

基于视觉显著失真度的图像质量自适应评价方法

丰明坤^{*①②} 赵生妹^① 邢超^①

^①(南京邮电大学信号处理与传输研究院 南京 210003)

^②(浙江科技学院信息与电子工程学院 杭州 310023)

摘要: 针对结构相似(SSIM)图像质量评价算法没有考虑人眼视觉多通道性和对图像高失真评价的不稳定性,提出一种基于视觉显著失真度的图像质量自适应融合(VSAP)评价方法。该方法首先采用 log-Gabor 滤波提取图像的高频、中频及低频 3 层视觉特征,基于 log-Gabor 变换尺度和方向权重系数计算特征值的相似度;然后基于视觉阈值多分辨性迭加计算出特征值的失真度;最后,根据视觉失真度自适应融合相似度评价与失真度评价获得图像质量的最终客观评价。实验结果表明,VSAP 方法不但对图像不同类型失真的客观评价与主观感知具有更高的相关性,而且 3 个主要指标斯皮尔曼等级相关系数(SROCC)、曲线拟合相关系数(CC)和均方根误差(RMSE)对图像不同水平失真的整体评价性能更稳定,明显优于其它评价方法。

关键词: 图像质量评价; 计算机视觉; log-Gabor 滤波器; 视觉显著; 自适应融合

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)09-2062-07

DOI: 10.11999/JEIT141641

Image Quality Self-adaptive Assessment Based on Visual Salience Distortion

Feng Ming-kun^{①②} Zhao Sheng-mei^① Xing Chao^①

^①(Institute of Signal Processing and Transmission, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The Structural SIMilarity (SSIM) algorithm of image quality assessment does not take into account the characteristics of multi-channel resolutions of human vision, it is also not consistent with subjective human evaluation for high level distortions. A Visual Salience Adaptive Pooling (VSAP) strategy of image quality assessment is proposed based on visual multi-scale and multi-orientation of log-Gabor transformation. Firstly, the visual characteristics of image on the high, medium, and low frequency are extracted by the log-Gabor transformation. Then the visual similarity scores based on visual scales and visual orientations of log-Gabor are calculated, accordingly, the visual distortion levels of image are calculated iteratively with the visual multi-resolution threshold. Finally, a strategy of image quality assessment is proposed with adaptive pooling similarity scores to distortion scores. The experimental results show that objective assessments of VSAP for different types of distortion hold higher correlation with subjective assessment. More importantly, the overall assessment performance of the Spearman Rank-Order Correlation Coefficient (SROCC), Correlation Coefficient (CC) and Root Mean Square Error (RMSE) for different levels of distortion is more consistent with subjective scores and superior to other methods.

Key words: Image quality assessment; Computer vision; log-Gabor filter; Visual salience; Adaptive pooling

1 引言

随着图像应用技术的发展,图像质量评价的研究引起了人们的关注,该研究分为主观评价和客观评价两种方法,前者通过测试者的主观感知来评价图像的质量;后者则依据计算机模拟人类视觉系统建模研究图像质量。客观方法以其速度快、实时性

强而成为了研究重点^[1-5]。在全参考图像质量客观评价研究领域,人类视觉系统(Human Visual System, HVS)建模方法比峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)类方法具有较高的准确度。Dalay 模型^[6]和 Lubin 模型^[7]基于每个视觉通道的感知门限检测概率评价图像。文献[8]基于基准、亮度和掩膜的归一化因子使用 Minkowski 度量进行评价。文献[9]则利用离散余弦和小波变换模拟人眼评价图像质量。文献[10]优化了评价参数。HVS 方法

的缺点是建模效率较低，并且较少考虑图像自身的失真特性。

近些年基于系统论提出了一些新的方法。文献[11]提出的 SSIM(Structural SIMilarity)方法基于图像结构相关性评价其质量。文献[12]提出的信息保真度准则(Information Fidelity Criterion, IFC)方法基于失真图像和参考图像共享信息量的大小进行质量评价。文献[13]提出的奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)算法基于参考图像和失真图像奇异值的差值评价图像质量。文献[14]将图像分离出频率失真度量 (Distortion Measure, DM) 和加性噪声失真度量(Noise Quality Measure, NQM)并分别进行评价。系统论方法的优点是基于图像的语义信息进行质量评价，建模效率较高，但缺点是没有考虑 HVS 的多通道特性。

当前，比较多的研究将 HVS 特性融入图像高层系统论，取得了较好的评价效果。文献[15]提出的多尺度结构相似度(Multi-Scale Structural SIMilarity, MS-SSIM)算法融合了图像多个尺度上的 SSIM 评价。文献[16]提出的特征相似度(Feature SIMilarity, FSIM)算法则基于相位一致性特征评价图像质量。文献[17]提出了基于局部统计结构相关(Statistical Local Correlation, SLC)算法。文献[18]提出了图像奇异值分解的结构相似度评价算法。文献[19]提出的视觉显著索引(Visual Saliency Index, VSI)算法在视觉显著图(Graph-Based Visual Saliency, GBVS)变换域计算图像的 SSIM 值。文献[20]提出的视觉信息保真度(Visual Information Fidelity, VIF)算法则评价图像视觉稀疏特征的相似度。这些改进方法的缺点是图像视觉特征算法不统一，且不能自适应地融合最佳评价策略。

该领域目前仍然存在的问题是针对图像不同类型失真和不同程度失真的评价，没有一种方法整体上保持较好的评价性能。针对该问题，并借鉴 HVS

特性及 SSIM 类改进算法的成果，本文提出一种基于图像视觉失真度显著的自适应融合 (Visual Saliency Adaptive Pooling, VSAP)评价方法。VSAP 首先采用 2 维 log-Gabor 变换模拟人眼提取图像视觉显著特征，然后将 HVS 对比度敏感函数和中央凹融入评价，分别计算失真图像和参考图像的视觉结构相似度和视觉失真度，最后基于图像失真度自适应地融合了相似度评价和失真度评价。

2 图像质量评价自适应融合 VSAP 方法

基于图像失真度自适应融合的 VSAP 方法可用图 1 描述。该方法首先对图像进行 log-Gabor 变换模拟人眼提取图像的多通道视觉显著图特征，然后设计视觉结构相似度(Visual Structural SIMilarity, VSSIM)算法和视觉阈值迭加自适应 (Visual Threshold Iteratively Adaptive, VTIA)算法分别计算失真图像和参考图像的相似度与失真度，最后基于图像失真度函数 $\lambda(\text{MSE})$ 自适应地融合 VSSIM 与 VTIA 获得图像质量评价 VSAP 值。其中，VSSIM 算法首先独立计算对应通道的相似度 $VSSIM(s, o)$ 值；然后在每个视觉尺度 s 上，基于视觉方向权重系数加权融合 $VSSIM(s, o)$ 值，获得该视觉尺度通道的相似度 $VSSIM(s)$ 值；最后基于视觉尺度权重系数加权融合 $VSSIM(s)$ ，获得最终相似度测量 $VSSIM$ 值。VTIA 算法则按照 VSSIM 算法相似的流程计算失真度 MSE。两者不同之处在于 VTIA 每一步融合过程均多考虑了视觉中央凹效应，且 VSSIM 融合采用乘积的方式，而 VTIA 则采用迭加求和的方式。

HVS 通常根据图像自身失真度，自适应地调节视觉分辨率并融合多重评价方法，因此，VSAP 方法统一并自适应地融合了 VSSIM 和 VTIA 的评价结果，可用式(1)表示：

$$VSAP = (VTIA)^\lambda \cdot (VSSIM_MSE)^{1-\lambda} \quad (1)$$

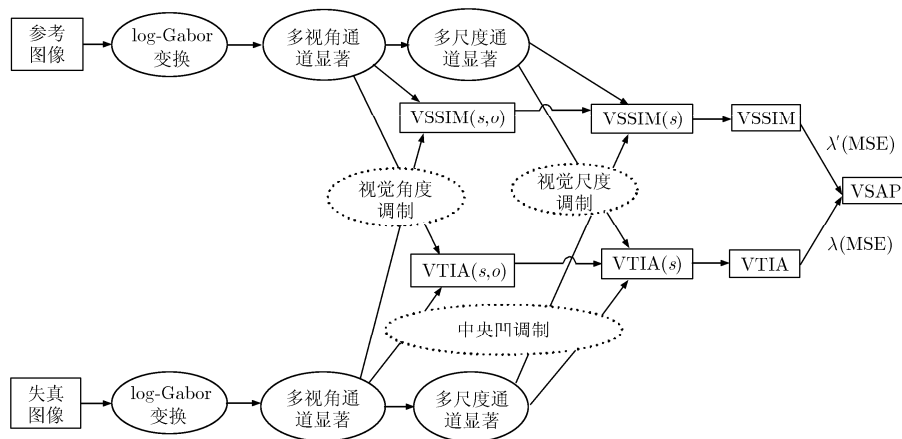


图 1 VSAP 方法原理

式中 $VSSIM_MSE = 100 \cdot (1 - VSSIM)$, $\lambda = 1/[1 + \gamma_1(VTIA)^2]$, γ_1 和 γ_2 为融合参数, 经实验确定最佳值为 $\gamma_1 = 10.0$, $\gamma_2 = 0.00001$ 。

2.1 log-Gabor 变换的视觉特性

log-Gabor 小波具有以下优点: (1)空域和频域联合测不准下限; (2)频谱覆盖宽; (3)高频端延长的尾巴符合自然图像统计特性; (4)对数结构吻合 HVS 特性^[16]。

2 维 log-Gabor 是 1 维 log-Gabor 的径向高斯平滑扩展, 其频域函数为^[16]

$$G_{s,o}(r,\theta) = \exp\left[-\frac{\ln(r/r_s)^2}{2(\ln(\sigma_s/r_s))^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_o)^2}{2\sigma_o^2}\right] \quad (2)$$

式中 s 为尺度因子, o 为方向因子。参数 $r = \sqrt{(u/2M)^2 + (v/2N)^2}$ 是归一化径向频率, $\theta = \arctan(v/u)$ 是方向角, r_s 是尺度 s 的归一化中心频率, σ_s/r_s 决定带宽, θ_o 是变换的中心角, σ_o 是扩展因子。

2.2 图像视觉相似度 VSSIM 算法

以矩阵 $Vr_{s,o}(x)$ 和 $Vd_{s,o}(x)$ 分别表示参考图像和失真图像视觉通道 (s,o) 的显著特征, 则 VSSIM 原理如图 2 所示, 图中 s_1, s_2, s_3 分别表示 log-Gabor 变换的视觉尺度 1 通道、尺度 2 通道和尺度 3 通道, o_1, o_2, o_3 分别表示 log-Gabor 变换的视觉方向 1 通道、方向 2 通道和方向 3 通道。VSSIM 首先基于 SSIM 算法计算每对对应通道的局部结构相关视图矩阵 $VSSIM_{s,o}(x)$, 并利用视觉显著权重系数矩阵

$Vm_{s,o}(x)$ 加权平均 $VSSIM_{s,o}(x)$, 得到每个通道的全局评价 $VSSIM(s,o)$; 其次在每个视觉尺度 s 上, 基于视觉方向权重系数 $w_o(s)$ 加权平均 $VSSIM(s,o)$, 得到该视觉尺度通道的相似度评价 $VSSIM(s)$; 最后基于视觉尺度权重系数 $w(s)$ 加权平均 $VSSIM(s)$, 得到图像质量相似度的最终评价 VSSIM 值。

根据文献[11]的 SSIM 算法, 可得通道 (s,o) 的结构相关视图矩阵 $VSSIM_{s,o}(x)$ 为

$$VSSIM_{s,o}(x) = [LUM_{s,o}(x)]^\alpha \cdot [CST_{s,o}(x)]^\beta \cdot [STR_{s,o}(x)]^\gamma \quad (3)$$

式中 $LUM_{s,o}(x)$, $CST_{s,o}(x)$, $STR_{s,o}(x)$ 分别为均值相似度视图矩阵, 对比度相似度视图矩阵和结构相似度视图矩阵, 参数 α, β, γ 分别表示其对图像评价的影响程度, 一般取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。

$$LUM_{s,o}(x) = \frac{2\mu_{vr(s,o)}(x) \cdot \mu_{vd(s,o)}(x) + C_1}{\mu_{vr(s,o)}^2(x) + \mu_{vd(s,o)}^2(x) + C_1} \quad (4)$$

$$CST_{s,o}(x) = \frac{2\sigma_{vr(s,o)}(x) \cdot \sigma_{vd(s,o)}(x) + C_2}{\sigma_{vr(s,o)}^2(x) + \sigma_{vd(s,o)}^2(x) + C_2} \quad (5)$$

$$STR_{s,o}(x) = \frac{2\sigma_{vr,vd(s,o)}(x) + C_3}{\sigma_{vr(s,o)}(x) \cdot \sigma_{vd(s,o)}(x) + C_3} \quad (6)$$

式中 $\mu_{vr(s,o)}(x)$ 与 $\sigma_{vr(s,o)}(x)$ 为 $Vr_{s,o}(x)$ 的局部均值矩阵和局部标准差矩阵, $\mu_{vd(s,o)}(x)$ 与 $\sigma_{vd(s,o)}(x)$ 为 $Vd_{s,o}(x)$ 的局部均值矩阵和局部标准差矩阵, $\sigma_{vr,vd(s,o)}(x)$ 为 $Vr_{s,o}(x)$ 与 $Vd_{s,o}(x)$ 的局部协方差矩阵。

定义视觉显著权重系数矩阵 $Vm_{(s,o)}(x) =$

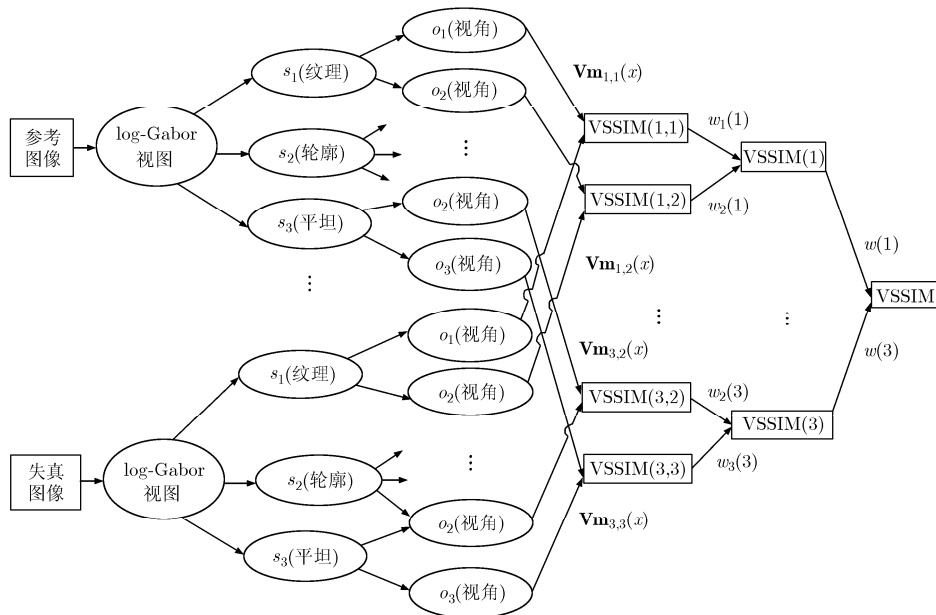


图 2 VSSIM 算法原理

$\max[\mathbf{Vr}_{(s,o)}(x), \mathbf{Vd}_{(s,o)}(x)]$, 则视觉通道 (s, o) 的全局评价 VSSIM (s, o) 为

$$\text{VSSIM}(s, o) = \frac{\sum_{x \in \Omega} \mathbf{Vm}_{(s,o)}(x) \cdot \text{VSSIM}_{(s,o)}(x)}{\sum_{x \in \Omega} \mathbf{Vm}_{(s,o)}(x)} \quad (7)$$

其中, 视觉尺度调制和视觉方向调制分别如下:

(1)视觉尺度调制: 图像中频、高频及低频视觉特征对评价结果的影响不同, 据此, 基于对比度敏感函数 CSF (f) 定义视觉尺度权重系数 $w(s)$ [21]:

$$\text{CSF}(f) = \begin{cases} 2.6(0.0192 + \lambda f) \exp[-(\lambda f)^{1.1}], & f \geq f_{\text{peak}} \\ 0.981, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

$$w(s) = \text{CSF}[f(s)] \quad (9)$$

式中 $f(s) = 2^{-s} \cdot r \cdot v \cdot \tan(0.5^\circ)$, r 是显示器的分辨率, v 是视距, f_{peak} 为 CSF (f) 低通轮廓的最大截止频率。根据文献[21], 取 $r = 37.80$ (像素/cm), $v = 48.51$ (cm), λ 为调节 f_{peak} 的参数, 取 $\lambda = 0.228$, 则 $f_{\text{peak}} = 4$ 周/度, 周/度为空间频率单位, 表示单位视角内图像特征的重复次数。

(2)视觉方向调制: log-Gabor 具有良好的视觉方向性, 据此, 定义视觉方向权重系数 $w_o(s)$ [21]:

$$w_o(s) = \text{CSF}[f_o(s)] \quad (10)$$

式中 $f_o(s) = \frac{f(s)}{[0.15 \cos(4o) + 0.85]}$, $o \in [-\pi, \pi]$ 。

融合视觉方向权重系数 $w_o(s)$, 得图像视觉尺度 s 通道 VSSIM (s) 的评价为

$$\text{VSSIM}(s) = \prod_{o=1}^4 \text{VSSIM}(s, o)^{w_o(s)} \quad (11)$$

融合视觉尺度权重系数 $w_{\xi(T)}(s)$, 得失真图像的最终视觉评价 VSSIM 为

$$\text{VSSIM} = \prod_{s=1}^5 \text{VSSIM}(s)^{w(s)} \quad (12)$$

2.3 图像视觉失真度 VTIA 算法

研究指出 [15-17], 当图像失真机理比较复杂时, 视觉心理往往会自适应地调节视觉分辨率, 基于不同视觉效果启动相应的视觉注意机制, 其中基于视觉阈值的图像失真度评价方法的研究获得了进展 [18-21], 其基本原理如图 3 所示。首先模拟主观评价方法的图像显示与感知原理, 将电脑中存储的图像数据转换为显示器上 HVS 感知到的图像效果, 并进行视觉多通道分解; 其次, 基于 HVS 特性提取各通道阈值和分配视觉权重系数; 最后基于视觉权重系数加权平均各通道内失真度的局部评价, 获得各通道的差异检测结果, 并通过各通道差异结果的 MSE 融合获得失真图像失真度的最终评价 VTIA

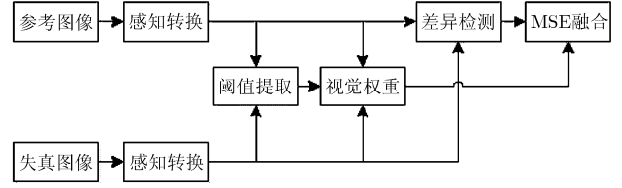


图3 VTIA方法

值。其中, 感知转换主要基于 weber 定理 $L = (k_0 + k_1 \cdot I)^\tau$ 和非线性响应函数 $P = \sqrt[3]{L}$ 将电脑中存储的图像数据 I 模拟转换为 HVS 的感知效果 P 。参照文献[21]取 $k_0 = 0$, $k_1 = 0.02874$, $\tau = 2.2$ 。通道视觉阈值自适应提取和视觉权重分配原理分别如下:

(1)视觉阈值自适应提取: 采取文献[21]的方法, 将 $\mathbf{Vr}_{s,o}(x)$ 划分为大小 11×11 的块(块间 60% 重叠), 记第 T 块的局部有效对比度函数为

$$C_{\text{vr}}(T) = \sigma_{\text{vr}}(T) / \mu_{\text{vr}}(T) \quad (13)$$

$\mu_{\text{vr}}(T)$ 是块 T 的均值, $\sigma_{\text{vr}}(T)$ 是子块 T 集内标准差的最小值, 记 $\mathbf{Verr}_{s,o}(x) = \mathbf{Vd}'_{s,o}(x) - \mathbf{Vr}'_{s,o}(x)$, 则有

$$C_{\text{err}}(T) = \begin{cases} \sigma_{\text{err}}(T) / \mu_{\text{vr}}(T), & \mu_{\text{vr}}(T) \geq 0.5 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

失真阈值判决准则为

$$\xi(T) = \begin{cases} \ln C_{\text{err}}(T) - \ln C_{\text{vr}}(T), & \ln C_{\text{err}}(T) > \ln C_{\text{vr}}(T) > \delta \\ \ln C_{\text{err}}(T) - \delta, & \ln C_{\text{err}}(T) > \delta \geq \ln C_{\text{vr}}(T) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

$\delta = -5$ 为视觉失真度检测硬阈值。

考虑视觉通道 (s, o) 的调制效应, 并取 $\delta = -0.12$, 则式(15)应为

$$\xi_{s,o}(T) = \xi(T) \cdot \text{CSF}[f_o(s)] \quad (16)$$

(2)视觉中央凹调制: 文献[22]的中央凹理论认为: 中央凹中心区域的空间分辨率高于非中心区域的分辨率。文献[23]将这种特性表示成如式(17)所示的空间函数:

$$K(T) = \frac{d_t}{d_t + d(T) / d_0} \quad (17)$$

式中 $d(T)$ 表示块 T 中心到图像中心的距离, d_0 表示图像边缘到图像中心的距离, d_t 在文中取为 4.0, 考虑中央凹视觉效应后, 则式(15)应为

$$\xi'_{s,o}(T) = \xi_{s,o}(T)^{K(T)} \quad (18)$$

根据文献[21], 可以推导视觉通道 (s, o) 的均方根误差 MSE 应为

$$\text{MSE}(s, o) = \left\{ \frac{1}{T} \sum_T [\xi'_{s,o}(T) \cdot D'_{s,o}(T)]^2 \right\}^{1/2} \quad (19)$$

$$D'_{s,o}(T) = \frac{1}{N_T^2} \sum_{i,j \in N_T} [\text{Verr}_{(s,o)}(i,j)]^2 \quad (20)$$

叠加所有通道的失真度, 可得最终评价结果 VTIA 为

$$\text{VTIA} = \sum_{s=1}^M \sum_{o=1}^N \text{VTIA}(s,o) = \sum_{s=1}^M \sum_{o=1}^N \text{MSE}(s,o) \quad (21)$$

式中 N 表示视觉方向通道数, 由于 log-Gabor 的高效性, 一般取 $N = 6$, M 表示视觉尺度分辨率, $M = \lceil \log_2(\min\{m,n\}) \rceil$, m, n 是 $\mathbf{Vr}'_{s,o}(x)$ 的大小, 符号 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整。

3 实验结果分析

本实验采用 LIVE 数据库, 该库包含以下 5 种典型失真: (1)JPEG 压缩; (2)JPEG2000 压缩; (3)WN 白噪声; (4)gblur 高斯模糊; (5)fastfading 移动信道。根据视频质量专家组 VQEG 规范化标准测试 3 个指标: (1)反映主、客观评价结果数据相关性的斯皮尔曼等级相关系数 SROCC 指标; (2)基于非线性数据拟合回归算法的相关系数 CC; (3)拟合均方根误差 RMSE。实验过程保持严格同等条件, 每个方法每次测试都从同一初始参数开始。

3.1 基于图像不同失真类型的实验结果

表 1 是 VSAP 方法和其它方法基于图像不同失真类型的非线性数据拟合回归算法的 Pearson 相关系数 CC 和均方根误差 RMSE 实验结果, CC 衡量预测的准确性, 越接近 1 则说明数据拟合一致性越好, RMSE 是标准非线性拟合的准确度, RMSE 越小说明拟合精度越高。表 1 中加粗数字表示性能较好, 结果显示 VSAP 方法的 CC 和 RMSE 指标对于各类图像失真都能保持较好的预测相关性和精度, 且整体评价性能(RMSE=6.104, CC=0.965)明显优于其它方法。

表 2 中 SROCC 指标的实验结果越接近 1 说明该方法的主、客观相关性越好。表中加粗数字表示

性能较高, 结果说明了 VSAP 方法对各类失真的客观评价与主观感知相对其它方法保持了较高的相关性, 且整体评价性能明显优于其它方法(SROCC=0.963, 高于 FSIM 方法 0.2 个百分点)。

3.2 基于图像不同失真程度的实验结果

本实验依据平均主观分值 (Mean Opinion Scores, MOS) 将图像失真划分为低 ($\text{MOS} < 21$)、中 ($21 \leq \text{MOS} < 50$)、高 ($50 \leq \text{MOS} \leq 85$) 3 个失真水平, 对每个失真水平保持统一的实验初值条件, 对不同失真水平的评价, 只有当 3 个指标 RMSE, CC 和 SROCC 都保持较高的水平时, 才能说明该方法性能较好。表 3 中加粗数字表示性能较低, 结果表明多数方法对图像高失真的评价性能不稳定, 与主观感知相关性较低, MSSIM 的 SROCC 也仅有 0.544。本文 VSAP 方法对图像高失真水平的评价性能, 相对其它方法有了明显的提升 (RMSE=6.004, CC=0.625, SROCC=0.638), 也是唯一对不同水平失真整体评价保持较好稳定性能的方法。

图 4 是 VSAP 方法和其它两个方法的主客观测试结果散点及非线性回归图, 图 4(a) 是基于视觉阈值信噪比的图像质量评价方法, 图 4(b) 是基于结构相关的图像质量评价方法, 图 4(c) 图是基于图像失真度自适应融合的质量评价方法。图 4 结果显示 VSAP 方法拟合曲线的评价结果整体分布较为均匀, 预测的线性度较为准确, 每个测量结果的散点围绕拟合曲线均匀集中分布说明 VSAP 方法的评价精度高。

4 结束语

利用 log-Gabor 变换的视觉显著性, 计算图像多通道相似度和失真度, 并结合 HVS 的视觉方向、视觉尺度调制效应及中央凹融合获得失真图像和参考图像的相似度与失真度测量结果, 最后提出的 VSAP 融合评价基于图像失真度自适应地融合了相

表 1 VSAP 方法及其它方法的均方根误差 RMSE 和相关系数 CC 比较

方法	JPEG2000		JPEG		WN		gblur		fastfading		整体	
	RMSE	CC	RMSE	CC	RMSE	CC	RMSE	CC	RMSE	CC	RMSE	CC
PSNR	6.201	0.967	7.081	0.957	2.447	0.994	8.921	0.912	6.861	0.951	8.125	0.936
VSNR	11.839	0.874	11.310	0.885	8.148	0.929	10.032	0.887	11.829	0.845	10.885	0.882
NQM	9.334	0.924	5.140	0.977	7.783	0.935	10.081	0.886	9.962	0.890	8.248	0.938
SSIM	5.954	0.970	6.744	0.961	4.026	0.981	5.827	0.963	5.828	0.965	7.525	0.946
MSSIM	5.955	0.970	6.749	0.961	3.027	0.991	5.828	0.963	6.334	0.958	7.437	0.947
VIF	5.790	0.971	7.328	0.953	5.459	0.969	10.279	0.881	6.707	0.953	10.114	0.899
VSI	6.538	0.963	6.473	0.964	3.867	0.984	6.158	0.959	7.060	0.948	7.686	0.943
FSIM	6.289	0.966	7.123	0.956	4.373	0.980	4.829	0.975	6.394	0.957	7.276	0.949
VSAP	4.636	0.982	7.307	0.954	3.380	0.988	4.911	0.974	5.524	0.968	6.104	0.965

表 2 VSAP 方法及其它方法的 SROCC 比较结果

方法	JPEG2000	JPEG	WN	gblur	fastfading	整体
PSNR	0.954	0.932	0.992	0.873	0.936	0.909
VSNR	0.789	0.825	0.890	0.808	0.833	0.808
NQM	0.962	0.953	0.984	0.947	0.924	0.938
SSIM	0.980	0.962	0.982	0.972	0.974	0.950
MSSIM	0.980	0.963	0.983	0.973	0.969	0.951
VIF	0.974	0.953	0.982	0.900	0.969	0.912
VSI	0.970	0.953	0.987	0.970	0.964	0.946
FSIM	0.982	0.963	0.980	0.983	0.971	0.961
VSAP	0.977	0.953	0.990	0.974	0.962	0.963

表 3 VSAP 方法及其它方法基于图像不同失真度的测试

MOS	指标	PSNR	VSNR	NQM	FSIM	SSIM	VSI	MSSIM	VIF	VSAP
(0,21) 低失真	RMSE	0.279	0.268	0.258	0.250	0.257	5.963	0.358	3.374	3.892
	CC	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.876	0.785
	SROCC	0.996	0.994	0.997	0.998	0.997	0.550	0.997	0.550	0.918
[21,50) 一般失真	RMSE	6.185	8.369	6.018	4.419	7.201	4.603	4.814	5.831	4.981
	CC	0.747	0.436	0.762	0.880	0.633	0.869	0.856	0.779	0.844
	SROCC	0.747	0.375	0.760	0.875	0.860	0.865	0.852	0.789	0.839
[50,85] 高失真	RMSE	7.070	6.629	6.500	6.165	6.530	6.703	6.189	7.408	6.004
	CC	0.393	0.507	0.535	0.598	0.530	0.490	0.594	0.268	0.625
	SROCC	0.347	0.429	0.491	0.577	0.518	0.485	0.544	0.317	0.638

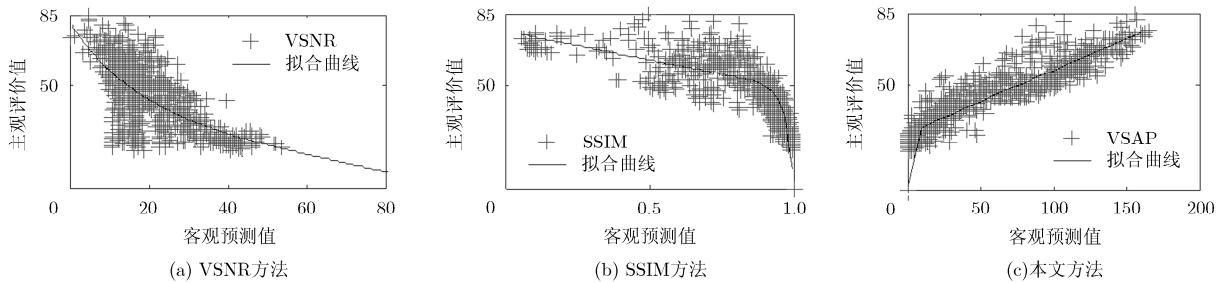


图 4 VSAP 及其它方法的主观评价散点图

似度与失真度，实验结果说明该方法评价结果与主观评价较为吻合，整体上精度比其它方法优越。后期研究将在 log-Gabor 变换的视觉特性和图像失真度之间建立一种自适应的关系，并结合图像处理的后视觉心理决策机制，通过混合专家(Mixture of Expert, MoE)理论最优化地融合多重图像质量评价方法。

参 考 文 献

[1] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 219-226.
Jiang Gang-yi, Huang Da-jiang, Wang Xu, et al. Overview on image quality assessment methods[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 219-226.

[2] 张飞艳, 谢伟, 陈荣元, 等. 基于视觉加权的奇异值分解压缩图像质量评价测度[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1061-1065.
Zhang Fei-yan, Xie Wei, Chen Rong-yuan, et al. Compression image quality assessment based on human visual weight and singular value decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(5): 1061-1065.

[3] 王翔, 丁勇. 基于 Gabor 滤波器的全参考图像质量评价方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(3): 422-430.
Wang Xiang and Ding Yong. Full reference image quality assessment based on Gabor filter[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2013, 47(3): 422-430.

[4] 米曾真. 小波域中 CSF 频率与方向加权的图像质量评价方法

- [J]. 电子学报, 2014, 42(7): 1273-1276.
- Mi Zeng-zhen. Image quality evaluation method based on frequency and direction weighted to CSF in wavelet domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(7): 1273-1276.
- [5] Yalman Y. Histogram based perceptual quality assessment method for color images[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 2014, 36(6): 899-908.
- [6] Daly S. The visible different predictor: an algorithm for the assessment of images fidelity[C]. Digital Images and Human Vision Conference, Cambridge, England, 1993: 179-206.
- [7] Lubin J. A visual discrimination model for images system design and evaluation[C]. Proceedings of the Conference on Visual Models for Target Detection and Recognition, Singapore City, Singapore, 1995: 207-220.
- [8] Safranek R J and Johnston J D. A perceptually tuned sub-band image coder with image dependent quantization and post-quantization data compression[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoust, Speech and Signal Processing, Glasgow, UK, 1989: 1945-1948.
- [9] Watson A B. DCT quantization matrices visually optimized for individual images[C]. Proceedings of the SPIE Human vision, Visual Processing, and Digital Display IV, Washington, USA, 1993: 202-216.
- [10] Teo P C and Heeger D J. Perceptual image distortion[C]. SPIE International Conference on Image Processing, Texas, USA, 1994: 982-986.
- [11] Wang Zhou, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [12] Sheikh H R, Bovik A C, and Veciana G D. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2117-2128.
- [13] Aleksandr S D, Alexander G, and Eskicioglu A M. An SVD-based grayscale image quality measure for local and global assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2): 422-429.
- [14] Venkata N D, Kite T D, Bovik A C, *et al.* Image quality assessment based on degradation model[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(4): 636-650.
- [15] Wang Zhou, Simoncelli E P, and Bovik A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment[C]. Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, Canada, 2002(2): 1398-1402.
- [16] Zhang Lin, Zhang Lei, Mou Xuanqin, *et al.* FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [17] Ding Yong, Wang Shao-ze, and Zhang Dong. Full-reference image quality assessment using statistical local correlation [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(2): 79-81.
- [18] Hu An-zhou, Zhang Rong, Yin Dong, *et al.* Image quality assessment using a SVD-based structural projection[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29(3): 293-302.
- [19] Zhang Lin, Shen Ying, and Li Hong-yu. VSI: a visual saliency-induced index for perceptual image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(10): 4270-4281.
- [20] Chang Hua-wen, Yang Hua, Gan Yong, *et al.* Sparse feature fidelity for perceptual image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(10): 4007-4018.
- [21] Larson E C and Chandler D M. Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(1): 011006-1-011006-21.
- [22] Wandell B A. Foundations of Vision[M]. Stanford: Sinauer Associates, 1995: 277-284.
- [23] Wang Zhou, Lu L G, and Bovik A C. Foveation scalable video coding with automatic fixation selection[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(2): 243-254.
- 丰明坤: 男, 1978 年生, 博士生, 讲师, 研究方向为计算机视觉、图像质量评价。
- 赵生妹: 女, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信中的信号处理。
- 邢超: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为编码信息论。