

文章编号 1004-924X(2017)03-0742-07

广义平均的全参考型图像质量评价池化策略

刘国军*, 高丽霞, 陈丽奇

(宁夏大学 数学统计学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:为了设计与人的主观评价相吻合的全参考型客观图像质量评价(IQA)算法。针对不同算法提取的局部特征,利用广义平均的非线性性质,提出了2种池化策略,以提高结构相似度(SSIM),梯度结构相似度(GSSIM),特征相似度指标(FSIM)的评价能力。在TID2008和TID2013数据库中进行数值实验,讨论了所有失真类型非线性参数的选择以及不同失真类型之间非线性参数的变化。结果表明,采用广义平均池化策略能提高IQA算法的有效性。4种客观评价指标 Spearman 等级相关系数(SROCC)、Kendall 等级相关系数(KROCC)、Pearson 线性相关系数(PLCC)和均方误差根(RMSE)表明所提算法性能优于已有的算法,与人的视觉系统具有一致性。

关键词:图像质量评价;全参考;池化策略;广义平均

中图分类号:TP391;TP18 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0742

Pooling strategy for full-reference IQA via general means

LIU Guo-jun*, GAO Li-xia, CHEN Li-qi

(School of Mathematics and Statistics, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

* Corresponding author, E-mail: liugj@nxu.edu.cn

Abstract: In order to design a full-reference objective Image Quality Assessment (IQA) algorithm that consistent with subjective evaluation. Based on local feature extracted according to different algorithms and nonlinear properties of generalized means strategy, two pooling strategies were proposed to promote the ability to evaluate Structural Similarity Image Measurement (SSIM), Gradient Structural Similarity Image Measurement (GSSIM) and Feature Similarity Index (FSIM). Numerical test was conducted in TID2008 and TID2013 database, selections of various distortion non-linear parameters as well as the changes of non-linear parameters among different distortion types were discussed. The results show that the application of general means strategies could promote the effectiveness of IQA algorithm. 4 kinds of objective evaluation indexes, which are Spearman's Rank-Order Correlation Coefficient (SROCC), Kendall's Rank-Order Correlation Coefficient (KROCC), Pearson's Linear Correlation Coefficient (PLCC) and the Root Mean Square Error (RMSE), indicate that the algorithm proposed herein is superior to the existing algorithm, proves the consistency with human visual system.

Key words: image quality assessment; full reference; pooling strategy; general mean

收稿日期:2016-12-21;修订日期:2017-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61461043, No. 61362029);宁夏自然科学基金资助项目(No. NZ1616)

1 引言

图像质量评价(Image Quality Assessment, IQA)可分为主观评价和客观评价,根据客观 IQA 方法对参考图像的依赖程度又可将其分为全参考型、部分参考型和无参考型3类。本文主要讨论全参考型 IQA(Full Reference IQA, FR-IQA)。

过去十几年里,研究者们已经提出了许多 FR-IQA 方法^[1-2],这些方法通常可通过两步方法来实现^[3-4]。第一步:计算参考图像与失真图像之间的局部质量图,第二步:通过池化策略得到局部质量图最终的质量得分。Wang 等人^[5]提出的结构相似度(Structural Similarity, SSIM)模型,是 FR-IQA 研究的里程碑。SSIM 在两步法的第一步中计算并合并3个特征图,第二步采用算术平均池化策略得到最终的质量得分^[6]。算术平均池化策略对特征图的每个像素同等对待,即该策略隐含的先验是每个像素对图像质量评价的贡献是一样的。然而 SSIM 忽视了人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)的底层特征,这将导致很多时候 SSIM 在评价图像质量时与主观评价结果不一致。针对此问题, Xue 等人^[7]提出了另一种池化策略,即利用参考图像和失真图像梯度模的标准差(Standard Deviation, SD)来预测图像质量,该方法比大多数流行的 IQA 方法有更好的预测精度。

另外,考虑到不同特征对图像质量的影响存在差异,研究者们又提出了不同的加权池化策略,例如:信息量加权^[3]、相位一致性加权^[7]和区域类型加权^[8]。加权策略的目的在于刻画 HVS 对不同特征所对应质量区域的敏感性,虽然这些策略在一定程度上提高了评价准确率,但其计算复杂度高、运行时间较长。最近, Huang 等人^[9]提出用调和平均作为池化策略来提高 SSIM, GSSIM (Gradient SSIM)^[10] 和 FSIM (Feature Similarity Index)^[7] 的评价性能。文献^[9]的实验结果表明,与原来的 FR-IQA 指标相比,采用调和平均池化策略可以有效地提高评价准确率,尤其对于一小块存在严重失真的区域,效果更为显著。传统的 FR-IQA 在第二步通过空域池化方法,由局部质量图池化计算得到最终的评价分值。文献^[11]从局部质量图中提取质量直方图和统计特

征,来描述像素质量的空域分布,进而提出了一种空域池化方法。该方法能够显著提高现有 IQA 方法的评价性能,与主观评价结果的吻合度高。

特征池化的本质是将 HVS 对图像质量评价的复杂过程模拟为一个非线性映射过程。由于大多数基于结构的 IQA 方法重点关注的是图像结构的改变对评价结果的影响,却在一定程度上忽视了池化策略和 HVS 的非线性特点。基于上述考虑,本文提出了两种广义平均的 IQA 池化策略,改进和拓展了 SSIM, GSSIM, FSIM 算法,推广和提升了文献^[9]的结果。

2 广义平均

对于任意的 n 个非负数 x_1, x_2, \dots, x_n , 记作 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则其广义平均定义为:

$$G(x, r) = \begin{cases} \left\{ \frac{x_1^r + x_2^r + \dots + x_n^r}{n} \right\}^{\frac{1}{r}}, & r \neq 0 \\ \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n}, & r = 0 \end{cases} \quad (1)$$

广义平均是几种常用平均的概括和推广。特殊地,当 $r = -1$ 时, $G(x, r)$ 为调和平均;当 $r = 0$ 时, $G(x, r)$ 为几何平均;当 $r = 1$ 时, $G(x, r)$ 为算术平均;当 $r = 2$ 时, $G(x, r)$ 为平方平均。此外,常见的几类平均具有如下关系: $G(x, -1) \leq G(x, 0) \leq G(x, 1) \leq G(x, 2)$ 。总之,除了 $r = 1$ 外,广义平均所定义的公式都是非线性的。

HVS 是一个复杂的非线性分析系统, IQA 主观评价就是通过人类观测图像给出质量得分。对于目标图像, HVS 通过自上而下的处理,积极主动地去寻找目标中失真的区域。其中对局部失真区域的度量是自上而下处理的重要部分。自下而上的处理在 HVS 中同样起着重要作用,其可将 HVS 对图像质量复杂的评判过程简化为一个局部特征的非线性映射,但它们之间到底存在怎样的非线性关系尚无定论、值得探究。

研究表明^[9], HVS 对图像中局部严重失真的区域更加敏感。也就是说,图像中严重失真的局部区域对整幅图像的质量影响较大,图 1 就很好地解释了这一情况。图 1 中, (a) 是参考图像, (b) 和 (c) 是 (a) 的不同程度的失真图像, (b) 中含有 4 个白色小块, (c) 改变了参考图像的亮度。尽管 (c) 的均方误差 (Mean Square Error, MSE) 较 (b) 大, 但人们通常会认为 (c) 有较好的质量。由此可

知,局部严重失真区域与整幅图像质量之间应该存在某种非线性关系。考虑到非线性变换能够很好地反映它们之间的关系,故本文利用广义平均

的非线性(不同的参数 r 刻画了不同的非线性)来模拟 HVS 对图像质量评价的复杂过程,提出了 FR-IQA 算法的两类广义平均池化策略。

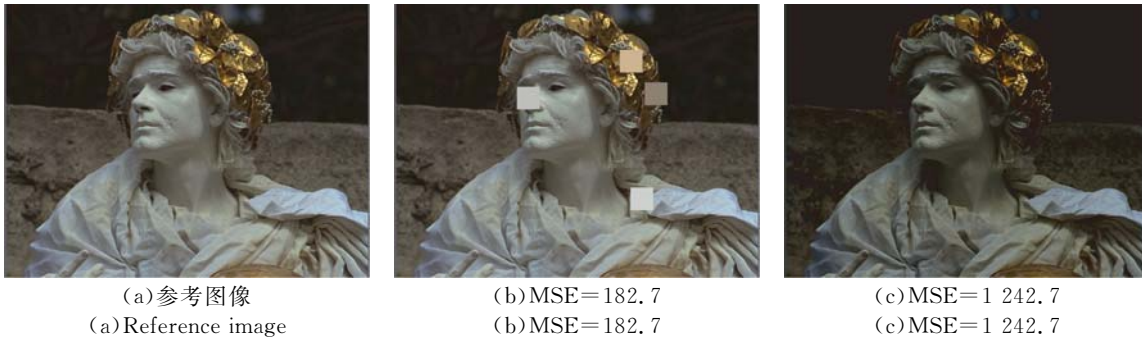


图 1 TID2008 中的一幅参考图像和其失真图像

Fig. 1 A reference image and its distortion images in TID2008

3 广义平均池化策略模型

3.1 对 SSIM 采用广义平均池化策略

SSIM 模型由 3 部分组成,即:亮度相似性 $l(x, y)$ 、对比度相似性 $c(x, y)$ 和结构相似性 $s(x, y)$ 。SSIM 的定义如下:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma, \quad (2)$$

式中: x 和 y 分别表示参考图像和失真图像的局部图像块;参数 α, β, γ 都是大于零的常数,通常取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ 。对所有局部图像块的 SSIM 取算术平均可得到整幅图像的 SSIM 值。

对于 SSIM 的 3 个局部特征,采用 2 种广义平均池化策略,从而得到 2 种改进算法。

算法 1: 对由 3 个局部图像块得到的 SSIM 值(见式(2)),做广义平均获得整幅图像的质量得分(GM-SSIM1)。即:

$$GM-SSIM1 = G(SSIM, r), \quad (3)$$

算法 2: 对 SSIM 的 3 幅局部特征图 $l(x, y)$, $c(x, y)$ 和 $s(x, y)$, 先分别做广义平均再进行线性合并(GM-SSIM2)。即:

$$GM-SSIM2 = \omega_1 G(l, r) + \omega_2 G(c, r) + \omega_3 G(s, r), \quad (4)$$

其中: l, c, s 是 3 个特征相似图, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 表示其权重。

3.2 对 GSSIM 采用广义平均池化策略

GSSIM^[10] 利用梯度来刻画图像的边缘信息,

从而提高图像的质量评分。GSSIM 首先利用梯度算子构建梯度图,其次在梯度图上计算 SSIM,计算方法与 SSIM 一样。同样,对 GSSIM 采用 2 种广义平均池化策略可得:

$$GM-GSSIM1 = G(GSSIM, r), \quad (5)$$

$$GM-GSSIM2 = \omega_1 G(l_g, r) + \omega_2 G(c_g, r) + \omega_3 G(s_g, r), \quad (6)$$

其中, l_g, c_g, s_g 是 3 个梯度特征相似图, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 表示其权重。

3.3 对 FSIM 采用广义平均池化策略

Zhang 等人^[7] 提出的 FSIM 由 2 部分组成。首先,提取相位一致性(Phase Congruency, PC)和梯度幅值(Gradient Magnitude, GM)局部特征相似图:

$$S_{PC}(x) = \frac{2PC_1(x) \cdot PC_2(x) + T_1}{PC_1^2(x) + PC_2^2(x) + T_1}, \quad (7)$$

$$S_G(x) = \frac{2G_1(x) \cdot G_2(x) + T_2}{G_1^2(x) + G_2^2(x) + T_2}. \quad (8)$$

其中 T_1, T_2 是正常数,以避免分母取到 0。

其次,利用 PC 作为权函数进行加权池化,以得到最终的质量得分。同样地,对 FSIM 采用 2 种广义平均池化策略可得:

$$GM-FSIM1 = G(S_{PC}(x) \cdot S_G(x), r), \quad (9)$$

$$GM-FSIM2 = \omega_1 G(S_{PC}, r) + \omega_2 G(S_G, r), \quad (10)$$

其中: ω_1, ω_2 是特征相似图的权重。

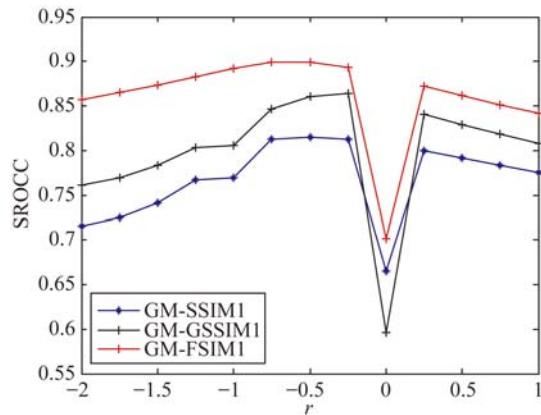
4 数值实验

为了研究本文算法与 HVS 评价结果的吻合程度,通常从客观评价与主观评价 (Mean Opinion Score, MOS) 两方面进行一致性分析。文中采用 Spearman 等级相关系数 (SROCC)、Kendall 等级相关系数 (KROCC)、Pearson 线性相关系数 (PLCC) 和均方误差根 (Root Mean Square Error, RMSE) 4 种评价指标进行客观评价。前两个相关系数用于测量图像质量评价算法的单调性,它们的数值越大,说明相关性越好。计算 PLCC 和 RMSE 需要应用回归分析得到客观得分与 MOS 之间的非线性映射。对于非线性回归,使用下面的映射函数^[12]:

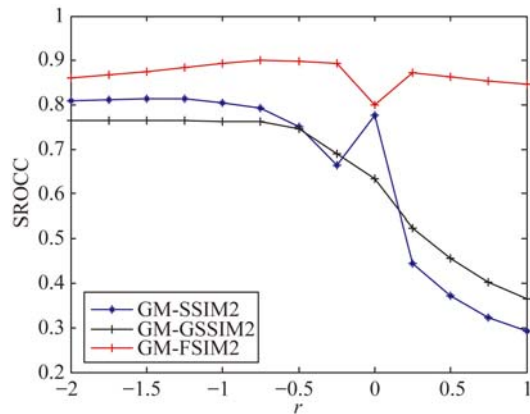
$$f(x) = \beta_1 \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + e^{\beta_2(x - \beta_3)}} \right] + \beta_4 x + \beta_5, \quad (11)$$

其中 $\beta_i, i=1, 2, \dots, 5$ 是可选择的参数。一个好的客观评价算法应该具有较高的 SROCC, KROCC 和 PLCC,同时具有较低的 RMSE。

本文改进算法中需要确定参数 r 的值。对于 TID2008^[13] 中的 25 幅参考图像和相应的 1 700 幅失真图像选取不同的参数值做实验,对实验结果进行比对,得到最佳的参数值。最佳参数值的选择标准是可以获得较高的 SROCC 值。实验中, r 取值为 $[-2, 1]$, 步长为 0.25, 对几种改进算法分别进行实验,它们的 SROCC 值随参数 r 值的变化情况如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。由图 2(a) 可以看出,当 $r = -0.5$ 时, GM-SSIM1 与 GM-FSIM1 取得最高的 SROCC 值;当 $r = -0.25$ 时, GM-GSSIM1 取得最高的 SROCC 值。由图 2(b) 可知,当 $r = -1.25$ 时, GM-SSIM2 与 GM-GSSIM2 取得最高的 SROCC 值;当 $r = -0.75$ 时, GM-FSIM2 取得最高的 SROCC 值。因此本文对 GM-SSIM1, GM-GSSIM1 取 $r = -0.5$, 对 GM-FSIM1 取 $r = -0.25$, 对 GM-SSIM2, GM-GSSIM2 取 $r = -1.25$, 对 GM-FSIM2 取 $r = -0.75$ 。对于不同的算法需选择不同的参数 r , 这也体现了 HVS 对不同特征提取的差异。



(a) 广义平均池化策略 1
(a) General mean pooling strategy 1



(b) 广义平均池化策略 2
(b) General mean pooling strategy 2

图 2 SROCC 随参数 r 变化的曲线图

Fig. 2 SROCC varies with parameter r

对于改进算法 1, 除 r 以外本文所用的其它参数值均与 SSIM, GSSIM, FSIM 中的参数值相同。对改进算法 2, 在第一步中除 r 外其它所用参数均不变。下面讨论第二步参数 $\omega_i (i=1, 2, 3)$ 的取值。文献[14-15]证实在 IQA 中去掉亮度比较因子后对图像质量的影响不大, 因此取 $\omega_1 = 0$ 。对 $\omega_2 (\omega_3 = 1 - \omega_2)$ 的选取方法与 r 一样, 取 $\omega_2 \in [0, 1]$, 步长为 0.1, 其实验结果如图 3 所示 (彩图见期刊电子版)。蓝色曲线和红色曲线分别表示 GM-SSIM2 与 GM-GSSIM2 的结果随 ω_2 的变化情况。由曲线可以看出, SROCC 在 $\omega_2 = 0.5$ 以后变化平缓。由于图像的结构特征在 IQA 中占有重要地位, 为了公平起见, 使 GM-SSIM2 中的参数 $\omega_i (i=1, 2)$ 与文献[9]一样, 取 $\omega_2 = \omega_3 = 0.5$ 。

用同样的方法,得到如图 3 中黑色曲线所示的实验结果。由图 3 可知,曲线一开始变化极小,在 $\omega_1=0.9$ 之后下降,由于梯度和相位都可以描述图像的结构信息,这一定程度上会导致信息的冗余,因此参数 ω_i 的取值对评价结果影响不大,与文献[9]一样,本文取 $\omega_1=\omega_2=0.5$ 。

为了说明广义平均池化策略的有效性,表 1 列举了 2 种改进算法、文献[9]中的方法以及 SSIM,GSSIM,FSIM 方法分别在 TID2008^[13] 和 TID2013^[16] 数据库中的 SROCC,KROCC,PLCC 和 RMSE 值(黑体标注了同类方法中 2 个最优的值)。

表 1 各个评价指标在 2 个标准数据库中的性能比较

Tab.1 Performance comparison of IQA metrics on 2 benchmark databases

	TID2008				TID2013			
	SROCC	KROCC	PLCC	RMSE	SROCC	KROCC	PLCC	RMSE
SSIM ^[5]	0.774 9	0.576 8	0.773 2	0.851 1	0.741 7	0.558 8	0.789 5	0.760 8
HM-SSIM ^[9]	0.808 5	0.602 0	0.782 6	0.835 5	0.769 9	0.577 8	0.797 4	0.748 1
GM-SSIM1	0.815 1	0.623 5	0.800 1	0.805 0	0.766 5	0.586 9	0.809 3	0.728 3
GM-SSIM2	0.813 3	0.618 3	0.787 1	0.826 8	0.782 5	0.588 5	0.802 1	0.740 4
GSSIM ^[10]	0.807 8	0.606 4	0.809 4	0.788 0	0.758 6	0.576 8	0.817 9	0.713 2
HM-GSSIM ^[9]	0.778 4	0.581 9	0.787 9	0.826 4	0.712 6	0.529 5	0.584 7	1.005 7
GM-GSSIM1	0.863 9	0.866 2	0.858 2	0.688 8	0.791 9	0.611 5	0.851 5	0.650 0
GM-GSSIM2	0.803 5	0.603 1	0.791 0	0.807 8	0.746 6	0.557 3	0.796 8	0.749 1
FSIM ^[7]	0.880 5	0.694 6	0.873 8	0.652 5	0.801 5	0.628 9	0.858 9	0.634 9
HM-FSIM ^[9]	0.893 2	0.702 5	0.872 3	0.656 1	0.808 8	0.631 9	0.852 8	0.647 2
GM-FSIM1	0.899 6	0.713 6	0.883 8	0.627 8	0.815 7	0.643 9	0.869 0	0.613 3
GM-FSIM2	0.899 5	0.712 6	0.882 6	0.631 0	0.813 7	0.639 9	0.864 9	0.622 3

由表 1 可以看出,对于 SSIM,FSIM,采用 2 种广义平均池化策略均能提高其评价准确率,对 GSSIM 采用广义平均池化策略 1 得到的 GM-GSSIM1 能够一致地提高其评价准确率,采用广义平均池化策略 2 得到的 GM-GSSIM2 与 GSSIM 的评价结果相当。

为了进一步说明广义平均的非线性,以 GM-SSIM1 算法为例,针对 TID2008 数据库中不同的失真类型选取不同的 r 值进行实验,结果如图 4 所示。图 4(彩图见期刊电子版)显示了在不同失真类型下 SROCC 随参数 r 的变化曲线。由图 4 可知,当 $r=0$ 时,awgn 和 awgn-color 两种失真类型的 SROCC 值最高;spatially corr-noise 在 $r=$

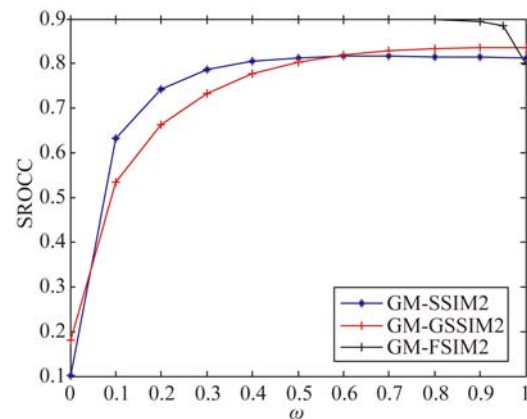
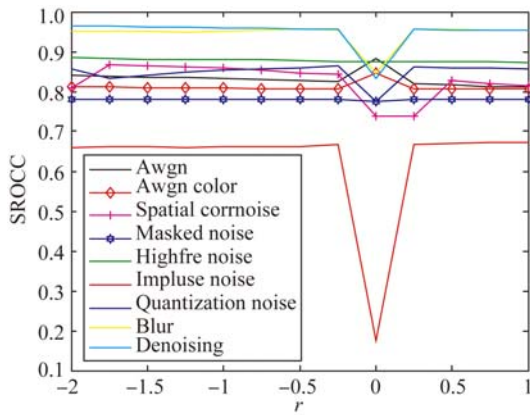


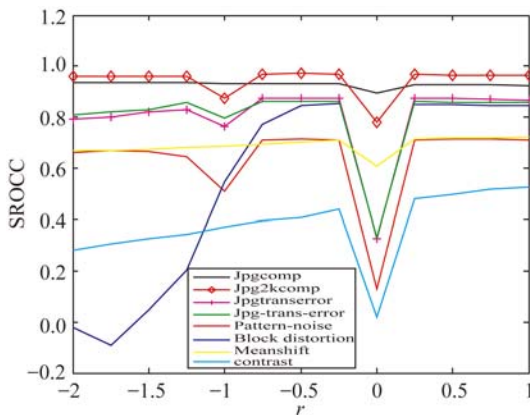
图 3 SROCC 随参数 ω 的变化曲线图

Fig.3 SROCC varies with parameter ω

-1.5 时效果最好;mask dnoise 在 $r=0.5$ 时效果最好;high-fre-noise,denosing 和 jpg-comp 在 $r=-2$ 时评价效果最好;quantization noise 当 $r=-0.25$ 时效果最好;blur 在 $r=0.25$ 时效果最好;jpg2k-comp,jpg-trans-error 和 pattern-noise 当 $r=-0.5$ 时效果最好;jpg2k-trans-error 当 $r=-0.75$ 时效果最好;block-distortion 当 $r=-0.25$ 时效果最好;mean shift, contrast 和 impluse noise 当 $r=1$ 时效果最好。由此可知不同失真类型对应的参数 r 的最佳值不尽相同。这就说明广义平均对不同的失真类型具有不同的非线性,体现了 HVS 对不同失真类型质量评价的差异。



(a)前9种失真类型
(a)First nine types of distortions



(b)后8种失真类型
(b>Last eight types of distortions

图4 GM-SSIM1在不同失真类型下的SROCC随参数r变化的曲线图

Fig4 SROCC curve with the change of parameter r values of GM-SSIM1 for each distortion type

参考文献:

[1] CHANDLER D M. Seven challenges in image quality assessment; past, present, and future research [J]. *ISRN Signal Processing*, 2013, 8(1): 1-53.
 [2] LIN W S, KUO CC J. Perceptual visual quality metrics: A survey [J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 2011, 22(4): 297-312.
 [3] WANG Z, LI Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1185-1198.
 [4] XUE W F, ZHANG L, MOU X Q, et al.. Gradient magnitude similarity deviation: A highly efficient perceptual image quality index [J]. *IEEE*

另外,对 GM-SSIM1 在整个 TID2008 数据库中的每类失真类型采用上述最优参数 r 进行实验,实验得出 SROCC 的值为 0.828 6,但由表 1 知:在整个数据库中的最优参数值调试出的 SROCC 值为 0.815 1,相对提高了 1.7%。当然,最优参数的选择也大大地增加了计算复杂度。

5 结 论

本文基于广义平均提出了 2 种 IQA 方法的池化策略。广义平均除 $r=1$ 时是线性的,其他情形都是非线性的,而非线性变换能够很好地反映 HVS 对局部严重失真区域的敏感性。在 TID2008 和 TID2013 数据库上进行数值实验,结果表明:对 SSIM,FSIM 采用 2 种广义平均池化策略均能一致地提高其评价准确率。相对 GSSIM,GM-GSSIM1 也能够一致地提高其评价准确率,GM-SSIM2 的评价效果与 GSSIM 相当。总体来说,采用广义平均池化策略能够提高 IQA 算法的评价效果。

由于独立成分分析是在分析 HVS 特性基础上利用稀疏编码的一种新颖的变换域方法^[17],可以利用该方法提取图像的特征;也可以利用文献^[18]的方法构建彩色图像质量评价算法,这都将是我们要开展的工作。

Transactions on Image Processing, 2013, 23(2): 684-695.
 [5] WANG Z, 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.
 [6] ZHANG L, ZHANG L, MOU X Q, et al.. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
 [7] LI C, BOVIK A C. Content-partitioned structural similarity index for image quality assessment [J]. *Signal Processing Image Communication*, 2010, 25(7): 517-526.
 [8] HUANG Y, CHEN X, DING X. A harmonic means pooling strategy for structural similarity index meas-

- urement in image quality assessment [J]. *Multimedia Tools & Applications*, 2016, 75(5): 2769-2780.
- [9] CHEN G H, YANG C L, XIE S L. Gradient-based structural similarity for image quality assessment [C]. *13th IEEE International Conference on Image Processing*, 2006:2929-2932.
- [10] LI Q H, FANG Y M, XU J T. A novel spatial pooling strategy for image quality assessment [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2016, 31(2): 225-234.
- [11] 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): 3440-3451.
- [12] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al.. TID 2008-A database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics [J]. *Advances of Modern Radio Electronics*, 2009, 10: 30-45.
- [13] BONDZULIC B P, PETROVIC V S. Additive models and separable pooling, A new look at structural similarity [J]. *Signal Processing*, 2014, 97(7): 110-119.
- [14] ROUSE D M, HEMAMI S S. Understanding and simplifying the structural similarity metric [C]. *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, 2008:1188-1191.
- [15] PONOMARENKO N, JIN L, LEREMEIEV O, et al.. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2015, 30(1): 55-77.
- [16] 骆媛, 张科, 纪明. 增强无人机态势感知的彩色图像融合方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S1): 1-7.
- LUO Y, ZHANG K, JI M. Color image fusion method for enhance situation awareness of ICA [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45 (S1): 1-7. (in Chinese)
- [17] 崔法毅. 色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的彩色人脸识别[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1382-1389.
- CUI F Y. Color face recognition using adaptive feature fusion based on chroma mahalanobis distance map and gray map [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1382-1389. (in Chinese)

作者简介:



刘国军(1978—),男,宁夏吴忠人,博士,教授,硕士生导师,2000年、2003年于宁夏大学分别获得学士、硕士学位,2010年于西安电子科技大学获得博士学位,主要从事小波、偏微分方程图像处理及其应用、图像质量评价等方面的研究。E-mail: liugj@nxu.edu.cn



高丽霞(1991—),女,宁夏固原人,硕士研究生,主要从事图像处理,图像质量评价等方面的研究。E-mail: 18295398631@163.com