

一种基于小波分析的部分参考型图像质量评价方法

路 文 高新波 王体胜
(西安电子科技大学工程学院 西安 710071)

摘 要：部分参考型图像质量客观评价方法已经成为图像质量评价领域研究的热点之一。该文利用视觉感知特性，通过统计图像经小波分解后视觉感知系数在各子带中的变化情况，提出了一种基于小波分解的部分参考型图像质量评价方法。该方法与经典的 RR-WISM(Reduced-Reference image quality assessment using Wavelet-domain natural Image Statistic Model)方法相比，主观感知的相关系数平均提高 3%，主观感知的离出率平均降低 6%，传输数据量减少 50%，计算代价大大降低。实验结果表明提出的方法与主观感知有很好的 consistency。
关键词：图像质量评价；人类视觉系统；小波变换
中图分类号：TN911.73 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-5896(2009)02-0335-04

A Reduce-Reference Image Quality Assessment Metrics
Based on Wavelet Transform

Lu Wen Gao Xin-bo Wang Ti-sheng
(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Reduced-reference image quality measure has become to be one of the focuses in image processing fields. In this paper, a reduced-reference image quality assessment method based on wavelet is proposed. Based on the character of the human visual system, it is taken into account the variance of the visual sensitive coefficients to get the measure of distorted image. The proposed approach is characterized by a very low complexity of computation, and compared with traditional method of RR-WISM, is with a higher correlation coefficient by 3%, a lower outlier ratio by 6%, and a less amount of information being transmitted by 50%, the computation time is greatly reduced. The experiment results illustrate that the proposed approach has a good prediction accord with the subjective perception.
Key words: Image quality assessment; Human visual system; Wavelet transform

1 引言

图像质量评价在图像处理相关领域中有着重要地位，图像质量的客观评价方法研究成为了图像领域的热点。图像质量客观评价方法根据对原始图像的依赖程度可以分为全参考型方法、无参考型方法和部分参考型方法 3 种^[1,2]。全参考型方法是 3 类方法中效果最好的，由于这类方法需要完整的原始图像，使其在实际应用中受到了很大限制；而无参考型方法的实现非常困难，且现有方法都需要很强的假设条件，目前还处于发展的初级阶段。
部分参考型方法是一种介于全参考型和无参考型之间的图像质量评价方法，仅利用参考图像的部分信息来估计失真图像的质量。具有传输数据量小，可靠性高等特点，受到了越来越多人的关注，VQEG(Video Quality Experts Group)也将其作为研究发展的一个重要方向^[3]。图 1 为一个部分参考型图像质量评价模型^[4]。在这个模型中，在发送端有一个

特征提取过程，所提取的特征一般数据量远远小于原始图像数据，并通过辅助通道传输到接收端。辅助通道通常认为是没有误差的，虽然实际上做不到绝对没有误差，但相对于原始图像，特征数据量少，其误差更容易控制，而且即使在有误差的情况下，其对图像质量评价也非常有意义。一个成功的部分参考型图像质量评价方法必须在特征数据率和图像质量的预测精度上取得很好的平衡。这是因为，如果部分参考型特征数据率越大，能包含参考图像的信息就越多，得到的预测就会越精确，但这也会给传送这些参数造成很大负担；相反，数据量越小就越易于传送，但最终的预测也会越差。

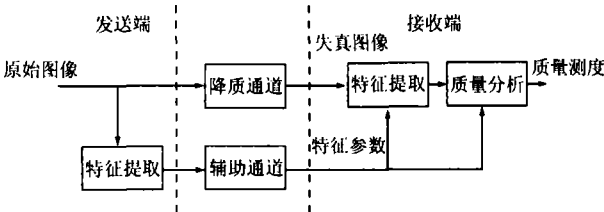


图 1 部分参考型图像质量评价模型

2007-08-06收到，2008-01-14改回
新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0948)，教育部长江学者和创新
团队支持计划(IRT0645)和国家自然科学基金(60771068)资助课题

针对部分参考型图像质量评价方法的特点, zhou wang 等人在文献[4]中提出了一种基于图像统计模型的部分参考型图像质量评价方法(Reduced-Reference image quality assessment using a Wavelet-domain natural Image Statistic Model, RR-WISM)。该方法针对自然图像的小波子带系数满足广义高斯分布的特性, 用图像的小波子带系数的分布来逼近广义高斯分布, 然后根据失真图像和参考图像相对于该分布的拟合误差对图像质量进行估计, 取得了较好的评价结果。但由于其采用了拟合分布的方式, 这种方式并不是一个提取图像特征的有效途径, 因此它并不是最优的方法。因为有效提取图像的特征是参考型图像质量评价方法的核心问题, 而对于部分参考型图像质量的评价方法而言, 其实质是统计失真图像相对原始图像的某种或某些特征信息的变化。所以, 如何有效地提取和统计图像的特征信息成为对图像质量评价的关键。

小波分析是时域和频域的局部变换, 可以有效地提取信号的局部特征信息。根据这一特点, 本文提出一种利用小波分析提取图像特征信息的部分参考型图像质量评价方法。图像经小波分析后, 利用人眼的视觉特性, 通过统计图像在失真前后视觉感知系数在各子带中所占比重的变化情况, 得到对失真图像的质量评价测度。

2 基于小波分析的图像质量评价方法

根据人眼视觉感知特性, 本文提出了一种基于小波变换的图像质量评价方法。利用小波分解提取信号的局部信息, 采用 CSF (Contrast Sensitivity Function) 子带加权获得图像的视觉敏感信息, 通过统计参考图像在失真过程中, 各子带的视觉感知系数在各自子带中所占比重的变化情况, 得到了一种新的部分参考型图像质量评价方法。

2.1 小波分析

小波分析^[6]提供了一种自适应的时域和频域同时局部化的分析方法, 通过伸缩和平移等运算功能进行多尺度细化分析, 能够有效地从信号特别是非平稳信号中提取信息。其多分辨率的特性适合人类的视觉特性^[6], 对不同的频带采用不同的量化比特, 使量化后的子带系数适合人眼视觉灵敏度。

小波分析的分解框架如图2所示。图中 h 和 g 分别为小波分解滤波器, 其中 h 为低通滤波器, g 为高通滤波器。图中的 \tilde{h} 和 \tilde{g} 分别为 h 和 g 的重构对偶滤波器。

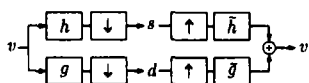


图2 小波分析框架

对一幅图像来说, 其高频信息主要集中在边缘、轮廓和某些纹理的法线方向上, 代表了图像的细节变化。在这个意义上, 可以认为小波图像的各个高频子带是图像中边缘、轮

廓和纹理等细节信息的体现, 并且不同子带所表示的边缘、纹理等信息的方向是不同的。小波的这一特点表明, 小波变换具有良好的空间方向选择性, 与人眼的视觉十分吻合, 这样我们就可以利用小波变换来提取符合人眼视觉特性的图像信息。

2.2 CSF 子带加权

小波分解后, 我们将图像分解到不同的空域频率范围内, 而人眼对不同空域频率的图像信号感知程度不同, 为使不同尺度上的系数对于视觉感知具有相同的意义, 鉴于 CSF 遮蔽效应可以使人眼对不同的频率具有相同的可视敏感度^[7], 本节利用 CSF 子带加权对小波分解后的图像子带进行可视敏感度归一化。

在文献[8,9]中, Mannos和Sakrison提出了CSF模型。其数学表达式为

$$H(f) = 2.6(0.192 + 0.114f)e^{[-(0.114f)^{1.1}]} \quad (1)$$

其中 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$, 单位为 cycles/degree。 f_x 和 f_y 分别为水平和垂直方向的空间频率。由图像的采样频率 f_s 和归一化频率 f_n 可求得信号的实际频率 $f = f_n f_s$ 。 f_s 由下式求得^[9]:

$$f_s = \frac{2v \tan(0.5^\circ) r}{0.0254} \quad (2)$$

其中 v 为观测距离, 单位为 m, 这里取显示器高度的 2~2.5 倍(文中取 0.8m), r 为显示器的分辨率, 单位为像素/cm。这里显示器的尺寸为 $21 \times 2.54 = 53.24\text{cm}$, 分辨率为 1024×768 , 则有 $r = \sqrt{1024^2 + 768^2} / 53.24 = 24$ 像素/cm。

2.3 视觉感知阈值

由上述分析可知, 通过对各子带系数的对比敏感度掩模可以使不同方向子带系数具有相同的视觉感知意义。而人类视觉系统仅对各子带内幅值较大的系数敏感。据此, 定义了一个视觉感知阈值 T , 将大于该阈值的子带系数定义为视觉感知系数。

$$T = \frac{\alpha}{M} \sum_{i=1}^M \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_{i,j} - \bar{x}_i)^2} \quad (3)$$

其中 $x_{i,j}$ 为最精细尺度上第 i 个方向子带的第 j 个系数, \bar{x}_i 为第 i 个方向子带系数的均值; M 为所选方向子带的数目, N 为每个子带中的系数的总个数, α 为阈值调节因子。

2.4 视觉感知系数归一化

分别计算参考图像和失真图像各方向子带中视觉感知系数所占的比重。

$$P_R(n) = \frac{R_T(n)}{R(n)} \quad (4)$$

$$P_D(n) = \frac{D_T(n)}{D(n)} \quad (5)$$

其中 $R_T(n)$ 和 $D_T(n)$ 分别为参考图像和失真图像的第 n 个子带中视觉感知系数的个数。 $R(n)$ 和 $D(n)$ 为其对应子带中所有系数的总个数。

2.5 图像质量评价测度

为减小数据传输量，将视觉感知阈值 T 和 $P_R(n)$ 作为参考图像的特征信息传输到接收端， $P_D(n)$ 在接收端求得。然后由式(6)统计所选子带中 $P_R(n)$ 和 $P_D(n)$ 的绝对差和 S

$$S = \sum_{n=1}^L |P_R(n) - P_D(n)| \tag{6}$$

L 为被选取子带的总个数，实验中取 $L=24$ 。据此定义图像质量的评价测度 Q

$$Q = \frac{1}{1 + \log_2(S/Q_0 + 1)} \tag{7}$$

其中 Q_0 为 Q 动态范围的调节因子，实验中取 $Q_0 = 0.1$ 。

综上所述，本文提出了一种统计参考图像在失真过程中视觉感知系数变化的方法。在发送端，首先对图像进行小波分解，为使图像的不同尺度对视觉感知系统具有相同的感知意义，对图像分解后的各子带系数分别进行了CSF子带加权。根据视觉感知特性定义视觉感知阈值，传输该视觉感知系数在子带中的比重。减小了在接收端传输数据量。在接收端，对失真图像进行同样的处理，得到失真图像中各子带中视觉感知系数在子带中的比重。比较参考图像和失真图像视觉感知系数在子带中的比重的变化情况，得到图像质量的评价测度。本文的系统模型如图3所示。

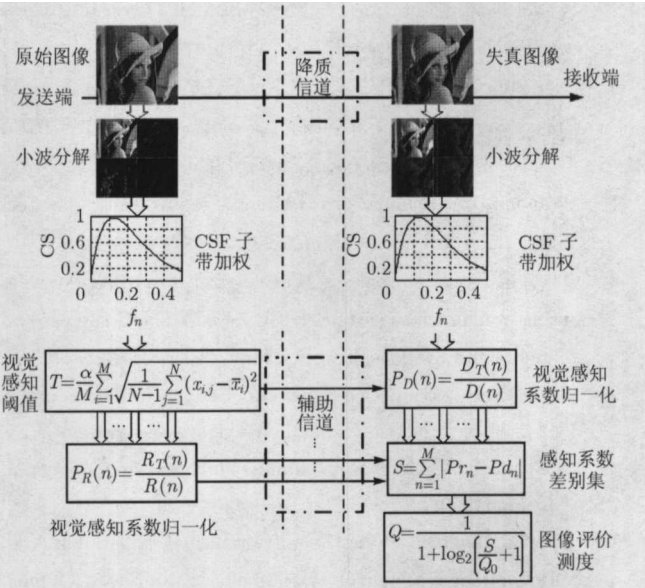


图3 本文提出方法系统模型

3 实验结果与分析

本文使用 LIVE 图像质量评估数据库^[10]进行客观评价方法与主观感知的一致性实验。在这个数据库中 29 幅高分辨率的 RGB 图像被压缩成 175 幅 JPEG 图像和 169 幅 JPEG2000 图像。其中还包括他们的原图像和主观评价数据和其它详细信息。

3.1 客观评价实验

首先，计算各失真图像由客观测度得出的客观成绩，然后使用文献[11]定义的 3 个评价标准来对客观预测和主观评价的一致程度进行评估。(1)客观评价成绩与主观评价成绩 MOS(Mean Opinion Score)非线性回归分析后的主客观成绩相关系数 (Correlation Coefficient, CC)，它反映了客观测度预测的精确性。(2)Spearman 等级次序相关系数 (Rank Order Correlation Coefficient, ROCC)，它反映了客观测度预测的单调性。(3)非线性回归分析后的离出率(Outlier Ratio, OR)，即客观成绩中，经非线性回归后超出对应主观成绩 2 倍方差的成绩所占的百分比，它反映了客观测度预测的稳定性。

表 1 PSNR, RR-WISM 和本文方法的主客观一致性评价结果

Model	Type	JPEG			JPEG2000		
		CC	ROCC	OR	CC	ROCC	OR
PSNR	FR	0.9229	0.8905	0.1886	0.933	0.90410	0.0947
RR-WISM	RR	0.9291	0.9069	0.1486	0.9261	0.91350	0.1183
本文方法	RR	0.9587	0.9391	0.0914	0.9487	0.93330	0.0473

本文所用来比较的客观评价方法有部分参考型 RR-WISM 方法^[4]，全参考型的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise-Ratio, PSNR)。实验中，对小波变换采用 Daubechies “db1”滤波器，采用 3 层小波分解。本文提出方法与所比较方法的实验结果见表 1 和图 4。

由表 1 可知，与全参考型方法 PSNR 和部分参考型方法 RR-WISM 相比，本文提出方法有很好的优越性：(1)有更高的预测精确性(更大的 CC)；(2)有更严格的预测单调性(更大的 ROCC)；(3)有更好的稳定性(更低的 OR)。由图 4 可以看出，本文方法相对全参考型 PSNR, RR-WISM 与主观 MOS 值的非线性拟合曲线逼近效果最优。因此本文提出的方法较已有的方法有较大的改进，且与主观评价具有较好的一致性。

3.2 计算代价对比实验

为验证本文方法的计算复杂度，本文设计了计算代价比较实验。利用尺度分别为 512×768、488×610 两组图像进行对比测试。表 2 给出了 RR-WISM 和本文方法对这两组图像进行评价时利用的时间代价。(软硬件平台：PC；OS: Windows XP；CPU: 3.0GHz；RAM: 2G；Software: Matlab 7.0)

表 2 RR-WISM 和本文方法的计算代价比较(单位: s)

图像尺寸	RR-WISM	本文方法
488×610	14.96	0.71
512×768	17.68	1.46

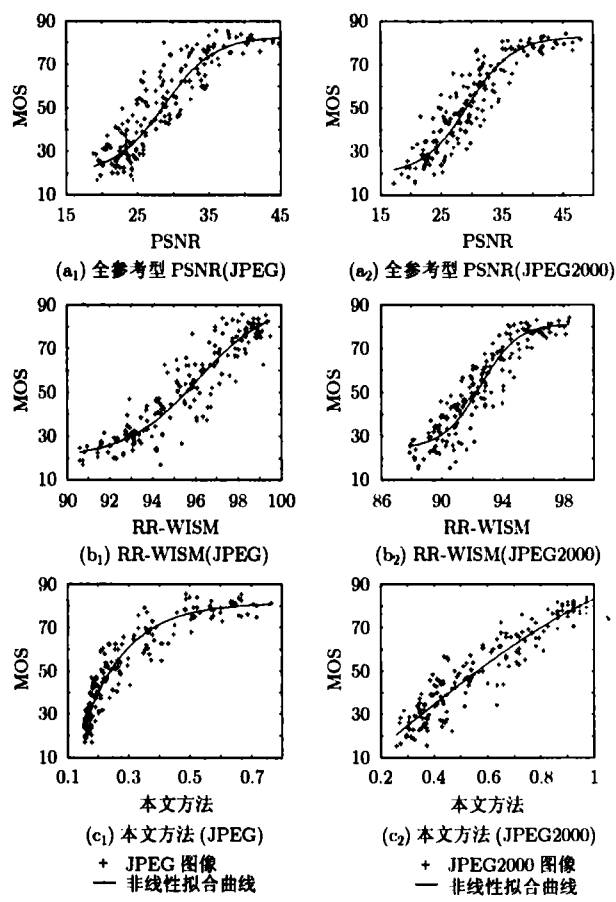


图 4 3 种图像质量评价方法对主观 MOS 值的非线性拟合曲线图

由表 2 可见，在不同的图像尺寸下，本文提出的方法相对 RR-WISM 方法速度都有较大的提升，计算时间消耗非常小。

3.3 传输数据量对比实验

本文方法在特征信息传输时，每幅图像需要传递 10 个图像特征(1 个视觉感知阈值和 9 个视觉感知量)。感知阈值量化为 12bit，视觉感知量值量化为 8bit。而 RR-WISM 方法^[4]需要传输 18 个图像特征或 162bit 的数据，表 3 给出了 RR-WISM 和本文方法需传递数据量比较结果。

表 3 RR-WISM 和本文方法传输数据量比较

	图像特征(单位: 个)	传递数据(单位: bit)
RR-WISM	18 (6+6+6)	162 (6×8+6×8+6×11)
本文方法	10 (9+1)	84(9×8+1×12)

由表 3 可以看出，本文方法需传递的图像特征和相应的数据量是 RR-WISM 方法的一半左右。

4 结束语

本文提出了一种基于小波变换的部分参考型图像质量评价方法，利用视觉感知的变化情况进行图像质量评价，本

方法的评价结果与人类的主观感知有较好的一致性，且计算代价较小，需要传输数据量非常少。

虽然小波分析在逼近具有一维奇异性(或点状起异性)的目标函数是具有最优表示的特性，但在描述图像这样的二维数据时，小波分析还是不够的。下一步，将研究高维函数的最优表示方法，选择更加合适的变换，将其应用于图像质量的评价。

参考文献

[1] Wang Zhou, Wu Guixing, and Sheikh Hamid R. Quality-aware images. *IEEE Trans. on Image on Processing*, 2006, 15(6): 1680-1689.

[2] Wang Zhou, Sheikh Hamid R, and Bovik A C. Objective video quality assessment. In *The Handbook of Video Databases: Design and Applications*, B. Furht and O. Marques, eds., CRC Press, Sept. 2003: 1041-1078.

[3] Video Quality Expert Group, RRNR-TV Group Test Plan Draft Version 1.9. <http://www.vqeg.org>, 2006.

[4] Wang Zhou and Simoncelli E P. Reduced-reference image quality assessment using a wavelet-domain natural image statistic model. *Human Vision and Electronic Imaging X. Proc, San Jose, CA, 2005*, 5666(1): 149-159.

[5] Mallat S. A theory for multiresolution decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.

[6] Nadenau M J, Reichel J, and Kunt M. Wavelet-based color image compression: Exploiting the contrast sensitivity. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2003, 12(1): 58-70.

[7] Wandell B A. *Foundations of Vision*. Sinauer Associates, Inc., Sunderland MA, first edition, 1995.

[8] Imgeun L and Jongsik K. Wavelet transform image coding using human visual system. *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*, Taipei, China, 1994: 619-623.

[9] Miloslavski M and Yo-Sung Ho. Zerotree wavelet image coding based on the human visual system model. *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*, Chiangmai, Thailand, 1998: 57-60.

[10] Sheikh Hamid R, Wang Zhou, Cormack L, and Bovik A C. LIVE Image Quality Assessment Database. [Online]. Available: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>, 2003.

[11] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment. <http://www.vqeg.org/>, 2000.

路文：男，1981年生，博士生，研究方向为视频传输与通信、影像质量评价。

高新波：男，1972年生，博士，教授，主要研究方向为图像/视频处理、模式识别和人工智能。

王体胜：男，1981年生，硕士生，研究方向为图像质量评价。