

## 结合全局与局部变化的图像质量评价

高敏娟<sup>1</sup> 党宏社<sup>1</sup> 魏立力<sup>2</sup> 王海龙<sup>3</sup> 张选德<sup>4</sup>

**摘要** 图像所包含的信息是通过灰度值在空域的变化呈现的. 梯度是度量变化的基本工具, 这使得梯度成为了目前大多数图像质量评价算法的重要组成部分. 但是梯度只能度量局部变化, 而当人类视觉系统 (Human visual system, HVS) 感知一幅图像时, 既能感知到局部变化, 也能感知到全局变化. 基于 HVS 的这一特性, 本文提出了一种结合全局与局部变化的图像质量评价算法 (Global and local variation similarity, GLV-SIM). 该算法利用 Grünwald-Letnikov 分数阶导数来度量图像的全局变化, 利用梯度模来度量图像的局部变化. 然后结合二者计算参考图像和退化图像之间的相似度谱 (Similarity map), 进而得到图像的客观评分. 在 TID2013、TID2008、CSIQ 与 LIVE 四个数据库上的仿真实验表明, 较之单一度量局部变化的方法, 本文算法能更准确地模拟 HVS 对图像质量的感知过程, 给出的客观评分与主观评分具有较好的一致性.

**关键词** 图像质量评价, 全局与局部, Grünwald-Letnikov 分数阶导数, 梯度模

**引用格式** 高敏娟, 党宏社, 魏立力, 王海龙, 张选德. 结合全局与局部变化的图像质量评价. 自动化学报, 2020, 46(12): 2662-2671

**DOI** 10.16383/j.aas.c190697

### Combining Global and Local Variation for Image Quality Assessment

GAO Min-Juan<sup>1</sup> DANG Hong-She<sup>1</sup> WEI Li-Li<sup>2</sup> WANG Hai-Long<sup>3</sup> ZHANG Xuan-De<sup>4</sup>

**Abstract** The information contained in an image is presented by the changes of gray value in spatial domain. Gradient is the basic tool to measure changes, which makes gradient become an important ingredient of most image quality assessment algorithms. However, gradient can only measure local changes, while when human visual system (HVS) perceives an image, it can perceive both local and global changes. Based on this characteristic of HVS, this paper proposes an image quality assessment algorithm by combining global and local variations similarity (GLV-SIM). The algorithm uses Grünwald-Letnikov fractional derivative to measure the global changes and uses gradient magnitude to measure the local changes of the image. Synthesizing the two aspect changes, similarity map between reference image and distorted image is calculated, and then objective score of the image is obtained. Simulation experiments on four databases TID2013, TID2008, CSIQ and LIVE show that, comparing with the algorithm only considering local changes, the proposed algorithm can more accurately simulate the perception process of HVS on image quality and can obtain better consistency between objective scores and subjective scores.

**Key words** Image quality assessment, global and local, Grünwald-Letnikov fractional derivative, gradient magnitude

**Citation** Gao Min-Juan, Dang Hong-She, Wei Li-Li, Wang Hai-Long, Zhang Xuan-De. Combining global and local variation for image quality assessment. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(12): 2662-2671

图像是人类视觉感知和计算机处理系统的重要

收稿日期 2019-10-08 录用日期 2019-12-15

Manuscript received October 8, 2019; accepted December 15, 2019

国家自然科学基金 (61871260, 61871259), 陕西科技大学人工智能交叉学科 PI 团队培育专项基金资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61871260, 61871259) and Shaanxi University of Science and Technology Artificial Intelligence Interdisciplinary PI Team Cultivation Special Project

本文责任编辑 黄庆明

Recommended by Associate Editor HUANG Qing-Ming

1. 陕西科技大学电气与控制工程学院 西安 710021 2. 宁夏大学数学统计学院 银川 750021 3. 宁夏师范学院数学与计算机科学学院 固原 756000 4. 陕西科技大学电子信息与人工智能学院 西安 710021

1. School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021 2. School of Mathematics and Statistics, Ningxia University, Yinchuan 750021 3. School of Mathematics and Computer Science, Ningxia Normal University, Guyuan 756000 4. School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021

信息载体, 图像质量的好坏直接影响着人们的视觉体验和图像的后续处理. 然而由于成像系统和环境等因素的限制, 图像在采集、存储和传输过程中, 会不可避免的引入噪声、模糊等现象, 造成图像质量的退化<sup>[1-3]</sup>. 为了有效地对图像质量进行控制或增强, 必先明确如何度量图像质量, 这催生了对图像质量评价 (Image quality assessment, IQA) 问题的研究.

图像质量评价根据人的参与情况, 可分为主观评价和客观评价<sup>[4]</sup>. 主观评价方法邀请志愿者对图像质量进行打分, 容易受到观测者个体因素的影响, 通常需进行多次重复试验并取平均意见分值 (Mean opinion score, MOS) 作为最终的质量评分. 该方法费用高、耗时长, 不能嵌入实时系统中, 因而使用

范围受到限制. 客观评价方法模拟人对图像质量的感知过程, 构建与主观评价结果相一致的评价算法.

根据评价过程有无真实图像 (Ground truth) 作为参考, IQA 分为全参考、部分参考和无参考评价<sup>[9]</sup>, 本文研究全参考 IQA 问题.

广泛应用的全参考 IQA 算法有均方误差 (Mean squared error, MSE)<sup>[6]</sup> 和峰值信噪比 (Peak signal noise ratio, PSNR)<sup>[7]</sup>, 二者通过计算参考图像与退化图像之间对应像素点的差异来度量图像质量损失, 计算简单且容易嵌入图像处理模型中, 但未考虑图像在空域的结构和 HVS 感知机理, 评价结果与主观 MOS 值的一致性较差. 2004 年, 结构相似性 (Structure similarity, SSIM)<sup>[8]</sup> 的提出受到研究者的广泛关注. 该算法假设 HVS 能够自适应地提取场景中结构信息, 并融合亮度、对比度、结构三方面特征来计算参考图像与退化图像之间的相似性. SSIM 的评价性能与 MSE、PSNR 相比有明显提高, 被认为是 IQA 领域具有里程碑意义的算法. 随后, 基于 SSIM 框架, 研究者提出一系列改进算法, 如 MS-SSIM<sup>[9]</sup>、IW-SSIM<sup>[10]</sup>、3-SSIM<sup>[11]</sup>, 以及文献 [12–15] 中的算法等. 2011 年, Zhang 等<sup>[16]</sup> 提出特征相似性 (Feature similarity, FSIM) 算法, 该算法假定 HVS 依据底层视觉特征的相似程度来判定图像质量, 并以相位一致性为第一特征, 梯度模为第二特征, 计算参考图像和退化图像的相似图谱, 然后以相位一致性作为视觉显著性度量来对相似图谱进行加权平均. FSIM 算法获得了较好的评价效果, 目前已成为全参考 IQA 的基准 (Benchmark) 算法.

图像中所包含的信息是通过灰度值或者色彩在空域的变化来呈现的, 这使得度量变化的特征 (Feature) 广泛应用于图像质量评价中. 梯度是度量变化的基本工具, 这使得梯度成为了目前很多 IQA 算法的基本组成部分. 例如, 文献 [17] 直接将梯度模作为局部特征, 构造了 GSIM (Gradient similarity) 算法; 文献 [18] 利用方向导数度量每个像素点周围四个方向上变化, 估计该点为边界的可能性, 提出 ESSIM (Edge strength similarity) 算法; 文献 [19] 通过度量参考图像和退化图像之间超像素亮度相似性 (Superpixel luminance similarity)、超像素色度相似性 (Superpixel chrominance similarity) 以及像素点梯度模相似性 (Pixel gradient similarity), 构造了 SPSIM (Superpixel-based similarity) 算法; 文献 [20] 综合梯度模、各向异性 and 局部方向性构建 DASM (Directional anisotropic structure measurement) 特征, 提出基于 DASM 的评价

算法; 文献 [21] 以梯度模为特征, 标准差为池化方式, 提出了 GMSD (Gradient magnitude similarity deviation) 算法; 可以看出, 这些算法的构造都用到了梯度特征, 且梯度特征对算法的评价性能起到了重要的作用. 此外, DOG (Difference of Gaussian) 滤波和小波变换也是工程中经常使用的度量变化的工具, 自然地可被用作图像质量评价的特征. 例如, 文献 [22] 提出了基于 DOG 的图像质量评价算法, 以及文献 [23] 提出了基于哈尔小波的 HaarPSI (Haar wavelet-based perceptual similarity) 算法.

梯度、DOG 以及小波均度量局部变化, 但 HVS 对图像进行观测时, 既能感知到局部信息, 也能感知到全局信息. 如当人在观测一幅图像时, 一方面, 能够感知到图像中的前景和背景, 并能够对整幅图像的语义信息有所理解, 这依赖于 HVS 对图像全局信息的感知; 另一方面, HVS 具有多尺度聚焦功能, 能够自适应地感知到图像中感兴趣的局部细节. 如我们在观测图 1 时, 会自然的把小孩的部分看作是图像前景, 草地的部分看作是图像背景; 同时, 人眼会易于关注到感兴趣的区域, 如小孩所在的区域, 尤其是脸部区域. 为模拟 HVS 的这一感知特点, 在本文中, 我们通过分别度量图像在空域上全局与局部的变化来刻画图像的全局信息与局部信息, 提出了一种结合全局与局部变化的图像质量评价算法 (GLV-SIM), 算法利用 Grünwald-Letnikov 分数阶导数来度量图像的全局变化, 利用梯度模来度量图像的局部变化. 在公开数据库的实验结果表明, 本文算法给出的客观评分能够获得与主观评分较好的一致性.

本文结构安排如下: 第 1 节介绍如何度量图像在空域的全局变化和局部变化; 第 2 节结合全局与



图 1 Child-swimming 图像

Fig.1 The image of child-swimming

局部变化定义 IQA 算法 GLV-SIM; 第 3 节通过数值实验讨论全局与局部变化特征相结合对图像对比变化的刻画能力, 以及分析本文算法的评价效果; 第 4 节为本文工作的总结和展望.

## 1 度量图像全局与局部变化

### 1.1 利用分数阶导数度量图像全局变化

分数阶微积分是整数阶微积分在形式上的推广, 研究阶次为分数的问题, 由法国数学家 Hopital 在 1695 年写给 Leibniz 的信中所提出<sup>[24]</sup>. 分数阶导数具有记忆性的特点, 能够较好地刻画历史依赖性和全局相关性, 可用来描述图像的全局变化. 基于从不同形式上的推广, 常见的分数阶导数定义有 Riemann-Liouville, Grünwald-Letnikov 和 Caputo 等<sup>[25-26]</sup>, 其中 Grünwald-Letnikov 常应用于信号处理方面.

本文采用 Grünwald-Letnikov (GL), 其定义由整数阶微积分推演而来. 对于一维信号  $f(x)$ , 一阶导数的计算式为

$$\frac{d^1}{dx^1} f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} [f(x) - f(x-h)] \quad (1)$$

其中,  $h$  为自变量增量. 容易地, 由一阶导数推导出二阶导数式

$$\frac{d^2}{dx^2} f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^2} [f(x) - 2f(x-h) + f(x-2h)] \quad (2)$$

循环使用上述方法, 最终得出  $f(x)$  的  $n$  阶导数为

$$\frac{d^n}{dx^n} f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{j=0}^n (-1)^j \binom{n}{j} f(x-jh) \quad (3)$$

将式 (3) 中导数阶次由整数  $n$  拓展到非整数  $\alpha$  的情形,  $f(x)$  的  $\alpha$  阶 GL 导数定义为

$${}_{x_0, x}^{GL} D^\alpha f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{x-x_0}{h} \rceil} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(x-jh) \quad (4)$$

其中,  ${}_{x_0, x}^{GL} D^\alpha$  左上标含义为 Grünwald-Letnikov, 右上标含义为  $\alpha$  阶导数, 而左下标  $x$ 、 $x_0$  分别代表上、下界. 另外,  $[\cdot]$  表示取整运算.

将式 (4) 中的系数部分  $(-1)^j \binom{\alpha}{j}$  改写为  $\frac{(-1)^j \Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(\alpha-j+1)}$ , 其中  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数, Gamma 函数为阶乘在非整数上的推广, 则 GL 定义可重新写为

$${}_{x_0, x}^{GL} D^\alpha f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\lceil \frac{x-x_0}{h} \rceil} \frac{(-1)^j \Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(j+1)\Gamma(\alpha-j+1)} \times f(x-jh) \quad (5)$$

从式中可以看出, 函数  $f(x)$  在  $x$  处的 GL 导数涉及从  $x_0$  至  $x$  的所有函数值, 由此可认为分数阶导数是有记忆的.

图像信号可看成是二维矩阵. 此处在一维信号 GL 定义的基础上, 计算二维图像信号的 GL 导数. 记图像信号为  $f(\mathbf{x})$ ,

$$f(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MN} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,  $M$ ,  $N$  分别为图像行、列像素总数. 对图像信号  $f(\mathbf{x})$  计算 GL 导数可看成是分别沿水平方向和垂直方向进行一维信号 GL 导数的计算.

沿水平方向计算 GL 导数, 对图像  $f(\mathbf{x})$  进行逐行处理. 对于第  $i$  行, 即  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ , 大小为  $1 \times N$ .  $\mathbf{x}_i$  对应的 GL 导数记为  $D_H^\alpha \mathbf{x}_i$  (下标  $H$  代表沿水平方向), 基于式 (5),  $D_H^\alpha \mathbf{x}_i$  计算如下

$$D_H^\alpha \mathbf{x}_i = \left( \frac{1}{h^\alpha} \times x_{i1}, \frac{(-1)\Gamma(\alpha+1)}{h^\alpha \times \Gamma(2)\Gamma(\alpha)} \times x_{i1} + \frac{1}{h^\alpha} \times x_{i2}, \dots, \frac{(-1)^{N-1}\Gamma(\alpha+1)}{h^\alpha \times \Gamma((N-1)+1)\Gamma(\alpha-(N-1)+1)} \times x_{i1} + \frac{(-1)^{N-2}\Gamma(\alpha+1)}{h^\alpha \times \Gamma((N-2)+1)\Gamma(\alpha-(N-2)+1)} \times x_{i2} + \dots + \frac{1}{h^\alpha} \times x_{iN} \right) \quad (7)$$

$D_H^\alpha \mathbf{x}_i$  计算结果为  $1 \times N$  的向量, 从式 (7) 中可以看出,  $D_H^\alpha \mathbf{x}_i$  第 1 项涉及像素值  $x_{i1}$ ; 第 2 项涉及像素值  $x_{i1}, x_{i2}$ ; 依次可知, 第  $N$  项涉及像素值  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}$ ; 表明了 GL 导数具有全局性的特点. 根据式 (7) 分别计算得到  $f(\mathbf{x})$  每一行对应的  $D_H^\alpha \mathbf{x}_i$  值,  $i = 1, 2, \dots, M$ , 即得到图像沿行方向的 GL 导数, 记为  $D_H^\alpha$ , 结果为  $M \times N$  的矩阵.

类似地, 沿垂直方向计算 GL 导数, 对图像  $f(\mathbf{x})$  进行逐列处理, 列向量大小为  $M \times 1$ , 每列所对应的 GL 导数结果为  $M \times 1$  的向量.  $f(\mathbf{x})$  可看成是  $N$  个  $M \times 1$  的列向量, 记图像沿列方向的 GL 导数为  $D_V^\alpha$  (下标  $V$  代表沿垂直方向), 则  $D_V^\alpha$  结果同样为  $M \times N$  的矩阵.

分别得到图像沿水平方向和垂直方向的 GL 导数  $D_H^\alpha$ ,  $D_V^\alpha$ , 图像对应 GL 导数模定义为



$$DM = \sqrt{(D_H^\alpha)^2 + (D_V^\alpha)^2} \quad (8)$$

$DM$  为  $M \times N$  的矩阵.

## 1.2 利用梯度模度量图像局部变化

图像梯度用来度量图像局部的变化, 其计算方法为图像与梯度算子进行卷积运算. 常用的梯度算子有 3 种, 分别为 Sobel 算子、Prewitt 算子和 Scharr 算子. 自然地, 采用不同的梯度算子对 IQA 算法的评价性能也将不同. 由文献 [16, 18] 的讨论可得 Scharr 算子能够对 IQA 模型产生较好的效果. 由此本文梯度算子选取 Scharr, 模板大小为  $3 \times 3$ , 式 (9) 给出了水平方向和垂直方向模板, 分别为

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix}, \quad \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由图像  $f(x)$  与式 (9) 中模板卷积运算分别得到水平方向和垂直方向的梯度值  $G_H$ ,  $G_V$ . 图像对应的梯度模定义为

$$GM = \sqrt{(G_H)^2 + (G_V)^2} \quad (10)$$

$GM$  为  $M \times N$  的矩阵.

## 2 GLV-SIM 图像质量评价算法

人在对图像的感知过程中, 不仅能够感知到图像中的语义对象等全局信息, 并且能够感知到图像中感兴趣的局部细节. 基于模拟 HVS 这一感知特点, 本文提出一种结合全局与局部的 IQA 算法 GLV-SIM, 该算法利用 GL 导数度量图像的全局变化, 利用梯度模度量图像的局部变化.

GLV-SIM 算法的总体框架如图 2 所示. 记参考图像为  $\mathbf{r} = \{r(x)|x \in \Omega\}$ , 退化图像为  $\mathbf{d} = \{d(x)|x \in \Omega\}$ ,  $\Omega$  表示整个图像域. 首先利用式 (8) 中 GL 导数模的定义分别计算  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{d}$  全局变化特征  $DM_r$ ,  $DM_d$ , 计算二者的相似性得到  $DM$  相似度谱; 利用式 (10) 中梯度模的定义分别计算  $\mathbf{r}$  和  $\mathbf{d}$  局部变化特征  $GM_r$ ,  $GM_d$ , 计算二者的相似性得到  $GM$  相似度谱. 然后融合  $DM$  相似度谱与  $GM$  相似度谱得到  $\mathbf{r}$  与  $\mathbf{d}$  总的相似性谱. 最后对总的相似性谱作池

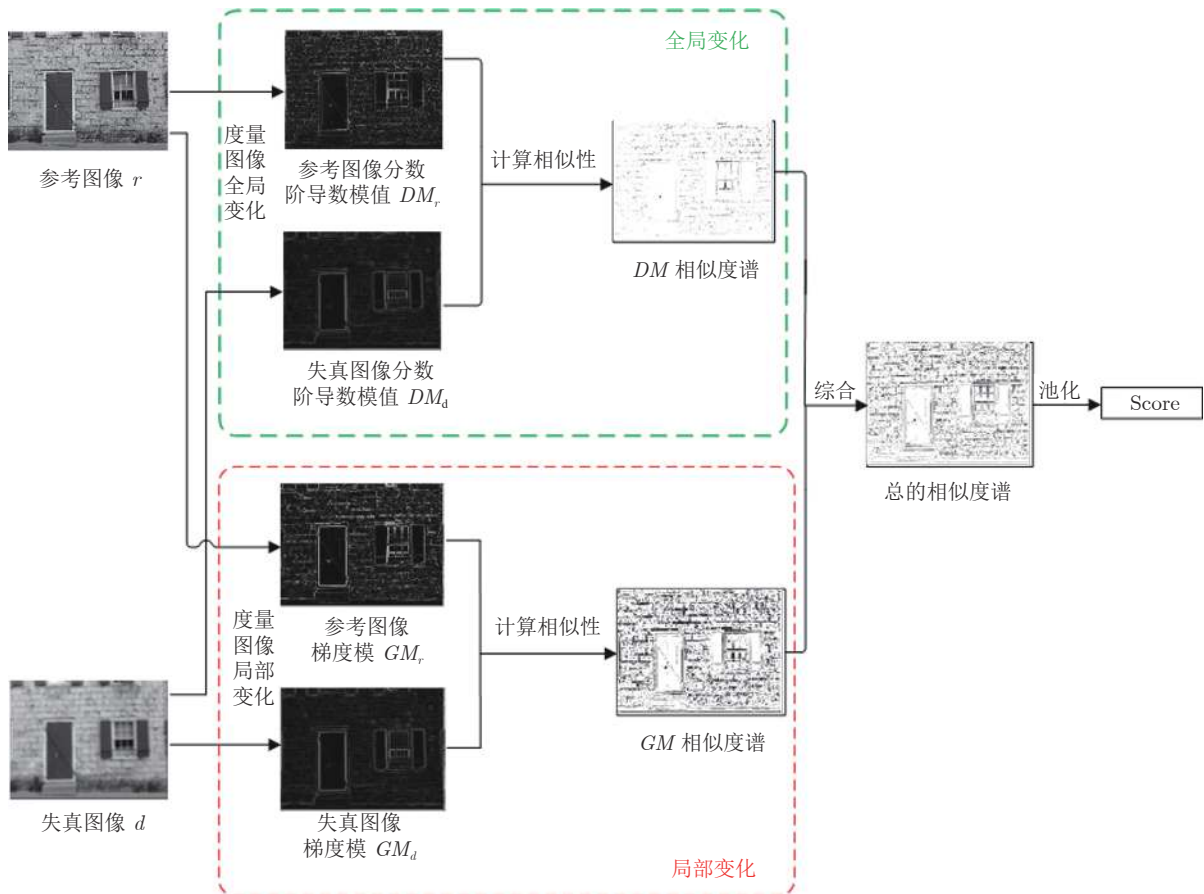


图 2 GLV-SIM 算法框架

Fig. 2 The framework of GLV-SIM algorithm

化处理得到图像的整体客观评分.

图像  $r$  和  $d$  在  $x$  处 GL 导数模的相似性度量定义为

$$S_{DM}(x) = \frac{2DM_r(x) \times DM_d(x) + C_1}{DM_r^2(x) + DM_d^2(x) + C_1} \quad (11)$$

$S_{DM}$  反映了参考图像与退化图像在全局变化特征上的相似程度.

类似地, 图像  $r$  和  $d$  在  $x$  处梯度模的相似性度量定义为

$$S_{GM}(x) = \frac{2GM_r(x) \times GM_d(x) + C_2}{GM_r^2(x) + GM_d^2(x) + C_2} \quad (12)$$

$S_{GM}$  则反映了参考图像与退化图像在局部变化特征上的相似程度. 式 (11) 和式 (12) 中  $C_1, C_2$  均为大于零的常数, 以避免分母为零和保持计算结果的稳定性.

综合式 (11) 和式 (12), 参考图像与退化图像总的相似性度量定义为

$$S(x) = [S_{DM}(x)]^\lambda \times [S_{GM}(x)]^{1-\lambda} \quad (13)$$

其中, 参数  $\lambda$  用来调节全局与局部特征的相对重要性.

最后, 对  $S$  进行均值池化处理, 图像整体客观评分为

$$Score = \frac{1}{T} \sum_{x=1}^T S(x) \quad (14)$$

式中,  $T$  表示图像域  $\Omega$  中像素总数.

### 3 数值实验

#### 3.1 测试数据库与评价指标

为全面分析本文 GLV-SIM 算法的评价性能, 选取 4 大公开 IQA 数据库 TID2013<sup>[27]</sup>、TID2008<sup>[28]</sup>、CSIQ<sup>[29]</sup> 和 LIVE<sup>[30]</sup> 作为实验数据集. 其中, TID2013 包含有 3 000 幅退化图像, 24 种失真类型, 5 种失真等级; TID2008 包含有 1 700 幅退化图像, 17 种失真类型, 每种失真类型有 4 个失真等级; CSIQ 数据库包含有 866 幅退化图像, 5 种失真类型, 4~5 种失真等级; 以及 LIVE 数据库包含有 779 幅退化图像, 5 种失真类型, 4~5 种失真等级. 同时, 数据库中均给出了每幅退化图像相应的主观评分. 值得注意的是, TID2013 和 TID2008 主观评分为 MOS 值, 其分值越大表示图像质量越好; 而 CSIQ 和 LIVE 主观评分为 DMOS (Differential mean opinion score) 值, 其分值越小表示图像质量退化程度越低.

客观 IQA 算法的性能通常以主客观评分之间的一致性来衡量. 常用的评价指标有 4 中: 斯皮尔曼等级相关系数 (Spearman rank order correlation coefficient, SROCC) 和肯德尔等级相关系数 (Kendall rank order correlation coefficient, KROCC) 评价主客观评分之间的单调性, 其值越接近于 1 则相关性越好; 皮尔逊线性相关系数 (Pearson linear correlation coefficient, PLCC) 和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 评价算法预测准确性, 由于主客观评分取值范围不同 (如 TID2013 中主观评分范围为 [0, 9], 而 SSIM 客观评分范围为 [0, 1]), 计算时需要先进行回归分析, 建立主客观评分之间的非线性映射. 这里采用式 (15) 中的 Logistic 回归函数, 其中,  $\{\beta_i | i = 1, 2, \dots, 5\}$  为回归模型参数. PLCC 值越接近于 1, 表示算法精度越高. 而 RMSE 值越小, 则算法预测准确性越好.

$$Q_P = \beta_1 \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \exp(\beta_2(Q - \beta_3))} \right] + \beta_4 Q + \beta_5 \quad (15)$$

#### 3.2 参数设置

GLV-SIM 算法在计算参考图像与退化图像全局与局部特征相似性度量时, 分别引入了可调参数  $C_1, C_2$ . 通常, 设置方法为取  $C_1 = (K_1 \times L)^2$ ,  $C_2 = (K_2 \times L)^2$ , 其中  $K_1, K_2$  为很小的常数 (对于 8-bit 灰度图像  $L = 255$ ). 另外, GLV-SIM 算法中分数阶次  $\alpha$  以及体现全局与局部的相对重要程度的  $\gamma$ , 也均为需设置的参数.

选取 TID2008 数据库中前 8 幅参考图像及对应的 544 幅退化图像作为测试子集, 在该子集上取不同参数进行数值实验, 通过最高的 SROCC 值确定算法最佳参数值. 采用控制变量法, 先令  $\alpha = 0.5$ ,  $\gamma = 0.5$ , 在二维网格  $(K_1, K_2) = (0.05k_1, 0.05k_2)$  上进行搜索,  $k_1 = 1, 2, \dots, 10$ ;  $k_2 = 1, 2, \dots, 10$ , 实验得到  $K_1 = 0.2$ ,  $K_2 = 0.1$  为最佳值. 其次, 以  $K_1, K_2$  最佳值与  $\gamma = 0.5$ , 对不同  $\alpha$  取值进行实验,  $\alpha$  最佳值取 0.6. 最后以  $K_1, K_2$  和  $\alpha$  最佳值, 确定  $\gamma$  最优值, 结果取  $\gamma = 0.7$ .

#### 3.3 GLV-SIM 度量能力分析

选取 TID2008 数据库中参考图像 I21, 及相应的退化图像 I21-1-2、I21-3-2、I21-8-2、I21-11-2 和 I21-12-2, 各退化图像对应的退化类型分别为加性高斯噪声、空间位置相关噪声、高斯模糊、JPG2K 压缩和 JPG 传输错误. 如图 3 所示, 图 3(a) 为参考图像, 图 3(b)~(f) 为退化图像, 图中右下角分别显示矩形区域局部放大图, 该区域包含有边界、纹理及平滑的部分 (如屋顶边界、云朵纹理及天空平滑



图3 参考图像 (a) 及其不同类型退化图像 (b)~(f) (右下角为矩形区域局部放大图)

Fig.3 Reference image (a) and different types of distorted images (b)~(f) (The lower right corner is a enlarged view of the rectangular region)

表1 图3(b)~(f) 主观评分和不同算法客观评分  
Table 1 Subjective scores and objective scores of different algorithms for Fig. 3(b)~(f)

评价方法	图3(b)	图3(c)	图3(d)	图3(e)	图3(f)
MOS	5.0000	3.8387	4.1875	4.7667	6.2903
PSNR	30.5304	30.5784	26.1303	27.4808	27.3498
VSNR	29.7301	21.1480	20.5342	30.7072	20.2681
IFC	4.7389	3.4351	4.9319	2.9956	11.3746
SSIM	0.9250	0.8461	0.9459	0.9475	0.9568
MS-SSIM	0.9606	0.9159	0.9738	0.9727	0.9821
IW-SSIM	0.9684	0.9075	0.9645	0.9704	0.9661
GSIM	0.9958	0.9888	0.9953	0.9966	0.9979
FSIM	0.9831	0.9462	0.9538	0.9699	0.9707
GLV-SIM	0.9959	0.9845	0.9927	0.9957	0.9961

部分). 从图中可以看出, 5 幅退化图像分别具有不同视觉感知质量, 其对应的主观评分 MOS 值如表 1 中所示. 分值越大代表图像质量越好, 则视觉质量由好到差依次为图 3(f), 3(b), 3(e), 3(d), 3(c).

表 1 同时列出了 GLV-SIM 及几种不同 IQA 算法对图 3(b)~(f) 的客观评分, 评分排名如表 2 所示. 结果表明, 本文 GLV-SIM 算法可获得与主观评价相一致的评价结果, 算法 FSIM、GSIM 同样考虑了利用梯度度量图像局部变化, 但排名结果与主观 MOS 不完全一致, 这也体现了本文综合考虑图像全局与局部变化的有效性.

考查图像全局变化特征对图像质量评价的有效

表2 针对表1 评分排名  
Table 2 The rank of scores on Table 1

评价方法	图3(b)	图3(c)	图3(d)	图3(e)	图3(f)
MOS	2	5	4	3	1
PSNR	2	1	5	3	4
VSNR	2	3	4	1	5
IFC	3	4	2	5	1
SSIM	4	5	3	2	1
MS-SSIM	4	5	2	3	1
IW-SSIM	2	4	5	1	3
GSIM	3	5	4	2	1
FSIM	1	5	4	3	2
GLV-SIM	2	5	4	3	1

性. 图 4 展示了与图 3 相对应矩形区域的 DM 图, 由图中可以看出, 图 4(a) DM 图能够很好地呈现参考图像的变化特征. 图 4(b)~(f) 与图 4(a) 相比, 明显图 4(f) 具有与图 4(a) 更相似的 DM 图, 与其他相比, 图 4(f) 视觉质量最好; 图 4(b) 与图 4(e) 相比, 图 4(b) 虽存在噪声但在边界处保留有更好的细节, 整体上图 4(b) 好于图 4(e); 而图 4(d) 在边界处出现模糊, 影响视觉效果; 图 4(c) 则与图 4(a) 相似程度最低, 图 4(c) 视觉质量最差. 由分析可看出, 描述图像全局变化特征的 DM 图能够获得与主观评价较好的一致性, 与人类视觉感知相符.

### 3.4 整体评价性能的比较

在 4 个数据库上测试 GLV-SIM 的整体评价性



能, 参与对比的算法有传统方法 PSNR、VSNR<sup>[31]</sup>、IFC<sup>[32]</sup>, 经典算法 SSIM 及其改进算法 MS-SSIM、IW-SSIM, 以及梯度相似性 GSIM 和特征相似性 FSIM 算法. 实验中对对比算法采用作者公布的代码

和文献中报道的最优参数. 实验环境为 DELL optiplex7040, Intel Core i7-6700, CPU@3.4 GHz, 8 GB RAM, 实验平台为 MATLAB R2016b. 表 3 和表 4 列出了 9 种算法在 4 个数据库上 SROCC、KROCC、

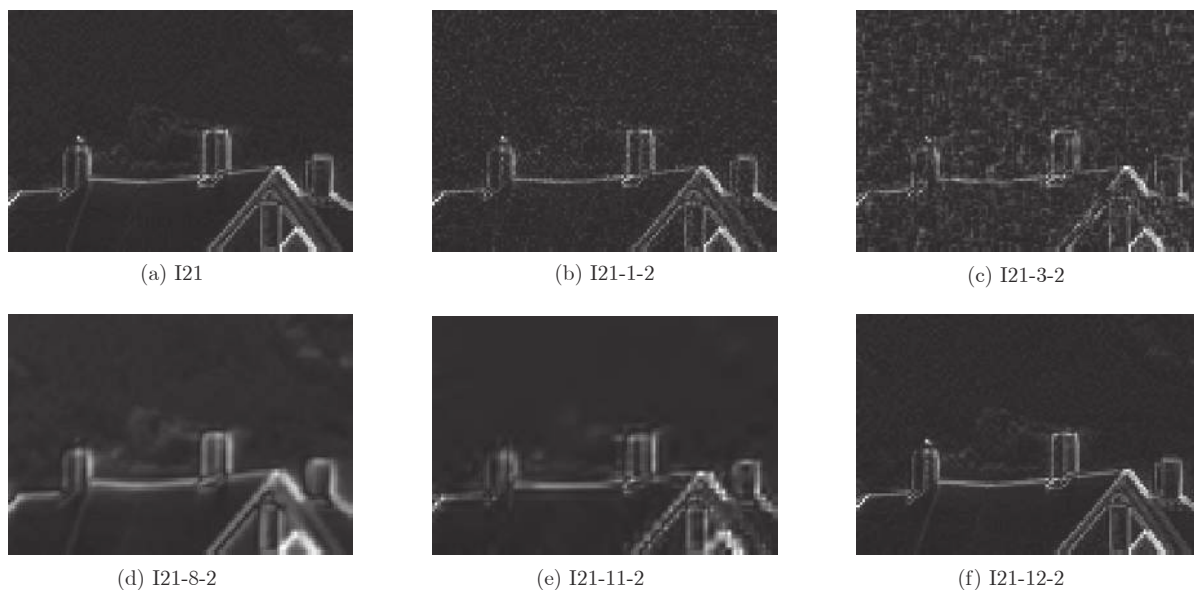


图 4 针对图 3 中各矩形区域对应的  $DM$  图

Fig. 4 The corresponding  $DM$  map for each rectangular region in Fig.3

表 3 不同 IQA 算法在 TID2013 和 TID2008 数据库的实验结果比较

Table 3 Comparison the performance results of different IQA algorithms on TID2013 and TID2008 databases

数据库	性能指标	PSNR	VSNR	IFC	SSIM	MS-SSIM	IW-SSIM	GSIM	FSIM	GLV-SIM
TID 2013	SROCC	0.6396	0.6812	0.5389	0.7417	0.7859	0.7779	0.7946	0.8015	<b>0.8068</b>
	KROCC	0.4698	0.5084	0.3939	0.5588	0.6047	0.5977	0.6255	0.6289	<b>0.6381</b>
	PLCC	0.7017	0.7402	0.5538	0.7895	0.8329	0.8319	0.8464	<b>0.8589</b>	0.8580
	RMSE	0.8832	0.8392	1.0322	0.7608	0.6861	0.6880	0.6603	<b>0.6349</b>	0.6368
TID 2008	SROCC	0.5531	0.7046	0.5675	0.7749	0.8542	0.8559	0.8504	0.8805	<b>0.8814</b>
	KROCC	0.4027	0.5340	0.4236	0.5768	0.6568	0.6636	0.6596	0.6946	<b>0.6956</b>
	PLCC	0.5734	0.6820	0.7340	0.7732	0.8451	0.8579	0.8422	<b>0.8738</b>	0.8648
	RMSE	1.0994	0.9815	0.9113	0.8511	0.7173	0.6895	0.7235	<b>0.6525</b>	0.6739

表 4 不同 IQA 算法在 CSIQ 和 LIVE 数据库的实验结果比较

Table 4 Comparison the performance results of different IQA algorithms on CSIQ and LIVE databases

数据库	性能指标	PSNR	VSNR	IFC	SSIM	MS-SSIM	IW-SSIM	GSIM	FSIM	GLV-SIM
CSIQ	SROCC	0.8058	0.8106	0.7671	0.8756	0.9133	0.9213	0.9108	0.9242	<b>0.9264</b>
	KROCC	0.6084	0.6247	0.5897	0.6907	0.7393	0.7529	0.7374	0.7567	<b>0.7605</b>
	PLCC	0.8000	0.8002	0.8384	0.8613	0.8991	<b>0.9144</b>	0.8964	0.9120	0.9082
	RMSE	0.1575	0.1575	0.1431	0.1334	0.1149	0.1063	0.1164	<b>0.1007</b>	0.1099
LIVE	SROCC	0.8756	0.9274	0.9259	0.9479	0.9513	0.9567	0.9561	<b>0.9634</b>	0.9521
	KROCC	0.6865	0.7616	0.7579	0.7963	0.8045	0.8175	0.8150	<b>0.8337</b>	0.8179
	PLCC	0.8723	0.9231	0.9268	0.9449	0.9489	0.9522	0.9512	<b>0.9597</b>	0.9368
	RMSE	13.359	10.505	10.264	8.9445	8.6188	8.3473	8.4327	<b>7.6780</b>	8.0864

表 5 不同 IQA 算法在 TID2008 数据库单一失真评价性能 (SROCC) 比较  
Table 5 Comparison SROCC for individual distortion of different IQA algorithms on TID2008 database

数据库	失真类型	PSNR	VSNR	IFC	SSIM	MS-SSIM	IW-SSIM	GSIM	FSIM	GLV-SIM
TID 2008	AWN	0.9073	0.7728	0.5806	0.8107	0.8094	0.7869	0.8573	0.8566	<b>0.9125</b>
	ANMC	<b>0.8994</b>	0.7793	0.5460	0.8029	0.8064	0.7920	0.8095	0.8527	0.8979
	SCN	<b>0.9175</b>	0.7665	0.5958	0.8144	0.8195	0.7714	0.8902	0.8483	0.9167
	MN	<b>0.8520</b>	0.7295	0.6732	0.7795	0.8156	0.8087	0.7403	0.8021	0.8087
	HFN	<b>0.9273</b>	0.8811	0.7318	0.8729	0.8685	0.8662	0.8932	0.9093	0.9175
	IMN	<b>0.8725</b>	0.6470	0.5345	0.6732	0.6868	0.6465	0.7721	0.7452	0.7864
	QN	0.8702	0.8271	0.5857	0.8531	0.8537	0.8177	0.8750	0.8564	<b>0.8865</b>
	GB	0.8704	0.9330	0.8559	0.9544	0.9607	<b>0.9636</b>	0.9585	0.9472	0.9587
	DEN	0.9422	0.9286	0.7973	0.9530	0.9571	0.9473	<b>0.9723</b>	0.9603	0.9666
	JPEG	0.8723	0.9174	0.8180	0.9252	0.9348	0.9184	0.9391	0.9279	<b>0.9534</b>
	JP2K	0.8131	0.9515	0.9437	0.9625	0.9736	0.9738	0.9755	<b>0.9773</b>	0.9751
	JGTE	0.7525	0.8056	0.7909	0.8678	0.8736	0.8588	<b>0.8832</b>	0.8708	0.8793
	J2TE	0.8312	0.7909	0.7301	0.8577	0.8522	0.8203	0.8925	0.8544	<b>0.9021</b>
	NEPN	0.5812	0.5716	<b>0.8418</b>	0.7107	0.7336	0.7724	0.7372	0.7491	0.7271
	BLOCK	0.6194	0.1926	0.6770	0.8462	0.7617	0.7623	0.8865	0.8492	<b>0.8960</b>
	MS	0.6966	0.3715	0.4250	0.7231	<b>0.7374</b>	0.7067	0.7174	0.6698	0.6994
	CTC	0.5867	0.4239	0.2713	0.5246	0.6398	0.6301	<b>0.6736</b>	0.6481	0.6689

PLCC 和 RMSE 的结果. 从表中可看出, GLV-SIM 整体评价效果较好. 在 TID2013、TID2008 和 CSIQ 数据库上, GLV-SIM 与 FSIM 评价性能相当, 好于基于梯度的 GSIM 算法, 且优于传统算法和基于 SSIM 的算法. 在 LIVE 数据库上, FSIM 取得了最好的评价效果, GLV-SIM 与 GSIM 相当. 该实验结果表明, 图像变化特征能够更好地描述图像结构信息, 本文 GLV-SIM 算法中全局与局部结合的方法与单一度量局部变化相比, 能提高对图像对比变化的刻画能力.

### 3.5 单一失真评价性能的比较

在 TID2008 数据库上测试 GLV-SIM 对单一失真类型的评价性能. 表 5 中列出了不同算法的 SROCC 值, 值越大表明评价效果越好, 图中每种失真类型排名首位的结果已加粗显示. 从表中可看出, GLV-SIM 和 PSNR 均出现 5 次, GSIM 出现 3 次, FSIM 出现 1 次. PSNR 对噪声类型的失真评价较好, GLV-SIM 在 AWN、QN 上效果明显, 并能在 AWNC、SCN 和 HFN 上取得与 PSNR 相当的效果. 其次, GLV-SIM 还可在 JPEG、J2TE、BLOCK 失真类型上取得较好的评价效果, 并在 JP2K 能与 FSIM 效果相当.

## 4 总结与展望

本文的贡献在于针对现有 IQA 算法仅考虑图像局部变化所存在的不足, 以模拟 HVS 既能感知到图像局部信息也能感知到全局信息的特点, 提出

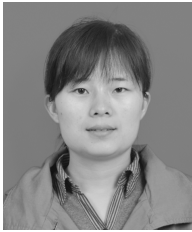
一种结合全局与局部变化的 GLV-SIM 算法. 该算法利用了分数阶导数具有全局性的特点来度量图像全局变化, 同时利用梯度来度量图像局部变化, 结合二者来预测图像质量评分. 在公开数据库上的实验结果表明, 本文算法能够取得与主观评分较好的一致性. 结合全局与局部的方法与单一考虑局部的方法相比能够更好地模拟 HVS 的主观评价过程. 在今后的研究中, 我们将进一步尝试将该方法应用于部分参考和无参考图像质量评价问题中.

## References

- 1 Mohammadi P, Ebrahimi-Moghadam A, Shirani S. Subjective and objective quality assessment of image: a survey. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 2015, **9**(1): 419-423
- 2 Yang X C, Sun Q S, Wang T S. Image quality assessment improvement via local gray-scale fluctuation measurement. *Multi-media Tools and Applications*, 2018, **77**(18): 24185-24202
- 3 Gao Min-Juan, Dang Hong-She, Wei Li-Li, Zhang Xuan-De. Image quality assessment algorithm based on non-local gradient. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2019, **41**(5): 1122-1129  
(高敏娟, 党宏社, 魏立力, 张选德. 基于非局部梯度的图像质量评价算法. 电子与信息学报, 2019, **41**(5): 1122-1129)
- 4 Xu Li-Na, Xiao Qi, He Lu-Xiao. Fused image quality assessment based on human visual characteristics. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, **44**(4): 546-554  
(许丽娜, 肖奇, 何鲁晓. 考虑人类视觉特征的融合图像评价方法. 武汉大学学报 (信息科学版), 2019, **44**(4): 546-554)
- 5 Cao Qing-Jie, Shi Zai-Feng, Zhang Jia-Ping, Li Hang-Yuan,



- Gao Jing, Yao Su-Ying. Sub-regional and multiple criteria full-reference image quality assessment. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, **52**(6): 625–630  
(曹清洁, 史再峰, 张嘉平, 李杭原, 高静, 姚素英. 分区域多标准的全参考图像质量评价算法. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, **52**(6): 625–630)
- 6 Wang Z, Bovik A C. Mean squared error: love it or leave it? A new look at signal fidelity measures. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2009, **26**(1): 98–117
- 7 Huynh-Thu Q, Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment. *Electronics Letters*, 2008, **44**(13): 800–801
- 8 Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, Simoncelli E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on image processing*, 2004, **13**(4): 600–612
- 9 Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment. In: Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2003. 1398–1402
- 10 Wang Z, Li Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(5): 1185–1198
- 11 Li C F, Bovik A C. Three-component weighted structural similarity index. In: Proceedings of the 2009 SPIE Conference on Image Quality and System Performance, San Jose, California, USA, 2009. 7242: 72420Q–72420Q-9
- 12 Liu Da-Jin, Ye Jian-Bing, Liu Jia-Jun. SVD-based gray-scale image quality assessment algorithms in the SSIM perspective. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, **40**(1): 73–78  
(刘大瑾, 叶建兵, 刘家骏. SSIM 框架下基于 SVD 的灰度图像质量评价算法研究. 南京师大学报(自然科学版), 2017, **40**(1): 73–78)
- 13 Yan Le-Le, Li Hui, Qiu Ju-Neng, Liang Ping. Image quality assessment method based on regional contrast and structural similarity. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(1): 58–63  
(闫乐乐, 李辉, 邱聚能, 梁平. 基于区域对比度和 SSIM 的图像质量评价方法. 应用光学, 2015, **36**(1): 58–63)
- 14 Jin X, Jiang G Y, Chen F, Yu M, Shao F, Peng Z J, et al. Adaptive image quality assessment method based on structural similarity. *Journal of Optoelectronics. Laser*, 2014, **25**(2): 378–385
- 15 Tian Hao-Nan, Li Su-Mei. Objective evaluation method for image quality based on edge structural similarity. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 110–114  
(田浩南, 李素梅. 基于边缘的 SSIM 图像质量客观评价方法. 光子学报, 2013, **42**(1): 110–114)
- 16 Zhang L, Zhang L, Mou X Q, Zhang D. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, **20**(8): 2378–2386
- 17 Liu A M, Lin W S, Narwaria M. Image quality assessment based on gradient similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, **21**(4): 1500–1512
- 18 Zhang X D, Feng X C, Wang W W, Xue W F. Edge strength similarity for image quality assessment. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, **20**(4): 319–322
- 19 Sun W, Liao Q M, Xue J H, Zhou F. SPSIM: a superpixel-based similarity index for full-reference image quality assessment. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, **27**(9): 4232–4244
- 20 Ding L, Huang H, Zang Y. Image quality assessment using directional anisotropy structure measurement. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, **26**(4): 1799–1809
- 21 Xue W F, Zhang L, Mou X Q, Bovik A C. Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, **23**(2): 684–695
- 22 Pei S C, Chen L H. Image quality assessment using human visual DOG model fused with random forest. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, **24**(11): 3282–3292
- 23 Reisenhofer R, Bosse S, Kutyniok G, Wiegand T. A haar wavelet-based perceptual similarity index for image quality assessment. *Signal Processing: Image Communication*, 2018, **61**: 33–43
- 24 Xue Ding-Yu. *Fractional Calculus and Fractional-order Control*. Beijing: Publishing House of Science, 2018. 31–72  
(薛定宇. 分数阶微积分学与分数阶控制. 北京: 科学出版社, 2018. 31–72)
- 25 Zhang Gui-Mei, Sun Xiao-Xu, Liu Jian-Xin, Chun Jun. Research on TV-L1 optical flow model for image registration based on fractional-order differentiation. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(12): 2213–2224  
(张桂梅, 孙晓旭, 刘建新, 储珺. 基于分数阶微分的 TV-L1 光流模型的图像配准方法研究. 自动化学报, 2017, **43**(12): 2213–2224)
- 26 Chen Yun, Guo Bao-Yu, Ma Xiang-Yuan. Image processing based on regularization with fractional calculus. *Mathematica Numerica Sinica*, 2017, (39): 393–406  
(陈云, 郭宝裕, 马祥园. 基于分数阶微积分正则化的图像处理. 计算数学, 2017, (39): 393–406)
- 27 Ponomarenko N, Jin L, Ieremeiev O, Lukin V, Egiazarian K, Astola J, et al. Image database TID2013: peculiarities, results and perspectives. *Image Communication*, 2015, **30**(C): 57–77
- 28 Ponomarenko N, Lukin V, Zelensky A, Egiazarian K, Astola J, Carli M, et al. TID2008: a database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics [Online], available: <http://www.ponomarenko.info/papers/mre>, November 1, 2016
- 29 Larson E C, Chandler D. Categorical subjective image quality (CSIQ) database [Online], available: <http://vision.okstate.edu/csiq>, November 1, 2016
- 30 Sheikh H R, Wang Z, Bovik A C. Image and video quality assessment research at LIVE. [Online], available: <http://live.ece.utexas.edu/rese-arch/quality/>, November 1, 2016
- 31 Chandler D M, Hemami S S. VSNR: a wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(9): 2284–2298
- 32 Sheikh H R, Bovik A C, Veciana G D. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2117–2128



**高敏娟** 陕西科技大学电气与控制工程学院博士研究生. 2010 年获得山西大学工学硕士学位. 主要研究方向为图像处理, 图像质量评价.

E-mail: gaominjuan1984@163.com

**(GAO Min-Juan** Ph.D. candidate

at the School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology. She received her master degree in engineering from Shanxi University in 2010. Her research interest covers image processing and image quality assessment.)



**党宏社** 陕西科技大学电气与控制工程学院教授. 主要研究方向为工业过程与优化, 计算机控制, 图像处理.

E-mail: danghs@sust.edu.cn

**(DANG Hong-She** Professor at the School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology.

His research interest covers industrial process and optimization, computer control, and image processing.)



**魏立力** 宁夏大学数学统计学院教授. 主要研究方向为应用统计与数据分析. E-mail: liliwei@nxu.edu.cn

**(WEI Li-Li** Professor at the School of Mathematics and Statistics, Ningxia University. His research interest covers apply statistics and

data analysis.)



**王海龙** 宁夏师范学院数学与计算机科学学院讲师. 2011 年获得香港公开大学教育硕士学位. 主要研究方向为代数.

E-mail: wanghailong7903@163.com

**(WANG Hai-Long** Lecturer at the School of Mathematics and Com-

puter Science, Ningxia Normal University. He received his Master of education degree from the Open University of Hong Kong, China in 2011. His main research interest is algebra.)



**张选德** 陕西科技大学电子信息与人工智能学院教授. 2013 年获得西安电子科技大学理学博士学位. 主要研究方向为图像恢复, 图像质量评价, 稀疏表示和低秩逼近理论. 本文通信作者.

E-mail: zhangxuande@sust.edu.cn

**(ZHANG Xuan-De** Professor at the School of Electronic Information and Artificial Intelligence, Shaanxi University of Science and Technology. He received his Ph.D. degree in applied mathematics from Xidian University in 2013. His research interest covers image restoration, image quality evaluation, sparse representation, and low rank approximation theory. Corresponding author of this paper.)