

中图法分类号: TP391.4 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)01-0033-07

论文引用格式: 金波, 李朝锋, 吴小俊. 结合 NSS 和小波变换的无参考图像质量评价 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 33-39

结合 NSS 和小波变换的无参考图像质量评价

金波 李朝锋 吴小俊

江南大学物联网工程学院, 无锡 214122

摘要: 为了度量不同失真类型的图像质量, 提出一种基于小波多尺度变换的无参考质量评价方法。该方法根据自然场景统计(NSS)模型中小波多尺度变换子带能量在对数域的线性分布规律, 利用失真条件下变化缓慢的高尺度子带能量预测理想图像的低尺度子带能量, 同时对一些不适合失真类型进行能量补偿, 最后通过量化失真图像的预测值和实际值之间的能量差异来度量图像质量。实验结果表明, 该方法与主观评价方法有较好的一致性, 且在总体性能上优于当前相关文献的方法。

关键词: 无参考图像质量评价; 自然场景统计模型; 小波变换; 多尺度预测; 能量补偿

No-reference image quality assessment based on natural scene statistics and wavelet

Jin Bo, Li Chaofeng, Wu Xiaojun

School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: To estimate a range of image distortions, a novel no-reference image quality assessment method is proposed based on wavelet multi-scale transformation. For natural scene statistics (NSS) model, the sub-band energy of wavelet transformation has a linear distribution with scale index. According to this principle, the energy distribution of ideal image could be predicted from high-scale sub-band energy, which was not badly affected by distortion. Meanwhile, an effective method for identifying and compensating for an inappropriate distortion was presented. Finally, the quality metric was constructed by quantifying the difference between predicted energy and real energy in degradation image. Experimental results showed that the new method was consistent with subjective assessment and outperformed the other methods.

Key words: no-reference image quality assessment; natural scene statistics (NSS) model; wavelet transform; multi-scale prediction; energy compensation

0 引言

图像处理技术的许多方面,例如获取、压缩、传输、增强和重现过程中,都需要图像质量评价。评价图像质量的方法一般分为主观方法和客观方法两大类。在大多数情况下,人是图像视觉信息的最终接受者,故利用主观实验来评价图像质量是最准确最可靠

的方法,但主观方法费时费力且不易于嵌入自动化系统中,所以目前研究的重点是客观图像质量评价方法。客观质量评价方法根据是否有参考图像又分为3类,全参考质量评价、部分参考质量评价和无参考质量评价。全参考和部分参考质量评价方法都需要参考图像或其部分特征,而在许多实际应用中,参考图像或其部分特征是很难甚至无法得到的,因此无参考图像质量评价方法就显得尤为重要。

收稿日期: 2011-01-17; 修回日期: 2011-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61170120); 江苏省自然科学基金项目(B1: 2011132)

第一作者简介: 金波(1987—)男,现为江南大学物联网工程学院计算机软件与理论专业硕士研究生,主要研究方向为图像质量评价、图像处理。E-mail: wxjinbo@163.com

根据目前相关文献提出的无参考图像质量评价方法,大体可分为 3 类: 1) 指定失真类型。该方法采用量化已知类型的特有失真效果来评价图像质量。如针对模糊失真,在有模糊图像的基础上再加模糊^[1]和测量模糊图像边界延展性^[2]的方法; 针对 JPEG 压缩失真,有计算块边界和块内活跃点^[3]及基于块边界方向统计^[4]的方法。2) 基于训练学习的方法。这类方法首先提取图像的感知特征,然后利用训练学习算法来评价图像质量。例如,基于支持向量机学习的方法^[5]和基于神经网络训练的方法^[6]等。3) 基于自然场景统计模型的方法。该方法假设自然图像或失真图像都只是所有图像信息的一个微小子集,然后试图通过寻找两者之间的差异来评价图像质量。例如, Lu Wen 等人提出的基于 contourlet 域统计联合直方图的方法^[7]、楼斌等人提出的基于 NSS 与 HVS 的 contourlet 域线性预测方法^[8]以及 Moorthy 等人提出的先用分类算法求出失真概率再单独计算失真强度最后加权求和的方法^[9]等。

第 1 类方法明显的缺陷在于需要知道特定的失真类型,这使得其很难应用于多种失真类型。第 2 类方法的缺陷在于它依赖于有效的特征提取算法,且需要主观得分来训练学习,这都限制了它的推广应用。第 3 类方法是很有前途的发展方法,它依赖于广泛的图像统计模型和其可靠的推广性。但文献[7]的方法仍然需要主观得分来进行学习训练,文献[8]的方法也仅适用于 JPEG2000、白噪声、高斯模糊 3 种失真类型,文献[9]的方法则需要一次性预定义大量参数进行失真概率的学习。

本文在分析了上述方法后,提出一种基于小波变换域图像统计的无参考质量评价方法。该方法利用失真条件下变化缓慢的高尺度子带能量预测理想图像的低尺度子带能量,同时对一些不适合失真类型进行能量补偿。最后通过量化预测值和实际值之间的能量差异来度量失真图像质量,并由此得到对 JPEG2000 压缩、JPEG 压缩、高斯噪声、高斯模糊和 FastFading 等多种失真类型的质量评价。

1 图像统计特性

1.1 自然图像统计特性

自然图像是指在自然环境中利用高质量的摄像设备在可见光下得到的图像,包括户外景色、城市风光、人物花草等。由于自然图像本身具有平坦、纹

理、边缘等不同的视觉感知区域,因此它的频率分布是有一定规律的,如文献[10]指出,自然图像的功率谱与空间频率在对数域有近似线性关系。在小波变换(wavelet transform)中,这种关系则表现为图像的小波子带能量在对数域内沿不同分解尺度有线性递减规律,如图 1 和图 2 所示。图 1、图 2 分别为小波子带能量序号示意图和 LIVE 图像质量评价数据库^[11]中 29 幅高质量理想图像子带能量随分解尺度的变化图。其中子带能量为

$$E_{s,\rho} = \frac{1}{T} \sum \log_2 |C_{s,\rho} + \phi| \quad (1)$$

式中 E 为子带能量矩阵, T 为子带像素个数, C 为子带系数, s 为尺度数, ρ 为方向数,为防止对数运算中 C 趋近于 0 时所造成的能量偏差及保证子带能量的线性分布, ϕ 为调整因子,实验中取 0.1。

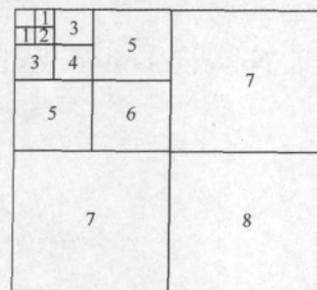


图 1 小波子带能量序号示意图

Fig. 1 Index of wavelet sub-band energy

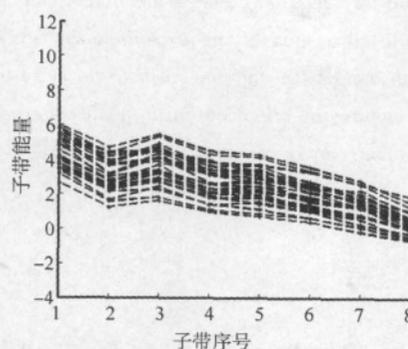


图 2 理想图像子带能量分布图

Fig. 2 Sub-band energy distribution of ideal image

由图 2 能量谱分布可以看出,虽然子带能量大致呈线性分布,但形状并不光滑,不同能量谱之间的强弱(高低)也相差较大。这是因为图像不同区域的小波系数幅值在对数域中变化并不一致^[8]。为提取自然图像的共同特性,本文选取图像中视觉感

知重要区域作为考查对象。具体步骤如下: 首先对图像进行四尺度 bior4.4 小波基变换; 其次对高尺度 (第 4 尺度) 的每一个方向子带, 选取其中绝对值大于子带绝对值均值的系数作为视觉感知重要区域; 然后依次根据不同尺度同方向逐级进行升采样插值, 从而得到其他 3 个尺度的视觉感知重要区域; 最后用该区域的系数代替整个子带的系数。图 3 给出了 LIVE 数据库中 29 幅理想图像的视觉感知重要区域子带能量分布图。与图 2 相比, 它的子带能量线性规律更加明显。

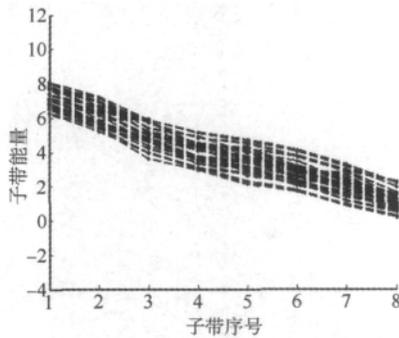


图 3 理想图像视觉感知重要区域的子带能量分布图
Fig. 3 Sub-band energy distribution of ideal image with visual important region

1.2 失真图像统计特性

根据图像失真产生的原因和效果, 我们知道, JPEG2000、高斯模糊、FastFading 等都会不同程度地对图像产生模糊现象。模糊降低了图像的细节信息, 使边缘纹理区域变得平滑。表现在小波能量上, 会呈现低尺度精细部分的子带能量 E 衰减得比较快, 而高尺度粗糙部分的子带能量 E 衰减得比较慢或近似不衰减, 如图 4 (a) (d) (e) 所示。而对于白噪声则增加了与图像信息不相关的细节信号, 表现在小波能量上, 其低尺度精细部分的子带能量 E 会呈上升趋势, 如图 4 (c) 所示。而且随着失真强度的增加, 低尺度能量的变化也逐渐变大。但对于 JPEG 压缩失真, 我们发现它的能量分布几乎没什么变化, 如图 4 (b) 所示。那是因为压缩降低了图像内容的高频信息, 而 DCT 变化所产生的块效应却增加了块边界的高频能量, 因此在整体上其平均能量并未发生大的变化。图 4 给出了 LIVE 数据库中 JPEG2000、JPEG、白噪声、高斯模糊、FastFading 5 种失真类型图像的视觉感知重要区域子带能量分布图, 其中每种失真类型随机选取 20 幅图像。

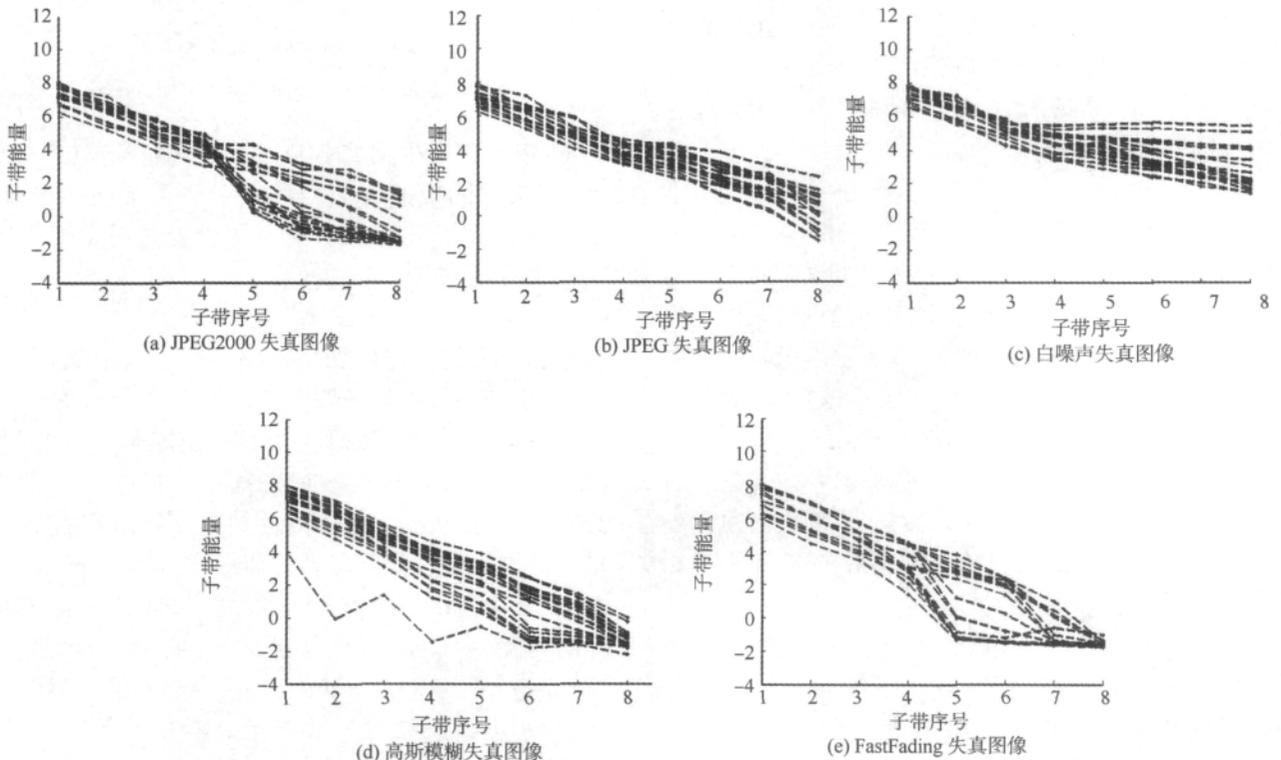


图 4 不同失真类型视觉感知重要区域的子带能量分布图
Fig. 4 Sub-band energy distribution of different distortions with visual important region

2 算法描述

如图 3、图 4 所示,理想图像视觉感知重要区域的子带能量 E 在对数域内具有很强的线性规律,而失真图像却会破坏这种规律。于是我们可以根据线性规律使用高尺度值来预测低尺度值从而近似构造理想图像能量值,同时对一些不适合的失真类型进行补偿,最后通过量化预测值和实际值之间的能量差异来度量失真图像质量。具体步骤如下:

1) 训练 为描述自然图像子带能量的线性关系,需要训练得到高尺度预测低尺度的预测矩阵。首先对 n ($n \geq 10$) 幅高质量的理想图像进行小波变换并提取其视觉感知重要区域,然后根据式(1)计算得到理想图像的子带能量 I ,最后利用最小二乘法得到尺度间的线性预测矩阵 H 。

$$H_s = I_s \cdot I_4^{-1} \quad (2)$$

式中 H_s 为第 s 尺度的预测矩阵; s 为尺度数,取值 3、2、1 分别表示第 3、2、1 尺度; I_s 表示理想图像第 s 尺度的子带能量; I_4 为理想图像第 4 尺度的子带能量。

2) 预测 对失真图像进行小波变换并得到其子带能量 D ,然后用失真图像第 4 尺度的子带能量 D_4 和式(2)中求得的 H_s 系数矩阵预测其相应理想图像的子带能量 P 。

$$P_s = D_4 \cdot H_s \quad (3)$$

3) 调整 如图 4(d) 所示,当图像失真很严重时,高尺度(第 4 尺度)上的子带能量 D_4 也会发生较大变化。如若用这些变化较大的值进行线性预测则会产生较大的误差,如图 5(a) 所示。为防止这种情况,对预测值 P 进行调整

$$\text{IF } \mu_4 \leq U_4 \text{ THEN } P = I_{avg} \quad (4)$$

式中 μ_4 为失真图像 D_4 的子带均值; U_4 、 I_{avg} 分别为步骤 1) 中 n 幅图像和第 4 尺度 I_4 子带均值的最小值和子带能量 I 的平均值。调整后的能量分布如图 5(b) 所示。

4) 噪声失真下的能量补偿 由于噪声增加了图像的高频信息,所以失真图像的子带能量在低尺度会大于理想图像的子带能量(如图 4(c) 所示),而其他失真类型由于模糊效应使得子带能量在低尺度都小于理想图像的子带能量。于是我们可以利用低尺度的实际能量 D 是否大于

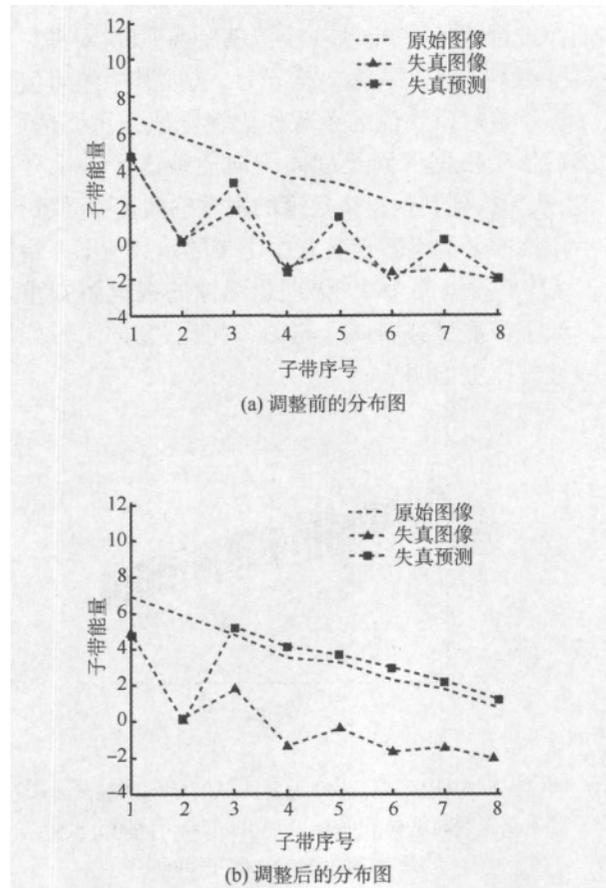


图 5 调整预测子带能量

Fig. 5 Adjust the predicted sub-band energy

预测能量 P 来检测噪声类型。具体操作方法如下:当失真图像的第 1、2 尺度 4 个子带能量中至少有两个大于其相应的预测子带能量时,按下式调整其子带能量

$$D_s = D_s + \delta t_4 \quad (5)$$

式中 δ 为补偿因子,取值 $0 \leq \delta < 1$,实验中取 0.1; t_4 为失真图像 D_4 的子带均值。

5) JPEG 失真下的能量补偿 由图 4(b) 可以发现,能量变化对 JPEG 压缩失真并不明显。为得到 JPEG 的失真强度,本文提出一种基于块内外能量比的方法来对它进行补偿。具体操作方法如下:由于 JPEG 分块大小一般为 8×8 结构^[3],当经过小波降采样分解后,块的大小会变成 4×4 。对于水平方向,块边界能量取第 1 和 4 列,块内部能量取第 2、3 列;对于垂直方向,块边界能量取第 1 和第 4 行,块内部能量取第 2、3 行。最后根据块内外能量比求出 JPEG 失真的能量补偿 J_c 。

水平方向

$$\begin{cases} B_h^{outer} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{\lfloor N/4 \rfloor - 1} |X(i, [1 \ 4] + 4j)| \\ B_h^{inner} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{\lfloor N/4 \rfloor - 1} |X(i, [2 \ 3] + 4j)| \end{cases} \quad (6)$$

竖直方向

$$\begin{cases} B_v^{outer} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{\lfloor M/4 \rfloor - 1} \sum_{j=1}^N |X([1 \ 4] + 4i \ j)| \\ B_v^{inner} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{\lfloor M/4 \rfloor - 1} \sum_{j=1}^N |X([2 \ 3] + 4i \ j)| \end{cases} \quad (7)$$

$$J_c = \left| \frac{B_h^i + B_v^i}{B_h^o + B_v^o} - 1 \right| \quad (8)$$

式中 B^{outer} 、 C^{inner} 分别为块边界能量和块内部能量; $X(i \ j)$ 为小波第 1 尺度对角方向系数, M 为行数, N 为列数, J_c 为 JPEG 的能量补偿。

6) 构造尺度间权重 由于人眼对不同空间分辨率的感知程度不同, 因此要对不同频率的子带进行加权, 使加权后的子带能量对人类视觉系统 (HVS) 具有相同的意义。采用文献 [12] 中的 CSF 模型来计算尺度间权重。

$$W_s = 2.6(0.192 + 0.114f_s) \times \exp[-(0.114f_s)^{1.1}] \quad (9)$$

式中 f_s 为归一化的空间频率, 计算公式为

$$f_s = (f_{sx}^2 + f_{sy}^2)^{\frac{1}{2}} f_n \quad (10)$$

f_{sx} 、 f_{sy} 分别为第 s 尺度水平和垂直方向的空间频率; f_n 为采样频率, 实验中取 0.05。

7) 构造无参考质量评价度量 由图 4 可以看

出, 子带能量在 1、2 尺度可以很好地体现图像质量的变化, 于是根据失真图像的预测值 P 和实际值 D 以及式 (8) (9) 得到统计量 Q 。

$$Q = \sum_{s=1}^2 W_s \log_2(1 + |P_s - D_s| w) + J_c \quad (11)$$

式中 w 为每尺度两个方向的权重, 实验中水平竖直方向设为 1.2, 对角方向设为 0.8。

3 实验结果分析和比较

本实验数据采用 LIVE 图像质量评价数据库^[11]。该库有 29 幅原始参考图像和经过 5 种失真处理后的图像, 其中 JPEG2000 压缩失真 169 幅, JPEG 压缩失真 175 幅, 白噪声失真 145 幅, 高斯模糊失真 145 幅, Rayleigh 衰减失真 145 幅, 共 779 幅失真图像。同时该库还提供了每幅图像的主观得分 (DMOS) 作为客观质量评价的标准。为了测试本文提出的客观图像质量评价指标与主观感知的一致性, 实验中选择了以下两种度量准则: 1) 反映客观评价方法预测精确性的线性相关系数 (CC); 2) 反映客观评价成绩预测单调性的 Spearman 等级次序相关系数 (SROCC)。

表 1 给出了本文方法与文献 [7-9] 的无参考评价方法的比较结果。从中可以看出, 本文方法适用于 JPEG2000、JPEG、白噪声、高斯模糊和 Rayleigh 衰减 5 种失真类型, 且在总体性能上优于当前相关文献的方法。而且本文方法无须主观 DMOS 值进行训练, 具有更好的推广性。

表 1 性能比较

Table 1 Performance comparison of different methods

性能方法	失真类型						
	JP2K	JPEG	WN	BLUR	FF	ALL	
CC	文献[7]	0.852 7	0.581 0	0.957 6	0.891 7	0.852 7	N/A
	文献[8]	0.906 5	N/A	0.969 4	0.945 4	N/A	N/A
	文献[9]	0.808 6	0.901 1	0.953 8	0.829 3	0.732 8	0.820 5
	本文算法	0.909 9	0.898 2	0.968 3	0.908 1	0.851 9	0.853 6
SROCC	文献[7]	0.823 8	0.562 3	0.600 5	0.856 1	0.823 1	N/A
	文献[8]	0.898 1	N/A	0.950 2	0.934 7	N/A	N/A
	文献[9]	0.799 5	0.891 4	0.951 0	0.846 3	0.706 7	0.819 5
	本文算法	0.885 3	0.866 4	0.957 3	0.889 5	0.838 6	0.849 6

图 6 还给出了本文模型的预测质量值与主观 DMOS 值对比的散点图,由散点图的分布可以看出,本文方法无论在测量单种失真或者多种失真方面都

与主观评价方法有较好的一致性,这也进一步证实本文方法是一种新的有效的无参考图像质量评价方法。

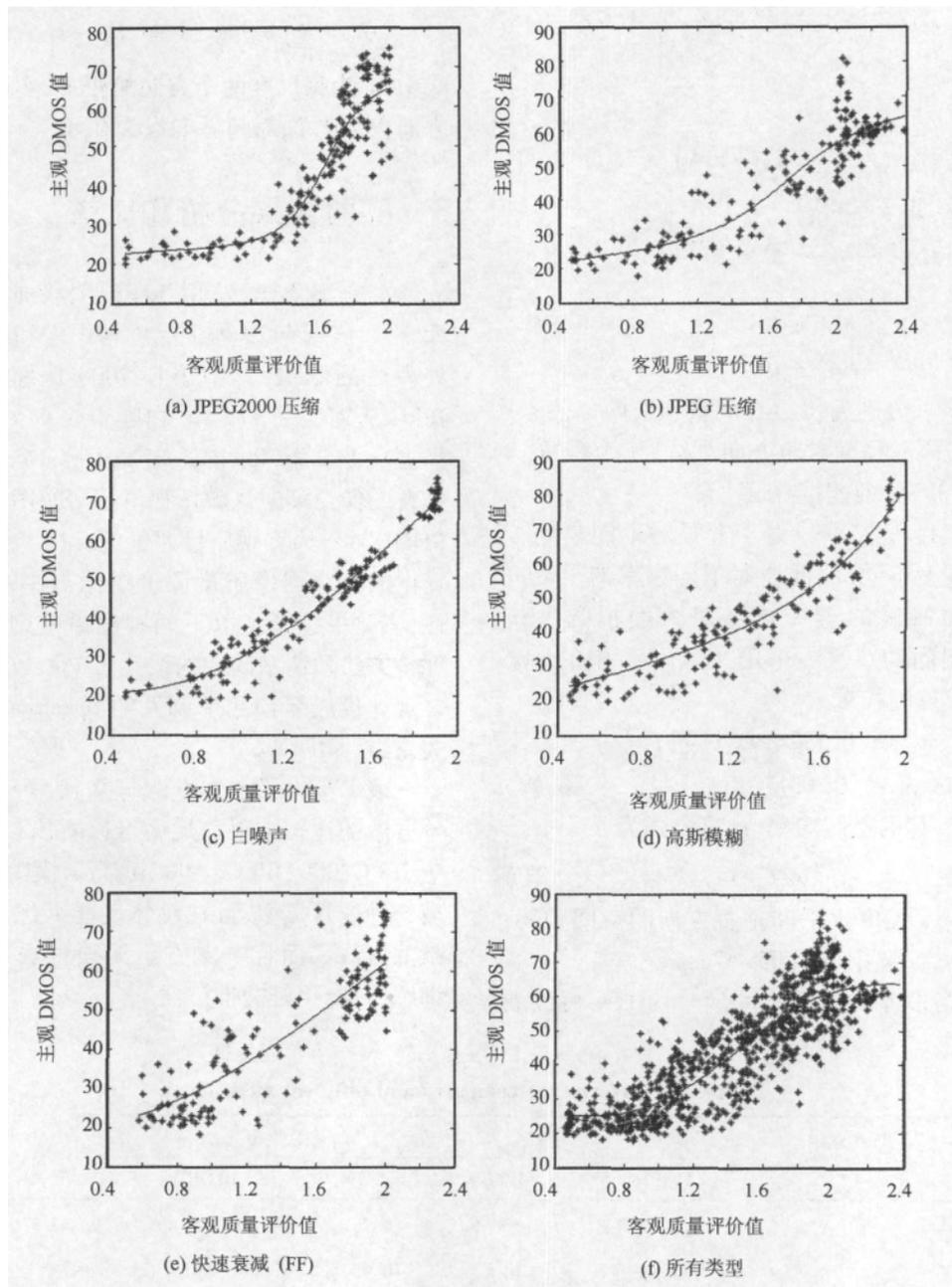


图 6 模型预测值与 DMOS 值对比的散点图

Fig. 6 Scatter of model prediction and DMOS

4 结 论

根据自然图像空间频率在对数域中的线性规律,提出一种基于小波多尺度变换的无参考质量评

价方法。实验表明,该方法与当前其他无参考方法相比具有更好的主观一致性。但由于小波子带能量分布并非严格意义上的线性关系,从而在预测过程中会出现预测误差,如何减少预测误差提高性能是下一步研究的方向。

参考文献(References)

- [1] Crete F ,Dolmiere T ,Ladret P ,et al. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric [C]// Human Visual and Electronic Imaging XII. San Jose ,USA: Proceeding of SPIE ,2007: 649201.
- [2] Marziliano P ,Dufaux F ,Winkler S , et al. A no-reference perceptual blur metric [C]// Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. Genimedia SA ,Switzerland: IEEE Computer Society 2002: 57-60.
- [3] Wang Z ,Sheik H R ,Bovik A C. No-reference perceptual quality assessment of jpeg compressed images [C]// Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing. New York ,USA: IEEE Computer Society 2002: 447-480.
- [4] Pan F ,Lin X ,Rahardja S ,et al. Using edge direction information for measuring blocking artifacts of images [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing 2007 ,18(4) : 297-308.
- [5] Charrier C ,Lebrun G ,Lezoray O. A machine learning-based color image quality metric [C]//Proceedings of Third European Conference on Color in Graphics. Leeds ,UK: Imaging And Vision 2006: 251-256.
- [6] Babu R V ,Perkis A. An hvs-base no-reference perceptual quality assessment of jpeg coded images using neural networks [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Genoa ,Italy: IEEE Computer Society 2005: 433-439.
- [7] Lu W ,Zeng K ,Tao D C ,et al. No-reference image quality assessment in contourlet domain [J]. Neurocomputing ,2010 ,73(4-6) : 784-794.
- [8] Lou B ,Shen H B ,Zhao W F ,et al. No-reference image quality assessment based on statistical model of natural image [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science) , 2010 ,44(2) : 248-252. [楼斌 沈海斌 赵武锋,等. 基于自然图像统计的无参考图像质量评价 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010 44(2) : 248-252.]
- [9] Moorthy K A ,Bovik A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices [J]. IEEE Signal Processing Letters , 2010 17(5) : 513-516.
- [10] Schaaf A ,Hateren J H. Modeling the power spectra of natural images: statistics and information [J]. Vision Research ,1996 ,36(17) : 2759-2770.
- [11] Sheikh H R ,Wang Z. Live Image Quality Assessment Database [EB/OL] (2005 [2010-06-14]. http: // live. ece. utexas. edu/ research /quality.
- [12] Wang T S ,Gao X B ,Lu W ,et al. A new method for reduced-reference image quality assessment [J]. Journal of Xidian University 2008 ,35(1) : 101-104. [王体胜 高新波 路文,等. 一种新的部分参考型图像质量评价方法 [J]. 西安电子科技大学学报 2008 ,35(1) : 101-104.]