

中图分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)07-1184-08

论文索引信息: 孔繁锵. 结合 HVS 和相似性度量的图像质量评价测度 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1184-1191

结合 HVS 和相似性度量的图像质量评价测度

孔繁锵

(南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

摘要: 图像质量评价是图像处理领域内一项很有意义的研究课题。传统的评价方法(如 PSNR 和 MSE)只是在像素域统计参考图像和失真图像的误差,因而不能有效反映图像的视觉感知质量。针对上述问题,在充分考虑人眼视觉感知特性的基础上,提出一种新颖的图像质量评价算法,通过模拟人类视觉系统,并结合相似性度量方法获得有效的图像质量评价测度。实验结果显示,采用本文方法获得的图像质量评价结果与主观感知具有较好的一致性,能准确地反映人眼对图像质量的视觉感知。

关键词: 图像质量评价; 人类视觉系统; 相似性度量; 小波分解

Image quality assessment metrics based on human visual system

Kong Fanqiang

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016 China)

Abstract: Image quality assessment is important in the image processing field. The traditional methods (e. g. PSNR and MSE) only compute the error between the reference image and distorted image at the pixel-scale, so they cannot well reflect the visual quality of image. Aiming at the above problem, a novel image quality evaluation approach is proposed according to the human visual characteristics. It is obtained to mimic human visual system and utilize similarity measure methods. Experimental results illustrate that the proposed has a good consistency with the subjective assessment of human beings; thus it can be used to describe the visual perception of the image effectively.

Keywords: image quality assessment; human visual system; similarity measure; wavelet decomposition

0 引言

随着图像传输、处理及压缩等技术中图像降质的出现,如何有效地评价图像质量的问题也就应运而生,而一个图像传输、处理及压缩系统的输出图像质量最终决定了该系统方法的优劣,因而图像质量评价越来越受到人们的关注。

一般来说,图像质量评价方法^[1]分为主观评价方法和客观评价方法。由于人是图像的最终受体,无疑主观评价方法是最可靠的。但是这种方法易受

到观察者知识背景、观测目的和环境等影响,稳定性和可移植性差,更难以用数学模型表达加以应用。传统的图像质量客观评价方法^[2]有均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR),它们是基于像素域对参考图像和失真图像之间的误差进行简单的数学统计,这类方法虽然计算简单,易于实现,但没有考虑人眼的视觉感受,不能真实的反映图像的视觉感知质量,最终导致与主观评价一致性较差。

随着对人类视觉系统认识的深入,人们开始利用人类视觉系统(HVS)的某些特性对图像进行质量评价^[3-5]。出现了各种基于 HVS 模型^[6-7]的评价

收稿日期:2010-01-11;修回日期:2010-09-17

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60532060);江苏省自然科学基金面上项目(BK2010498)

第一作者简介:孔繁锵(1980—),男,讲师。2008年于西安电子科技大学通信工程学院获信息与通信工程专业博士学位,主要从事图像传输与压缩、影像质量评价等方面的研究工作。E-mail:kongfq@nuaa.edu.cn。

方法,而且评价性能明显提高。Wang 等人^[8]根据人类视觉系统能高度自适应地提取场景中的结构信息的理论提出了基于结构相似度的图像质量评价方法(SSIM)。SSIM 很好地利用了图像相邻像素点之间的结构关系,但其缺点在于没有区别对待图像中人眼感兴趣程度不同的区域,而是将子块的结构相似度的 SSIM 简单地取平均而得出整幅图像的结构相似度,这存在一定的局限性。路文等人^[9]利用 WBCT (wavelet-based contourlet transform) 模拟人类视觉多通道特性,利用感知系数的个数来衡量图像的失真程度,针对 JPEG 和 JPEG2000 图像取得了较好的结果,但是对噪声不敏感。针对以上问题,提出一种结合 HVS 和相似性度量方法的图像质量评价新方法。首先对参考图像和失真图像分别进行子波分解;其次构建人类视觉系统的数学模型,将得到的系数按其感知重要性进行加权;再次结合角度相似性和空间相关性来计算参考图像和失真图像之间的相似性;最后将其作为图像质量评价测度。

1 人类视觉系统

因为人眼是大多数图像的最终接受者,在图像质量评价中引入人眼视觉特性将有效提高其评价性能,所以正确理解人类视觉系统的特性显得尤为重要。自 20 世纪 70 年代以来,人们开始关注并探索比较完整的 HVS^[10] 理论框架,力求寻找一种基于 HVS 的客观图像感知质量尺度,架起主客观联系的桥梁。人类视觉系统是研究人眼及神经系统如何感知刺激物的过程。典型的 HVS 模型框架如图 1 所示,这个人眼视觉框图是从仿生学的角度模拟人眼成像过程中存在的视觉特性,主要利用事视觉感知特性,与人类视觉系统的并行处理有些差异。人眼成像的过程相当于一个串行过程。与图像质量密切相关的几个特性有视觉多通道分解、对比敏感度函数、对比度掩盖效应和误差综合。

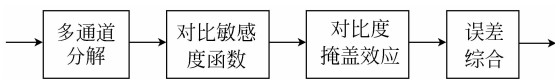


图 1 HVS 模型框架

Fig. 1 The framework of the HVS

1.1 视觉感知的多通道特性

对初级视皮层的研究表明,皮层中特定的神经元对某些特定方向和频率的视觉刺激有响应。这证

明了人类视觉系统内存在着一系列彼此独立的、对不同空间频率具有选择性的通道,这些通道感受一定频率范围和方向的视觉信息。被誉为信号分析中的“显微镜”的小波在时域和频域同时具有良好的局部化性质,可以聚焦到对象的任意细节,因此小波特别适用于对信号奇异点的分析,其本质是多分辨率或多尺度地分析信号,因此非常适合模拟 HVS 对频率感知的多通道和对数特性。通过感知滤波器组分解模拟人类视觉系统多通道视觉信息处理的感知信道,对输入的图像进行空-频分解,形成特定方向、特定频率范围的子带图像,以便构建感知模型。这些结果进一步被模式识别及有关相互作用现象研究的心理物理学实验所证实。

1.2 对比敏感度函数

对比度是对亮度相对变化的衡量,观测者要把目标从背景中检测出来,需要一定的对比度,所需的最小对比度称为对比度阈值。对比度阈值的倒数随空间频率变化的曲线称为对比度敏感函数^[11] (CSF)。对比敏感度函数描述了人类视觉系统的频率响应特性,从而能反映人眼分辨亮度差异的能力。科学家已通过一些心理视觉实验对这一特性进行了测量和描述。如图 2 所示,从图中可以看出敏感度曲线在中频区域表现较为敏感,随着频率的增加,敏感度曲线陡峭下降,在低频区域,敏感度也有所下降,从整体趋势看,CSF 具有带通滤波器的性质。

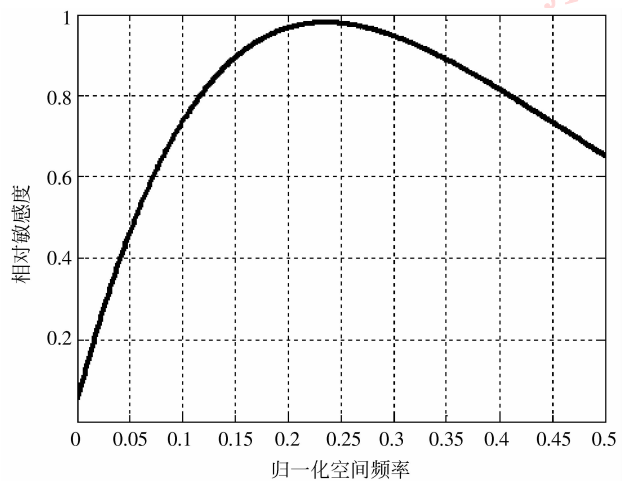


图 2 CSF 曲线示意图

Fig. 2 The sketch map of the CSF curve

1.3 对比度掩盖效应

对比度掩盖效应是指当另一信号出现在刺激信号背景中时,刺激信号的可视度降低,即对比度阈值

增加,也就是说,刺激信号在超阈值背景下会被掩盖掉。对比度掩盖效应可以使人眼对不同的频率具有相同的可视敏感度,它反映了激励之间的相互作用,是视觉系统的一个重要特性。通常情况下,当掩膜信号与目标信号有相似的特征时,如相似的空间频率、方向和位置,容易造成目标信号某些部分的可视度降低或升高。目前有两种对比度掩膜方法:带间加权掩膜和带内平均掩膜。本文采用的是带内平均掩膜,相当于对同一尺度上的高频子带使用相同的加权因子,如图 3 所示。

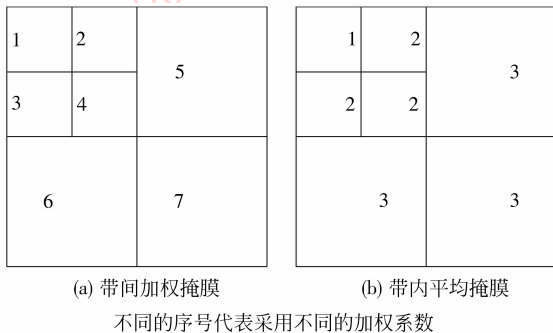


图 3 对比度掩膜效应示意图

Fig. 3 The diagram of the contrast masking

1.4 误差综合

视觉信息经过多通道一系列处理之后,最终在视觉高级中枢进行信息整合,从而形成感知和理解。具体地说,首先利用视觉感知的多通道分解特性对误差图像进行处理后,在每一个通道形成一幅可视误差图;其次,为减小信息冗余度,模拟视皮层信息合成的过程,把这个多通道误差图整合为一个感知

质量评价的数字指标^[11],采用相似度度量方法来模拟误差综合,对于全参考型图像质量评价而言,其过程相当于一个相似性度量的过程,通过参考图像和失真图像的相似程度,来评价失真图像的质量,也就是说失真图像与参考图像的相似程度越大,则相应的失真程度越小。

2 基于 HVS 的图像质量评价方法

首先对参考图像和失真图像分别进行子波分解,利用人类视觉系统模型使不同频率范围和方向的视觉信息进入不同的视觉通道,并根据子带系数对视觉感知的重要性进行对比敏感度加权掩膜,最后根据原始图像和失真图像各个对应子带的幅度和方向特征的相关性来衡量图像的失真程度。其实现框图如图 4 所示。

2.1 图像分解

将参考图像和失真图像分别进行 3 层子波分解^[12],得到 10 个子带图像,包含 9 个高频子带图像和 1 个低频子带图像。由于子波的高频子带表征图像的边缘和形状,而人眼对图像的边缘信息和形状信息敏感,因此利用子波的高频子带对图像质量进行评价,如图 5 所示。

2.2 CSF 加权掩膜

经过子波变换,图像被分解成不同的频率子带,而人眼对不同空间频率和方向上的信号感知程度是不同的。为了模拟这种感知的差异性,需要对不同子带的系数进行归一化加权处理,这就是 CSF 加

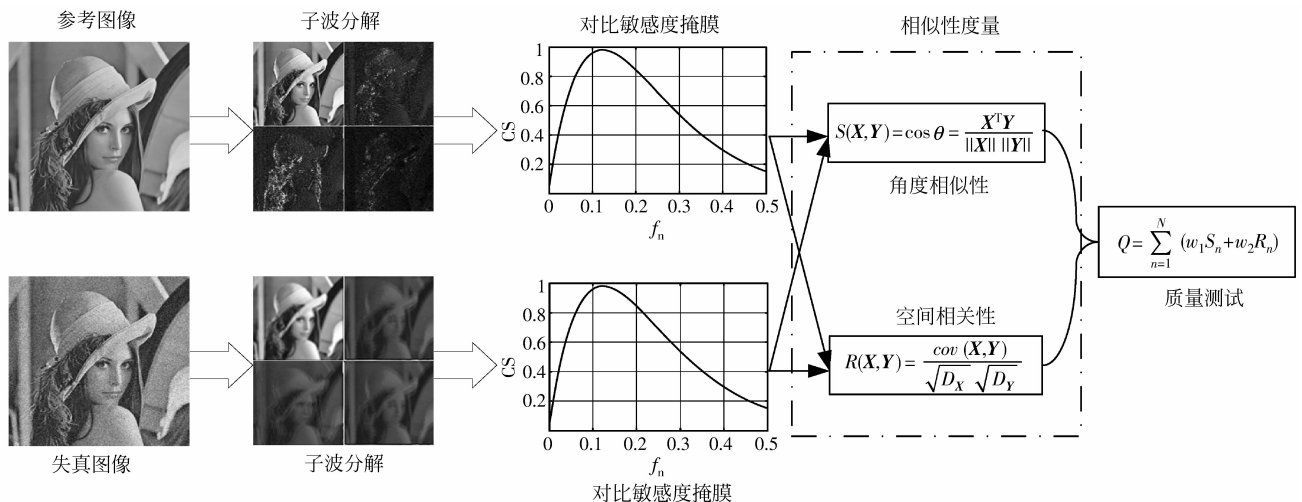


图 4 本文方法系统框图

Fig. 4 The block diagram of the proposed method

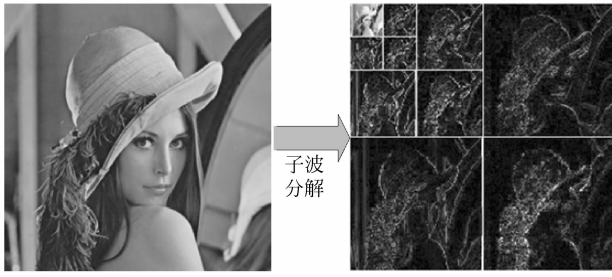


图5 图像的子波分解

Fig. 5 Wavelet transform based image decomposition

权。而掩盖效应的存在可以使人眼对同一尺度不同频率的信号具有相同的可视敏感度^[13]。

CSF 模型通过视觉系统的调制传递函数(MTF)获得,常见的模型具有如下基本形式

$$H(f) = a(b + cf) \exp(-cf)^d \quad (1)$$

式中,空间频率 $f = f_n f_s$,单位为周/°, f_s 是信号的采样频率,单位为周/像素,而 f_n 是归一化频率,单位为像素/°。采用文献[14-15]中使用的 CSF 模型, a, b, c, d 分别为 2.6, 0.192, 0.114, 1.1。

f_s 由下式求得^[16]

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

式中, 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 0.8 m), r 为显示器的分辨率,单位为像素/英寸。这里显示器的尺寸为 21 英寸,分辨率为 1024 × 768,则有 $r = \sqrt{1024^2 + 768^2} / 21 = 61$ 像素/英寸。

f_n 是子带归一化中心频率,利用带内平均掩膜方法计算得到。同一尺度上的方向子带系数的 f_n 是相同的。如果图像采样频率满足 Nyquist 采样频率,则数字图像的频率范围为 $[0, f_s/2]$ 。 f_n 的范围为 $[0, 0.5]$ 。

2.3 相似性度量

经过人眼的视觉滤波后,采用原始图像和失真图像的相似程度来衡量图像的质量。本文结合空间相关性和角度相似性来衡量,空间相关性是指两个向量在幅度上的接近程度,而角度相似性是指两个向量在角度上的接近程度。因此采用空间相关性和角度相似性这两个准则来衡量图像的质量测度。空间相关性和角度相似性越强,图像相关性越强,图像失真越不明显,其质量就越好。

空间相关性定义为

$$R_n(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D_X} \sqrt{D_Y}} \quad (3)$$

式中, X 和 Y 分别表示参考图像和失真图像在同一个尺度上的子带图像, n 表示子带个数。 $\text{cov}(X, Y)$ 表示 X 和 Y 的协方差, D_X 和 D_Y 分别为 X 和 Y 的方差。

角度相似性反映了两个子带图像在角度上的相似程度,夹角越小,方向越趋于一致。定义为

$$S_n(X, Y) = \cos \theta = \frac{X^T Y}{\|X\| \|Y\|} \quad (4)$$

式中, X 和 Y 分别表示参考图像和失真图像在同一个尺度上的子带图像。

2.4 图像质量测度

失真图像与参考图像不同子带之间的相似性表示了图像的失真程度。

图像质量测度 Q ,定义为

$$Q = \sum_{n=1}^N (w_1 S_n + w_2 R_n) \quad (5)$$

式中, N 表示子带的数目, S_n 和 R_n 分别表示第 n 个子带的角度相似性和空间相似性, w_1 和 w_2 是加权因子,由于角度相似性和空间相似性的重要程度在图像质量评价中是相同的,所以文中取加权系数 $w_1 = w_2 = 0.5$ 。

3 实验结果与分析

3.1 图像数据库及评价标准

本实验是在美国 TEXAS 大学 LIVE (Lab of Image and Video Engineer) 图像质量评价数据库^[17]上进行的。数据库中包含 29 幅高分辨率的 RGB 图像以及对应的 5 种失真类型图像,每一种失真类型均有不同程度的几幅失真图像与原始图像对应。5 种类型包括 JPEG 压缩、JPEG2000 压缩、白噪声污染(WN)、高斯模糊(GBlur)和快速退化(FF)。其中 JPEG 图像 175 幅, JPEG2000 图像 169 幅,它们的比特率分别是 0.150~3.336 bit/像素和 0.028~3.150 bit/像素,且是非均匀采样的,以便主观评价分数在整个范围内是均匀分布的,另外的 WN、GBlur 和 FF 图像各 145 幅。每幅被测图像均为多个不同的测试者在适当的距离处观看,得出他们对图像的感知质量,一般分成很差、较差、一般、较好、很好 5 个等级。

3.2 模型性能评价方法

为了测试本文提出的图像质量客观评价结果与

主观感知的一致性,选择以下 4 个度量准则^[18]:
 1) 相关系数(CC),反映了客观评价方法预测的精确性;2) 平均绝对误差(MAE),反映了客观评价方法的有效性;3) 非线性回归分析后的均方根误差(RMSE),反映了客观评价方法的有效性;4) Spearman等级次序相关系数(ROCC),反映了客观评价成绩预测的单调性。

3.3 本文方法的性能

针对 LIVE 图像质量评价数据库中提供的 5 种失真类型,将所提出的方法与全参考型的 PSNR, MSSIM 和文献[9]中方法进行对比。由实验结果可以看出,本文方法相对现有方法有较大的改进,且与

主观评价价值具有较好的一致性。

3.3.1 JPEG2000 图像的实验结果

图 6 和表 1 给出了前面提出的不同图像质量评价模型相对于本文方法在 JPEG2000 图像库上的实验结果。可以看出,本文方法较前 3 种算法的性能有了较大提高。究其原因是因为 JPEG2000 图像的失真主要由压缩编码过程中量化引入的模糊和振铃效应组成。PSNR 对这两种失真并不敏感,而 MSSIM 和 WBCT 虽然能较好地捕捉该类失真,但本文所提出的方法能更为准确地模拟 HVS 的视觉特性,故效果较好。

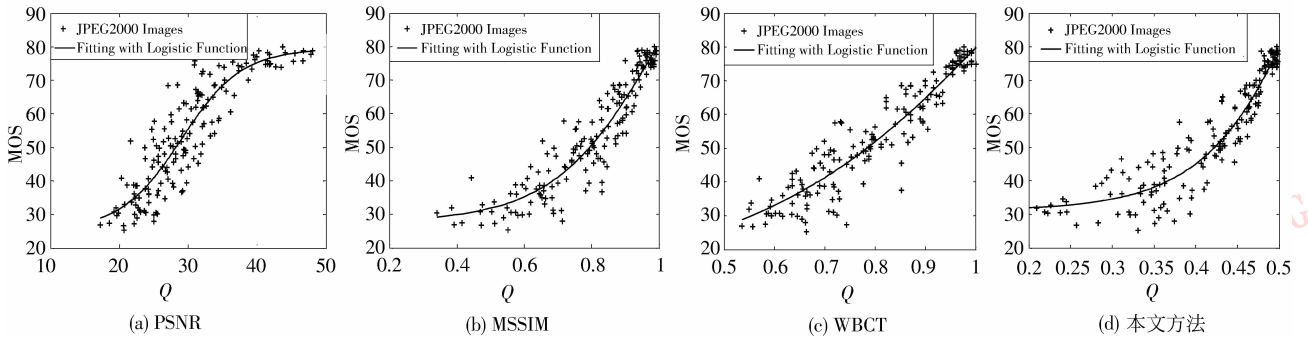


图 6 JPEG2000 图像的主客观评分散点分布图

Fig. 6 Scatter plots of subjective mean opinion score (MOS) versus different method prediction on JPEG2000

表 1 不同质量评价模型对 JPEG2000 图像库性能的比较

Tab.1 The comparison of different IQA methods on JPEG2000

方法	CC	MAE	RMSE	ROCC
PSNR	0.896 2	5.528 3	7.186 5	0.889 8
MSSIM	0.936 7	4.433 2	5.670 6	0.931 7
WBCT	0.937 5	4.265 6	5.638 9	0.933 5
本文方法	0.944 2	4.178 1	5.333 7	0.936 0

3.3.2 JPEG 图像的实验结果

不同图像质量评价模型相对于本文方法在

JPEG 图像库上的实验结果如图 7 和表 2 所示。由于 JPEG 图像的失真主要为分块编码时引入的块效应,故 PSNR 对其也不敏感。而本文所提出的方法是基于 HVS 和相似度量度的,不仅计算了原始与失真图像的空间相似性,还考虑到两者的角度相似性,故较 MSSIM 与 WBCT 而言更为准确地模拟了人眼的视觉模型,从而更好地捕捉到了 JPEG 图像的块效应对 HVS 所带来的失真。

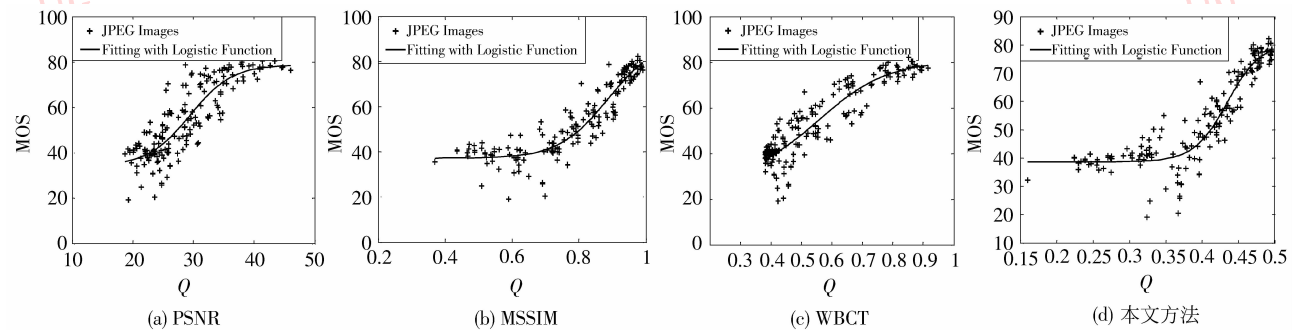


图 7 JPEG 图像的主客观评分散点分布图

Fig. 7 Scatter plots of subjective mean opinion score (MOS) versus different method prediction on JPEG

表 2 不同质量评价模型对 JPEG 图像库性能的比较

Tab.2 The comparison of different IQA methods on JPEG

方法	CC	MAE	RMSE	ROCC
PSNR	0.859 6	6.379 7	8.170 0	0.840 9
MSSIM	0.928 3	4.484 6	5.946 8	0.902 8
WBCT	0.914 3	4.826 5	6.477 5	0.883 8
本文方法	0.9328	4.1305	5.7610	0.8990

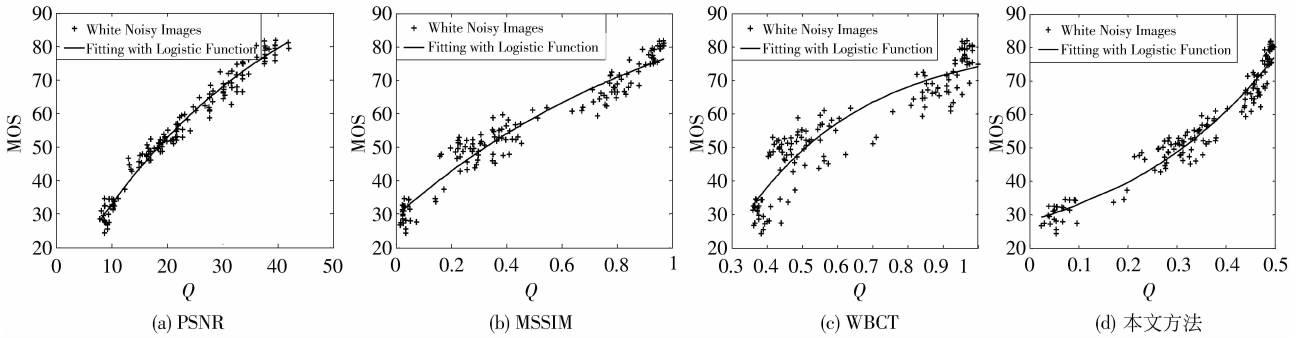


图 8 WN 图像的主客观评分散点分布图

Fig.8 Scatter plots of subjective mean opinion score (MOS) versus different method prediction on WN

表 3 不同质量评价模型对高斯模糊图像库性能的比较

Tab.3 The comparison of different IQA methods on GBlur

方法	CC	MAE	RMSE	ROCC
PSNR	0.783 4	7.742 5	9.772 3	0.781 6
MSSIM	0.874 0	5.759 5	7.639 1	0.894 2
WBCT	0.858 1	6.634 5	8.074 7	0.852 7
本文方法	0.957 6	3.623 0	4.527 3	0.950 9

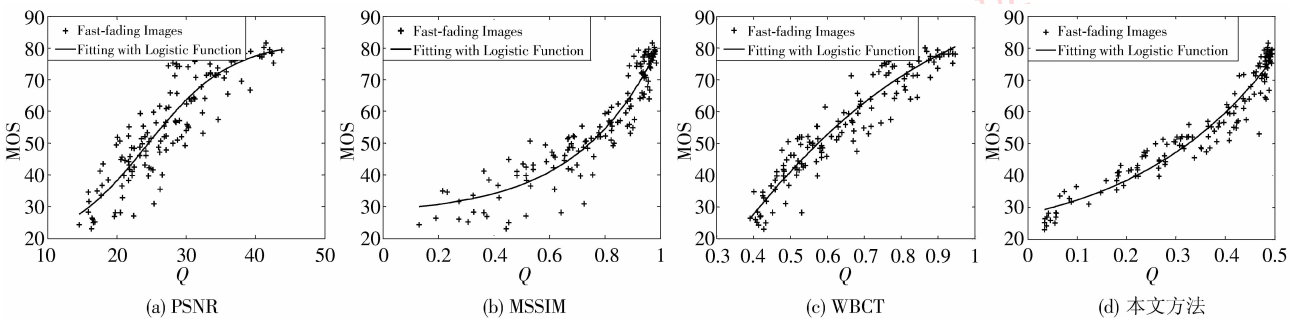


图 9 Fast-fading 图像的主客观评分散点分布图

Fig.9 Scatter plots of subjective mean opinion score (MOS) versus different method prediction on FF

表 4 不同质量评价模型对 Fast-fading 图像库性能的比较

Tab.4 The comparison of different IQA methods on FF

方法	CC	MAE	RMSE	ROCC
PSNR	0.889 5	5.800 0	7.525 8	0.890 3
MSSIM	0.942 8	4.296 8	5.484 6	0.941 1
WBCT	0.946 8	4.059 3	5.240 4	0.950 4
本文方法	0.966 1	3.406 6	4.247 0	0.966 0

3.3.3 WN 图像的实验结果

WN 图像库是由原始图像经过叠加不同程度的白噪声而构成的失真图像所组成的。图 8 和表 3 给出了本文方法与其他 3 种方法的实验结果。可以证实 PSNR 在这种类型的失真图像上的效果最好,这也是由 PSNR 的算法特点所决定的,其对叠加在原始图像上的噪声最为敏感。

3.3.4 Fast-fading 图像的实验结果

Fast-fading 图像库是由模拟 JPEG2000 码流在 Fast fading 信道传输中发生错误而引起失真的图像所组成的。该类图像的失真类型除了 JPEG2000 编码引入的模糊和振铃效应以外,主要是由于码流丢失导致的图像内容的幅度和相位失真。图 9 和表 4 给出了各种图像质量评价模型的实验结果。可以看出,本文方法仍然具有相当优秀的表现。

3.3.5 混合失真图像的实验结果

最后将本文方法和其他 3 种方法在各种失真类型的图像库上进行了交叉验证。图 10 是交叉验证实验的散点图,表 5 给出了各种性能指标的值。由图 10 和表 5 可以看出,本文所提出的基于相似度量度的方法表现最为突出。原因在于本文所利用的

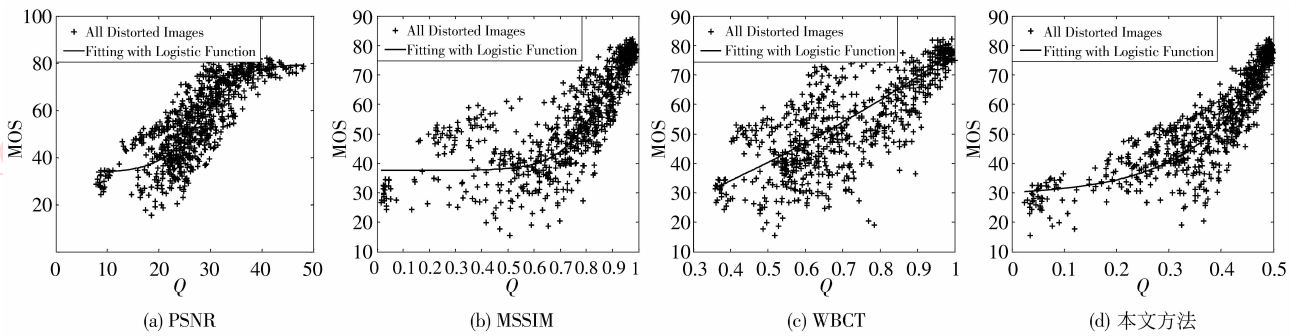


图 10 所有失真图像的主客观评分散点分布图

Fig. 10 Scatter plots of subjective mean opinion score (MOS) versus different method prediction on all distortions

表 5 不同质量评价模型对所有失真图像性能的比较

Tab. 5 The comparison of different IQA methods on all distortions

方法	CC	MAE	RMSE	ROCC
PSNR	0.842 1	7.287 5	9.154 8	0.819 7
MSSIM	0.883 5	6.271 1	8.167 3	0.851 0
WBCT	0.768 3	7.877 9	10.305 9	0.776 2
本文方法	0.921 3	5.166 9	6.746 4	0.907 8

两幅图像的空间相似性和角度相似性对各种失真类型都能够较好地反映出来。另外,由于该算法还考虑到 HVS 的视觉特性,其更加符合主观实验的结果。

4 结论

提出一种新颖的图像质量评价方法,结合人类视觉系统和相似性度量准则,通过比较参考图像和失真图像子带之间的空间相关性和角度相似性来衡量图像的失真程度,从而得到了一种与人类视觉感知有较好一致性的图像质量评估准则。为了进一步优化和改进本文方法,将从相似性度量准则入手,寻找更合适的相似性度量方法,获得更好的图像质量评价方法,并将其引到视频质量评价^[19-20]上。

参考文献 (References)

- [1] Wang Z, Bovik A C. Modern Image Quality Assessment [M]. New York: Morgan and Claypool Publishing Company, 2006: 20-30.
- [2] İsmail Avcibas, Bülent Sankur, Khalid Sayood. Statistical evaluation of image quality measures [J]. Journal of Electronic Imaging, 2002, 11(2): 206-213.
- [3] Wang Tao, Gao Xinbo, Zhang Duying. An objective content-based image quality assessment metric[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(6): 1002-1007. [王涛, 高新波, 张都应. 一种基于内容的图像质量评价测度[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(6): 1002-1007.]
- [4] Pang Quan, Wang Zhenhua, Geng Lishuo, et al. A criterion of objectively assessing image quality based on fractal dimension [J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 657-662. [庞全, 王振华, 耿丽硕, 等. 基于分形维数的图像质量客观评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 657-662.]
- [5] Pang Jianxin, Zhang Rong, Zhang Hui, et al. Quality assessment for image coding with structural distortion[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(8): 1560-1568. [庞建新, 张荣, 张晖, 等. 图像结构失真的编码质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(8): 1560-1568.]
- [6] Gao Xinbo, Lu Wen, Tao Dacheng, et al. Image quality assessment based on multiscale geometric analysis [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2009, 18(7): 1409-1423.
- [7] Engelke U, Kusuma M, Zepemick H, et al. Reduced-reference metric design for objective perceptual quality assessment in wireless imaging[J]. Signal Processing: Image Communication, 2009, 24: 525-547.
- [8] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Trans. Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [9] Lu Wen, Gao Xinbo, Wang Tisheng. A natural image quality assessment metric based on wavelet-based contourlet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 303-308. [路文, 高新波, 王体胜. 一种基于 WBCT 的自然图像质量客观评价方法 [J]. 电子学报, 2008, 36(2): 303-308.]
- [10] Wandell Brian A. Foundations of Vision [M]. Sunderland M A: Sinauer Associates, Inc., 1995: 65-80.
- [11] Alan Bovik. The Handbook of Image and Video Processing [M]. 2nd ed. New York: Elsevier Press, 2006: 325-345.
- [12] Gaudart L, Grebassa T, Petrakian J P. Wavelet transform in human visual channels [J]. Applied Optics, 1993, 32(22):

- 4119-4126.
- [13] Karunasekera S A, Kingsbury N G. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. *Proceedings of IEEE Trans. Image Processing*, 1995, 4 (6):713-724.
- [14] Lee I, Kim J, Kim S, et al. Wavelet transform image coding using human visual system [C]//*Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*. Taipei, China: University of Taiwan, 1994: 619-623.
- [15] Miloslavski M, Ho Y S. Zerotree wavelet image coding based on the human visual system models [C]//*Proceedings of IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems*. Chiangmai, Thailand: University of Chiangmai, 1998, 57-60.
- [16] Marcus J N, Julien R, Murat K. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2003, 12(1):58-70.
- [17] Sheikh H R, Wang Z, Bovikand A C, et al. *Image and Video Quality Assessment Research at LIVE*[DB/OL]. [2008-3-10]. <http://live.ece.utexas.edu/rese-arch/quality/>.
- [18] VQEG. *Final Report from the Video Quality Experts Group on the Validation of Objective Models of Video Quality Assessment* [EB/OL]. [2008-3-10]. <http://www.vqeg.org>.
- [19] Hewage C, Worrall S T, Dogan S S, et al. Quality evaluation of color plus depth map-based stereoscopic video[J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(2): 304-318.
- [20] Pahalawatta V P, Tourapis M A. Motion estimated temporal consistency metrics for objective video quality assessment [C]//*Proceedings of 2009 International Workshop on Quality of Multimedia Experience, USA Arizona: Arizona State University*, 2009,174-179.