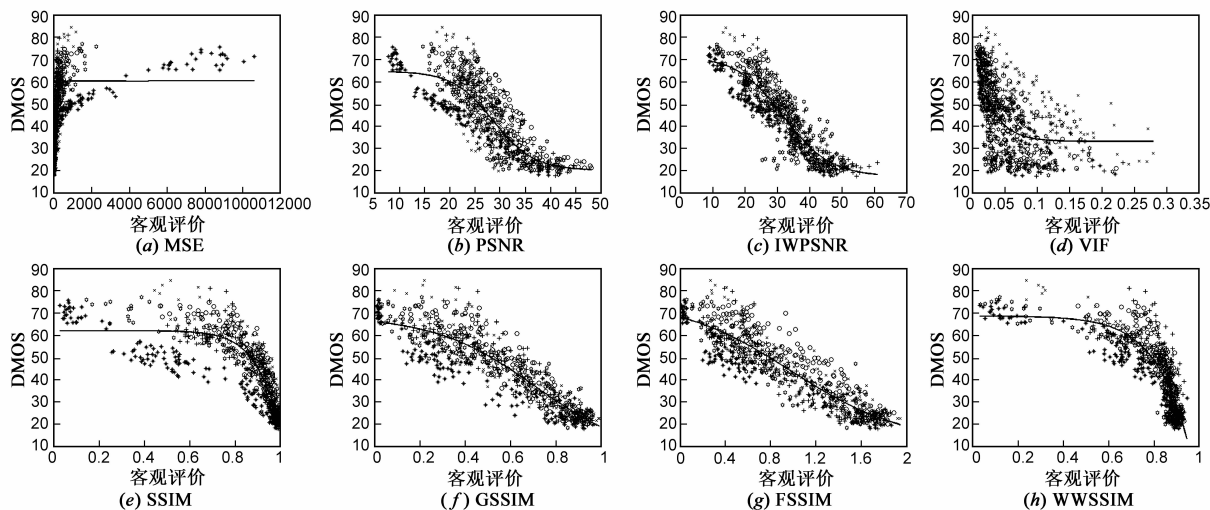


图4 LIVE数据库中各种评价方法散点图

5 结论

本文提出一种小波域的人眼主观视觉 CSF 的频率与方向进行加权的 SSIM 图像质量评价方法.该方法将图像的小波域多分辨率特性与 CSF 曲线的带通特性有机的相结合,得到一种新的图像质量评价方法.对比了 LIVE 库中各种类型的图像评价指标,证明了 WWSSIM 算法比较贴近人类主观视觉感受,体现了图像的不同频率、不同梯度方向在人类视觉系统中重要程度的差异,提高了主客观评价的一致性.

参考文献

- [1] 路文,高新波,曾凯,等.一种基于 HWD 的图像质量评价测度[J].红外与毫米波学报,2009,28(1):72-76
LU Wen, GAO Xin-Bo, ZENG Kai, et al. Image quality evaluation metrics based on hwd[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(1): 72-76. (in Chinese)
- [2] Wang Z, 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.
- [3] Chandler D M, Hemami S S. VSNR: A wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(9): 2284-2298.
- [4] Campisi P, Le Callet P, Marini E. Stereoscopic images quality assessment[A]. Proceedings of 15th European Signal Processing Conference[C]. Poznan, Poland, 2007. 2110-2114.
- [5] 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.

YANG Chun-ling, CHEN Guan-hao, XIE Sheng-li. Gradient information based image quality assessment[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7): 1313-1317. (in Chinese)

- [6] Liu A, Lin W, Narwaria M. Image quality assessment based on gradient similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1500-1512.
- [7] Sheikh H R, et al. Image information and visual quality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 430-444.
- [8] Wang Z, Li Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(5): 1185-1198.
- [9] 李航,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:自然科学版,2009,49(4):559-562.
LI Hang, et al. Image quality assessment based on frequency domain of structural similarities[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2009, 49(4): 559-562. (in Chinese)

作者简介



米曾真 男,1984 年出生,湖南怀化人,于 2012 年在重庆大学获工学博士学位.现为重庆理工大学电子信息与自动化学院教师.主要从事图像处理、图像质量评价等方面的研究工作.

E-mail: lomoer@cqu.edu.cn