

人眼视觉特性压缩图像质量评估方法

田金沙¹ 韩永国¹ 吴亚东^{1, 2} 赵小乐¹

(1. 西南科技大学计算机科学与技术学院 四川绵阳 621010;
2. 西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室 四川绵阳 621010)

摘要:图像质量评价是图像和视频处理系统中的基本算法。通过对人眼视觉特性及图像的边缘特征的分析研究,认为梯度矢量更能反映图像边缘的本质特性,结合人眼视觉的多尺度特性及视觉感兴趣区域的加权,提出了一种基于梯度矢量的压缩图像质量评估方法。仿真实验表明,该评估方法符合人眼的视觉特征,与主观评价结果具有更好的一致性,可广泛应用于JPEG和JPEG2000压缩图像质量评估。

关键词:图像质量评估 人眼视觉(HVS) 压缩图像 梯度 JPEG JPEG2000

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8755(2015)03-0062-09

HVS Based Compressed Image Quality Assessment Method

TIAN Jin - sha¹, HAN Yong - guo¹, WU Ya - dong^{1,2}, ZHAO Xiao - le¹

(1. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, Sichuan, China; 2. Fundamental Science on Nuclear Wastes
and Environmental Safety Laboratory, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang 621010, Sichuan, China)

Abstract: Image quality assessment is fundamental importance for image or video processing system. Through the research and analysis human visual system features and the edge feature of image, this paper consider that the gradient vector better reflect the essential characteristics of image edge feature. Combined with the multi - scale feature and weighted interest region of human visual system, a new compressed image quality assessment method based on gradient vector is proposed. The proposed method is simple in calculation. Simulation results upon image databases show that the evaluation method is in accordance with characteristics of human visual system and consistency with subjective evaluation results better. In addition the method can be widely used to assess the quality of JPEG and JPEG2000 compressed images.

Key words: Image quality assessment; Human visual system (HVS); Compressed image; Gradient; JPEG; JPEG2000

结合人眼视觉系统的特性进行图像压缩的方法
和技术已成为图像压缩编码技术的发展方向^[1-2]。

而与此同时,要建立起更理想、更符合图像实际质
量的图像质量评价方法也必须依据人眼的视觉、心

收稿日期:2015-04-01

基金项目:国家自然科学基金(61303127);核废物与环境安全国防重点学科实验室项目(13zxnk12);中国科学院“西部之光”人才培养计
划项目(13zs0106)。

作者简介:田金沙,女,硕士研究生。通讯作者:吴亚东(1979—),男,教授,研究方向为图形图像处理、信息可视化及人机交互。E-mail:
wyd028@163.com

理特性,把客观与主观评价方法有机结合起来。大量的研究表明,基于人眼视觉(HVS)的方法^[3-5]评价结果明显优于传统方法。

由于人是图像的最终受体,利用人眼视觉特性进行质量评估可以取得跟人眼感知一致的评价结果,因此基于人眼视觉特性的评估方法被广泛关注^[6]。Zhou Wang 等人认为人眼的主要功能是从视野中提取结构信息,提出了结构相似性理论和结构相似度(SSIM, Structural Similarity Image Measure)指标^[3]。由于 SSIM 算法简单、准确性较好,提出后受到了广泛关注。但是 SSIM 在交叉失真类型和失真严重时的准确率还不够好,在结构相似性理论基础上,很多人对其做了改进。例如 Anmin Lin 等^[4]提出的基于梯度相似的图像质量评估标准中表示,梯度信息是理解图像内容的重要信息,梯度信息的改变可以捕获结构和对比度的改变,利用梯度和亮度失真计算图像质量。杨春玲等人^[5]认为人眼对边缘信息敏感,利用梯度幅度和方向表示边缘信息,提出了基于边缘的结构相似度评估方法。对于压缩失真图像质量的评估,大部分算法^[7-13]主要针对压缩产生的某种失真的程度,包括块效应失真压缩图像、振铃效应失真压缩图像。例如 Wang 提出衡量块边缘差异方法^[8]来评价块效应失真;Lee 提出了仅依靠块边缘特征检测的图像块效应程度检测方法^[9],基于块效应因子给出质量评估得分体系。Remi Barland 等^[10]通过测量平均边缘过渡宽度和模糊的方法来预测 JPEG2000 压缩图像质量。H. Tong 等^[11]结合空间振铃和模糊效应的特点,预先归类为失真或完好,对边缘点进行主成分分析来预测图像质量。但是这些算法对评估其他的失真类型的性能会明显下降。而目前 JPEG 标准和 JPEG2000 标准在图像处理应用中都非常广泛,需要一种对两种压缩失真都能很好评判的质量评估方法。参考文献 [14] 中在平均误差的基础上提出在图像空间频率域计算平均误差可以提高算

法性能。Z. A. Seghir 等^[15]利用人眼视觉的兴趣区域对参考文献 [5] 的算法改进,得到一种与主观质量评分一致性更好的压缩图像质量评估方法。Ji Shen 等^[16]根据自然图像的统计特性即图像的频域系数直方图峰值坐标的不变性,提出一种无参考自然图像质量评估方法。但这些方法不能准确的预测压缩图像的质量,有些算法计算复杂度较高,很难在实际中应用。

本文在以上工作的启发下,结合人眼视觉的多尺度特性及人眼感兴趣区域,提出了一种新的压缩图像质量评估方法。

1 人眼视觉特性压缩图像质量评估方法

图像的边缘是图像最基本的特征,是人眼识别目标的重要信息。许多研究发现,梯度信息能较好反映图像的边缘纹理特征。图像任一点的梯度是一个二维矢量,即在同一个位置沿两个垂直方向的像素的差分。梯度矢量的失真往往会导致它的梯度方向或幅值上的变化。这样我们判断图像的质量失真可以按照图像梯度矢量的失真来测量。本文同时又考虑了人眼视觉感知的多尺度特性,将输入图像分解到不同的分辨率尺度。对不同分辨率图像提取梯度信息,计算梯度矢量相似度构造图像质量分布图(MGV)。又由于人眼对图像不同区域的关注度不同,利用感知池策略对质量分布图进行加权合并得到相应尺度的图像质量指标。不同的尺度分配不同的权重,使得算法更加符合实际的视觉感知结果。

算法整体框架如图 1 所示,图中 Ref, Dis 分别表示原始图像及失真图像。首先对原始图像及失真图像进行人眼视觉的多尺度分析,进行 2 倍下采样操作,产生 n 个尺度图像。根据不同尺度内的图像计算梯度矢量相似度分布(MGV),同时求解视觉感知加权矩阵 W,二者相乘得到相应尺度的质量指标,最后对不同尺度加权生成质量指标 IQA。

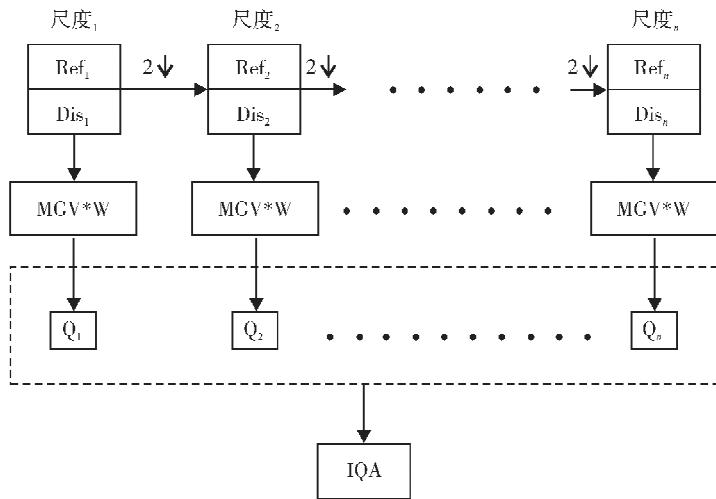


图1 人眼视觉特性压缩图像质量评估方法框架
Fig. 1 HVS based compressed image quality assessment framework

1.1 人眼视觉感知多尺度分析

图像细节的感知取决于图像信号的采集密度和图像到观察者的距离。在实践中,人对图像的主观感知质量评价值随着这些因素的变化而变化。多尺度方法包含不同分辨率下的图像细节。尺度空间^[17]满足视觉不变性,将传统的单尺度图像信息处

理技术纳入尺度不断变化的动态分析框架中,更容易获取图像的本质特征。许多对于质量评价算法的研究表明:结合图像的多尺度信息会使得质量评价算法拥有更好的人类感知一致性^[18]。对于参考图像和待测图像,本文采用隔点下采样操作,共产生了5个尺度,如图2所示。

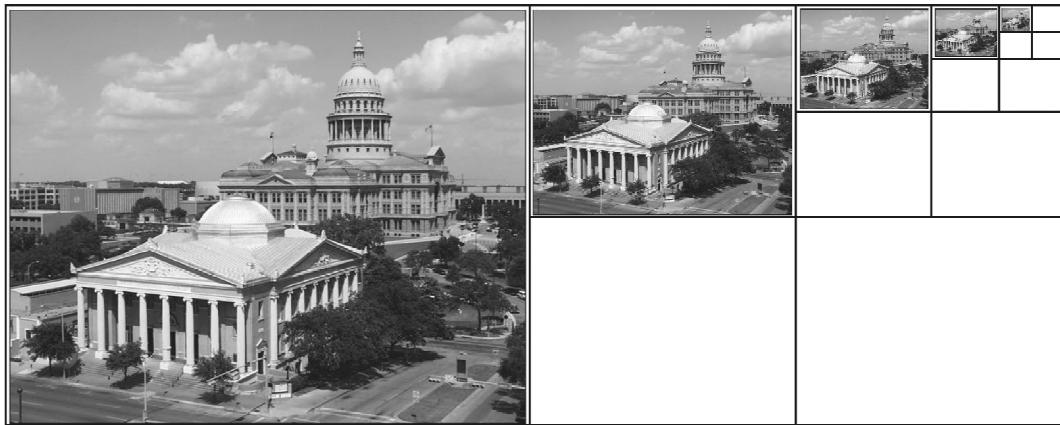


图2 图像的多尺度表示
Fig. 2 Multi - scale image

1.2 图像梯度矢量相似度分布

1.2.1 梯度矢量的获取

在本文中,采用 Sobel 算子对图像进行梯度计算,如图3所示。对于图像中的每一个像素 $P_{i,j}$,可以通过 Sobel 算子定义它的梯度信息向量 $V_{i,j} = \{dx_{i,j}, dy_{i,j}\}$ 。其中, $dx_{i,j}$ 和 $dy_{i,j}$ 分别由图3中的水平边缘算子 H 和垂直边缘算子 V 得到。

1.2.2 基于梯度矢量的相似度生成质量分布图

图像中的每个像素点的特征用向量来表示,计算参考图像与待测图像对应像素点的向量相似度,

$\begin{matrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{matrix}$
垂直边缘算子 V	水平边缘算子 H

图3 Sobel 算子
Fig. 3 Sobel operator

生成待测图像的质量分布图。向量相似度的测度方法^[19]主要有 Minkowsky 距离、夹角余弦法、相关系数法、广义 Jaccard 系数法等。经过对上述算法在标准图像库中的实验结果对比发现采用广义 Jaccard 系数法的算法评价与主观评价的一致性最好,故本文采用广义 Jaccard 系数法计算两个向量之间的相似度。计算两个向量 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 的广义 Jaccard 系数公式如下:

$$\text{sim}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i} \quad (1)$$

在实验中,取梯度向量相似度的绝对值保证图像像素点质量为正,生成的质量分布图每一点的取值范围在 0~1 之间,且满足交换性,输入参考图像和待测图像的顺序对评估结果没有影响。

图 4(a)~图 4(e)更直观地展示了图像的质量分布图。其中图 4(a)为原图,图 4(b)和图 4(c)分别为原图经过 JPEG 压缩和 JPEG2000 压缩处理后的待测图像,图 4(d)和图 4(e)则分别为待测图像图 4(b)与图 4(c)的质量分布图。质量分布图中越亮的点表示质量越好,黑色区域表示图像失真严重区域。从图中可以看出图像的梯度矢量特征可以很



图 4 图像质量分布图

Fig. 4 Image quality maps

好地捕获压缩图像的失真区域。

1.3 视觉感知加权矩阵

研究表明人眼对图像不同区域的关注度不同,人眼越关注的区域对图像质量评估的影响就越大。很多研究者由此提出了不同的视觉感知池策略^[20~21],主要有基于 Minkowsky 距离的感知池、局部质量权重感知池、基于图像内容的感知池策略和基于视觉显著区域的感知池策略等。实验表明使用感知池策略对图像质量分布图加权可以提高预测图像质量的准确度。本文采用效果较好且运算速度较快的基于图像内容的感知池策略。

基于图像内容的感知池策略^[20]认为感知的图像信息内容是图像经过视觉通道获得的,视觉通道常用加性高斯噪声模型模拟。假设 S 表示原始信号, C 表示通道的噪声信号。由信息论中的结论可知接收到的信号可用以下公式得出:

$$I = \frac{1}{2} \log \left(1 + \frac{S}{C} \right) \quad (2)$$

在图像中,利用局部区域像素标准差表示图像能量信号,本方法实现中取 11×11 像素区域。 σ_x 和 σ_y 分别表示参考图像和待测图像的像素能量。值越大表示信息越多,人眼越关注。 C 为高斯噪声模型标准差,其值参考文献[26]。权重函数 W 用以下公式给出:

$$W(x, y) = \log \left[\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{C} \right) \left(1 + \frac{\sigma_y^2}{C} \right) \right] \quad (3)$$

1.4 生成质量指标 Q

图像多尺度划分的第 k 个尺度的图像质量指标 Q_k 由第 k 个尺度的质量分布矩阵 MGV_k 与相应的权重函数 W_k 由以下公式得到:

$$Q_k = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N MGV_k(i, j) W_k(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W_k(i, j)} \quad (4)$$

其中 M, N 为第 k 个尺度图像大小。

由于人眼视觉对不同尺度的敏感度不同,由参考文献[18]得到权重矩阵 gamma 对每层图像质量指标 Q_k 加权生成图像质量评估指标 Q :

$$Q = \prod_{k=1}^5 Q_k^{\text{gamma}(k)} \quad (5)$$

2 实验及结果分析

本文采用 TID2008 数据库^[22]和 TID2013 数据

库^[23]中的JPEG,JPEG2000子集进行评估,每一幅图像都有对应的主观评价值(MOS, Mean Opinion Score)。根据VQEG提出的准则,在客观评价值和主观评价值之间存在一定的非线性关系,这里采用下面的logistic函数^[24]建立这种非线性映射关系:

$$f(x) = \beta_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + e^{\beta_2(x - \beta_3)}} \right) + \beta_4 x + \beta_5 \quad (6)$$

其中x表示客观评价值,β₁,β₂,β₃,β₄,β₅为模型参数,可通过MATLAB中非线性优化函数求得。为了更好地比较图像客观质量评估模型的性能,本文选用3个常用客观参量作为评估这些方法的客观指标:Pearson相关系数(PLCC),Spearman等级相关系数(SROCC),反映模型预测值与主观值的均方误差(RMSE)。PLCC,SROCC的值越接近1表示客观评价方法的准确性越高,RMSE的值越小表示客观评价方法的准确性越高。

本文采用了目前先进的图像评估方法^[25]作为参考对比,包括结构相似度算法(SSIM)^[3],视觉保真度(VIF, Visual Information Fidelity)^[26],内容加权的结构相似度(IW-SSIM, Information Weighting-SSIM)^[27],特征相似度指标(FSIM, Feature Simili-

ty for Image Measure)^[28],基于视觉显著区域的评估指标(VSI, Visual Saliency-Induced Index)^[29]。

2.1 TID2008数据库实验结果对比

TID2008数据库中每幅图像的主观评价值由838位志愿者对图像观察评分加权得到。库中JPEG,JPEG2000子集中分别包含100幅图像(25幅原图×4种不同程度失真)。表1、表2、表3给出了在TID2008数据库中上述几种算法的性能比较。由表中数据可以看出本文算法仅对于JPEG失真图像的PLCC,RMSE质量评估指标略低于VSI算法,始终优于其他算法;对JPEG2000及两种压缩失真综合评估的PLCC,SROCC,RMSE指标均高于其他算法,与人的主观评价值有更好的一致性。

图5为上述几种算法与TID2008中图像的MOS值之间的散点图。图中每个点代表一幅图像,横、纵坐标值分别为算法预测质量值和MOS值。图中点的分布越接近曲线表明算法的评价值与主观评价值一致性越好。从图中可以直观地看出,本文方法和其他算法相比与主观值之间的拟合度最好。

表1 JPEG失真评估

Table 1 JPEG distortion evaluation

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW-SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG	PLCC	0.945 8	0.954 7	0.959 5	0.974 2	0.986 0	0.985 5
	SROCC	0.916 6	0.916 8	0.918 4	0.927 9	0.961 6	0.964 5
	RMSE	0.553 3	0.507 0	0.479 9	0.384 4	0.283 5	0.288 9

表2 JPEG2000失真评估

Table 2 JPEG 2000 distortion evaluation

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW-SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG2000	PLCC	0.969 6	0.973 0	0.976 1	0.980 1	0.986 5	0.989 5
	SROCC	0.968 4	0.970 9	0.973 8	0.977 3	0.984 8	0.984 9
	RMSE	0.477 8	0.450 5	0.424 0	0.387 1	0.319 7	0.282 6

表3 JPEG失真和JPEG2000失真综合评估

Table 3 Comprehensive evaluation of JPEG and JPEG 2000 distortion

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW-SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG	PLCC	0.958 4	0.958 4	0.966 1	0.974 5	0.980 5	0.986 2
	SROCC	0.954 2	0.956 5	0.957 0	0.969 2	0.978 4	0.981 8
JPEG2000	RMSE	0.539 9	0.539 7	0.488 1	0.424 4	0.371 6	0.313 0

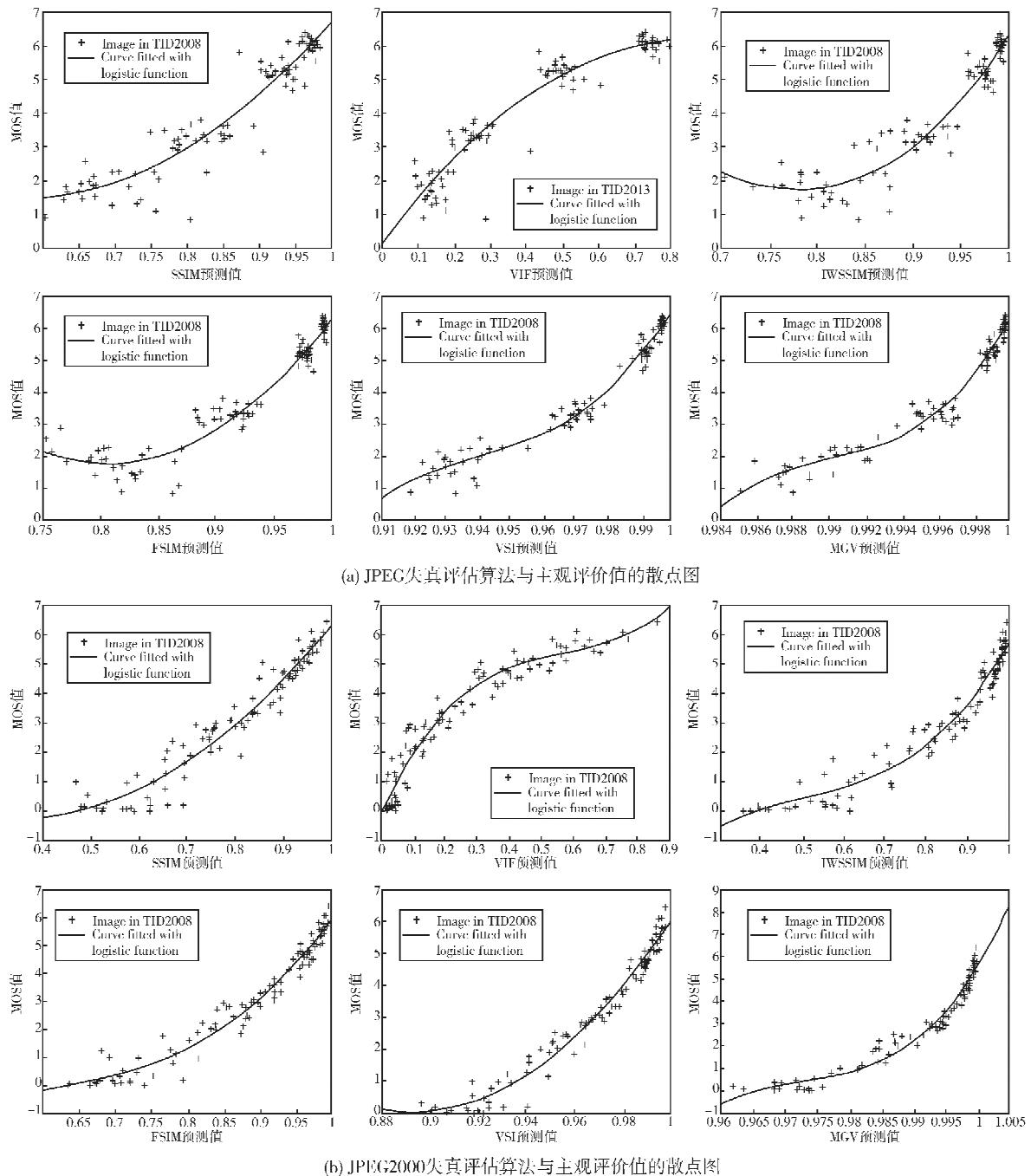


图5 TID2008 压缩图像失真评估算法与主观评价价值的散点图

Fig. 5 Scatter plot of TID 2008 compressed image distortion evaluation algorithm and subjective evaluation value

2.2 TID2013 数据库实验结果对比

TID2013 数据库是目前最大的标准图像库,每幅图像的主观评价值由 971 位不同背景、不同职业、不同学历的观察者对图像的评分加权得来。JPEG, JPEG2000 子集中分别包含 150 幅图像(25 幅原图 \times 5 种不同程度失真)。表 4、表 5、表 6 给出了在 TID2013 数据库中上述几种算法的性能比较。由表中数据可

以看出本文算法的 PLCC, SROCC, RMSE 指标均优于其他算法,能较准确预测图像质量,与人的主观评价价值的一致性最好。

图 6 为上述几种算法与 TID2013 中图像的 MOS 值之间的散点图。从图中可以看出,本文方法与主观值之间的拟合度最好。

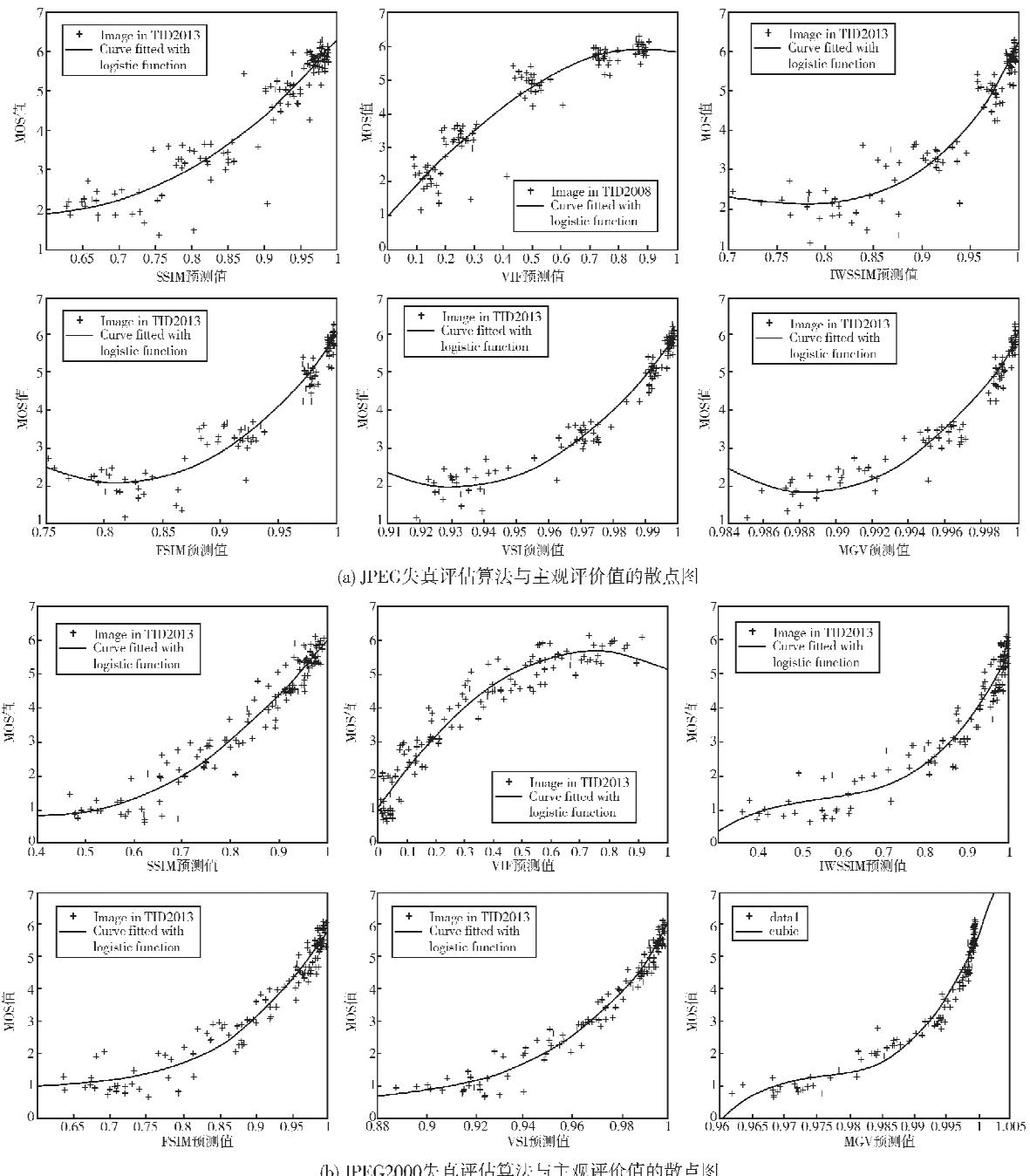


图6 TID 2013 压缩图像失真评估算法与主观评价的散点图

Fig. 6 Scatter plot of TID 2013 compressed image distortion evaluation algorithm and subjective evaluation value

表4 JPEG失真评估

Table 4 JPEG distortion evaluation

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW-SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG	PLCC	0.949 3	0.933 1	0.957 2	0.971 3	0.985 4	0.985 6
	SROCC	0.915 0	0.919 2	0.918 7	0.932 4	0.954 1	0.963 8
	RMSE	0.473 7	0.445 5	0.435 9	0.358 4	0.256 2	0.254 8

表5 JPEG2000 失真评估
Table 5 JPEG2000 distortion evaluation

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW - SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG2000	PLCC	0.968 1	0.966 5	0.967 1	0.973 2	0.983 1	0.988 1
	SROCC	0.950 5	0.951 6	0.950 6	0.957 7	0.970 6	0.976 0
	RMSE	0.427 0	0.437 3	0.433 0	0.391 7	0.311 8	0.261 2

表6 JPEG 失真和 JPEG2000 失真综合评估
Table 6 Comprehensive evaluation of JPEG and JPEG2000 distortion

失真类型	评价指标	SSIM	VIF	IW - SSIM	FSIM	VSI	MGV
JPEG	PLCC	0.959 4	0.956 6	0.961 3	0.970 9	0.981 0	0.985 3
	SROCC	0.941 9	0.947 2	0.944 9	0.957 7	0.968 2	0.974 0
JPEG2000	RMSE	0.462 4	0.477 8	0.452 1	0.392 9	0.318 5	0.280 7

3 结论

本文提出了一种基于梯度矢量的人眼视觉特性压缩图像质量评估方法,针对主流的图像压缩方法(JPEG 和 JPEG2000)处理后的图像进行质量评估,克服了传统方法只能针对一种压缩失真评估的缺点,应用更广泛。通过实验对比,本方法可以很好反映压缩图像质量,与人眼感知有较高的一致性。如何使其适用于其他失真类型图像的质量评估是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 阴躲芬,李一民,王英妹,等.浅谈数字图像压缩编码技术[J].科技广场,2008,(2):128-139.
- [2] 曹灿云,王延求.浅议图像压缩编码技术的发展与应用[J].信息与电脑(理论版),2011,(3):127-129.
- [3] WANG Z, BOVIK A C, HAMID R S, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13 (4): 600-612.
- [4] LIU A, LIN W, NARWARIA M. Image quality assessment based on gradient similarity[J]. IEEE Trans. Image Process, 2012, 4(21): 1500-1512.
- [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,2007,7(35):1313-1317.
- [6] 刘书琴,毋立芳,宫玉,等.图像质量评价综述[J].中国科技论文在线,2011,7(6):501-506.
- [7] PAN F, LIN X, RAHARDJA S, ONG E, et al. Using edge direction information for measuring blocking artifacts of images [J]. Multidimensional Syst. Signal Process, 2007, 18: 297-308.
- [8] WANG Z, SHEIK H R, BOVIK A C. No - reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images [C]. Proc. International Conference on Image Processing. Rochester, USA: [s. n.], 2002. 477-480.
- [9] LEE S, PARK S J. A new image quality assessment method to detect and measure strength of blocking artifacts [J]. Signal Processing: Image Communication, 2012, 27(1): 31-38.
- [10] BARLAND R, SAADANE A. Reference free quality metric for JPEG2000 compressed images[C]. In Proceedings of ISSPA. Sydney Australia: IEEE, 2005. 351-354.
- [11] TONG H, et al. No reference quality assessment for JPEG2000 compressed images[C]. In Proceedings of Image Processing. Singapore: IEEE, 2004.
- [12] HUA Z, YIRAN Z, XIANG T. A weighted sobel operator - based no - reference blockiness metric[C]. in Proc. Pacific - Asia Workshop Comput. Intell. Ind. Appl. PACHA, IEEE, 2008.
- [13] CHEN C H, BLOOM J A. A blind reference - free blockiness measure[J]. Adv. Multimedia Inf. Process, 2010, 6297: 112-123.
- [14] SAKULDEE R, YAMSANG N, UDOMHUNSAKUL S. Image Quality Assessment for JPEG and JPEG2000[C]. Third 2008 International Conference on Convergence and Hybrid Information Technology, IEEE, 2008. 320-325.
- [15] SEGHIR Z A, HACHOUF F. Image Quality Assessment Based on Edge - Region Information and Distorted Pixel for JPEG and EG2000[C]. Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Springer Berlin Heidelberg, 2009. 156-166.
- [16] SHEN J, LI Q, ERLEBACHER G. Hybrid no - reference natural image quality assessment of noisy, blurry, JPEG2000, and JPEG images[J]. IEEE Transactions on

- Image Processing, 2011, 8(20) : 2089 – 2098.
- [17] LOWE D G. Distinctive image features from scale – invariant keypoints[J]. The International Journal of Computer Vision, 2004.
- [18] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi – scale Structural Similarity for Image Quality Assessment[C]. In Proc. IEEE Asilomar Conf. Signals, Syst, Comput, Pacific Grove, CA, Nov. 2003. 1398 – 1402.
- [19] 张宇, 刘雨东, 计钊. 向量相似度测度方法[J]. 声学技术, 2009, 28(4) : 532 – 536.
- [20] WANG Z, SHANG Xin – li. Spatial Pooling Strategies for Perceptual Image Quality Assessment[C]. IEEE Inter. Conf. Image Proc. Atlanta: IEEE, 2006. 8 – 11.
- [21] MOORTHY A K, BOVIK A C. Visual importance pooling for image quality assessment[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(2) : 193 – 201.
- [22] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al. TID2008 – A database for evaluation of full – reference visual quality assessment metrics[DB/OL]. Adv. Modern Radioelectron, 2010 – 02 – 22. <http://www.ponomarenko.info/tid2008.htm>.
- [23] PONOMARENKO N, IEREMEIEV O, LUKIN V, EGLAZARIAN K, et al. A new color image database TID2013: innovations and results[DB/OL]. Proceedings of ACIVS, 2014 – 03 – 02. <http://www.ponomarenko.info/tid2013.htm>.
- [24] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11) : 3441 – 3452.
- [25] ZHANG L, ZHANG L, MOU X, et al. A Comprehensive Evaluation of Full Reference Image Quality Assessment Algorithms[C]. In Proc. 19th IEEE Int. Conf. Image Process., 2012. 1477 – 1480.
- [26] SHEIKH H R, BOVIK A C. Image information and visual quality [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2) : 430 – 444.
- [27] WANG Z, LI Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment[J]. IEEE Trans. Image Process., 2011, 5(20) : 1185 – 1198.
- [28] ZHANG L, ZHANG L, MOU X, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. IEEE Trans. Image Process., 2011, 8(20) : 2378 – 2386.
- [29] ZHANG L, SHEN Y, LI Hong – yu. VSI: a visual saliency – induced index for perceptual image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 10(23) : 4270 – 4281.