

# 四元数谱余量彩色图像质量评价

岳靖\*\*, 刘国军\*, 付浩

宁夏大学数学统计学院, 宁夏 银川 750021

**摘要** 通过将参考图像与失真图像表示为纯四元数矩阵, 提出了一种用于检测两幅图像视觉显著性区域的四元数谱余量方法。将该方法与四元数梯度特征作为指标构建彩色图像质量评价方法, 并将视觉显著性作为评价指标的权值。利用 Spearman 等级相关系数(SROCC)、Kendall 等级相关系数、Pearson 线性相关系数及均方误差平方根 4 种客观评价指标在 TID2013 与 CSIQ 数据库中进行数值实验, 结果表明, 所提算法在 TID2013 上的 SROCC 值为 0.8169, 且与人的主观评价相匹配。

**关键词** 图像处理; 彩色图像质量评价; 四元数; 谱余量; 视觉显著性

中图分类号 TP391.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031009

## Color Image Quality Assessment Based on Quaternion Spectral Residual

Yue Jing\*\*, Liu Guojun\*, Fu Hao

School of Mathematics & Statistics, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

**Abstract** The quaternion spectral residual method for detecting the visual saliency regions of two images is proposed, by expressing the reference image and the distorted image as a pure quaternion matrix. Then both the method and the quaternion gradient features are employed to design color image quality evaluation, as well as visual saliency as the weight of the evaluation index. Numerical experiments are conducted on the TID2013 and CSIQ databases to calculate four kinds of objective evaluation indexes such as the Spearman rank correlation coefficient (SROCC), the Kendall rank correlation coefficient, the Pearson linear correlation coefficient, and the root mean squared error. The results show that the experimental SROCC value on TID2013 reaches 0.8169, which matches the subjective evaluation of humans.

**Key words** image processing; color image quality assessment; quaternion; spectral residual; visual saliency

**OCIS codes** 100.2960; 110.2960; 110.3000

## 1 引言

图像质量评价(IQA)是图像处理领域的重要工作之一, 主要在图像特征分析的基础上对图像质量的优劣做出判断。近年来, 随着对数字图像处理等不同领域的深入研究, 提出了许多高效的 IQA 方法。其可分为主观评价和客观评价。主观评价是把人作为观测者, 对图像进行评价, 从而最大程度地反映人的视觉感知; 客观评价方法则是借助某类数学模型, 设计出与人类视觉系统相吻合的算法, 并模拟人的视觉感知能力对图像做出评价。客观评价可分为全参考、无参考及半参考 3 种类型。

人类视觉系统对图像的感知能力是非常迅速而且准确的。在图像处理的发展过程中, 可以将视觉特征作为一个极其重要的组成部分。Hou 等<sup>[1]</sup>提出了基于谱余量的视觉显著性检测方法, 通过对图像进行傅里叶变换, 将图像对数谱信息冗余的部分作为谱余量, 即视觉显著性部分。Xu 等<sup>[2]</sup>将边缘信息及邻域色彩对比度应用于视觉显著性检测。而在 IQA 的过程中, 为了构造出与人类视觉系统相吻合的算法, 将视觉显著性引入图像质量评价取得了一定程度的成功。Zhang 等<sup>[3]</sup>提出基于谱余量的灰度图像质量评价算法, 将谱余量与梯度作为局部特征构造局部相似性, 同时在计算整幅图像相似性的过程

收稿日期: 2018-08-29; 修回日期: 2018-09-08; 录用日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(61461043)、宁夏自然科学基金(2018AAC03014)

\* E-mail: liugj@nxu.edu.cn; \*\* E-mail: yjing1995@163.com

中,将参考图像与失真图像的谱余量最大值作为视觉显著性指标的权值构造灰度图像质量评价方法。Zhang 等<sup>[4]</sup>提出视觉显著性指标(VSI),在谱余量图像质量评价的基础上,引入对比度相似性,将视觉显著性、梯度相似性和对比度相似性指标结合构成 IQA 算法,其评价结果具有效率高、精度高的特点,且与人类视觉系统的主观得分有着很好的契合性。

通过上述分析可知,视觉显著性对于彩色图像质量评价具有重要的影响,如何准确有效地刻画彩色图像的颜色结构信息并提取其视觉特征是研究的难点。

## 2 彩色图像的四元数表达

在彩色图像质量评价的过程中,人们往往将彩色图像转换到 RGB、YIQ、HSV 和 YUV 等空间,或者将彩色图像转换为灰度图像以做进一步的处理。Zhang 等<sup>[5]</sup>在构造图像质量评价的特征相似性指标时,将图像转换到 YIQ 空间中;文献<sup>[6]</sup>也是在 YIQ 空间中通过广义平均池化策略给出了彩色图像质量评价方法。而彩色图像转换为灰度图像时,丢失了彩色信息,导致其评价效果存在一定缺陷。四元数

能够很好地刻画彩色图像的结构信息,Pei 等<sup>[7]</sup>最先提出将彩色图像单个像素点的 RGB 像素值分别存储到一个纯四元数的 3 个虚数结构中,降低了彩色信息矩阵的维数,且能够更加准确地反映彩色信息的交互性。

四元数由哈密顿在 1843 年提出,是复数域的推广。一个四元数可表示为

$$q = a + bi + cj + dk, \quad (1)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  属于实数域; $i$ 、 $j$ 、 $k$  为虚数单位,且满足关系为

$$\begin{cases} i^2 = j^2 = k^2 = -1 \\ ij = -ji = k \\ ki = -ik = j \\ jk = -kj = i \end{cases} \quad (2)$$

若  $a=0$ ,则称  $q$  为纯四元数。矩阵由四元数或者纯四元数构成,称为四元数矩阵。

假设  $f(x, y)$  为一幅单通道图像,则可以用纯四元数表示为

$$f(x, y) = r(x, y)i + g(x, y)j + b(x, y)k, \quad (3)$$

式中: $(x, y)$  为彩色像素坐标; $r$ 、 $g$ 、 $b$  分别为彩色图像的红绿蓝单通道信息,如图 1 所示。

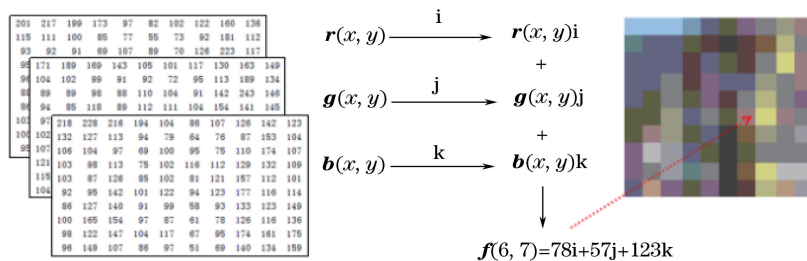


图 1 RGB 图像转换为纯四元数矩阵示意图

Fig. 1 Schematic of color image convert to a pure quaternion matrix

用四元数表征彩色图像可以降低构造彩色图像质量评价的复杂度。Yu 等<sup>[8]</sup>提出了利用四元数对彩色图像进行稀疏表示;Jin 等<sup>[9]</sup>通过四元数表示彩色图像,构造四元数边缘检测算子,利用卷积检测彩色图像边缘;Zeng 等<sup>[10]</sup>通过建立四元数主成分分析网络,对彩色图像进行分类;Lan 等<sup>[11]</sup>构造了彩色图像的四元数 Weber 局部描述子;Gai 等<sup>[12]</sup>提出在四元数小波域使用正则逆高斯模型对图像进行去噪,后续拓展到缩减的四元数矩阵奇异值分解<sup>[13]</sup>;Angulo 等<sup>[14]</sup>将四元数彩色图像结构张量用于不变特征提取;徐海洋等<sup>[15]</sup>提出了基于四元数三维骨骼表示的人体行为识别方法。四元数彩色图像表示在稀疏表示、边缘提取、分类、去噪、特征提取等领域取得了一定程度的成功。

在利用四元数进行彩色图像质量评价方面,王

宇庆等<sup>[16]</sup>通过对彩色图像进行四元数奇异值分解,评价了彩色图像质量;Kolaman 等<sup>[17]</sup>构造了彩色图像的四元数结构相似性彩色图像质量评价算法,描述了具有亮度、对比度和结构相似性的四元数模型;王勇等<sup>[18]</sup>实现了全四元数结构相似度的彩色图像质量评价算法构造。在图像质量评价的众多算法中,谱余量能够反映图像中人类视觉显著区域且性能良好,因此给出四元数谱余量的计算,并构造彩色图像质量评价的视觉显著性方法。

## 3 四元数谱余量彩色图像质量评价指标

### 3.1 四元数谱余量彩色图像视觉显著性

彩色图像四元数谱余量主要刻画彩色图像去除

统计的冗余部分之后所产生的变化。即从待测图像的对数谱中得到彩色图像四元数谱余量,再将谱余量转换到空域得到彩色图像的视觉显著性图。

受文献[3]的启发,将彩色图像表示为四元数矩阵  $f(x,y)$ ,其四元数谱余量视觉显著性图  $Q_{SRVS}$  计算为

$$\mathbf{M}(m,n) = \text{abs}\{\mathcal{F}[f(x,y)](m,n)\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{A}(m,n) = \text{angle}\{\mathcal{F}[f(x,y)](m,n)\}, \quad (5)$$

$$\mathbf{L}(m,n) = \log[\mathbf{M}(m,n)], \quad (6)$$

$$\mathbf{R}(m,n) = \mathbf{L}(m,n) - \mathbf{h} * \mathbf{L}(m,n), \quad (7)$$

$$Q_{SRVS} = \mathbf{g}(x,y) * \{\mathcal{F}^{-1}[\exp(\mathbf{R} + \mu\mathbf{A})](x,y)\}^2, \quad (8)$$

式中:  $*$  为矩阵间的卷积运算;  $\mathcal{F}(\mathcal{F}^{-1})$  表示傅里叶变换(傅里叶逆变换);  $\text{abs}(\cdot)$  为计算四元数幅值;  $\text{angle}(\cdot)$  为计算四元数的 3 个辐角;  $\mathbf{h}$  为四元数均值滤波算子,取  $3 \times 3$  阶单位四元数组成的四元数矩阵;  $(m,n)$  为彩色图像某个像素的频域坐标;  $\mathbf{M}(m,n)$  为图像  $f(x,y)$  进行四元数傅里叶变换之后取模的结果;  $\mathbf{A}(m,n)$  为图像  $f(x,y)$  进行四元数傅里叶变换之后取辐角的结果;  $\mathbf{L}(m,n)$  为对于  $\mathbf{M}(m,n)$  取其对数谱;  $\mathbf{R}(m,n)$  为四元数谱余量部分;  $\mu$  为纯单位四元数;  $\mathbf{g}(x,y)$  为四元数高斯核,取  $3 \times 3$  阶四元数矩阵;  $(x,y)$  为像素的空间坐标。

### 3.2 彩色图像的四元数梯度特征

彩色图像的梯度反映彩色图像在某一方向上的变化程度。在图像处理中,往往用梯度检测一幅图像的边缘轮廓。为了更好地保留并反映出彩色图像信息,采用四元数梯度算子提取梯度特征,用于构造两幅彩色图像之间的四元数梯度相似性。

彩色图像  $f(x,y)$  的水平四元数梯度算子  $\mathbf{G}_h(x,y)$  和垂直四元数梯度算子  $\mathbf{G}_v(x,y)$  可表示为

$$\mathbf{G}_h(x,y) = (1/6) \times \begin{bmatrix} \mu & \mu_0 & \mu^{-1} \\ \mu & \mu_0 & \mu^{-1} \\ \mu & \mu_0 & \mu^{-1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathbf{G}_v(x,y) = (1/6) \times \begin{bmatrix} \mu & \mu & \mu \\ \mu_0 & \mu_0 & \mu_0 \\ \mu^{-1} & \mu^{-1} & \mu^{-1} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中:  $\mu = 1/\sqrt{3}(i+j+k)$  为纯四元数;  $\mu^{-1}$  为  $\mu$  的逆;  $\mu_0 = 0$  梯度算子应单位化,故前面乘以 1/6。根据(9)、(10)式,则彩色图像  $f(x,y)$  的四元数梯度  $Q_{GM}(x,y)$  定义为

$$Q_{GM}(x,y) =$$

$$\sqrt{[f(x,y) * \mathbf{G}_h]^2 + [f(x,y) * \mathbf{G}_v]^2}. \quad (11)$$

四元数梯度能较好地反映彩色图像的边缘信息。

以 TID2013 数据库(TID2013)<sup>[19]</sup> 中的 8 幅参考图像为例,图 2 给出了其四元数梯度图。可以看出,四元数梯度能够更好地反映彩色图像的局部信息,使提取的边缘信息更加精准,以便构造更加良好的评价算法。

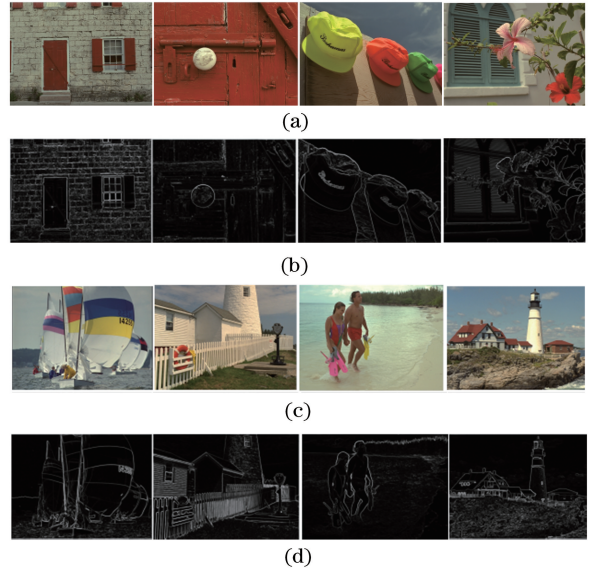


图 2 彩色图像的四元数梯度图。(a)彩色图像;(b)与(a)相对应的四元数梯度图;(c)彩色图像;(d)与(c)相对应的四元数梯度图

Fig. 2 Quaternion gradient maps of color images. (a) Color images; (b) corresponding quaternion gradient maps of (a); (c) color images; (d) corresponding quaternion gradient maps of (c)

### 3.3 四元数谱余量彩色图像评价指标

设现有两幅彩色四元数图像,  $f_1(x,y)$  为参考图像,  $f_2(x,y)$  为失真图像。其四元数谱余量彩色图像评价指标(QSR-SIM)可分为四元数谱余量视觉显著性(QSRVS)可及四元数梯度(QGM)两部分。记四元数谱余量视觉显著性分别为  $Q_{SRVS1}(x,y)$  和  $Q_{SRVS2}(x,y)$ , 定义其局部视觉显著性相似性  $S_{QSRVS}$  为

$$S_{QSRVS} = \frac{2Q_{SRVS1}(x,y)Q_{SRVS2}(x,y) + C_1}{Q_{SRVS1}^2(x,y) + Q_{SRVS2}^2(x,y) + C_1}, \quad (12)$$

式中  $C_1 > 0$ , 为常数,避免分母为 0。

同样的,两幅彩色图像的四元数梯度分别记为  $Q_{GM1}(x,y)$  和  $Q_{GM2}(x,y)$ , 定义其局部梯度相似性  $S_{QGM}$  为

$$S_{QGM} = \frac{2Q_{GM1}(x,y)Q_{GM2}(x,y) + C_2}{Q_{GM1}^2(x,y) + Q_{GM2}^2(x,y) + C_2}, \quad (13)$$

式中  $C_2 > 0$  为常数。

通过(12)、(13)式得到两幅图像局部的四元数

谱余量视觉显著性相似性和梯度相似性之后,可以定义其局部相似性  $S_Q(x, y)$  为

$$S_Q(x, y) = S_{QSRVS} \times (S_{QGM})^\alpha, \quad (14)$$

式中参数  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) 用来权衡四元数谱余量视觉显著性与梯度特征之间的重要性。本文参数  $\alpha \in [0, 0.3]$ 。

两幅彩色图像之间的整体相似性可以定义为

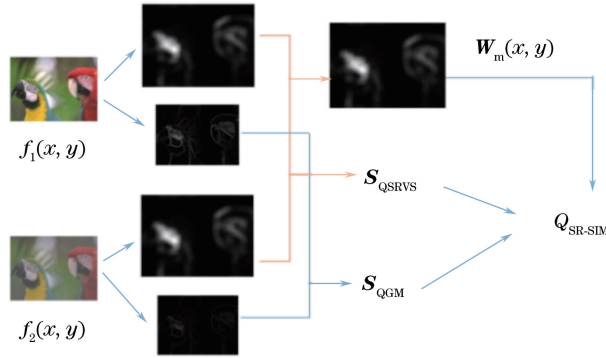


图3 QSR-SIM 质量评价算法的流程图

Fig. 3 Flowchart of QSR-SIM algorithm

## 4 实验结果

为了验证算法性能,在 TID2013、CSIQ 数据库<sup>[20]</sup>进行实验。与经典算法结构相似性(SSIM)<sup>[21]</sup>、特征相似性(FSIM)<sup>[5]</sup>、多尺度梯度幅值相似性方差(MS-GMSDc)<sup>[22]</sup>、四元数结构相似性(QSSIM)<sup>[17]</sup>以及谱余量相似性(SR-SIM)<sup>[3]</sup>方法进行比较,计算 Spearman 等级相关系数(SROCC)、Kendall 等级相关

$$Q_{SR-SIM} = \frac{\sum S_Q(x, y)W_m(x, y)}{\sum W_m(x, y)}, \quad (15)$$

式中  $W_m(x, y) = \max[Q_{SRVS1}(x, y), Q_{SRVS2}(x, y)]$ 。(15)式旨在将  $W_m(x, y)$  作为四元数谱余量视觉显著性的权值来反映局部信息,刻画视觉对局部显著特征的敏感度,所提算法的流程图如图3所示。

系数(KROCC)、Pearson 线性相关系数(PLCC)及均方误差平方根(RMSE)以度量主观评价与客观评价的相关性。

图4为所提算法与 SSIM、FSIM、MS-GMSDc、QSSIM 及 SR-SIM 算法在 TID2013 数据库上的实验性能。可以看出,所提算法在 TID2013 上的评价性能拟合效果较为突出,QSSIM 算法是将四元数引入 SSIM 算法中得到的,构造了彩色图像的质量评

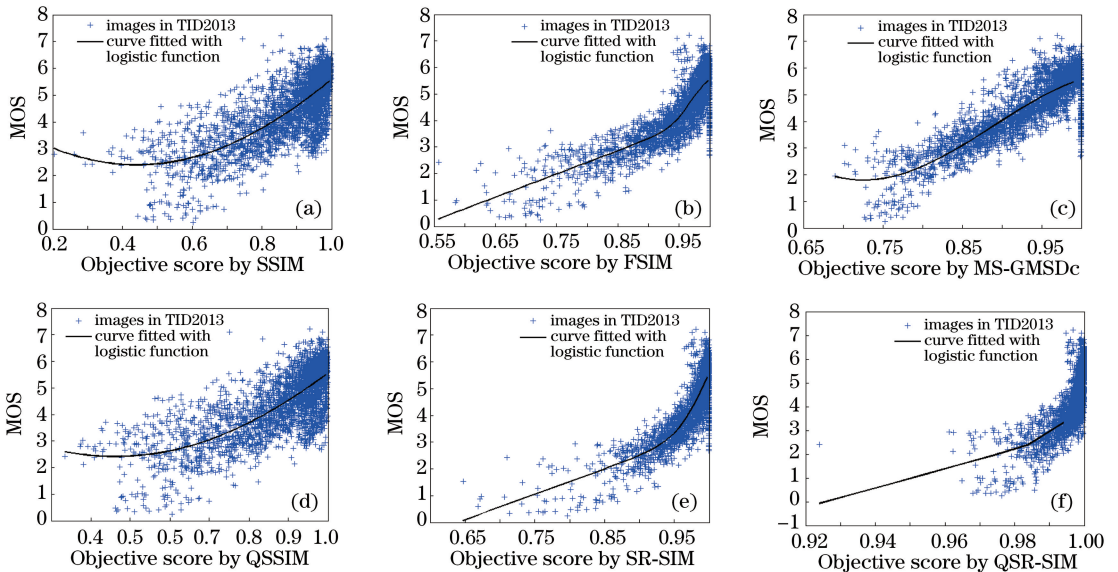


图4 TID2013 数据库上不同图像质量评价算法的回归曲线。

(a) SSIM; (b) FSIM; (c) MS-GMSDc; (d) QSSIM; (e) SR-SIM; (f) QSR-SIM

Fig. 4 Regression curves of different image quality evaluation algorithms in TID2013. (a) SSIM; (b) FSIM; (c) MS-GMSDc; (d) QSSIM; (e) SR-SIM; (f) QSR-SIM

价算法。与 QSSIM 算法相比,所提算法得到的评价结果集中在 0.925 以后,拟合效果好,与人的主观得分较为接近。

图 5 选择 TID2013 数据库中的一幅图像和所对应的几种不同类型的失真图像,用于考察不同评价算法的实验结果。图 5(a)为 TID2013 数据库中的第 I07 幅参考图像,图 5(b)~(f)分别为 I07 的 5 种失真图像,即 I07\_11\_5, I07\_12\_4, I07\_15\_3, I07\_17\_4 和 I07\_24\_5, 其失真类型分别为“jpeg 2000 compression”“jpeg transformation errors”“Local

block-wise distortions of different intensity”“Contrast change”“Sparse sampling and reconstruction”。对图 5(b)~(f)用不同评价算法的计算结果如表 1 所示,其中列举了图 5(b)~(f)的主观得分,可以看出,人类视觉系统对于图 5(b)、(f)视觉效果较差,打分较低,而对图 5(e)的视觉效果最佳,打分最高。表 2 为表 1 中各个评价算法的排名情况。从表 2 可以看出, QSR-SIM、VSI、SR-SIM 和 FSIM 算法可以产生与主观评价相同的排名,说明这几种评价算法与人类视觉系统评价具有一致性。

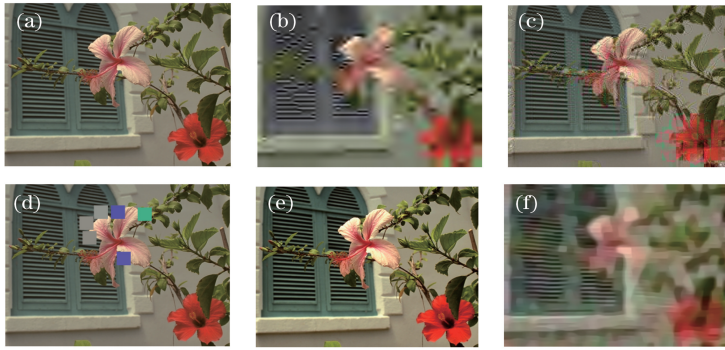


图 5 参考图像及其不同类型的失真图像。(a)参考图像 I07;(b) I07\_11\_5;(c) I07\_12\_4;(d) I07\_15\_3;(e) I07\_17\_4;(f) I07\_24\_5

Fig. 5 Reference image and its distortion images of different types. (a) Reference image I07;

(b) I07\_11\_5; (c) I07\_12\_4; (d) I07\_15\_3; (e) I07\_17\_4; (f) I07\_24\_5

表 1 参考图像 I07 的 5 种失真图像在不同评价算法实验中的结果

Table 1 Results of five kinds of distorted pictures of reference image I07 in different evaluation algorithm experiments

Algorithm	I07_11_5	I07_12_4	I07_15_3	I07_17_4	I07_24_5
Subjective score	0.9773	2.8636	3.0455	6.7273	0.4762
QSR-SIM	0.9701	0.9919	0.9968	0.9976	0.9691
VSI <sup>[4]</sup>	0.8964	0.9610	0.9614	0.9868	0.8875
SR-SIM <sup>[3]</sup>	0.8283	0.9317	0.9636	0.9803	0.8056
FSIM <sup>[5]</sup>	0.7203	0.9150	0.9610	0.9621	0.7137
SSIM <sup>[21]</sup>	0.5922	0.7208	0.9683	0.9516	0.6019
VSNR <sup>[23]</sup>	8.7561	15.0237	12.223	11.3239	8.6929
PSNR <sup>[24]</sup>	23.0007	26.1743	27.2014	25.0836	23.0449
GMSD <sup>[25]</sup>	0.2418	0.1215	0.1291	0.0259	0.2622

表 2 不同评价算法的排名

Table 2 Ranking of different evaluation algorithms

Algorithm	I07_11_5	I07_12_4	I07_15_3	I07_17_4	I07_24_5
Subjective score	4	3	2	1	5
QSR-SIM	4	3	2	1	5
VSI	4	3	2	1	5
SR-SIM	4	3	2	1	5
FSIM	4	3	2	1	5
SSIM	5	3	1	2	4
VSNR	4	1	2	3	5
PSNR	5	2	1	3	4
GMSD	4	2	3	1	5

表 3 为所提四元数谱余量算法和四元数 SSIM 的时间复杂度比较结果。结果显示:所提出的算法

在单幅图或在 TID2013 数据库中均显示出更高的计算效率。表 4 为其他几种算法与所提算法在

TID2013 以及 CSIQ 数据库上的实验结果,黑体标注为排名前三的算法。由表 4 还可以看出,所提算法在 SROCC 上表现优异,在 TID2013 库中本文方法的表现最为优异,在 CSIQ 数据库中排名前三。由于所提算法集中在 0.95 以后,所以与主观得分在计算 PLCC 和 RMSE 这 2 项指标上拟合效果较差。

表 3 算法的时间复杂度比较

Table 3 Comparison of time complexity of algorithms

Database	Time /s	
	QSSIM	QSR-SIM
I17_11_2	1.1124	0.7474
TID2013	520	485

表 4 各彩色图像质量评价方法的性能比较

Table 4 Comparison of various color image quality assessment methods' performance

Database	Parameter	PSNR	SSIM	FSIM	GMSD	MS-GMSD	SR-SIM	QSR-SIM
TID2013	SROCC	0.6869	0.7417	0.8015	0.8030	<b>0.8139</b>	<b>0.8073</b>	<b>0.8169</b>
	KROCC	0.4958	0.5588	0.6289	<b>0.6352</b>	<b>0.6467</b>	<b>0.6404</b>	0.6268
	PLCC	0.6748	0.7895	<b>0.8589</b>	<b>0.8575</b>	<b>0.8618</b>	0.7970	0.8413
	RMSE	0.9149	0.7608	0.6349	<b>0.4762</b>	<b>0.6288</b>	<b>0.6193</b>	0.6701
CSIQ	SROCC	0.8058	0.8756	0.9242	<b>0.9515</b>	<b>0.9545</b>	0.9319	<b>0.9435</b>
	KROCC	0.6084	0.6907	0.7567	<b>0.8021</b>	<b>0.8075</b>	0.7725	<b>0.7821</b>
	PLCC	0.8000	0.8613	0.9120	<b>0.9453</b>	<b>0.9512</b>	<b>0.9250</b>	0.8049
	RMSE	0.1575	0.1334	0.1077	<b>0.0856</b>	<b>0.0810</b>	<b>0.0997</b>	0.1618

表 5 为各个评价算法在 TID2013 数据库中不同失真类型的 SROCC 值对比,包括加性高斯噪声 (AGN)、颜色部分加噪 (ANC)、空域相关性噪声 (SCN)、掩膜噪声 (MN)、高频噪声 (HFN)、脉冲噪

声 (IN)、量化噪声 (QN)、高斯模糊 (GB)、图像去噪 (DEN)、JPEG 压缩 (JPEG)、JPEG2000 压缩 (JP2K)、JPEG 传输错误 (JGTE)、JPEG2000 传输错误 (J2TE)、非偏性模式噪声 (NEPN)、局部块状

表 5 各评价算法的在 TID2013 数据库中不同失真类型下的 SROCC 值

Table 5 SROCC values for different distortion types for various evaluation algorithms in the TID2013 database

Database	Distortion type	MS-SSIM <sup>[26]</sup>	SSIM_I <sup>[27]</sup>	SSIM	IFC <sup>[28]</sup>	VSNR	IW-SSIM	FSIM	SR-SIM	VSI	QSR-SIM
TID2013	AGN	0.8646	0.8627	0.8671	0.6612	0.8271	0.8438	<b>0.8973</b>	<b>0.9253</b>	<b>0.9460</b>	<b>0.9138</b>
	ANC	0.7730	0.7763	0.7726	0.5352	0.7305	0.7515	<b>0.8208</b>	<b>0.8570</b>	<b>0.8705</b>	<b>0.8111</b>
	SCN	0.8544	0.8505	0.8515	0.6601	0.8013	0.8167	<b>0.8750</b>	<b>0.9225</b>	<b>0.9367</b>	<b>0.8900</b>
	MN	<b>0.8073</b>	<b>0.7895</b>	0.7767	0.6932	0.7072	<b>0.8020</b>	<b>0.7944</b>	0.7860	0.7697	0.7036
	HFN	0.8604	0.8688	0.8634	0.7406	0.8455	0.8553	<b>0.8984</b>	<b>0.9132</b>	<b>0.9200</b>	<b>0.9042</b>
	IN	0.7629	<b>0.7896</b>	0.7503	0.6408	0.7363	0.7281	<b>0.8072</b>	<b>0.8277</b>	<b>0.8741</b>	0.7885
	QN	<b>0.8706</b>	0.8411	<b>0.8657</b>	0.6282	0.8357	0.8468	<b>0.8719</b>	0.8502	<b>0.8748</b>	0.8626
	GB	<b>0.9673</b>	<b>0.9724</b>	0.9668	0.8907	0.9470	<b>0.9701</b>	0.9551	0.9620	<b>0.9612</b>	0.9118
	DEN	0.9268	0.9296	0.9254	0.7779	0.9081	0.9152	<b>0.9302</b>	<b>0.9403</b>	<b>0.9484</b>	<b>0.9366</b>
	JPEG	<b>0.9265</b>	0.9227	0.9200	0.8357	0.9008	0.9187	<b>0.9324</b>	<b>0.9386</b>	<b>0.9541</b>	0.9219
	JP2K	0.9504	<b>0.9575</b>	0.9468	0.9078	0.9273	0.9506	<b>0.9577</b>	<b>0.9674</b>	<b>0.9706</b>	0.9522
	JGTE	0.8475	<b>0.8581</b>	<b>0.8493</b>	0.7425	0.7908	0.8388	0.8464	<b>0.8543</b>	<b>0.9216</b>	0.7764
	J2TE	<b>0.8889</b>	0.8856	0.8828	0.7769	0.8407	0.8656	<b>0.8913</b>	<b>0.9166</b>	<b>0.9228</b>	0.8355
	NEPN	0.7968	0.7885	0.7821	0.5737	0.6653	<b>0.8011</b>	0.7917	<b>0.7975</b>	<b>0.8060</b>	<b>0.8141</b>
	Block	<b>0.4801</b>	0.4563	<b>0.5720</b>	0.2414	0.1771	0.3717	<b>0.5489</b>	0.4731	0.1713	<b>0.5545</b>
	MS	<b>0.7906</b>	<b>0.7845</b>	0.7752	0.5522	0.4871	<b>0.7833</b>	0.7531	0.6576	0.7700	<b>0.7762</b>
	CTC	0.4634	0.3800	0.3775	0.1798	0.3320	0.4593	<b>0.4686</b>	<b>0.4705</b>	<b>0.4754</b>	<b>0.4671</b>
	CCS	0.4099	<b>0.4208</b>	0.4141	0.4029	0.3677	<b>0.4196</b>	0.2748	0.2053	<b>0.8100</b>	<b>0.5359</b>
	MGN	0.7786	0.8092	0.7803	0.6143	0.7644	0.7728	<b>0.8469</b>	<b>0.8778</b>	<b>0.9117</b>	<b>0.8110</b>
	CN	0.8528	0.8711	0.8566	0.8160	0.8683	0.8762	<b>0.9121</b>	<b>0.9263</b>	<b>0.9243</b>	<b>0.9084</b>
LCNI	0.9068	0.9173	0.9057	0.8180	0.8821	0.9037	<b>0.9466</b>	<b>0.9608</b>	<b>0.9564</b>	<b>0.9406</b>	
ICQD	0.8555	0.8351	0.8542	0.6006	0.8667	0.8401	<b>0.8760</b>	<b>0.8803</b>	<b>0.8839</b>	<b>0.8795</b>	
CHA	<b>0.8784</b>	<b>0.8771</b>	<b>0.8775</b>	0.8210	0.8645	0.8682	0.8715	0.8754	<b>0.8906</b>	0.8494	
SSR	0.9483	0.9488	0.9461	0.8885	0.9339	0.9474	<b>0.9565</b>	<b>0.9614</b>	<b>0.9628</b>	<b>0.9625</b>	

扭曲(Blocks)、平均移位(MS)、对比度变化(CTC)、颜色饱和度变化(CCS)、乘性高斯(MGN)、舒适噪声(CN)、噪声图像的有损压缩(LCNI)、抖动的图像颜色量化(ICQD)、色差(CHA)和稀疏采样和重建VSNR视觉信噪比(SSR)。其中,黑体标记为在一种失真类型下表现良好且排名前4的算法。VSI黑体标记出现了21次,FSIM算法黑体标记出现了18次,SR-SIM算法黑体标记出现了17次,而所提算法黑体标记出现了15次,其余算法黑体标注不及1/2。所提算法对于大多数失真类型都具有较好的评价性能。在Block及MS两种失真类型的情况下,所提算法较VSI算法优越,原因在于四元数对图像的彩色信息及其之间的交互有很好的表达。

## 5 结 论

将四元数作为表示彩色图像信息的载体,提出了四元数谱余量彩色图像质量评价方法。在TID2013和CSIQ数据库对所提方法进行了实验,并与其他几种方法进行了比较。非线性拟合结果和量化评价结果均表明,所提方法与人眼主观感受具有一致性,优于传统方法和SR-SIM方法。所提算法在TID2013上的SROCC达到0.8169,在CSIQ上的SROCC达到0.9435。虽然所提方法的计算复杂度及评价效果仍有待改进,但研究的重要意义在于,将四元数谱余量用来刻画彩色图像视觉显著性,设计了一种彩色图像质量的评价方法。

## 参 考 文 献

- [1] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach [C] // Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 383267.
- [2] Xu M, Zhang H L. Saliency detection with color contrast based on boundary information and neighbors [J]. Visual Computer, 2015, 31(3): 355-364.
- [3] Zhang L, Li H Y. SR-SIM: a fast and high performance IQA index based on spectral residual[C] // IEEE International Conference on Image Processing, 2012: 1473-1476.
- [4] Zhang L, Shen Y, Li H Y. VSI: a visual saliency-induced index for perceptual image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(10): 4270-4281.
- [5] 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.
- [6] Ma Y M, Chen H Y, Liu G J. General mean pooling strategy for color image quality assessment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021007. 马月梅, 陈海英, 刘国军. 彩色图像质量评价的广义平均池化策略[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021007.
- [7] Pei S C, Cheng C M. A novel block truncation coding of color images using a quaternion-moment-preserving principle [J]. IEEE Transactions on Communications, 1997, 45(5): 583-595.
- [8] Yu L C, Xu Y, Xu H T, *et al.* Quaternion-based sparse representation of color image [C] // IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2013: 6607436.
- [9] Jin L H, Song E M, Li L, *et al.* A quaternion gradient operator for color image edge detection[C] // IEEE International Conference on Image Processing, 2013: 3040-3044.
- [10] Zeng R, Wu J S, Shao Z H, *et al.* Color image classification via quaternion principal component analysis network[J]. Neurocomputing, 2016, 216: 416-428.
- [11] Lan R S, Zhou Y C, Tang Y Y. Quaternionic weber local descriptor of color images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2017, 27(2): 261-274.
- [12] Gai S, Luo L M. Image denoising using normal inverse gaussian model in quaternion wavelet domain [J]. Multimedia Tools and Applications, 2015, 74(3): 1107-1124.
- [13] Gai S, Yang G W, Wan M H, *et al.* Denoising color images by reduced quaternion matrix singular value decomposition [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2015, 26(1): 307-320.
- [14] Angulo J. Structure tensor of colour quaternion image representations for invariant feature extraction [C] // International Workshop on Computational Color Imaging, , 2009: 91-100.
- [15] Xu H Y, Kong J, Jiang M. Human action recognition by representation 3D skeleton as points based on quaternion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021002. 徐海洋, 孔军, 蒋敏. 基于四元数 3D 骨骼表示的人体行为识别[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021002.
- [16] Wang Y Q, Zhu M. Maximum singular value method

- of quaternion matrix for evaluating color image quality[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 469-478.
- 王宇庆, 朱明. 评价彩色图像质量的四元数矩阵最大奇异值方法[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 469-478.
- [17] Kolaman A, Yadid-Pecht O. Quaternion structural similarity: a new quality index for color images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(4): 1526-1536.
- [18] Wang Y, Wang Y Q, Gu H J, *et al.* Color image quality assessment method based on full quaternion structure similarity measure [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, 25(10): 2033-2043.
- 王勇, 王宇庆, 顾海军, 等. 客观评价彩色图像质量的全四元数结构相似度方法[J]. *光电子 • 激光*, 2014, 25(10): 2033-2043.
- [19] Ponomarenko N, Ieremeiev O, Lukin V, *et al.* Color image database TID2013: peculiarities and preliminary results[C] // *IEEE European Workshop on Visual Information Processing*, 2013: 106-111.
- [20] Larson E C, Chandler D. Categorical image quality (CSIQ) database. [EB/OL]. [2009-12-14] <http://vision.eng.shizuoka.ac.jp/course/view.php?id=6>.
- [21] 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.
- [22] Zhang B, Sander P V, Bermak A. Gradient magnitude similarity deviation on multiple scales for color image quality assessment [C] // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2017: 1253-1257.
- [23] Chandler D M, 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.
- [24] Wang Z, Bovik A C, Lu L G. Why is image quality assessment so difficult? [C] // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2002: 3313-3316.
- [25] Xue W F, Zhang L, Mou X Q, *et al.* Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(2): 684-695.
- [26] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment[C] // *IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers*, 2003: 1398-1402.
- [27] Farias M C Q, Akamine W Y L. On performance of image quality metrics enhanced with visual attention computational models[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(11): 631-633.
- [28] Wang Z, Li Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1185-1198.