

基于子带相似性分析的 JPEG2000 图像无参考质量评价

郭迎春^{*①} 于明^① Zhu Qiu-ming^②

^①(河北工业大学计算机科学与软件学院 天津 300130)

^②(University of Nebraska at Omaha, Omaha, USA 68182-0500)

摘要: 无失真图像中相邻尺度同一方向子带的小波系数是相互关联的, 而编码压缩使得这种相关性随着压缩率而变化的。该文采用余弦相似性来模拟相邻尺度同方向子带图像的相关性, 根据提取的子带相似性特征向量和统计工具来分析人的主观质量评价得分 MOS(Mean Opinion Scores)与子带余弦相似性的关系, 得到了一种新的无参考质量模型。实验结果显示该文提出的 JPEG2000 无参考质量评价方法与 MOS 具有较高的相关性, 而且复杂度低, 运行时间少。

关键词: 图像处理; 无参考图像质量评价; 余弦相似; 统计分析; JPEG2000

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1496-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00890

No Reference Image Quality Assessment Based on Subbands Similarity and Statistical Analysis for JPEG2000

Guo Ying-chun^① Yu Ming^① Zhu Qiu-ming^②

^①(School of Computer Science and Software Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

^②(University of Nebraska at Omaha, Omaha, 68182-0500, USA)

Abstract: For undistorted images, the wavelet coefficients of between-scale coefficients in the same orientation are correlated, while compression coding reduce the correlation. Cosine similarity is used in this work to model the correlation of between-scale subbands, and statistical regression is applied to analyze the relationship between human subjective assessment Mean Opinion Scores (MOS) and subbands cosine similarity. The accurate quality model is obtained by regression analysis. Experimental results show that the proposed no-reference method has a high correlation with the MOS measurement, and a considerably lower computational complexity and less run time.

Key words: Image processing; No-reference Image quality assessment; Cosine similarity; Statistical analysis; JPEG2000

1 引言

多媒体的图像压缩是现代网络发展的关键性技术, 不同的图像压缩方法会产生不同的失真^[1,2], 如何评价失真对用户的影响是至关重要的。直接的方法就是主观评价, 然而其耗时且不能实时实现。客观评价方法有全参考(FR), 部分参考(RR)和无参考(NR)3种。FR要求无失真的图像与失真图像进行比较, RR方法需要部分无失真图像或者是其部分特征来评价图像质量^[3], 在实际应用中参考图像经常不可利用, 因而NR质量评价方法更具有实用价值。

迄今为止, 大部分的NR图像质量评价方法主要检测JPEG压缩图像的方块化效应^[4], JPEG2000图像利用小波进行分解和重构, 根据小波子带相似性或小波系数码块^[5-7]进行编码, 获得了比JPEG编码更高的效率, 但是引起其他的失真, 比如模糊和振铃等。

基于NSS的无参考质量评价是利用自然图像的统计属性预测图像的失真。研究文献[8-10]发现自然图像在其转换空间(如DCT或者小波)统计上有很强的规则性分布, 然而编码压缩破坏了这种规则性, 通过检测这种变化可以定量分析图像质量。在文献[10]中, 作者构造了概率模型, 根据小波各子带子孙及近邻关系来估计小波系数的条件分布, 并发现这种条件分布在log域上对于同一幅图像的各子带是一致的, 且对于不同的图像也是一致分布的。Sheikh

2010-08-19 收到, 2011-03-16 改回

国家自然科学基金青年基金(60203018), 河北省教育厅自然科学基金重点项目(ZD200911)和河北省教育厅自然科学基金项目 2009 年第 2 批第 10 项资助课题

*通信作者: 郭迎春 sguo@mail.unomaha.edu

等人^[8]由此得到启发,提出了利用自然图像在小波域的简化双模态方法,计算后两层分解层在3个方向的小波系数,并发现这些小波系数的共同直方图与 JPEG2000 图像质量高度相关。Zhou 等人^[9]认为文献[8]依赖于图像内容,小波幅值衰减曲线受图像内容影响,他们把图像分为多个块,只选择有纹理的块进一步处理,结果 RMSE 比文献[8]要低。这些方法的缺点是计算复杂,文献[8]整个过程需要 19 个矢量,而文献[9]需要 22 个矢量。

小波图像的金字塔表示显示了各子带在空间和尺度上的结构相似性,而这种相似性可以有效提高图像压缩,这是 JPEG2000 采用小波压缩的原因,但是目前没有任何质量评价方法利用这种相似性来预测失真图像的质量。这里我们提出利用余弦相似性来检查 JPEG2000 图像的失真度,因为无失真的图像在相同方向不同尺度的子图像上具有很好的相关性,而压缩导致了这种相关性的降低。本文提取了相同方向相邻子带的余弦相似系数作为特征,利用回归的方法,经过训练和测试得到了 6 个特征矢量来表示一幅图像的失真度,在各项指标上得到了比文献[8]和文献[9]更好的结果。

2 小波编码方法的简单介绍

2.1 小波变换

JPEG2000 小波变换是可分离的小波变换,一次小波分解得到 4 个更小的子图像: L , H , V 和 D 分别表示原图像的最佳逼近、水平高频分量、垂直高频分量和对角线高频分量。其中, L 子带集中了图像的大部分能量,高层的小波变换都是针对低层变换产生的低频子带(L)再进行变换,这个过程称为二进分解,各子带按照金字塔结构重新排列,见图 1。子带能量随着尺度减小而减少,所以小波系数值一般在高层子带比低层子带更大。

2.2 小波图像子带相似性及基于小波子带的编码

小波子带具有空间相似性,同一方向上各子带

的小波系数是相互关联的,高层子带中大的系数在低层子带的相应空间位置产生大的系数的概率较高;同样,如果小的系数相对于一定门限是不重要的,则同一方向上相应空间位置的低层子带的系数相对于该门限不重要的概率也较高。文献[8]和文献[10]利用低层子带小波系数(子节点)的线性组合来预测高层子带小波系数(父节点)。每个父节点有 4 个子节点,形成小波四叉树关系。

由于小波具有子带相似性,一些编码方法利用此性质减少子带的相关性来提高压缩率,例如 EZW^[5], SPIHT^[6]及 EBCOT^[7]利用小波子带的相关性,显著提高压缩效果。这些编码方法均采用比特平面编码,渐进传输,编码过程可以根据压缩比要求在任意一点截止。低层的小波具有较低的能量,小波系数值也较小,在一定压缩率下不被编码的概率较大,而这些小波系数是高频分量,缺失高频分量易造成模糊和环状失真, JPEG2000 中的模糊失真这是由于高频分量的减弱造成的,环状失真是由传输编码中高频系数的量化引起的。图 2(a)是比特率为 0.78 bpp 的 JPEG2000 “buildings” 图像,图 2(b)是小波分解并按金字塔结构排列的小波子图像。

从图 1(b)和图 2(b)对比可以看到 JPEG2000 压缩影响了低层子带的相似性。压缩率越高,相似性越低,由此我们考虑用小波子带图像的相似性来量化失真的程度。

3 小波子带图像余弦相似性

余弦相似性是通过两个 N 维矢量的余弦角来测量其相似性。给定两个矢量分布 A 和 B , 余弦相似角 θ 用点乘和幅值表示为

$$C_{A-B} = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (1)$$

符号“ \sim ”表示两个矢量的相似,这里用余弦相似性来检查相同方向相邻子带的相似性。

图像一次小波分解可以得到 4 个子图像,每个

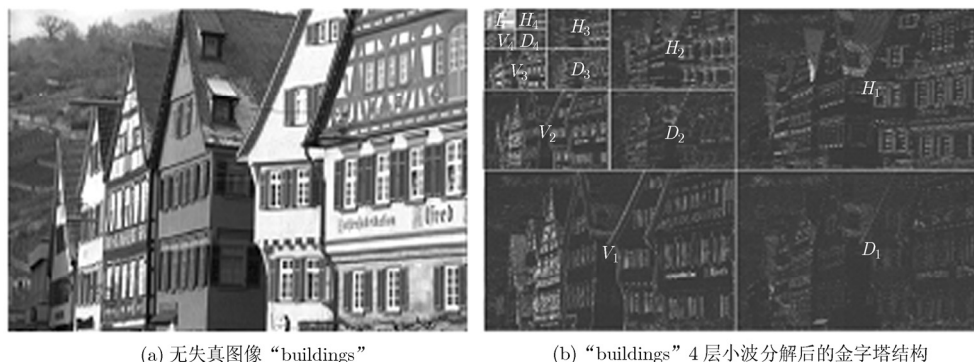
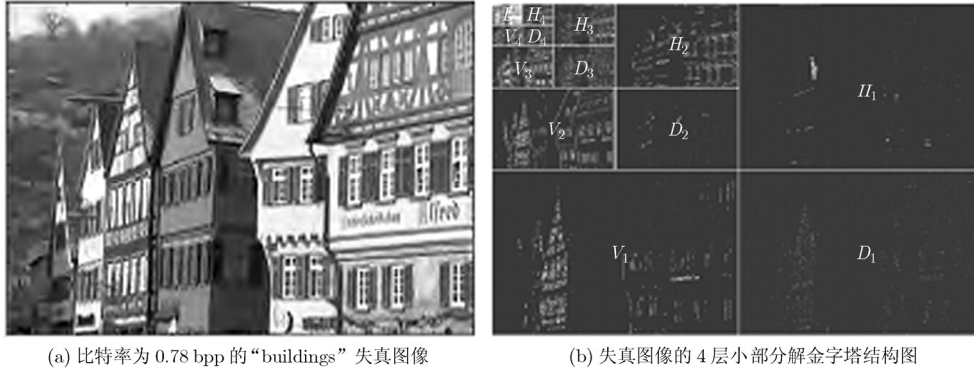


图1 无失真图像“buildings”及其4层小波分解图



(a) 比特率为 0.78 bpp 的“buildings”失真图像 (b) 失真图像的 4 层小波分解金字塔结构图

图2 失真图像“buildings”及其 4 层小波分解结构图

子图像是待分解图像的四分之一，在子带 $L_k, H_k, V_k,$ 和 D_k (父节点)中的每个像素对应于子带 $L_{k-1}, H_{k-1}, V_{k-1}$ 和 D_{k-1} (子节点)中相应位置的 4 个像素，如图 1(b)及图 2(b)所示。

设 H_k 的长宽分别为 M 和 N ，则 H_{k-1} 的长宽则为 $2M$ 和 $2N$ ，且 $H_k(i, j)$ 与 $H_{k-1}(2i, 2j), H_{k-1}(2i+1, 2j), H_{k-1}(2i, 2j+1)$ 和 $H_{k-1}(2i+1, 2j+1)$ 是子孙关系。 $C'_{H_k-H_{k-1}}$ 表示 H_k, H_{k-1} 的相似系数，由于 H_k 大小是 H_{k-1} 的四分之一，在计算时将 H_k 每个元素重复 4 次与 H_{k-1} 中相应子节点对应做内积，重写式 (1)，得到 H_k, H_{k-1} 的子带余弦相似系数。

$$C'_{H_k-H_{k-1}} = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left\{ H_k(i, j) \cdot \left[\sum_{l=0}^1 \sum_{m=0}^1 H_{k-1}(2i+l, 2j+m) \right] \right\}}{\sqrt{4 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} H_k(i, j)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{2M-1} \sum_{j=0}^{2N-1} H_{k-1}(i, j)^2}} \quad (2)$$

同理，可以计算 V_k 与 V_{k-1} 及 D_k 与 D_{k-1} 的子带余弦相似系数。

本文统计了 LIVE¹⁾, TID2008²⁾和 CSIQ³⁾图像数据库中无失真的 84 幅图像及失真的 395 幅 JPEG2000 图像，得到无失真图像的余弦子带相似系数分布在 0.6 左右，失真图像的余弦相似系数随着压缩率的增大而减小。文献[5]也用实验证明了父节点小波系数的平方和子节点小波系数平方的相关性在 0.2~0.6 之间。对于图像，如果父节点为重要系数，其中 4 个子节点中有 1 个子节点为重要系数，则认为图像子带相似度接近于 1，这里我们对式(2)

引入一个提升因子 $\sqrt{2}$ ，得到式(3)用以弥补式(2)中只有 4 个子节点均为重要系数才能保证子带余弦系数为 1 这种在小波图像子带相似应用的不足。

$$C_{H_k-H_{k-1}} = \sqrt{2} C'_{H_k-H_{k-1}} \quad (3)$$

这里 $C_{H_k-H_{k-1}}$ 值越大则 H_k 与 H_{k-1} 的相关性越大。同理 $C_{V_k-V_{k-1}} = \sqrt{2} C'_{V_k-V_{k-1}}, C_{D_k-D_{k-1}} = \sqrt{2} C'_{D_k-D_{k-1}}$ 。

4 基于子带相似性的图像质量评价

4.1 无参考质量评价特征矢量

图 3 是 LIVE 数据库中 29 幅无失真图像的相邻子带余弦相似系数，其中符号“ ∞ ”表示两个子带的相似，例 $H_{4 \sim 3}$ 表示水平方向上第 4 层子带与第 3 层子带的余弦相似。

从图 3 可以看到第 1 层与第 2 层子带的余弦相似性($H_{2 \sim 1}, D_{2 \sim 1}$ 和 $V_{2 \sim 1}$)在所有图像中具有有一致性，而其他层由于图像内容的影响而不具有这种性质。

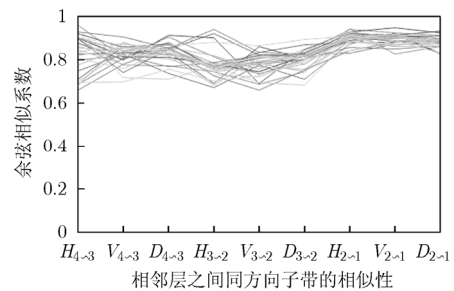


图 3 29 幅无失真图像的余弦子带相似图

图 4 是图像“buildings”经过 JPEG2000 压缩后不同压缩率下图像的子带余弦相似系数图。MOS 值介于 0 到 100, 0 是失真最大的图像，而 100 为无失真图像。在不同 MOS 值下，高阶的分解层子带相似系数趋于一致，失真主要影响低阶分解层的子带相似性，随着图像质量的降低子带相似系数值下降，这是由小波分解的比特平面编码方法造成的。

由于水平和垂直子带在同一尺度层中对图像质量具有相同的重要性，本文将水平和垂直方向上最

¹⁾<http://live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm>

²⁾<http://www.ponomarenko.info/tid2008.htm>

³⁾<http://vision.okstate.edu/index.php?loc=csiq>

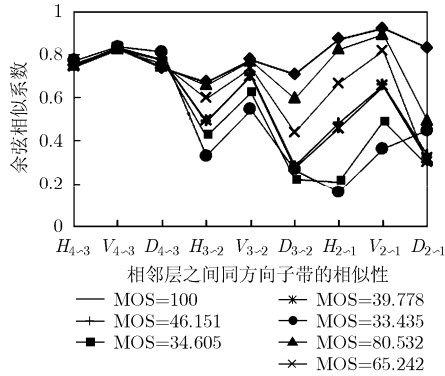


图4 失真图像的子带余弦相似性图

小的子带余弦相似系数作为无参考质量评价的一个特征(见式(4)), 把对角方向上的余弦相似系数单独作为一个特征, 因此对于 4 层小波分解有 6 个特征值来评价图像质量。

$$H/V_{A_1-A_2} = \min(H_{A_1-A_2}, V_{A_1-A_2}) \quad (4)$$

4.2 回归分析及实验结果

小波子带的余弦相似系数是独立的, 可以考虑它们之间与 MOS 有线性关系, 预测的图像质量应是它们的线性组合。

假设 $x_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 和 y 分别是训练集中的特征矢量和 MOS 值, p 是特征个数。多个矢量线性回归模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p \quad (5)$$

$\beta_i (i = 0, 1, \dots, p)$ 是回归系数, 表示每个独立矢量相对于 y 的独立分布, 在本文中为余弦相似系数的权。

本文利用 Regress 和 Stepwise 多元线性回归分析来模拟 MOS 与子带余弦相似间的关系。多元线性回归方程中当涉及的变量较多时, 这些变量可能并不是全部都对 MOS 值有显著影响。通常情况下, 希望将有统计学意义的变量引入回归方程, 以使方差更加简单, 容易解释; 更重要的是把不显著的变量排除后可以使残差的均方减小。实验中采用的是 LIVE 图像数据库中 JPEG2000 压缩的 169 幅失真图像, (为了分析方便, 只在图像的亮度分量中计算, 先把所有图像归一化到 RMS=1, 再利用小波滤波器 BIOR4.4 分解为 4 层, 所有小波系数取绝对值)。169 幅失真图像被分为两组, 一组 84 幅作为训练, 另一组 85 幅作为测试, 通过分析后得到 95%置信区间内各特征矢量回归系数值, 预测的图像质量值 MOS_{Q1} 值介于 0 到 100, MOS_{Q1} 与各特征矢量的关系为

$$MOS_{Q1} = \beta_0 + \beta_1 D_{4-3} + \beta_2 H/V_{3-2} + \beta_3 D_{3-2} + \beta_4 H/V_{2-1} + \beta_5 D_{2-1} \quad (6)$$

这里 $\beta_0 = 40, \beta_1 = -47, \beta_2 = 16.34, \beta_3 = 37.43, \beta_4 = 50.1, \beta_5 = -11.24$ 。 MOS_{Q1} 与 MOS 的相关性为 0.926, Sheikh 在 LIVE 的网站上提供了该文献的 MATLAB 程序⁴⁾, 其相关系数为 0.907。

图 5(a)和 5(b)分别显示了两种方法中预测的质量与 MOS 关系的散点图。当一幅图像中子带相似系数值中有低于 0.2 者, MOS 值通常不超过 40, 此时 MOS_{Q1} 和文献[8]中方法与 MOS 的 Pearson 相关值分别为 0.475 和 0.495, 这意味着图像质量较低时预测的值通常不是很准确, 这也同人的主观判断在图像质量较差时评判图像差异较大类似。为了提高预测精度, 本文增加了每幅图像中最小余弦相似系数作为其中的一个特征, 重新进行 Regress 和 Stepwise 分析, 增加的特征项对拟合的 MOS_{Q2} 有重要影响, 而常量项的影响相对减弱, 因此去除了式(6)中的常量, 得到新的图像质量评价公式 MOS_{Q2} :

$$MOS_{Q2} = \beta_1 D_{4-3} + \beta_2 H/V_{3-2} + \beta_3 D_{3-2} + \beta_4 H/V_{2-1} + \beta_5 D_{2-1} + \beta_6 \text{Min}_{Q1} \quad (7)$$

其中 $\text{Min}_{Q1} = \min(D_{4-3}, H/V_{3-2}, D_{3-2}, H/V_{2-1}, D_{2-1})$, $\beta_1 = 5.62, \beta_2 = 14.63, \beta_3 = 30.95, \beta_4 = 37.21, \beta_5 = -26.54, \beta_6 = 38.56$ 。

利用式(7)得到的余弦相似系数低于 0.2 的低质量图像与 MOS 的相关性提高到 0.64, MOS_{Q2} 与 MOS 的散点图见图 5(c)。VQEG 提出了 4 个标准: 平均平方根误差(RMSE), Pearson 相关系数(PCC), Spearman 秩相关系数(SCC)和离出率(OR)来评价预测的客观数据与相应主观数据的一致性。表 1 是本文提出的 MOS_{Q2} 与文献[8]中的 Q 结果比较。

表 1 文献[8]中 Q 与 MOS_{Q2} 的结果对比

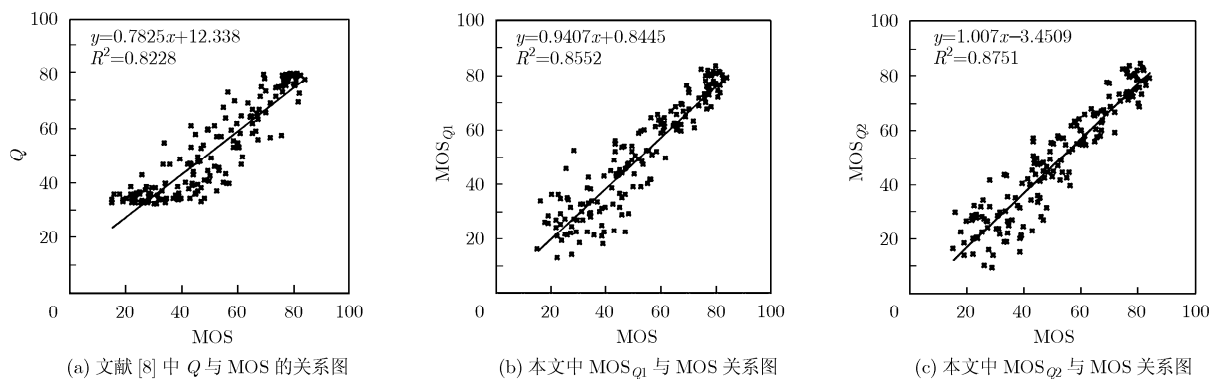
质量预测算法	RMSE	PCC	SCC	OR	运行时间(s)
文献[8] Q	8.130	0.907	0.902	0.089	1.18
MOS_{Q2}	7.955	0.940	0.932	0.094	0.47

从表 1 中可以看到本文的方法在各项指标中均优于文献[8]提出的方法, 其中最显著的就是运行时间大大减少, 本文的方法更适于实时运算, 全部程序采用 MATLAB 编程, 在 Windows Vista, 2.53 GHz 计算机上运行得到结果。

5 结论

通过研究小波子图像余弦相似性及其与 MOS 的相关性, 本文提出了一种新的 JPEG2000 图像无

⁴⁾ <http://live.ece.utexas.edu/research/quality/subjective.htm>

图5 Q , MOS_{Q1} 和 MOS_{Q2} 与 MOS 的关系比较

参考质量评价方法。该方法没有模拟JPEG2000压缩图像的具体失真类型,而是利用子图像余弦相似系数作为特征,用回归分析得出无参考图像质量评价公式,实验证明该方法简单有效,比文献[8]和文献[9]执行效果更好,尤其运算时间大幅减少。文献[9]只给出了RMSE值为7.86(测试失真图像),其他数据无法参考。文献[8]和文献[9]分别采用了每幅图像19个及22个特征来训练提出的评价机制,增加了模型的复杂度,相应地影响了模型的精确度,本文只采用6个特征与主观评价得分MOS进行拟合,得到了更为有效的质量评价方法,可以实时实现无参考图像质量预测。

参考文献

- [1] Suresh S, Venkatesh Babu R, and Kim H J. No-reference image quality assessment using modified extreme learning machine classifier [J]. *Applied Soft Computing*, 2009, 9(2): 541-552.
- [2] Liang L, Wang S, and Chen J, et al. No-reference perceptual image quality metric using gradient profiles for JPEG2000[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2010, 25(7): 502-516.
- [3] Zeng K and Wang Z. Temporal motion smoothness measurement for reduced-reference video quality assessment[C]. 2010 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), Dallas, Texas, March 2010: 1010-1013.
- [4] Suthaharan S. No-reference visually significant blocking artifact metric for natural scene images[J]. *Signal Processing*, 2009, 89(8): 1647-1652.
- [5] Shapiro J. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445-3462.
- [6] Said A and Pearlman W. Image compression using the spatial-orientation tree[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Chicago, May 1993: 279-282.
- [7] Taubman D. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(7): 1158-1170.
- [8] Sheikh H R and Bovik A C. No-reference quality assessment using natural scene statistics: JPEG2000[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(11): 1918-1927.
- [9] Zhou J, Xiao B, and Li Q. A no reference image quality assessment method for JPEG2000[C]. IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Hongkong, June 2008: 863-868.
- [10] Buccigrossi R W and Simoncelli E P. Image compression via joint statistical characterization in the wavelet domain[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(12): 1688-1701.

郭迎春: 女, 1970年生, 副教授, 研究方向为数字图像处理、图像视频编码压缩、图像视频质量评价。

于明: 男, 1964年生, 教授, 研究方向为图像处理与模式识别、智能媒体接口及生物信息识别。

Zhu Qiu-ming: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为数据挖掘、人工智能、数字图像处理、神经网络。