

# 结合复小波域和空间总变分的无参考图像清晰度评价

邵雪, 曾台英, 汪祖辉  
(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 针对频域和空域相结合的清晰度评价方法耗时太长、与主观评价一致性不高等问题, 提出结合复小波域和空间总变分的感知清晰度评价方法。 **方法** 采用低通滤波的方法将原始图像再模糊, 得到其参考图像; 在复小波域上采用局部相位一致性计算原始图像和参考图像的清晰度图, 在空间域上采用总变分计算原始图像和参考图像的清晰度图; 分别将原始图像以及参考图像各自的 2 幅清晰度图进行几何加权平均, 得到 2 幅整体的感知清晰度图; 计算 2 幅感知清晰度图的相似性, 得到原始图像的感知清晰度值。 **结果** 在 LIVE 数据库上的 SROCC 值达到 0.9476, CC 值达到 0.9483, 一幅测试图所耗时间为 6.003 s。 **结论** 实验证明文中算法的评价性能较优, 相较同样结合频域和空域的评价方法计算复杂度降低, 耗时较少, 更加符合人眼视觉主观感知清晰度。

**关键词:** 无参考清晰度评价; 人眼视觉; 复小波域; 总变分

**中图分类号:** TS801.3; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0200-05

## No-reference Image Definition Evaluation in Combination with Complex Wavelet Domain and Total Spatial Variation

SHAO Xue, ZENG Tai-ying, WANG Zu-hui  
(Shanghai University for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose the method to evaluate perceptual sharpness combined with complex wavelet domain and total spatial variation with respect to the problem that the definition evaluation method combined with frequency domain and spatial domain is time-consuming and not highly consistent with the subjective evaluation and so on. The resolution charts of original image and reference image were calculated on the complex wavelet domain through local phase consistency. The resolution charts of original image and reference image were calculated on the spatial domain through total spatial variation. The weighted geometric average of the respective two resolution charts of original image and reference image was carried out to obtain two overall perceptual sharpness charts. The similarity of two perceptual sharpness charts was calculated to obtain the perceptual sharpness of the original image. The results showed that the SROCC value on LIVE database reached 0.9476, CC value reached 0.9483 and the test image consumed 6.003 s. Experimental results show that the evaluation performance of the algorithm herein is better than that of the evaluation method similarly combined with frequency domain and spatial domain and it can reduce the computational complexity, consume less time and better conform to the subjective perceptual sharpness of human vision.

**KEY WORDS:** no-reference definition evaluation; human vision; complex wavelet domain; total variation

图像的清晰度是人们判断其质量的首要考虑因素, 清晰度决定着图像的内容信息能否准确的传达给

观察者, 因此, 数字图像质量的好坏与其清晰度直接相关, 清晰度是指人眼能感觉出的相邻影像间的明显

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 2012 国家重大科学仪器设备开发专项 (2011YQ150040); 新闻出版总署数字印刷工程研究中心数字传播重点实验室基金 (10-00-309-000)

作者简介: 邵雪 (1994—), 女, 上海理工大学硕士生, 主攻图像质量评价。

通讯作者: 曾台英 (1978—), 女, 博士, 上海理工大学讲师、硕导, 主要研究方向为印刷质量检测与控制。

程度<sup>[1]</sup>。影响图像清晰度的原因主要是图像模糊,这主要包括由于成像系统与被摄对象的相对运动造成的运动模糊,以及由于在成像区域中存在不同深度的对象所引起不同程度的离焦模糊等等。图像清晰度的评价不仅是比较不同成像系统性能的重要指标,也是成像系统实现自动对焦的前提,更是评价和优化图像复原、图像增强和压缩等图像处理算法效果的重要依据<sup>[2]</sup>。

图像清晰度(模糊度)评价方法可大致分为基于空间域的方法和基于变换域方法<sup>[3]</sup>。基于空间域的方法如 Ferzli 及 Karam<sup>[4]</sup>提出基于最小可察觉模糊(JNB)阈值估计边缘的感知模糊度(CPBD),取得了较好的评价效果,但对图像内容有一定的依赖性,当待评价图像中缺少锐利边缘时会导致估计不准确。基于变换域方法中如 Hassen 等<sup>[5]</sup>提出基于复小波域的局部相位相干性来估计模糊图像清晰度(LPC),Vu 和 Chandler<sup>[6]</sup>等通过三级小波变换得到的高频能量计算图像清晰度。许多算法综合利用了变换域和空间域的信息,如 Vu 等<sup>[7]</sup>结合频率域和空间域特征得到一个综合评价标准  $S_3$  (Spectral and spatial sharpness),频域特征由局部频谱幅值的斜率得到,空间域特征由局部总变分(TV)计算得到,取两者的几何加权均值作为综合评价值。基于变换域的模糊度评价方法综合了图像的频域特性和多尺度特征,结合空间域的特征可以达到对模糊度估计较好的准确性和鲁棒性。

通过以上分析,结合频率域和空间域的清晰度评价方法综合了两者的优点,对图像清晰度的估计更具有准确性和鲁棒性,与主观评价一致性较好。与文献 7 算法不同之处在于文中构造待评价图像的参考图像,频域特征由复小波域的系数相位一致性计算得到,通过结合空间域的总变分特征,计算待评价图像和参考图像的清晰度图的相似性,提出一种结合复小波域和空间总变分的无参考图像感知清晰度评价方法(CWTVNRS)。构造待评价图像的参考图像,并考虑到复小波域中复小波系数的相位在尺度上表现出一致性,而相位一致性可以表示图像的底层特征,以方便人眼理解图像,空间域中利用总变分可以计算图像的对比度,而人眼依赖图像中边缘和纹理的相对亮度(即对比度)获取信息,可以很好地表现图像的清晰度,因此,结合 2 种算法分别计算待评价图像和其参考图像的整体感知清晰度图,通过计算 2 幅清晰度图的相似性来得到待评价图像的感知清晰度。实验结果表明,该方法与主观评价分数的一致性较好,单调性高,准确性高,更加符合人眼视觉感知清晰度评价。

## 1 复小波域的局部相位一致性

人眼主要根据图像中的底层特征来理解图像,相

位一致性恰好可以表示图像的底层特征(颜色、纹理和形状特征)<sup>[8]</sup>。复小波系数的相位在尺度上表现出一致性,并且局部相位被用于图像纹理的描述,因此可以有效地提取图像纹理和边缘特征,计算图像的清晰度。局部相位一致性的概念可很好地在二维解释。给定一个信号  $f(x)$ , 位于位置  $x_0$  附近有  $f(x)=f(x-x_0)$ , 它的小波变换可以被定义为<sup>[9]</sup>:

$$F(s,p) = \int f(x) * \omega_{s,p}(x) dx = \left[ f(x) * \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{x}{s}\right) e^{j\omega_c x/s} \right]_{x=p} \quad (1)$$

式中:  $s>0$  为尺度因子;  $p$  为变换因子; 小波族  $\omega_{s,p}(x)$  来自于母小波  $\omega(x) = g(x) e^{j\omega_c x}$ ;  $\omega_c$  为中心频率;  $g(x)$  为对称包络函数。

$$\omega_{s,p}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \omega\left(\frac{x-p}{s}\right) = \frac{1}{\sqrt{s}} g\left(\frac{x-p}{s}\right) e^{j\omega_c(x-p)/s} \quad (2)$$

利用卷积定理和傅立叶变换的平移和缩放性质,式(1)可以写成:

$$F(s,p) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \sqrt{s} G(s\omega - \omega_c) e^{j\omega p} d\omega = \frac{1}{2\pi\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} F_0\left(\frac{\omega}{s}\right) G(\omega - \omega_c) e^{j\omega(p-x_0)/s} d\omega \quad (3)$$

式中:  $F(\omega)$ ,  $F_0(\omega)$  和  $G(\omega)$  为  $f(x)$ ,  $f_0(x)$  和  $g(x)$  的傅里叶变换。

$F(s,p)$  的相位取决于  $F_0(\omega)$  的本质,如果  $F_0(\omega)$  是尺度不变的,即  $F_0(\omega/s) = K(s)F_0(\omega)$ , 其中  $K(s)$  是一个只包含  $s$  的实函数,与  $\omega$  无关,则有:

$$F(s,p) = \frac{K(s)}{\sqrt{s}} F(1, x_0 + \frac{p-x_0}{s}) \quad (4)$$

经分析,尺度不变的连续谱信号的唯一形式遵循幂定律:  $F_0(\omega) = K_0 \omega^p$ 。在空间域,函数  $f_0(x)$ 、阶跃函数和其导数均满足精确地定位在空间中这样一个条件。因为  $K(s)$  和  $s$  均是实数,则有

$$\Phi(F(s,p)) = \Phi\left(F\left(1, x_0 + \frac{p-x_0}{s}\right)\right) \quad (5)$$

式(5)表示在尺度和空间之间强大的相位一致性关系,设有一维平面上的平面直线  $(s,p)$ , 其等相位线(定义为  $x_0 + (p-x_0)/s = C$ , 其中  $C$  可以为任意常数)完全收敛于特征  $x_0$  的位置,见图 1a。

以上结果可以扩展到二维信号或图像,若其局部相位满足定义式(5)中的相位一致性,则可以从大尺度邻域系数很好的预测小尺度系数。在这种情况下,邻域复小波系数的位置,见图 1b,其最小尺度系数的相位  $\hat{\phi}(\{c_{ij}\})$  ( $i,j=1\dots 4$ ) 可以通过大尺度系数  $\{a, b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}\}$  预测出来。

评价一幅输入图像的清晰度,首先构造一个空间变化的局部相位一致性图。采用可操纵金字塔的复数形式分解输入图像为多方向 3 尺度的子带,定义其相位一致性图为:

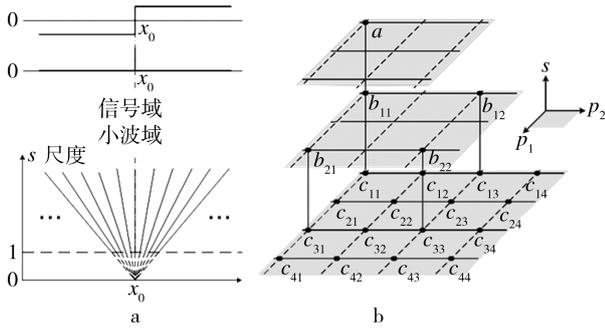


图1 位于锐利特征点  $x_0$  的局部相位一致性及复小波系数的二维采样网络

Fig.1 Local phase coherence of localized sharp feature at  $x_0$  and 2D sampling grid of wavelet coefficients

$$P_i = \frac{\sum_{l=1}^L |c_{i,l}| \cos(\Phi(\{c_{i,l}\}) - \hat{\Phi}(\{c_{i,l}\}))}{\sum_{l=1}^L |c_{i,l}| + K} \quad (6)$$

式中： $L$  为可操纵金字塔分解的方向个数， $\Phi(\{c_{i,l}\})$  为第  $l$  方向上最小子带的第  $i$  个系数的相位； $K$  为一个正数以避免在小能量区域的不稳定。该清晰度评价方法是由方向系数的大小决定的，因此在包含更多能量的方向上，方向系数越大。得到的相位一致性图即为评价图像的清晰度所代表的清晰度图，记为  $S_1(x)$ 。

## 2 空间域的总变分

人眼依赖图像中边缘和纹理的相对亮度(即对比度)获取信息。若图像中细节和边缘处有较高的对比度，则该图像表现出较好的清晰度<sup>[2]</sup>，因此，考虑到人眼对对比度的敏感特性，利用总变分计算图像的一个区域与该区域的空间偏移之间的绝对差异的总和，来衡量不同对比度下相邻像素之间的变化，从而作为评价图像清晰度的标准。由于平滑区域相较于纹理区域的总变分值要小，因此纹理区域在空间上表现出更大的变化<sup>[10]</sup>。在空间域计算图像清晰度，文中利用文献[11]的改进方法。一幅图像的块  $x$  的总变分定义为  $v(x)$ ，见式(7)。

$$v(x) = \frac{1}{255} \sum_{i,j} |x_i - x_j| \quad (7)$$

式中： $x_i$  和  $x_j$  是图像块  $x$  的 8 邻域像素强度值。

总变分  $v(x)$  有效地计算块  $x$  与块  $x$  的空间偏移之间的绝对差异之和，因此，如果  $x$  是高对比度的块，则相邻像素值之间的差异就高，式(7)就会得到一个较大的总变分值，反之亦然。由块  $x$  的总变分计算得到图像的感知清晰度，记为  $S_2(x)$ 。不是从块  $x$  的总变分直接得到  $S(x)$ ，而是通过计算块  $\zeta$  的总变分的极大值

$$S_2(x) = \frac{1}{4} \max_{\zeta \in x} v(\zeta) \quad (8)$$

式中： $\zeta$  为  $x$  的  $2 \times 2$  大小的块。

式(8)中的  $\max$  算子是空间上视觉感知求极大值的尝试，即 HVS 特性在空间上非线性的感知反应已经可以通过一个  $\max$  算子来被近似取得( $L_\infty$ 范数)<sup>[12]</sup>。由于一个  $2 \times 2$  大小的块的最大总变分为 4，因此，系数  $1/4$  是为了使  $S(x)$  的值在 0 到 1 之间。将一幅图像分为  $8 \times 8$  个块来计算局部总变分，所有块的  $S(x)$  值构成了整个空间域的清晰度图，但是  $S(x)$  在图像中有较多纹理时会低估该区域的清晰度计算。

## 3 文中算法

考虑到复小波域的局部相位一致性在计算图像纹理时有更好的表现，可以弥补总变分算法计算图像清晰度时在纹理区域的缺失，因此，文中结合复小波域的局部相位一致性和空间总变分算法，通过加权几何平均两者得到的清晰度图，来计算图像的整体感知清晰度图，记为  $S_3(x)$ 。

$$S_3(x) = S_1(x)^\alpha \times S_2(x)^{1-\alpha} \quad (9)$$

式中： $0 \leq \alpha \leq 1$ 。经实验， $\alpha=0.5$  时结果最好。

文中算法的系统框图见图 2，其步骤说明如下。

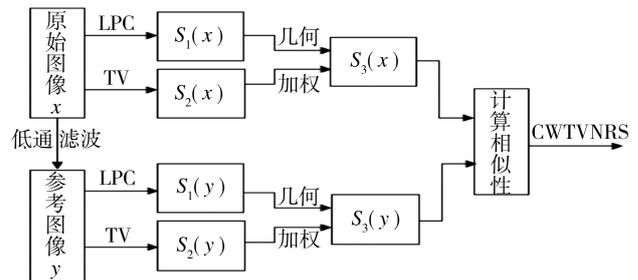


图2 评价方法的系统

Fig.2 System diagram of evaluation method

由于清晰图像比模糊图像含有更丰富的细节信息，即高频分量，故可以通过高斯低通滤波器构造再模糊图像，作为待评价模糊图像的参考图像<sup>[13]</sup>，因此，采用大小为  $11 \times 11$ ，方差为 1 的高斯低通滤波的方法构造待评价图像  $x$  的参考图像  $y$ 。

在复小波域采用相位一致性算法计算  $x$  的清晰度图  $S_1(x)$ ，在空间域采用总变分算法计算  $x$  的清晰度图  $S_2(x)$ ，同样的方法分别计算参考图像  $y$  的 2 幅清晰度图  $S_1(y)$  和  $S_2(y)$ ；

分别将  $x$  和  $y$  的 2 幅清晰度图进行加权几何平均，得到各自的整体清晰度图  $S_3(x)$  和  $S_3(y)$ ，再通过式(10)计算  $S_3(x)$  和  $S_3(y)$  的相似性  $S_{xy}$ 。

$$S_{xy} = \frac{2S_3(x)S_3(y) + T}{S_3^2(x) + S_3^2(y) + T} \quad (10)$$

式中： $T=0.1$ 。

计算待评价图像的清晰度，定义为：

$$CWTVNRS = 1 - \frac{\sum_{x \in \Omega} S_{xy}(x) S_{3m}(x)}{\sum_{x \in \Omega} S_{3m}(x)} \quad (11)$$

式中： $\Omega$  为图像整体的空间域； $S_{3m} = \max(S_3(x), S_3(y))$ 。CWTVNRS 值越大，表示原始图像的清晰度越高，质量越好，反之则清晰度越低，质量越差。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验数据库及性能指标

文中采用 LIVE<sup>[14]</sup>、TID2008<sup>[15]</sup>、CSIQ<sup>[16]</sup>3 个常用的图像质量评价数据库来验证提出的算法在高斯模糊图像上的清晰度评价性能。其中，LIVE 数据库包含 145 幅高斯模糊图像及 29 幅原图像，TID2008 数据库包含 100 幅高斯模糊图像，CSIQ 数据库包含 150

幅，每个数据库均通过一组测试人员对图像质量进行平均意见(MOS)打分。按照 VQEG 对质量模型的检验标准，选用 5 个参数指标<sup>[17-18]</sup>来比较 4 种常用的无参考清晰度评价算法和文中算法：斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)，用来估计预测的单调性；皮尔逊相关系数(CC)，用来估计预测的准确性；线外率(OR)，用来估计预测的一致性，值越小，算法性能越好；平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)，值越小，原始模糊图像的质量越好。

### 4.2 不同算法在不同数据库上的性能比较

实验通过比较 5 个常用的清晰度评价算法：JNBM<sup>[18]</sup>、CPBD<sup>[4]</sup>、LPC<sup>[5]</sup>、 $S_3$ <sup>[7]</sup>、FISH<sup>[6]</sup>与文中算法 CWTVNRS 的性能，进行分析，结果见表 1。

由表 1 的数据可知，文中 CWTVNRS 算法在 3

表 1 不同算法在 LIVE, TID2008, CSIQ 数据库上的性能比较

Tab.1 Performance comparison of different algorithms in LIVE, TID2008 and CSIQ databases

数据库	算法	斯皮尔曼秩相关系数	皮尔逊相关系数	线外率	平均绝对误差	均方根误差
LIVE	JNBM	0.8344	0.8497	0.1322	6.9333	9.0135
	CPBD	0.9466	0.9256	0.0632	4.7140	6.4688
	LPC	0.9432	0.9431	0.0575	4.3261	5.6823
	$S_3$	0.9392	0.9532	0.0057	3.7859	5.1694
	FISH	0.9292	0.9368	0.0517	4.6022	5.9797
	CWTVNRS	0.9476	0.9483	0.0230	4.1187	5.4251
TID2008	JNBM	0.6667	0.6931	0.7300	0.6529	0.8459
	CPBD	0.8414	0.8237	0.6900	0.5175	0.6655
	LPC	0.8561	0.8574	0.7100	0.4856	0.6040
	$S_3$	0.8319	0.8485	0.6100	0.4865	0.6210
	FISH	0.7828	0.8079	0.6700	0.5449	0.6915
	CWTVNRS	0.8417	0.8455	0.7000	0.4241	0.5792
CSIQ	JNBM	0.7807	0.8261	0.4000	0.1265	0.1615
	CPBD	0.8646	0.8557	0.3800	0.1185	0.1483
	LPC	0.8835	0.8913	0.3067	0.1011	0.1299
	$S_3$	0.8481	0.8546	0.3467	0.1111	0.1488
	FISH	0.8705	0.8890	0.3000	0.0966	0.1312
	CWTVNRS	0.8875	0.8972	0.3400	0.1001	0.1302

个数据库上的整体性能较优，在 LIVE 数据库上的 SROCC 达到了 0.9476，CC 达到了 0.9483，OR 只有 0.0230，与主观评价的一致性、单调性和准确性较好。5 种评价指标都较 JNBM 和 FISH 算法有较大的提高，与 CPBD、LPC 和  $S_3$  算法的性能相当或略优。由此可以说明，文中算法与主观评价拟合效果更好，更加符合人眼视觉对图像感知清晰度的评价。

使用配置为 Intel Core i5 CPU(2.30 GHz)，2 GB 内存的计算机，在 Matlab R2010a 中运行 LIVE 数据库里一幅测试高斯模糊图像的清晰度计算，CPBD 的

使用时间为 2.539 s，LPC 算法的使用时间为 6.592 s， $S_3$  算法的使用时间为 20.9212 s，中文 CWTVNRS 算法的使用时间为 6.003 s。根据 4 种算法评价一幅测试图像的使用时间数据可知，文中 CWTVNRS 算法在评价其清晰度时相较于 LPC 和  $S_3$  的时间较短，计算速度较快，相比同样是结合频域和空域评价清晰度的  $S_3$  算法，耗时缩短了将近 3.5 倍，计算效率较高。相比 CPBD 算法的时间耗时较长，这是由于 CPBD 仅在空间域计算边缘块的亮度和展宽并结合 JNB 得到模糊概率，计算量上大大减少。

## 5 结语

通过构造参考图像实现了在复小波域提取局部相位一致性的清晰度图和空间域计算总变分清晰度图的加权融合,得到新的整体清晰度图,再比较原始图像与其参考图像的清晰度图的相似性,得到原始图像的清晰度评价,通过实验证明文中算法与主观评价的单调性、一致性较高,算法性能稳定,计算时间相比同样结合频域和空域的算法大大缩短,有实用性,更加符合人眼视觉清晰度感知。

### 参考文献:

- [1] 范媛媛,沈湘衡,桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. 光学精密工程, 2011, 19(10): 2485—2493.  
FAN Yuan-yuan, SHEN Xiang-heng, SANG Ying-jun. No Reference Image Sharpness Assessment Based on Contrast Sensitivity[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2485—2493.
- [2] 高绍妹,王延江,金伟其,等. 基于感知对比度的图像清晰度客观评价模型[J]. 光学技术, 2015, 41(5): 396—399.  
GAO Shao-shu, WANG Yan-jiang, JIN Wei-qi, et al. Objective Image Sharpness Metric Based on Perceptual Contrast[J]. Optical Technique, 2015, 41(5): 396—399.
- [3] 王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学报, 2015, 41(6): 1062—1079.  
WANG Zhi-ming. Review of No-reference Image Quality Assessment[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(6): 1062—1079.
- [4] NIRANJAN N D, KARAM L J. A No-Reference Image Blur Metric Based on the Cumulative Probability of Blur Detection (CPBD)[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2011, 20(9): 2678—2683.
- [5] HASSEN R, WANG Zhou, SALAMA M. No-reference Image Sharpness Assessment Based on Local Phase Coherence Measurement[J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech & Signal Processing, 2010, 23(3): 2434—2437.
- [6] PHONG V V, DAMON C M. A Fast Wavelet-Based Algorithm for Global and Local Image Sharpness Estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(7): 423—426.
- [7] CUONG V T, PHAN T D, et al. S3: A Spectral and Spatial Measure of Local Perceived Sharpness in Natural Images[J]. Image Processing IEEE Transactions on, 2012, 21(3): 934—945.
- [8] 苗莹,易三莉,贺建峰,等. 结合梯度信息的特征相似性图像质量评估[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(6): 749—755.  
MIAO Ying, YI San-li, HE Jian-feng, et al. Image Quality Assessment of Feature Similarity Combined with Gradient Information[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(6): 749—755.
- [9] WANG Zhou, SIMONCELLI E P. Local Phase Coherence and the Perception of Blur[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2003, 16: 786—792.
- [10] 成孝刚,安明伟,阮雅端,等. 基于变分的盲图像复原质量评价指标[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 418—423.  
CHENG Xiao-gang, AN Ming-wei, RUAN Ya-duan, et al. A Modern Image Quality Measurement Method for Blind Image Restoration[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 418—423.
- [11] BLANCHET G, MOISAN L, ROUGE B. Measuring the Global Phase Coherence of an Image[J]. 15th IEEE International Conference on Image Processing, ICIP, 2008: 1176—1179.
- [12] GRAHAM N. Visual Pattern Analyzers[J]. New York: Oxford University Press, 1989.
- [13] 桑庆兵,苏媛媛,李朝锋,等. 基于梯度结构相似度的无参考模糊图像质量评价[J]. 光电子·激光, 2013, 24(3): 573—577.  
SANG Qing-bing, SU Yuan-yuan, LI Chao-feng, et al. No-reference Blur Image Quality Assessment Based on Gradient Similarity[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(3): 573—577.
- [14] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, et al. Live Image Quality Assessment Database Release 2[J/OL]. Available: <http://live.ece.utexas.edu/research/quality> Available.
- [15] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al. TID2008—A Database for Evaluation of Full-reference Visual Quality Assessment Metrics[J]. Adv Modern Radioelectron, 2009, 10: 30—45.
- [16] LARSON E C, 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.
- [17] 黄晓妹,田绪红. 无参考的模糊图像清晰度评价方法[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(5): 1117—1121.  
HUANG Xiao-mei, TIAN Xu-hong. No-reference Sharpness Assessment for Blurred Image[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(5): 1117—1121.
- [18] FERZLI R, KARAM L J. A No-reference Objective Image Sharpness Metric Based on the Notion of Just Noticeable Blur (JNB)[J]. IEEE Trans Image Process, 2009, 18(4): 717—728.