

基于稀疏表示的图像模糊度评价方法

张 涛^{1,2}, 梁德群¹, 王新年¹

(1. 大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 根据自然图像稀疏表示基函数类似 V1 区简单细胞感受野的反应特性, 以及系数反映神经元响应程度的特性, 提出基于稀疏表示的图像模糊度评价方法。将输入图像分成互不重叠的块, 采用训练好的词典对各块进行稀疏分解, 并计算每块的关注度系数。将每块稀疏系数的 p 范数与关注度系数的加权和作为模糊度评价的依据。实验结果表明, 该算法计算的模糊度相对于图像的模糊程度是单调的, 具有较好的抗噪性, 符合人眼视觉系统特性。

关键词: 图像质量评价; 模糊度; 图像稀疏表示; 向量范数; 人眼视觉系统; 感受野

Image Fuzzy Degree Assessment Method Based on Sparse Representation

ZHANG Tao^{1,2}, LIANG De-qun¹, WANG Xin-nian¹

(1. College of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

【Abstract】 Based on the facts that natural images can be sparsely coded, and their basis functions are similar to the particular shapes of V1 simple-cell receptive fields and the sparse coefficients correspond to the response properties of visual neurons for the fixed patterns, a novel image fuzzy degree assessment method based on sparse representation is proposed. The flow chart of the proposed method is to divide the input image into no overlapped patches. The coefficient vectors and the visual attention weights of each patch are computed, and the fuzzy degree is represented by the linear superposition of the p -norm of sparse coefficient vectors and visual attention weights of each patch. Experimental results show that the proposed method is monotonic, robust to additive noises, and also consistent with human visual system.

【Key words】 image quality assessment; fuzzy degree; image sparse representation; vector norm; human visual system; receptive field

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.04.061

1 概述

数字图像或视频的采集、压缩、存储、传输和重建的每一环节都会对图像的质量产生影响, 如何评价图像质量成为图像处理和计算机视觉领域的一个基本而又富有挑战性的问题。图像质量评价分为主观评价和客观评价。主观评价主要通过测试者在特定的测试环境下, 按照事先规定的评价规则、评价尺度对图像进行主观评分; 而客观评价是采用算法对输入图像的质量进行自动评价^[1-4]。图像客观评价研究的目的在于设计与主观评价一致的图像质量评价算法^[2]。

目前客观图像质量评价可以分为 3 类: 全参考图像质量评价, 半参考图像质量评价和无参考图像质量评价^[1-4]。前 2 种方法需要原始图像或者原始图像的某些特征的集合作为参考与失真图像比较, 但是在很多应用场合, 原始图像是无法获取的。无参考图像质量评价是在没有原始图像作参考的情况下, 直接对失真图像进行质量评价的方法。本文主要考虑的是无参考图像质量评价。

图像的模糊度是图像质量评价的一种, 主要用来衡量图像(视频)信号经过成像系统后的降质程度。图像模糊由多种因素导致, 如成像物体的运动、散焦、大气运动、抗混叠滤波、图像压缩、去噪和重采样等。

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20070151014); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(2012JC038)

作者简介: 张 涛(1976—), 女, 讲师、博士研究生, 主研方向: 数字图像处理; 梁德群, 教授、博士生导师; 王新年, 副教授、博士

收稿日期: 2012-05-11 **修回日期:** 2012-08-29 **E-mail:** zt2941@sina.com

目前无参考图像模糊度评价的方法主要是以边缘作为特征来进行的^[2],典型方法有:(1)基于边缘梯度的方法^[5-7];(2)基于多个模糊副本差异的方法^[8];(3)利用边缘宽度的方法^[9-10]。

神经生理学研究表明:初级视觉皮层下细胞的感受野具有显著的方向敏感性,单个神经元仅对处于其感受野中的刺激做出反应,即单个神经元仅对某一频段的信息(如特定方向的边缘、线段、条纹等图像特征)呈现较强的反映。1996年,Nature杂志上的一篇重要论文指出自然图像存在稀疏表示,并且经过稀疏编码后得到的基函数类似于V1区简单细胞感受野的反应特性,稀疏表示系数反映了神经元的响应程度^[11]。人眼对整幅图像神经元的响应程度与图像的清晰程度有紧密的关系,基于此,本文提出了基于稀疏表示的图像模糊度评价方法。

2 基于稀疏表示的图像模糊度评价方法

2.1 图像稀疏系数与模糊程度的关系

图像的稀疏表示是指图像(块)可完全或近似地由非常少的一组原子的线性组合来表示^[11-13],其数学描述为:

$$I = D\alpha + v \tag{1}$$

其中, I 表示图像或图像块的列向量形式; D 表示过完备词典矩阵; α 是列向量,表示的是图像稀疏分解系数, α 的每个值反映了图像块与词典中对应列所表示模式的相关程度,其值越大,图像块就越具有该模式的特性; v 表示残留误差或噪声。

图像模糊过程的数学描述为:

$$g = Hl + n = Da_g + Da_n + v = Da_{gn} + v \tag{2}$$

其中, g 为有噪模糊图像; H 为模糊矩阵; l 为清晰图像; n 为随机噪声; a_g 为模糊图像的稀疏分解系数; a_n 是噪声的稀疏分解系数; $a_{gn} = a_g + a_n$ 表示有噪模糊图像的稀疏分解系数。由于 n 是随机噪声,其与词典中的原子相关性较小,因此列向量 a_n 的每个系数都会很小,进而 a_{gn} 中幅值较小的分量是噪声的可能性较大,基于此,在本文算法中,为减弱噪声对模糊度评价的影响, a_g 的估计 \hat{a}_g 为:

$$\hat{a}_g(j) = \begin{cases} 0 & |a_{gn}(j)| < \varepsilon \\ a_{gn}(j) & \text{else} \end{cases}, j = 1, 2, \dots, M \tag{3}$$

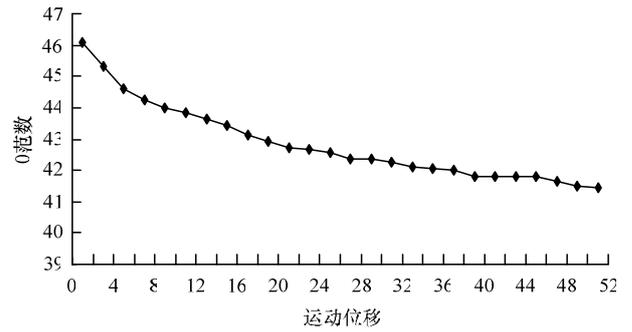
其中, j 是列向量的下标; ε 是噪声阈值。

从统计意义上讲,一幅图像越清晰,其信息量就越大,所包含组成的成分就越多,其稀疏分解系数中非零分量个数就越多。即若图像 g_1 比图像 g_2 清晰,则有:

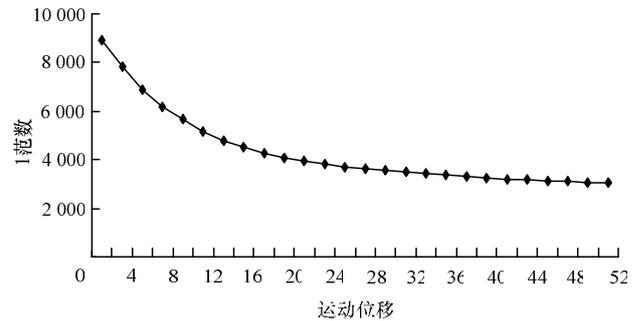
$$\|a_{g_1}\|_p \geq \|a_{g_2}\|_p \tag{4}$$

图1所示的是Lena图分别经过运动模糊和高斯模糊后,其稀疏分解向量的0范数和1范数与模糊程度关系的曲线,其中运动模糊是水平方向,位移为 $[1, 3, \dots, 51]$;高斯模糊窗口大小和方差分别为 $[(1, 1/6), (3, 3/6), \dots, (51,$

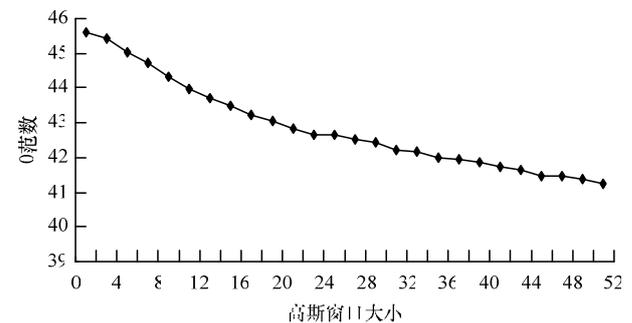
$51/6)]$ 。由图1可知,从统计意义上讲,图像越模糊,其 p 范数就越小。



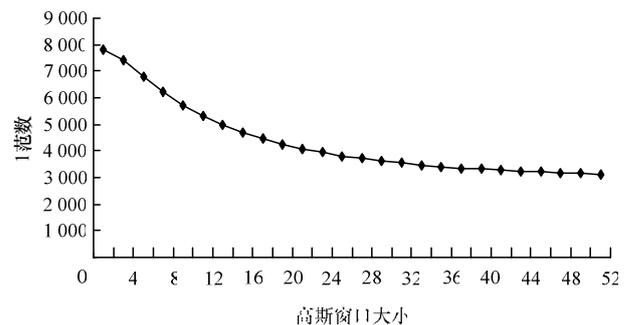
(a)运动模糊程度与0范数之间的关系



(b)运动模糊程度与1范数之间的关系



(c)高斯模糊程度与0范数之间的关系



(d)高斯模糊程度与1范数之间的关系

图1 图像模糊程度与其稀疏分解系数 p 范数之间的关系

2.2 基于稀疏表示的图像模糊度评价

由上文分析可知,图像的模糊程度与其稀疏表示系数之间有着紧密的关系。基于此特性,本文提出了基于稀疏表示的图像模糊度函数,其数学描述为:

$$M_{\text{blur}} = Ae^{-b \frac{L_n(a)^\gamma}{2\sigma^\gamma}} \tag{5}$$

其中, $M_{\text{blur}} \in (0,1]$ 表示图像模糊度, 图像越模糊, 其值越大; A 为归一化因子, 其值可取 1; b 取值 1 或 -1, 用于保证模糊度函数随着图像模糊程度的增加, 函数值递增; $L_n(\mathbf{a})$ 是图像模糊度参数, 是图像稀疏分解系数的函数, 表达形式下文介绍; γ 和 σ 为灵敏度调整因子, γ 可取 1 或 2 等, 由于 $L_n(\mathbf{a})$ 的取值较大, $L_n(\mathbf{a})^\gamma$ 容易越界, 因此 σ 取值应与 $L_n(\mathbf{a})$ 在同一个数量级上, 这样才能保证 $\frac{L_n(\mathbf{a})^\gamma}{2\sigma^\gamma}$ 不越界。

依据自然图像具有局部自相似的特点, 借鉴 JPEG 编码思想, 将图像分成互不重叠的图像块, 每一个图像块进行稀疏分解的向量构成了整幅图像的稀疏表示, 即:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,c} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{r,1} & a_{r,2} & \cdots & a_{r,c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $a_{i,j}(k)$ 表示图像中第 (i,j) 块分解系数的第 k 个分量; r 表示行方向的总块数; c 表示列方向的总块数。

视觉心理学研究表明, 人眼对于图像中的各区域及其特征的关注度是不一样的^[14]。本文引入关注度系数矩阵 \mathbf{w} 来表示该特性, 即:

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,c} \\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,c} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{r,1} & w_{r,2} & \cdots & w_{r,c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $w_{i,j}(k)$ 表示人眼对图像中第 (i,j) 块的稀疏表示向量的第 k 分量的关注度系数, 且 $\sum_{i,j,k} w_{i,j}(k) = 1$ 。为计算方便, 假设每块稀疏分解系数的各个分量的关注度系数是一样的, 并且每块的关注度系数随着与焦点的距离呈高斯函数递减关系, 即:

$$w_{i,j} = \frac{1}{\sum_{i,j} w_{i,j}} e^{-\frac{(m-i)^2 + (n-j)^2}{2\sigma_a^2}} \quad (8)$$

其中, (m,n) 为焦点块坐标; σ_a 决定关注度系数的下降速度。

根据式(6)~式(8), 图像模糊度参数 $L_n(\mathbf{a})$ 表达形式为:

$$L_n(\mathbf{a}) = \frac{1}{rc} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c w_{i,j} \|\hat{\mathbf{a}}_{i,j}\|_p \quad (9)$$

其中, $\hat{\mathbf{a}}_{i,j}$ 表示每个图像块的稀疏分解系数 $\mathbf{a}_{i,j}$ 经式(3)处理后的结果, 这样做的目的在于减弱噪声的影响。

综上, 基于稀疏表示的图像模糊度评价算法流程如下。

算法 基于稀疏表示的图像模糊度评价算法

输入 $I, \varepsilon, \gamma, \beta, \sigma, \sigma_a$, 已训练好的过完备词典库 D

Step1 将图像分成互不重叠的块;

Step2 稀疏分解每个图像块, 得到稀疏向量 $\mathbf{a}_{i,j}$;

Step3 根据式(3)计算 $\hat{\mathbf{a}}_{i,j}$;

Step4 根据式(7)和式(8)计算关注度系数矩阵 \mathbf{w} , 将图像中心块设为焦点块;

Step5 根据式(9)计算模糊度参数 $L_n(\mathbf{a})$;

Step6 根据式(5)计算图像模糊度 M_{blur} ;

输出 M_{blur}

3 实验结果与分析

为验证本文算法的有效性, 进行了 3 组实验。

第 1 组实验验证算法相对于图像模糊程度的单调性: 一个好的图像模糊度算法计算的模糊度应该随着图像模糊程度的增减而增减, 即若图像 1 的模糊程度大于/小于图像 2 的模糊程度, 则根据图像 1 计算的模糊度也应该大于/小于根据图像 2 计算的模糊度。

第 2 组实验验证算法具有抗噪性: 在一定信噪比情况下, 一个好的图像模糊度算法的单调性应该受噪声影响较小, 即在给定信噪比范围内, 若图像 1 的模糊程度大于/小于图像 2 的模糊程度, 则根据图像 1 计算的模糊度也应该大于/小于根据图像 2 计算的模糊度。

第 3 组实验验证所提算法结果与主观评价结果的一致性: 一个好的图像模糊度算法计算的模糊度应该与主观评价一致, 本文采用 5 个常用指标(相关系数、秩相关系数、均方误差、平均绝对误差和离出率)分析所提出的模糊度算法。

实验测试数据来源于图像评价通用数据库 LIVE^[15]、IVC^[16]和 USC-SIPI^[17]。在实验中, 选择文献[8,10]所提出的无参考图模糊评价算法与本文算法的结果进行比较, 这 2 种算法是目前比较典型的图像评价算法, 本文中分别简称为 Crete 算法和 CPBD 算法, 算法程序由作者网站提供^[18-19]。

在实验中, 算法各项参数分别为: $\varepsilon = 100$, $\beta = 1$, $\gamma = 2$, $\sigma = 5\ 000$, σ_a 为图像宽度的 1/6, 图像块大小为 10×10 , 词典 D 及稀疏分解算法采用文献[13]提供的词典和源程序, 算法性能指标计算程序来源于 CPBD 源程序网站^[19]。

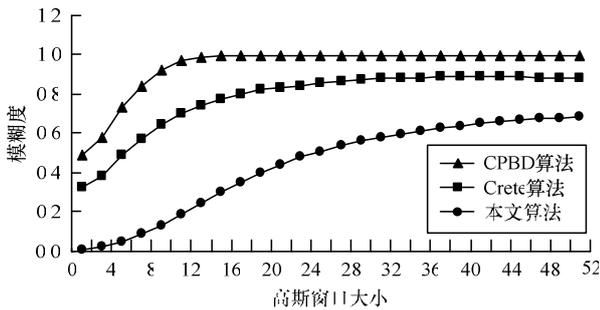
实验 1 模糊度单调性验证

从测试数据集^[15-17]中, 选取人物图像、航拍图像、动物图像、景物图像, 分别与不同窗口大小的均值滤波器、高斯滤波器和水平方向运动模糊滤波器进行卷积, 得到 3 种类型模糊图像测试序列, 用于验证算法对不同类型模糊的单调性。在实验中, 均值滤波器窗口大小分别为 $[1, 3, \dots, 51]$, 高斯滤波器窗口大小和方差分别为 $[(1, 1/6), (3, 3/6), \dots, (51, 51/6)]$, 水平方向运动位移分别为 $[1, 3, \dots, 51]$ 。限于篇幅, 图 2 只给出了不同程度高斯模糊的 Lena 图和 Texture 图的测试结果。从实验结果可以看出: 对于 3 种类型的模糊, 本文算法计算的模糊度相对于图像模糊程度是单调的; Crete 算法和 CPBD 算法在模糊程度较小时是单调的, 但对于纹理较强的图(如 Texture、Lighthouse 等),

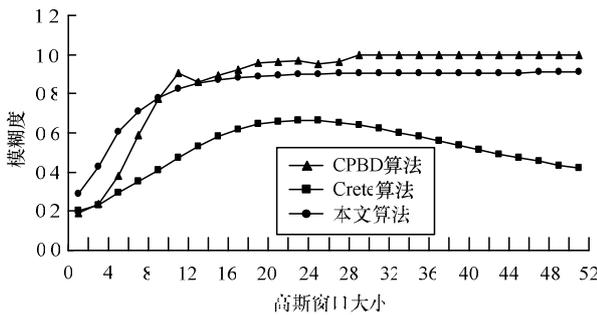
在模糊程度较大时并不是单调的，如图 2(d)所示。图中高斯模糊滤波器的方差为窗口大小的 1/6，窗口越大，图像越模糊；圆形标记是本文算法，方形标记是 Crete 算法，三角形标记是 CPBD 算法。



(a)Lena 图 (b)Texture 图(文件名为 1.5.07)



(c)Lena 图模糊度计算结果

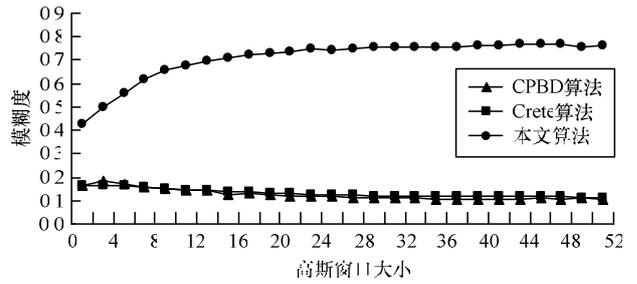


(d)Texture(1.5.07)图模糊度计算结果

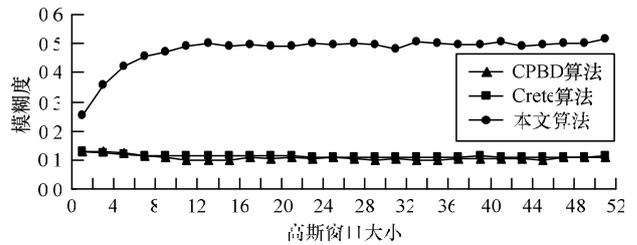
图 2 各算法模糊度计算结果比较

实验 2 模糊度抗噪性验证

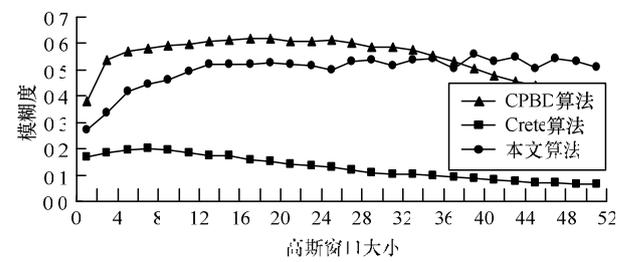
在实验 1 获得的测试序列上，分别加入高斯噪声(方差为 25.5)和椒盐噪声(噪声强度为 0.05)，测试结果如图 3 所示，各曲线标记含义同图 2。由图 3 可知：对于高斯噪声，本文算法明显好于 CPBD 算法和 Crete 算法；对于椒盐噪声，本文算法单调性在总体上没有改变，效果最好，CPBD 算法在模糊程度很小时，单调性没有改变，但在图像模糊程度稍大，如图 3(d)中高斯窗口大小为 5 时，单调性向反方向改变，Crete 算法失效，效果最差。从图 3 中也可以看出，在模糊滤波器窗口尺寸大于 15(具体尺寸需根据图像中细节丰富程度而定)时，本文算法计算的模糊度有抖动，主要原因在于：此时图像大部分细节信息丢失，图像中噪声占主导，并且噪声在图像中是随机分布的，从而计算的模糊度会出现抖动。由以上分析可知，本文算法在模糊程度稍小(如模糊窗口为 15)时，有很好的抗噪性；但在模糊程度较大时，计算的模糊度有抖动。



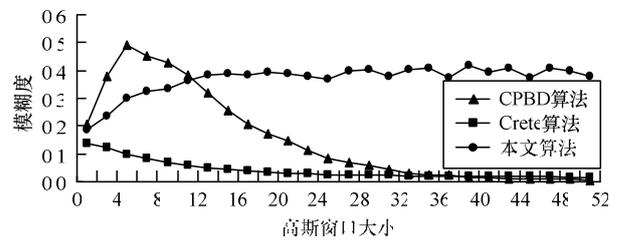
(a)加入高斯噪声的各模糊程度 Lena 图模糊度计算结果



(b)加入高斯噪声的各模糊程度 texture 图模糊度计算结果



(c)加入椒盐噪声的各模糊程度 Lena 图模糊度计算结果



(d)加入椒盐噪声的各模糊程度 Texture 图模糊度计算结果

图 3 噪声对模糊度算法的影响

实验 3 模糊度与主观评价一致性验证

本文实验测试图像采用 Texas 大学图像与视频工程实验室(LIVE)提供的图像质量评价数据库中的高斯模糊数据集。根据 VQEG 提出的客观模型评价准则^[20]，采用 5 个指标参数比较算法的性能：Person 相关系数，Spearman 秩相关系数，均方误差(RMSE)，平均绝对误差(MAE)和离出率(OR)。其中，前 2 个指标值越大越好，后 3 个指标值越小越好。本文算法、CPBD 算法和 Crete 算法的 5 个性能指标如表 1 所示。从表 1 可以看出，在上述 5 个指标上，本文算法总体优于 CPBD 算法和 Crete 算法。

表 1 LIVE 数据库上模糊度性能比较

算法	Person	Spearman	RMSE	MAE	OR
CPBD 算法	0.988 79	0.992 53	0.083 33	2.071 5	1.699 6
Crete 算法	0.992 37	0.988 64	0.045 45	1.560 9	1.251 4
本文算法	0.994 42	0.990 58	0.030 30	1.489 2	1.228 0

4 结束语

本文根据自然图像能够稀疏表示并且其基函数与V1区简单细胞感受野的反应特性一致的特点, 提出了基于稀疏表示的图像模糊度评价方法。该方法将每个图像块的稀疏系数的 p 范数和关注度系数的线性组合作为模糊度评价的依据。与典型算法的比较实验结果表明: 本文算法计算的模糊度相对于图像模糊程度是单调的, 在模糊程度稍小时具有良好的抗噪性, 并且计算的模糊度与主观评价结果一致。但当模糊程度较大时, 对噪声图像的模糊度计算存在抖动现象; 由于图像的稀疏分解对时间和空间要求高, 本文算法的复杂度较高。因此, 如何增强算法在模糊程度较大时的抗噪性以及提高算法效率是本文的下一步工作。

参考文献

- [1] ITU. Methodology for The Subjective Assessment of The Quality of Television Pictures[R]. Tech. Rep.: ITU-R BT 500-11, 2002.
- [2] Lin Weisi, Jay K C C. Perceptual Visual Quality Metrics: A Survey[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2011, 22(4): 297-312.
- [3] 魏政刚, 袁杰辉, 蔡元龙. 图象质量评价方法的历史、现状和未来[J]. 中国图象图形学报, 1998, 3(5): 386-389.
- [4] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(7): 1-4.
- [5] Batten C F. Auto-focusing and Astigmatism Correction in the Scanning Electron Microscope[D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2000.
- [6] Sadaka N G, Karam L J, Ferzli R. No-reference Perceptual Image Sharpness Metric Based on Saliency-weighted Fovea Pooling[C]//Proc. of International Conference on Image Processing. San Francisco, USA: IEEE Press, 2008.
- [7] Hassen R, Wang Zhou, Salama M. No-reference Image Sharpness Assessment Based on Local Phase Coherence Measurement[C]//Proc. of International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Texas, USA: IEEE Press, 2010.
- [8] Crete F, Dolmiere T, Ladret P, et al. The Blur Effect: Perception and Estimation with a New No-reference Perceptual Blur Metric[C]//Proc. of SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging. [S. l.]: SPIE Press, 2007.
- [9] Ferzli R, Karam L J. A No-reference Objective Image Sharpness Metric Based On The Notion of Just Noticeable Blur(JNB)[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2009, 18(4): 717-728.
- [10] Ferzli R, Karam L J. A No-reference Image Blur Metric Based on the Cumulative Probability of Blur Detection (CPBD)[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2011, 20(9): 2678-2683.
- [11] Olshausen B A, Field D J. Emergence of Simple-cell Receptive Field Properties by Learning a Sparse Code for Natural Images[J]. Nature, 1996, 381(6583): 607-609.
- [12] Donoho D L. Compressed Sensing[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [13] Yang Jianchao, Wright J, Huang T S. Image Super-resolution via Sparse Representation[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2010, 19(11): 2861-2873.
- [14] Kanwisher N, Wojciulik E. Visual Attention: Insights from Brain Imaging[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2000, 1(2): 91-10.
- [15] Sheikh H R, Bovik A C, Cormack L. LIVE Image Quality Assessment Database[EB/OL]. (2011-10-20). <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [16] Callet P L, Autrusseau F. Subjective Quality Assessment IRCCyN/IVC Database[EB/OL]. (2011-10-20). <http://www.irccyn.ecnantes.fr/ivcdb/>.
- [17] USC-SIPI. USC-SIPI Image Database[EB/OL]. (2011-10-20). <http://sipi.usc.edu/database/database.php>.
- [18] Bao D Q. Image Blur Metric(Scripts) 1.0[EB/OL]. (2011-10-20). <http://www.downloadplex.com/Publishers/Do-Quoc-Bao/Page-1-0-0-0-0.html>.
- [19] Narvekar N D, Karam L J. CPBD Sharpness Metric Software[EB/OL]. (2011-12-18). <http://ivulab.asu.edu/Quality/CPBD>.
- [20] VQEG. Final Report from the Video Quality Experts Group on The Validation of Objective Models of Video Quality Assessment[EB/OL]. (2000-03-15). <http://www.vqeg.org/>.

编辑 顾逸斐

(上接第266页)

- [10] 哈力木拉提. 基于轮廓的维吾尔文切分[C]//第十一届全国民族语言文字信息学术研讨会论文集. 西双版纳: [出版者不详], 2007.
- [11] Amin A, Mari J F. Machine Recognition and Correction of Printed Arabic Text[J]. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(5): 1300-1306.
- [12] Bisdys F, Sana J, Habash N. Online Arabic Handwriting Recognition Using Hidden Markov Models[M]. New York, USA: [s. n.], 2008.
- [13] Jin Jianming, Peng Liangrui, Ding Xiaoqing. Printed Uyghur Character Recognition[C]//Proc. of the 5th China Korea Joint Symposium on Oriental Language Processing and Pattern Recognition. Qingdao, China: [s. n.], 2004: 59-62.

编辑 顾逸斐

