

## 基于局部结构张量的无参考型图像质量评价方法

邵宇\* 孙富春 刘莹

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室 北京 100084)

**摘要:** 该文提出一种基于局部结构张量奇异值分解的无参考型图像质量评价方法, 由于图像局部结构张量能反映图像几何结构, 因此利用张量特征值之间的关系来度量图像噪声与模糊水平, 将两个度量结合得到图像质量的综合评价。通过分析仿真图像和实际图像的质量评价结果, 该方法能同时度量因噪声和模糊造成失真后的图像质量。与图像质量评价数据库的主观评价结果比较表明, 该文方法与主观评价结果相关性高, 能很好地反映图像质量的视觉感知效果, 并且易于实现。

**关键词:** 图像质量评价; 奇异值分解; 局部结构张量; 无参考型

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2012)08-1779-07

**DOI:** 10.3724/SP.J.1146.2012.00042

## A No-reference Image Quality Assessment Method Using Local Structure Tensor

Shao Yu Sun Fu-chun Liu Ying

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A new image quality metric is proposed, it can be used to predict the no-reference image quality. Based on the Singular Value Decomposition (SVD) of the local structure tensor of the image, the noise and blur level is measured using the characteristic of singular value. The performance of the method is evaluated with a publicly available database of images and their quality score. The results show that the proposed no-reference method for the quality prediction of noise and blur images has a comparable performance to the leading metrics available in literature, and also that the method is easier to implement.

**Key words:** Image Quality Assessment (IQA); Singular Value Decomposition (SVD); Local structure tensor; No-reference

### 1 引言

数字图像和多媒体技术的发展推动了对图像质量评价(Image Quality Assessment, IQA)的需求, 理解和评价图像质量在图像处理领域特别是图像增强中起着非常重要的作用<sup>[1]</sup>。数字图像质量评价方法可以分为两类: 主观评价和客观评价。前者是由观察者对图像质量评分, 得到平均评价分(Mean Opinion Score, MOS)用以衡量图像质量, 后者利用模型计算图像质量。一般情况下, 主观评价实验结果比较可靠, 但主观评价方法费时费力。近些年, 许多学者提出了一些图像质量客观评价方法, 这些方法的评价结果力求与主观评价结果取得视觉感知相一致的质量测度, 从而使计算机能代替人类自动

评价图像质量。

根据所提供的原始图像信息的程度, 客观图像质量评价方法可以分为三类: 全参考型, 部分参考型和无参考型。全参考型 IQA 是在已知原始图像和失真图像情况下, 通过比较二者的相关性获得失真图像质量的评价值, 常用的全参考型图像质量评价有均方误差(Mean Square Error, MSE)、峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)等, 但这些评价方法不能很好地刻画图像质量, 近年来人们提出了基于人类视觉系统(Human Visual System, HVS)的 IQA 方法。2004 年 Wang 等人<sup>[2]</sup>提出了基于结构相似性度量的 SSIM(Structural SIMilarity)算法。2006 年文献[3]提出了视觉信息保真度(Visual Information Fidelity, VIF)算法。2009 年 Mansour 等人<sup>[4]</sup>则采用了基于奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)后比较特征值差异的图像质

量评价方法。尽管这些全参考型 IQA 能较好的预测图像质量，但在实际应用中往往是无法得到原始图像信息的。2011 年 Lahoulou 等人<sup>[5]</sup>测试了不同的全参考型 IQA 方法在 6 个图像库中的表现。

部分参考型 IQA 是利用原始图像的部分信息预测失真图像质量，一般是提取原始图像的特征与失真图像的特征进行比较获得评价指标值，但这种方法对图像特征比较敏感。

无参考型 IQA 不需要获取原始图像信息，其应用领域非常广泛。目前大部分的无参考型 IQA 算法可以转化为参数优化问题，针对特定的失真类型估计影响图像质量的参数，如噪声方差或模糊滤波的核函数大小等参数。还有一部分无参考型 IQA 是利用自然图像的统计规律，图像的失真程度可以用其与自然图像统计规律的差异来衡量，进而评价图像质量<sup>[6]</sup>。

无参考型 IQA 方法一般针对特定失真类型设计的，这是因为图像的噪声和模糊等失真因素的产生原因不尽相同。例如图像模糊是可能由于镜头的带宽限制滤除了部分高频信号、或者是对焦不准、相机运动等原因产生。图像噪声是可能由于曝光时间不准、传感器内部噪声、传输通道的干扰等原因产生。图像噪声表现在频域是整个频域信号干扰，主要增加了高频信号，而图像模糊则抑制了高频信号。若图像中既有噪声又有模糊，评价其质量不是一件容易的事情。因此大多数图像质量评价方法只能取其中一种失真因素进行评价而忽略其它的因素<sup>[7]</sup>，如针对模糊图像的质量评价方法有文献[8,9]等，噪声图像的质量评价方法有文献[10,11]等。

2010 年 Cohen 等人<sup>[7]</sup>综述了无参考图像质量评价方法，并提出了一种基于自然图像统计的评价方法。Ferzli 等人<sup>[12]</sup>提出了基于 Riemann 张量的非参考型图像清晰度计算方法，图像越模糊，清晰度越低。但无法对同时受噪声和模糊污染的图像做出质量评价。文献[13-15]分别提出了一种基于特征值分解的全参考型 IQA 方法，但需要已知原始图像信息。若在没有原始图像信息的情况下，如何只利用失真图像的局部结构张量来衡量图像质量是目前研究的难点。

本文借鉴了文献[16]中对不同类型失真图像评价的思想，同时考虑了噪声和模糊这两种造成图像失真的因素，通过对局部结构信息受噪声和模糊影响后的表现进行分析，提出了一种新的基于图像局部结构特征的无参考型图像质量评价方法。本文的结构安排如下：首先介绍图像局部结构张量的特征值分析，然后给出本文提出的无参考图像质量评价

方法，并通过计算该方法在仿真数据及 5 类图像数据库上的客观评价结果，比较其与主观评价结果的相关性，最后是结束语。

## 2 图像局部结构张量的奇异值分解

梯度可以有效地描述信号的局部结构信息。考虑图像中某一点  $f(x, y)$ ，其梯度为  $\mathbf{g} = \nabla f(x, y)$ 。在  $f(x, y)$  的  $N \times N$  邻域 ( $w$ )，这点的局部梯度向量<sup>[17]</sup>定义为

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots \\ g_x(k) & g_y(k) \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \quad k \in w \quad (1)$$

那么点  $f(x, y)$  的局部梯度协方差矩阵 (也称为局部结构张量) 为

$$\mathbf{C} = \mathbf{J}^T \mathbf{J} = \begin{bmatrix} \sum_{k \in w} g_x^2(k) & \sum_{k \in w} g_x(k) g_y(k) \\ \sum_{k \in w} g_x(k) g_y(k) & \sum_{k \in w} g_y^2(k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

协方差矩阵 SVD 分解<sup>[17]</sup>后得到

$$\mathbf{C} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \mathbf{U} \begin{bmatrix} s_1 & 0 \\ 0 & s_2 \end{bmatrix} [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2] \quad (3)$$

其中  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$  是正交矩阵， $\mathbf{v}_1$  是局部结构张量的主方向， $\mathbf{v}_2$  是局部结构张量的次方向，特征值  $s_1 \geq s_2 \geq 0$ ，分别表示局部结构张量在  $\mathbf{v}_1$  和  $\mathbf{v}_2$  方向上能量变化大小 (如图 1 所示)。在图像信息平坦的区域，特征值  $s_1 \approx s_2 \approx 0$ ，在图像边缘位置，特征值  $s_1 > s_2 \approx 0$ ，在图像噪声位置，特征值  $s_1 > s_2 > 0$ 。

图像的梯度容易受噪声的影响，导致在受噪声影响的图像中，直接计算梯度并不准确。本文用局部核回归方法<sup>[18]</sup>得到的鲁棒梯度估计代替  $\mathbf{g}$ 。局部梯度协方差矩阵的特征值也与邻域大小有关。如果邻域窗口较小，就不能反映出局部结构特征；若邻域窗口很大，主方向的显著性会受到抑制。邻域大小会对局部结构的特征值大小产生影响，因此在选取邻域大小时，我们避免了选取过大或者过小的情

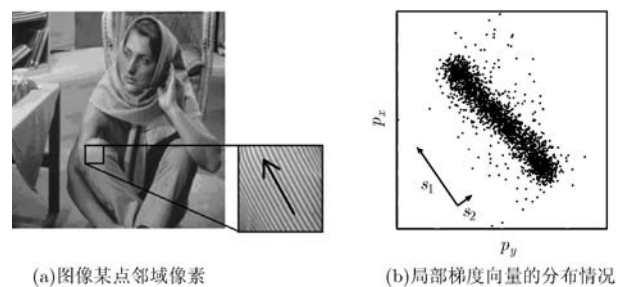


图1 局部结构张量的特征值与特征方向

况，本文分析和实验中选取的是  $5 \times 5$  邻域块。

对于图像上的每一点取周围一个小邻域，计算其局部结构张量，再通过奇异值分解得到特征值和主方向及次方向。上述局部结构张量定义在灰度图像上，对于彩色图像只需在分离出的亮度通道  $Y$  上计算局部结构张量。

### 3 无参考图像质量评价方法

在计算局部结构张量的特征值的基础上，2009年Zhu等人<sup>[19]</sup>提出了一种用特征值估计图像模糊和噪声水平的锐度度量算子，在LIVE图像库<sup>[20]</sup>中的噪声和模糊两类数据上实验并取得了较好的结果，但该方法需要先预估图像噪声的方差；2010年Zhu等人<sup>[16]</sup>又提出了图像内容度量算子，该算子在TID2008图像库<sup>[21]</sup>中的模糊和噪声两类图像上的客观评价结果，与主观评价结果的相关性较好，但在图像显著度低的区域(平坦区域)的客观评价结果与主观评价结果不一致，因此该方法需要先指定每块区域显著水平。

本文借鉴了文献[16]中对不同类型失真图像评价的思想，将文献[22]中提出的方向一致性度量作为图像模糊水平的估计，以文献[23]中提出的特征值指数作为图像噪声水平的估计，最后将两者结合得到图像质量的综合评价。除了这两种度量函数以外，还有角点度量  $[s_1 s_2 / (s_1 + s_2)]$ 、平均扩散率  $(s_1 + s_2) / 2$  和行列式  $(s_1 s_2)$  等等其他度量函数。但是它们都不具备衡量模糊和噪声水平的特性。方向一致性度量也被广泛运用于张量投票中构建棒张量和图像滤波算法中的正则项；特征值指数度量被用于计算弥散张量成像(Diffusion Tensor Imaging, DTI)的水分子各向异性值。

文献[22,23]中利用局部结构张量的特征值，定义了如下反映图像局部结构的度量：

$$(1) \text{方向一致性度量}^{[22]}: c_1 = (s_1 - s_2)^2;$$

$$(2) \text{特征值指数度量}^{[23]}: c_2 = \left( \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \right)^2。$$

由上节分析可知， $s_1$  和  $s_2$  分别表示主方向和次方向的能量大小，因此度量  $c_1$  有如下性质：

$$c_1(\text{边缘点}) > c_1(\text{平滑区域中的点}) \approx 0 \quad (4)$$

$c_2$  度量的是  $s_1$  与  $s_2$  之间的相对大小，对于度量  $c_2$  有

$$1 \approx c_2(\text{边缘点}) > c_2(\text{噪声点}) \approx 0 \quad (5)$$

构造平坦、线性、二次方和边缘等4种图像块，分析  $c_1$  和  $c_2$  在不同图像块中的表现。图2中随着图像块模糊程度加剧，图像块越来越平滑，方向一致性度量  $c_1$  越来越小，图3中  $c_2$  随着图像噪声水

平增加而减小。通过分析得出图像块的  $c_1$  值能表征模糊程度， $c_2$  值能表征图像块的噪声程度。

若图像块旋转任意的角度  $\theta$ ，只是  $v_1$  和  $v_2$  相应旋转角度  $\theta$ ，而图像的局部结构张量特征值  $s_1$  和  $s_2$  不会发生变化，也就是  $c_1$  和  $c_2$  保持不变。

### 4 图像块质量评价因子

定义图像块质量评价因子为

$$Q = c_1 c_2 = (s_1 - s_2)^2 \left( \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \right)^2 \quad (6)$$

为了进一步分析  $Q$  在实际图像块中的性质，选取图4中不同的图像区域块 ( $25 \times 25$  像素大小)。对每个图像块分别进行高斯模糊处理 ( $7 \times 7$  模糊核)，如图4(a)，随着高斯模糊核的方差增加，图像块越来越模糊，图像块质量评价因子  $Q$  也逐渐减小至趋于零。对每个图像块加入均值为零不同方差的高斯白噪声，如图4(b)随着方差的增加，图像块质量评价因子  $Q$  也逐渐减小。

同时可以看出，在图像模糊因素中，纹理图像块的  $Q$  值衰减最快。在噪声因素中，平滑图像块的  $Q$  值衰减最快。这是因为纹理图像块具有很强的边缘特征，随着模糊程度增加，其边缘特征迅速减弱，但其边缘特性受噪声程度影响则比较缓慢，这也符合方向一致性度量及特征值指数度量的性质。

对于一幅图像，无参考型图像质量评价算子  $Q$  具体的计算流程如下：

(1) 对图像中每一点  $k$ ，取其  $N \times N$  邻域 ( $w$ )，计算局部梯度张量的特征值；

(2) 根据式(6)计算图像每一点的局部质量度量  $Q_k$ ；

(3) 把图像每一点的局部度量求和  $Q = \sum Q_k$  得到图像质量客观评价结果。

## 5 实验结果

### 5.1 仿真图像的质量评价实验

设测试图像为  $I$ ，对  $I$  进行如下模型处理得到失真图像  $\hat{I}$ ：

$$\hat{I} = I \otimes k + n \quad (7)$$

其中  $k$  是高斯模糊核， $\otimes$  表示卷积运算， $n$  是高斯白噪声。

以图5中的Barbara为测试图像，随着模糊程度或噪声程度的增大，对应图像质量评价结果  $Q$  值都逐渐减小(图6)。这里的失真图像同时包含了模糊和噪声的情况，横轴表示模糊水平，3条曲线表示不同的噪声水平。

以图5中的6幅图像为测试图像，它们在方差

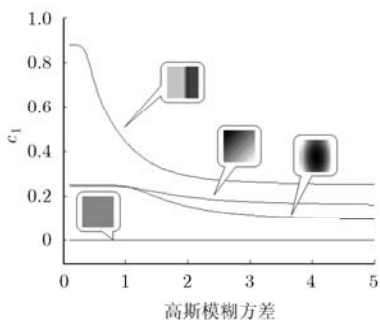


图2 图像块在不同模糊程度下  $C_1$  值

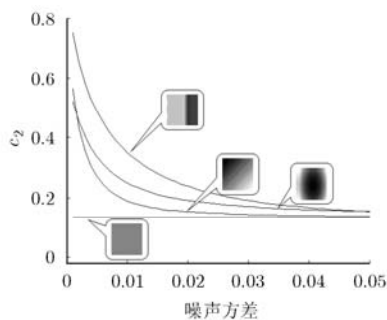
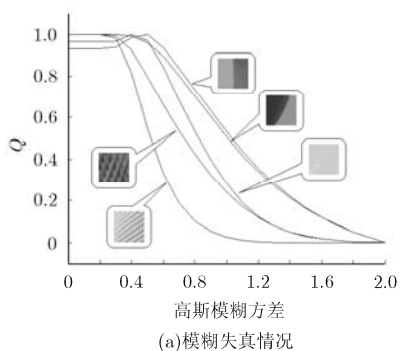
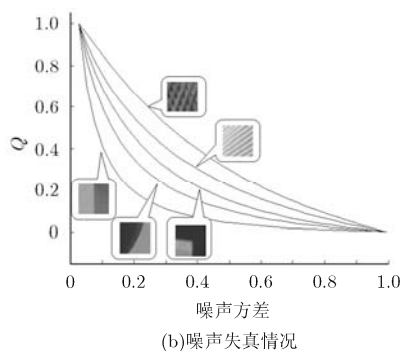


图3 图像块在不同噪声水平下  $C_2$  值



(a) 模糊失真情况



(b) 噪声失真情况

图4 图像块在不同模糊及噪声水平下的  $Q$  值



图5 仿真实验中的测试图像

从0增加到1, 高斯模糊方差从0增加到2的情况下, 得到的失真图像的质量评价结果如图7。在这两种因素下失真图像的质量评价结果  $Q$  都很好地反应图像质量变化趋势。图5中测试图像在同时存

在噪声和模糊的两种因素下失真情况, 图像质量变化趋势同图6类似。

### 5.2 图像质量评价数据库的实验结果

主流的图像质量评价数据库包括TID2008<sup>[21]</sup>,

CSIQ<sup>[24]</sup>, LIVE<sup>[20]</sup>, IVC<sup>[25]</sup>和A57<sup>[26]</sup>。每个数据库的信息见表1。以LIVE数据库为例,它包括29张原始图像,每个原始图像又对应不同类型的失真图像,图像质量主观评价(MOS)也包含在数据库中。

用 LIVE 数据中高斯模糊和高斯白噪声两类失真图像作为测试图像,由于每张测试图像只包含其中一种失真类型,因此将同一幅图像两类失真图像的  $Q$  值与 MOS 一起比较,图 8 为失真图像的客观

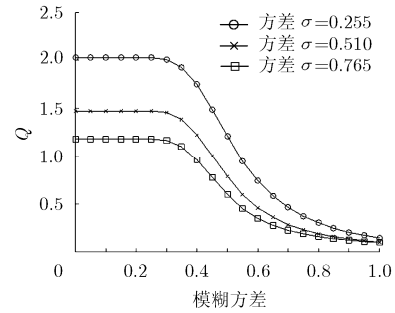


图 6 测试图像在不同失真程度下的质量评价结果

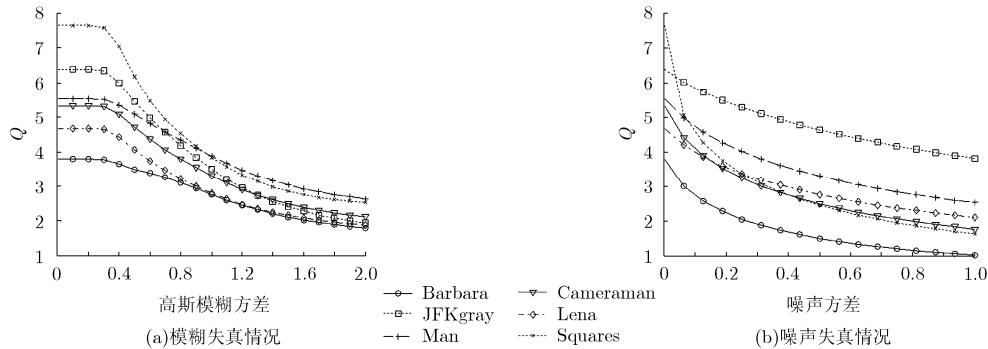


图 7 6幅测试图像在不同模糊和噪声程度下的质量评价结果

表1 图像质量评价数据库信息

数据库	原始图像个数	测试图像个数
TID	25	1700
CSIQ	30	866
LIVE	29	779
IVC	10	185
A57	3	54

评价结果  $Q$  与主观评价结果 MOS 之间的对比,图 8(b) 中圆圈表示模糊图像,星号表示噪声图像。经过 logistic<sup>[27]</sup>非线性拟合后, LIVE 数据库中  $Q$  与 MOS 的斯皮尔曼相关系数(SROCC)为 0.946,这说明客观评价结果  $Q$  很好的反映了主观视觉感知效果。

表 2 列出了本文提出的  $Q$  与 9 种 IQA 算法在 5 个图像数据库中的相关性(SROCC)测试结果,算子  $Q$  的相关性都在 0.9 左右。对于每个数据库的测试结果,取前 3 个性能最好的用粗体表示,可以看出本文提出算子  $Q$  明显好于同为无参考型的 IQA 方法的 JNBM<sup>[28]</sup>和  $Q_g$ <sup>[29]</sup>,并好于大部分全参考型 IQA 方法,只是比 VIF 结果略逊。因此  $Q$  的性能与目前最优方法很接近,但考虑到本文方法是无参考型 IQA,不需要原始图像信息,计算简单,其应用优势明显。

表 2 图像质量评价数据库的实验结果

类型	IQA	TID	CSIQ	LIVE	IVC	A57
全参考型	SSIM	0.878	0.900	0.863	<b>0.969</b>	0.518
	M_SSIM	0.850	0.893	0.810	<b>0.970</b>	0.468
	VIF	<b>0.975</b>	<b>0.987</b>	<b>0.975</b>	0.969	<b>0.939</b>
	PSNR	0.932	0.880	0.859	<b>0.970</b>	0.080
	NQM	<b>0.968</b>	0.937	<b>0.935</b>	0.942	<b>0.723</b>
	IFC	0.874	<b>0.963</b>	0.896	0.923	0.519
无参考型	UQI	0.885	0.937	0.892	0.934	0.666
	JNBM	0.787	0.940	0.393	0.906	0.384
	$Q_g$	0.889	0.867	0.832	0.801	0.569
	<b>Q</b>	<b>0.935</b>	<b>0.959</b>	<b>0.946</b>	0.932	<b>0.867</b>

## 6 结束语

本文提出了一种新的基于局部结构信息度量的无参考型 IQA 方法,利用局部结构张量奇异值分解后特征值来度量局部图像质量,在不需要原始图像信息的情况下,本文方法能评价因噪声和模糊等失真情况下的图像质量。仿真图像和实际图像的实验结果表明,本文提出的无参考型客观评价方法结果与主观评价结果相关性很强,鲁棒性强。除了常见的模糊和噪声两类失真外,图像可能还存在压缩失真,块效应失真等情况,因此研究能同时评

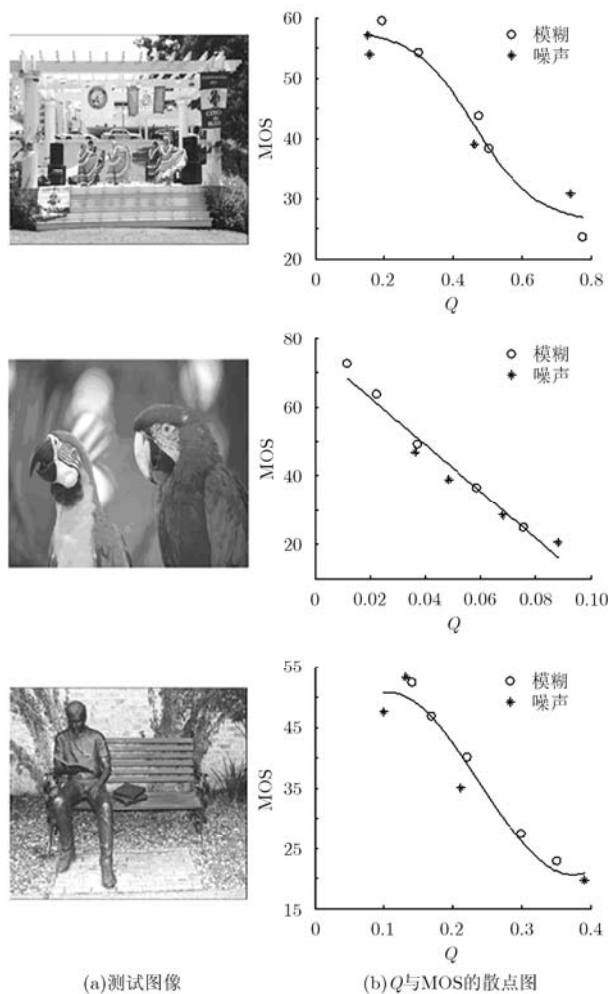


图8 主客观评价结果(SROCC)对比

价更多失真类型的IQA算法是未来研究的重点，也是图像质量评价中的难点。

### 参考文献

- [1] Liu H T, Redi J, Alers H, *et al.* No-reference image quality assessment based on localized gradient statistics: application to JPEG and JPEG2000[C]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7527(1): 75271F.
- [2] 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.
- [3] Sheikh H R and Bovik A C. Image information and visual quality[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2): 430-444.
- [4] Mansouri A, Aznavah A, Torkamani-Azar F, *et al.* Image quality assessment using the singular value decomposition theorem[J]. *Optical Review*, 2009, 16(2): 49-53.
- [5] Lahoulou A, Viennet E, Bouridane A, *et al.* A complete statistical evaluation of state-of-the-art image quality measures[C]. 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and Their Applications (WOSSPA), Tipaza, Algeria, 2011: 219-222.
- [6] Moorthy A and Bovik A. Blind image quality assessment: from natural scene statistics to perceptual quality[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(12): 3350-3364.
- [7] Cohen E and Yitzhaky Y. No-reference assessment of blur and noise impacts on image quality[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2010, 4(3): 289-302.
- [8] Wang Z, Xie Z, and He C. A fast quality assessment of image blur based on sharpness[C]. 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Yantai, China, 2010: 2302-2306.
- [9] Xin W, Baofeng T, Chao L, *et al.* Blind image quality assessment for measuring image blur[C]. 2008 Congress on Image and Signal Processing (CISP 2008), Sanya, China, 2008: 467-470.
- [10] Congli L, Kiushun Y, Wenbing C, *et al.* Study on the IQA method for polarization image based on degree of noise pollution[C]. International Conference on Information and Automation, Zhuhai, China, 2009: 1468-1472.
- [11] Shen J, Li Q, and Erlebacher G. Hybrid no-reference natural image quality assessment of noisy, blurry, JPEG2000, and JPEG images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2089-2098.
- [12] Ferzli R and Karam L J. A no reference objective sharpness metric using riemannian tensor[C]. 3rd International Workshop on Video Processing and Quality Metrics for Consumer Electronics (VPQM), Scottsdale, AZ, USA, 2007: 25-26.
- [13] Shnayderman A, Gusev A, 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] Wang R, Cui Y Z, and Yuan Y. Image quality assessment using full-parameter singular value decomposition[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(5): 57005.
- [15] Yang C A and Kaveh M. Image quality assessment using singular vectors[C]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7529: 752910.
- [16] Zhu X and Milanfar P. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(12): 3116-3132.
- [17] Feng X and Milanfar P. Multiscale principal components analysis for image local orientation estimation[C]. Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference on Signals Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2002: 478-482.
- [18] Takeda H. Locally adaptive kernel regression methods for

- multi-dimensional signal processing[D]. [Ph.D.dissertation]. University of California, 2010.
- [19] Zhu X and Milanfar P. A no-reference sharpness metric sensitive to blur and noise[C]. 1st International Workshop on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), San Diego, CA, USA, 2009: 64–69.
- [20] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, *et al.* LIVE image quality assessment database release 2[EB/OL]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>. 2005.
- [21] Ponomarenko N, Lukin V, Zelensky A, *et al.* TID2008 — a database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics[J]. *Advances of Modern Radioelectronics*, 2009, 10(1): 30–45.
- [22] Brox T, Weickert J, Burgeth B, *et al.* Nonlinear structure tensors[J]. *Image Vision Computing*, 2006, 24(1): 41–55.
- [23] Coulon O, Alexander D C, and Arridge S. Diffusion tensor magnetic resonance image regularization[J]. *Medical Image Analysis*, 2004, 8(1): 47–67.
- [24] Larson E C and Chandler D M. Categorical Image Quality (CSIQ) database[EB/OL]. <http://vision.okstate.edu/csiq>. 2009.
- [25] Ninassi A, Le Callet P, and Atrousseau F. Subjective quality assessment IRCCyN/IVC database[EB/OL]. <http://www2.irccyn.ec-nantes.fr/ivcdb>. 2005.
- [26] Chandler D M and Hemami S S. VSNR: a wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(9): 2284–2298.
- [27] Sheikh H R, Sabir M F, and 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.
- [28] Ferzli R and Karam L J. A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (JNB)[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(4): 717–728.
- [29] Gabarda S and Cristobal G. Blind image quality assessment through anisotropy[J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2007, 24(12): B42–B51.
- 邵 宇：男，1986 年生，博士生，研究方向为图像超分辨率与图像质量评价。
- 孙富春：男，1964 年生，教授，博士生导师，研究方向为人工智能、智能控制及机器人。
- 刘 莹：女，1988 年生，硕士生，研究方向为图像超分辨率。