文章编号:1007-2780(2015)06-0992-08

基于 Riesz 变换的结构相似度图像质量评价方法

卢彦飞[1,2,3],张 涛[1*]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所,江苏 苏州 215163)

摘要:不同的图像处理过程,会对图像引入各种各样的失真,如何对图像的质量进行评价成为一个热点问题。针对传统的基于像素差值统计的峰值信噪比方法及结构相似度方法与人眼主观评价不够符合的情况,本文提出了一种基于 Riesz 变换的结构相似度图像质量评价方法。该方法先将参考图像和失真图像进行一阶 Riesz 变换和二阶 Riesz 变换,并利用得到的 5 组对应特征图计算出 5 幅相似度图和 5 幅权重图,利用平均法进行融合得到最终的相似度图和权重图,然后加入原参考图像和失真图像的亮度比较项,得到最终的图像质量评价指标。在 LIVE 图像数据库上的实验表明,本文方法对于 5 种失真的质量预测准确性和一致性都很高,在交叉失真实验中,本文方法也优于结构相似度方法,PLCC 和 SROCC 值达到了 0.9482 和 0.9532。与几种公认较好的方法相比,本文方法能够更好地预测图像质量,更加符合人眼的主观感知。

关 键 词:图像质量;结构相似度;Riesz 变换;特征图
中图分类号:TP394.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/YJYXS20153006.0992

Image quality assessment method via Riesz-transform based structural similarity

LU Yan-fei[1,2,3], ZHANG Tao[1*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou* 215163, *China*)

Abstract: Various distortions will be introduced to images during different image processing procedures, and the assessment of image quality has become a hot topic. According to the fact that the traditional pixel-difference statistics-based PSNR method and structural similarity method cannot correlate well with human subjective evaluation, a novel image quality assessment method via Riesz-Transform based structural similarity is proposed. The method firstly applies 1st-order Riesz-Transform

收稿日期:2014-12-19;**修订日期**:2015-01-09.
基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61201117, No. 61301042);国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ040082);国家科技支撑计划(No. 2012BA113B04);江苏省自然基金项目(No. BK2012189)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61201117, No. 61301042); National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project(No. 2011YQ040082); National Key Technology Support Program(No. 2012BA113B04); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No. BK2012189)
*通信联系人,E-mail:zhangt@ciomp.ac.cn

and 2nd-order Riesz Transform to the reference image and distorted image, and 5 groups of corresponding features maps are obtained to produce 5 similarity maps and 5 weighting maps. Then the average-method fusion is performed to get the final similarity map and weighting map. Lastly, the luminance comparison of the original reference image and distorted image is considered to get the final image quality index. The experiments on the LIVE database indicate that the proposed method has high prediction accuracy and consistency on all 5 distortion types. It also outperforms the SSIM method under cross-distortion conditions and the PLCC value and SROCC value reach 0.948 2 and 0.953 2 respectively. Compared with other state-of-the-art methods, the proposed method owns good predictive performance, which indicates better consistency with human subjective perception.
Key words: image quality; structural similarity; Riesz-Transform; feature map

1 引　　言

成像和显示技术的发展，使得人们越来越容易获得图像，图像和人们生活的关系愈加密切。在图像的获取、压缩、传输及显示等过程中，会引入各种失真，影响图像的视觉效果。如何评价图像的质量成一个研究热点，引起了越来越多研究者的注意。

目前的图像质量评价方法主要分为主观评价和客观评价。由于主观评价的繁琐、耗时以及不可移植性，其很难应用到工程中去，目前的研究重点集中在客观评价。根据参考图像是否存在，客观评价可以分为全参考评价、半参考评价和无参考评价。全参考评价方法[1]需要利用整幅参考图像与失真图像进行比较来评价失真程度，是目前最可靠的客观方法。部分参考评价方法只利用了参考图像的部分信息或某些特征来进行评价。无参考评价方法不需参考图像的任何信息，一般针对某些特定类型的失真进行评价。

传统的全参考评价方法如均方误差(MSE)及峰值信噪比(PSNR)等，由于其容易实现，而且物理意义明确，应用比较广泛。但是因为其只考虑了像素之间的灰度差异，而没有利用图像任何的结构信息和像素之间的相关性，不能很好地反映人眼对图像的主观感知。随着人们对人眼视觉系统(Human Visual System，HVS)认识的深入，研究者开始利用 HVS 的某些特性[2]来设计图像质量评价方法。一种是针对 HVS 的各种特性构建视觉模型，通过自底向上(Bottom-up)的方法来模拟人的视觉，其中典型的方法有 NQM[3]和 VSNR[4]。由于人眼的视觉特性比较复杂，很难从底层对其进行模拟，人们又提出了自顶向下(Top-down)的方法，只考虑 HVS 的输入与输出之间的关系，对人眼视觉特性进行建模，根据 HVS 对图像的感知得到图像质量测度。典型的方法有 Zhou Wang 等人提出 SSIM[5]模型以及其改进 MS-SSIM[6]和 IW-SSIM[7]，Sheikh 等提出的 IFC[8]和 VIF[9]，Lin Zhang 等提出的 RFSIM[10]和 FSIM[11]，及 A. Shnayderman[12]等提出的基于 SVD 分解的方法。

SSIM 模型假设 HVS 的作用是提取图像的结构信息，并将图像的失真分为结构性失真和非结构性失真，将失真图像的亮度、对比度和结构信息与参考图像进行比较，从而得到对图像失真程度的评价。其避免了从低层次上模拟 HVS 的功能，计算比较简单，引起了广泛的关注。但是 SSIM 也存在一定的缺点，尤其是对于严重模糊的图像，SSIM 的评价结果会出现较大偏差，主要是由于其对结构信息的建模过于简单。研究发现，人眼视觉对于图像的低级特征比如边缘、角点等比较敏感。当一副图像失真时，图像的边缘也会发生相应的变化。Guanhao Chen 等人[13]提出了基于边缘信息的结构相似度图像质量评价方法 GSSIM，此模型先利用 Sobel 算子得到失真图像和参考图像的边缘图像，然后计算对应边缘图像的对比度失真项和结构失真项，并替换 SSIM 模型中的对应项，最后得到的 GSSIM 模型在表现上相对于 PSNR 和 SSIM 模型有一定的改善。但是其利用的边缘信息未能充分表达图像的结构，没有考虑角点等重要特征。

本文针对 SSIM 模型及相关改进模型中结构信息建模过于简单的问题，利用 Riesz 变换能够很好的表达图像局部结构信息的特点[10]，提出了

一种基于 Riesz 变换的结构相似度图像质量评价方法。将参考图像和失真图像进行一阶 Riesz 变换和二阶 Riesz 变换，分别得到 5 种特征图，利用对应的 5 组特征图，计算出 5 幅相似度图和 5 幅权重图，然后利用平均法进行融合得到最终的相似度图和权重图，再加入原参考图像和失真图像的亮度比较项，最后得到图像质量评价指标。利用 LIVE 图像数据库对该方法进行验证，实验结果表明，本文方法具有很好的图像质量预测性能。

2 结构相似度模型及分析

Zhou Wang[5] 等利用图像像素间的相关特性，给出了结构信息的概念，认为其应独立于图像的亮度和对比度。此模型认为 HVS 的主要功能是提取图像的结构信息，将图像的失真分为结构性失真和非结构性失真，并定义了结构相似度，提出了基于结构相似度的图像质量评价方法。

假设 X,Y 分别代表参考图像和失真图像。X,Y 的亮度和标准差分别记为 μ_x、μ_y 和 σ_x、σ_y，X 和 Y 的协方差记为 σ_{xy}。则 X 和 Y 的亮度、对比度和结构的相似度分别定义为：

$$l(x,y)=\frac{2\mu_x\mu_y+C_1}{\mu_x^2+\mu_y^2+C_1}\ , \tag{1}$$

$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+C_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+C_2}\ , \tag{2}$$

$$s(x,y)=\frac{\sigma_{xy}+C_3}{\sigma_x\sigma_y+C_3}\ , \tag{3}$$

其中：系数 C_1，C_2 和 C_3 均为很小的正数，以避免分母为零或者接近零时造成的不稳定的情况，一般取 $C_1=(K_1L)^2$，$C_2=(K_2L)^2$，$C_3=C_2/2$，其中 K_1，K_2 取非常小的常数，L 是图像像素的灰度动态范围。

两幅图像的结构相似度(SSIM)定义为：

$$\mathrm{SSIM}(x,y)=[l(x,y)]^{\alpha}\cdot[c(x,y)]^{\beta}\cdot[s(x,y)]^{\gamma}\ , \tag{4}$$

其中：$\alpha>0$，$\beta>0$，$\gamma>0$，主要用来调整 3 个部分的相对重要性，一般均取为 1。

由 SSIM 模型中亮度、对比度和结构项的定义可以知道，亮度与图像的结构信息关系不大，而在对比度和结构项的计算过程中，均利用到了图像的标准差，标准差可以反映图像的结构信息，所以这两部分都与图像的结构信息密切相关，计算过程中可以合并为一项[5]，从而将图像的亮度项分离出来。

在实际计算中，一般利用滑动窗口，将图像分为互不重叠的图像块，计算每个窗口对应图像块的 SSIM 值，然后对所有的 SSIM 值求平均，便可得到整幅图像的 SSIM 值。SSIM 的值越大，说明图像的质量越高。由于部分考虑了人眼对图像的感知特性，利用了图像的结构信息，SSIM 模型对图像的质量评价取得了较好的效果，与人眼的主观感知比较一致，得到了比较广泛的应用。但是这种方法对于模糊图像的评价不够理想，特别是模糊程度比较大的，评价结果与人眼的主观感知差异比较大。图 1 是 Monarch 图像及对应的两幅不同类型失真图像。



图 1 Monarch 图像及不同类型失真图像对比

Fig. 1 Comparison of "monarch" images with different types of distortions

对于图 1 中的 3 幅图，(a)为原图像，(b)和(c)分别为两幅不同类型的失真图像，其中(b)为噪声污染图像，(c)为模糊图像。从主观上来说，(b)的图像质量应该比(c)高，但是 SSIM 却给出了错误的评价，(b)的 SSIM 值为 0.528 9，(c)的 SSIM 值为 0.557 1，对于模糊程度较严重的(c)给出了偏差较大的评价结果。这是由于 SSIM 方法中的结构项定义过于简单，对图像低级特征的表达不够准确，未能充分利用图像的结构信息。针对这个问题，根据 Riesz 变换能够很好的表达图像局部结构信息的特点，利用 Riesz 变换提取图像特征，对结构信息进行建模，提出了一种改进的结构相似度图像质量评价方法。

3 基于 Riesz 变换的结构相似度图像质量评价方法

3.1 Riesz 变换及特征提取

自从 Gabor 提出了解析信号之后，Hilbert 变换在信号处理领域得到了广泛的应用。Riesz 变换是 Hilbert 变换向高维的扩展。在二维的情况

下，一阶 Riesz 变换可以表示为：

$$\boldsymbol{f}_R(\boldsymbol{z}) = \begin{pmatrix} f_x(z) \\ f_y(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_x \times f(z) \\ h_y \times f(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_x\{f\}(z) \\ h_y\{f\}(z) \end{pmatrix}, \tag{5}$$

其中：$f(z)$ 是输入信号，比如一幅图像，$z=(x,y)$，滤波器 h_x 和 h_y 在频域中的响应为 $H_x = -j\omega_x/\|\omega\|$ 和 $H_y = -j\omega_y/\|\omega\|$，$\omega=(\omega_x,\omega_y)$。Riesz 核在空域中的表达为：

$$(h_x,h_y) = \left(\frac{x}{2\pi\|\boldsymbol{z}\|^3}, \frac{y}{2\pi\|\boldsymbol{z}\|^3}\right). \tag{6}$$

利用一阶 Riesz 变换，可以对图像的局部线性特征进行提取[11]，但是无法对图像中存在的角点和交会点等进行表达。为了更全面地表征图像中存在的各种低级特征，还需要用到高阶 Riesz 变换，本文利用二阶 Riesz 变换表达更复杂的特征。二阶 Riesz 变换可以通过对一阶 Riesz 变换得到的结果再次进行 Risez 变换得到：

$$\begin{cases} h_{xx}\{\boldsymbol{f}\}(\boldsymbol{z}) = h_x\{h_x\{\boldsymbol{f}\}\}(\boldsymbol{z}) \\ h_{xy}\{\boldsymbol{f}\}(\boldsymbol{z}) = h_x\{h_y\{\boldsymbol{f}\}\}(\boldsymbol{z}) \\ h_{yy}\{\boldsymbol{f}\}(\boldsymbol{z}) = h_y\{h_y\{\boldsymbol{f}\}\}(\boldsymbol{z}) \end{cases}. \tag{7}$$

利用一阶和二阶 Riesz 变换可以对图像的低级特征进行提取，如图 2 所示。

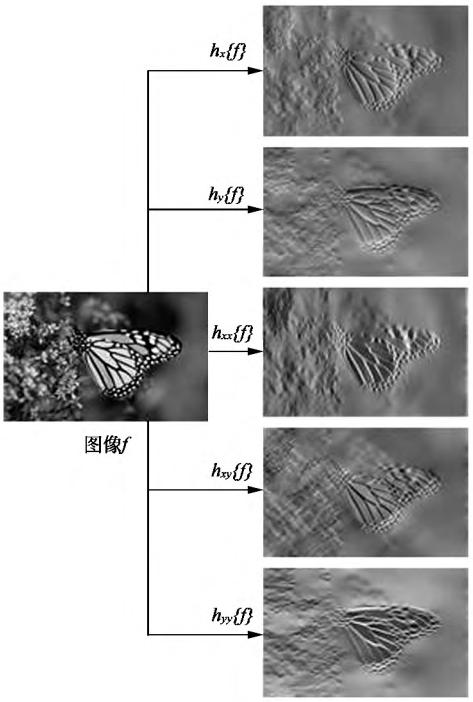


图 2　一幅图像与其对应的一阶和二阶 Riesz 变换特征图

Fig. 2　An image and its corresponding 1st-order and 2nd-order transform feature maps

本文将一阶 Riesz 变换得到的特征图 $h_x\{f\}$ 和 $h_y\{f\}$ 称为一阶特征图，二阶 Riesz 变换得到的特征图 $h_{xx}\{f\}$、$h_{xy}\{f\}$ 和 $h_{xy}\{f\}$ 称为二阶特征图，则每幅图像可以得到 2 种一阶特征图和 3 种二阶特征图。从图 2 可以看出，一阶特征图能够很好表达图像的边缘轮廓特征，二阶特征图能够表达更复杂的特征，比如角点等。

3.2　改进的结构相似度

将参考图像和失真图像分别记为 f 和 g，参考图像 f 对应的 5 种特征图 $h_x\{f\}$、$h_y\{f\}$、$h_{xx}\{f\}$、$h_{xy}\{f\}$ 及 $h_{yy}\{f\}$ 分别记为 f_1、f_2、f_3、f_4 和 f_5，失真图像 g 对应的 5 种特征图 $h_x\{g\}$、$h_y\{g\}$、$h_{xx}\{g\}$、$h_{xy}\{g\}$ 及 $h_{yy}\{g\}$ 分别记为 g_1、g_2、g_3、g_4 和 g_5。则对于 5 组对应的特征图 $\{f_i,g_i\}$ (i=1,2,…,5)，与 SSIM 模型中的计算方法类似，其对比度比较项和结构信息比较项为：

$$c(f_i,g_i) = \frac{2\sigma_{f_i}\sigma_{g_i}+C_2}{\sigma_{f_i}^2+\sigma_{g_i}^2+C_2}, \tag{8}$$

$$s(f_i,g_i) = \frac{\sigma_{f_ig_i}+C_3}{\sigma_{f_i}\sigma_{g_i}+C_3}, \tag{9}$$

其中 σ_{f_i} 和 σ_{g_i} 分别是特征图 f_i 和 g_i 的标准差，$\sigma_{f_ig_i}$ 是特征图 f_i 和 g_i 之间的协方差，C_2 和 C_3 均为很小的正数，以避免分母为零或者接近零时造成的不稳定的情况。取 $C_3=C_2/2$，可以将对比度比较项与结构信息比较项合并为一项：

$$cs(f_i,g_i) = \frac{2\sigma_{f_ig_i}+C_2}{\sigma_{f_i}^2+\sigma_{g_i}^2+C_2}, \tag{10}$$

则 5 组特征图可以得到 5 幅相似度图。由于 5 组特征图分别代表不同的低级特征，得到的 5 幅相似度图也分别对应不同的低级特征之间的相似度，为了得到整体特征的相似度图，需要将 5 幅相似度图进行融合，得到最终的相似度图。为了简化计算，本文利用平均法进行融合，即：

$$cs(f,g) = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}\frac{2\sigma_{f_ig_i}+C_2}{\sigma_{f_i}^2+\sigma_{g_i}^2+C_2}. \tag{11}$$

由于一幅图的亮度信息中不包含结构信息，则参考图像 f 和失真图像 g 之间的亮度比较项为：

$$l(f,g) = \frac{2\mu_f\mu_g+C_1}{\mu_f^2+\mu_g^2+C_1}. \tag{12}$$

结合相似度图以及亮度比较项，得到图像质量评价测度如下：

$$\mathrm{RTSSIM}(f,g)=[l(f,g)]^{\alpha}\cdot[cs(f,g)]^{\beta}\ , \tag{13}$$

其中：$\alpha>0$，$\beta>0$，这两个参数是用来调整两部分的相对重要程度，一般取 $\alpha=\beta=1$。

由于此方法利用 Riesz 变换来提取参考图像和失真图像的一阶特征图和二阶特征图，并根据对应特征图间对比度和结构信息的相似度来衡量图像的失真程度，本文将其称为基于 Riesz 变换的结构相似度测度（Riesz-Transform based Structural SIMilarity，RTSSIM）。

3.3 权重图的计算

人眼视觉系统对于图像不同区域的敏感程度是不同的，对于边缘和纹理区域，人眼能够感知到更多的信息，而对于平坦区域，人眼的敏感程度有所降低。因此，对于不同结构的视觉重要程度，需要分配不同的权重。图像的结构信息与其局部标准[14]差密切相关，本文利用标准差来衡量像素点的视觉重要性。

对于参考图像 f 和失真图像和 g 经过一阶和二阶 Riesz 变换后得到的 5 组对应的特征图 $\{f_i,g_i\}$（i=1,2,…,5），如果对应像素点的标准差比较大，则意味着这个像素点对于人眼视觉系统的重要程度也比较高。本文利用 $w(f_i,g_i)=\max(\mathrm{std}(f_i),\mathrm{std}(g_i))$ 作为权重来衡量对应像素点的重要性，则可以得到 5 幅权重图，这 5 幅权重图代表了不同的特征图中对应像素点的重要程度，为了得到最终的权重图，同样利用平均法进行融合，则

$$w(f,g)=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5}w(f_i,g_i)\ . \tag{14}$$

最终的图像质量评价测度如下：

$$Q_{\mathrm{RTSSIM}}=\frac{\sum_{\Omega}w(f,g)\cdot\mathrm{RTSSIM}(f,g)}{\sum_{\Omega}w(f,g)} \tag{15}$$

算法的实现框图如图 3 所示。

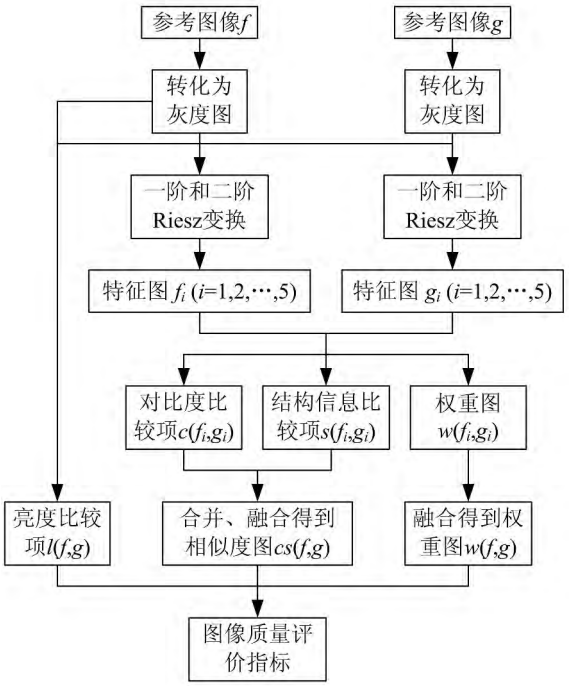


图 3 本文所提算法的实现框图

Fig. 3 Flow chart of the proposed algorithm

4 实验结果及分析

本文使用 Laboratory for Image and Video Engineering（LIVE）[15]图像数据库进行实验来验证所提方法的有效性。该图像数据库包含 29 幅参考图像和对应的 779 幅失真图像，其中有 5 种失真类型：JPEG2000 压缩（jp2k），JPEG 压缩（jpeg），白噪声（wn），高斯模糊（gblur）和 Rayleigh 衰落道模型失真（fastfading）。该图像库给出了每幅图像的主观评价得分 DMOS 值，DMOS 值由观测者打分后进行处理得到，DMOS 值越小说明图像的主观质量越好。本文方法暂时只考虑图像的灰度信息，彩色图像可以通过以下方式转换为灰度图像：

$$I=0.299R+0.587G+0.114B\ , \tag{16}$$

其中：R，G，B 分别表示彩色图像红、绿、蓝三通道的分量。

为了客观反映图像质量评价方法的性能，根据 VQEG[16]提出的准则，通常认为在客观评价值和主观评价值之间存在非线性关系，本文采用下面的函数[1]建立这种非线性映射：

$$f(x)=\beta_1\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{1+\mathrm{e}^{\beta_2(x-\beta_3)}}\right)+\beta_4 x+\beta_5\ , \tag{17}$$

其中：x 表示客观评价值，β_1，β_2，β_3，β_4 和 β_5 为模型参数。针对五种不同的失真类型，本文所提出的评价方法 RTSSIM 与主观 DMOS 的曲线拟合情况如图 4(a)～(e)所示，同时给出了交叉失真实验的曲线拟合情况（图 4(f)）。可以看出，散点图很紧凑的分布在拟合曲线的附近。

对于不同的质量评价方法，通常使用准确性、单调性和一致性三个标准[1]来评估客观评价值和主观评价的一致程度，其中 Pearson 线性相关系数(PLCC)反映预测的准确性，Spearman 秩相关系数(SROCC)反映预测的单调性及客观评价值与主观评价值之间的一致程度，均方根误差(RMSE)反映客观评价的一致性。PLCC 和 SROCC 数值越大，RMSE 数值越小则模型的预测能力越好。表 1 列出了 RTSSIM 评价方法与 PSNR 及 SSIM 模型在 LIVE 图像库中的性能指标。对于每种失真类型，每一列中 PLCC 和 SROCC 的最大值以及 RMSE 的最小值，均加粗标出。可以看出，本文方法的三项指标总体优于 PSNR 和 SSIM 模型。PSNR 是基于像素点误差统计的评价方法，比较适合白噪声这种失真类型，而本文方法依然得到了和 PSNR 接近的 SROCC，且 PLCC 值更高。对于其他失真类型，本文方法的表现均要优于 PSNR 和 SSIM，具有

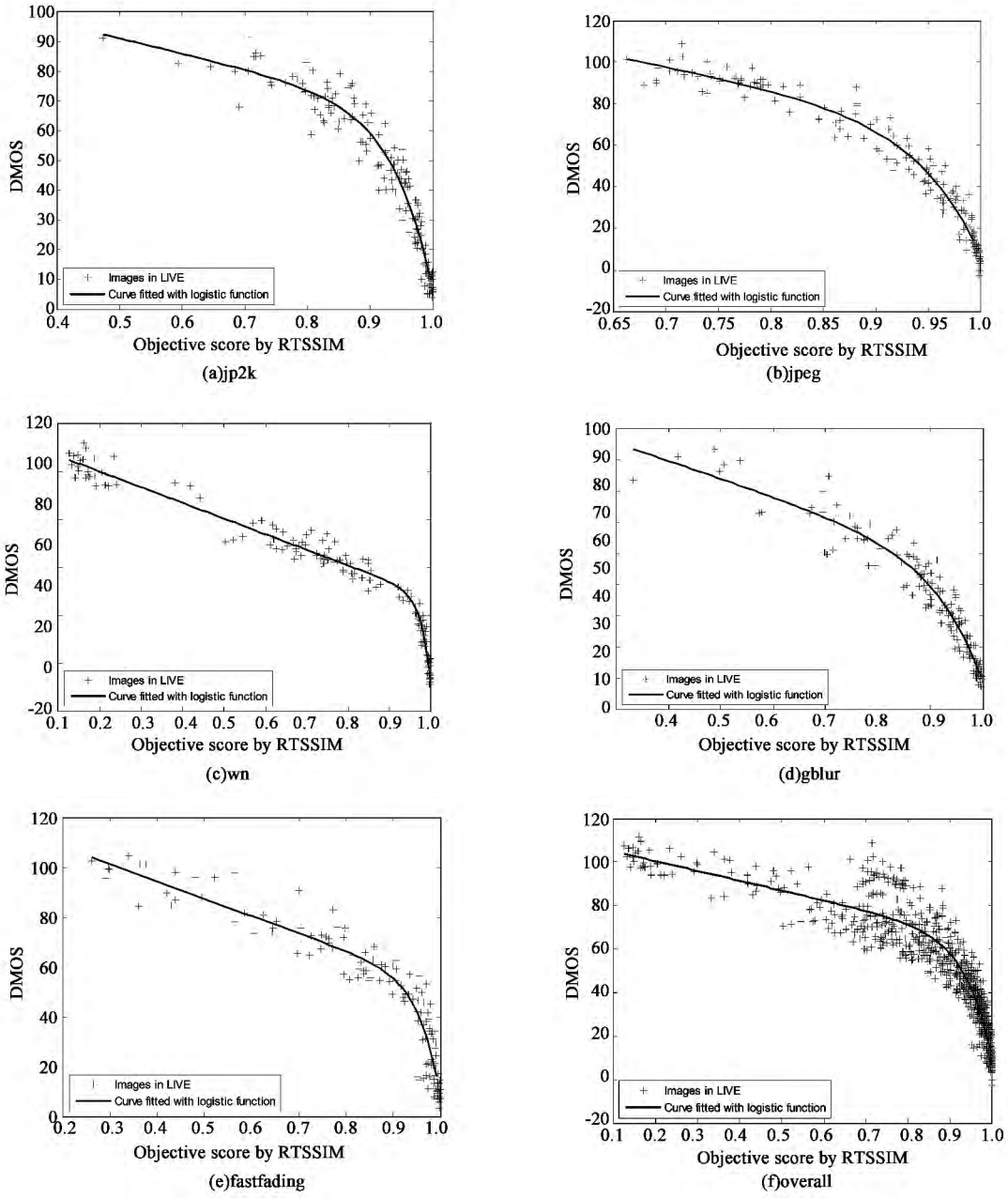


图 4　本文所提出的图像质量评价方法(RTSSIM)与主观 DMOS 的曲线拟合图

Fig. 4　Curve fitting map of the proposed RTSSIM with DMOS

最高的 PLCC 和 SROCC，且具有较小的 RMSE。在交叉失真实验中，本文方法的各项指标均优于 PSNR 和 SSIM 模型。特别的，对于图 1 中的两幅失真图像(b)和(c)，本文方法 RTSSIM 给出的评价值分别为 0.7353 和 0.3331，与人眼的主观评价一致。

表 1 本文提出的 RTSSIM 方法与其他方法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of the proposed RTSSIM and other methods

		jp2k	jpeg	wn	gblur	fastfading	overall
PLCC	PSNR	0.899 7	0.892 5	0.988 0	0.785 3	0.892 6	0.872 3
	SSIM	0.967 0	0.979 0	0.983 0	0.948 0	0.955 2	0.944 9
	RTSSIM	**0.974 4**	**0.982 6**	**0.989 3**	**0.965 9**	**0.962 3**	**0.948 2**
SROCC	PSNR	0.895 4	0.880 9	**0.985 4**	0.782 3	0.890 7	0.876 4
	SSIM	0.961 4	0.976 4	0.969 4	0.951 7	0.955 6	0.947 9
	RTSSIM	**0.967 0**	**0.979 8**	0.983 3	**0.966 7**	**0.960 3**	**0.953 2**
RMSE	PSNR	11.010 6	14.369 0	4.315 6	11.436 2	12.843 8	13.372 8
	SSIM	6.423 8	**5.053 2**	5.134 9	5.861 2	8.428 9	8.945 5
	RTSSIM	**5.667 1**	5.909 8	**4.078 3**	**4.781 5**	**7.749 8**	**8.682 2**

表 2 列出了本文所提方法的 SROCC 值与几种性能公认较好的评价方法对比。其中 MS-SSIM[6]，IW-SSIM[7] 是以 SSIM[5] 为基础的改进，IFC[8] 基于自然场景分析和信息论，RFSIM[11] 中也用到了 Riesz 变换，均属于自顶向下(Top-down)的方法；VSNR[4] 属于自底向上(Bottom-up)的方法。表 2 中，对于每种失真类型，每一行中最大的 3 个值均加粗标出。可以看出，本文方法 RTSSIM 在所有 5 种失真类型上的表现都很好，每种类型对应的 SROCC 值均排名靠前。实际上，利用其他指标，例如 KROCC 和 PLCC，也可以得到类似的结果。总体上来说，RTSSIM 方法的表现比其他方法更优越，与主观评价结果具有更好的一致性。

表 2 本文提出的 RTSSIM 方法的 SROCC 值与其他方法对比

Tab. 2 SORCC values comparison of the proposed RTSSIM and other methods

	PSNR	SSIM	MS-SSIM	IW-SSIM	VSNR	IFC	RFSIM	RTSSIM
jp2k	0.895 4	0.961 4	**0.962 7**	**0.964 9**	0.955 1	0.911 3	0.932 3	**0.967 0**
jpeg	0.880 9	0.976 4	**0.981 5**	**0.980 8**	0.965 7	0.946 8	0.958 4	**0.979 8**
wn	**0.985 4**	0.969 4	0.973 3	0.966 7	0.978 5	0.938 2	**0.979 9**	**0.983 3**
gblur	0.782 3	0.951 7	0.954 2	**0.972 0**	0.941 3	**0.958 4**	0.906 6	**0.966 7**
fastfading	0.890 7	**0.955 6**	0.947 1	0.944 2	0.902 7	**0.962 9**	0.923 7	**0.960 3**

5 结 论

由于图像质量评价方法在成像系统中的应用前景，在图像处理领域得到了广泛的关注，新的评价思路层出不穷。传统的基于像素差值统计的 MSE 及 PSNR 方法没有考虑人眼的视觉特性和像素之间的相关性，评价结果不够符合人眼的主观感知。而 SSIM 模型假设 HVS 的主要提取图像的结构信息，得到了较好的评价结果。但是由于结构项的模型过于简单，其对于模糊程度比较严重的图像的评价结果偏差较大。本文根据 Riesz 变换能够对

图像的局部结构信息进行表达的特性，利用一阶和二阶 Riesz 变换提取图像的低级特征，构建图像的结构信息，提出了基于 Riesz 变换的结构相似度图像质量评价方法。在 LIVE 图像数据库上的实验结果表明，本文方法对于 5 种失真的质量预测准确性和一致性都很高，均超过了 PSNR 和 SSIM 的表现。在交叉失真实验中，PLCC 和 SROCC 值达到了 0.948 2 和 0.953 2，高于 PSNR 和 SSIM 的对应值。通过 SROCC 比较，本文方法相对于 PSNR、SSIM 及其改进 MS-SSIM 与 IW-SSIM、VSNR、IFC 和 RFSIM，能够更好地预测图像质量，在各种失真上均有很好的表现。本文提出的 RTSSIM 方法取得了很好的图像质量预测结果，更加符合人眼的主观感知。

参 考 文 献：

[1] Sheikh H R, Sabir M F, 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.

[2] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法[J]. 液晶与显示，2011，26(3)：390-396.
Yao J C. Image quality assessment method based on contrast sensitivity characteristics of human vision system [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(3): 390-396. (in Chinese).

[3] Damera-Venkata N, Kite T D, Geisler W S, *et al*. Image quality assessment based on a degradation model [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(4): 636-650.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multiscale structural similarity for image quality assessment [C]. *IEEE Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA*, USA: IEEE, 2003: 1398-1402.

[7] Wang Z, Li Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 1185-1198.

[8] Sheikh H R, Bovik A C, de Veciana G. An information fidelity criterion for image quality assessment using natural scene statistics [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2117-2128.

[9] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2): 430-444.

[10] 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.

[11] Zhang L, Zhang D, Mou X Q. RFSIM: A feature based image quality assessment metric using Riesz transforms [C]. 2010 17*th IEEE International Conference on Image Processing*, Hong Kong, China: IEEE, 2010: 321-324.

[12] Shnayderman A, Gusev A, 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.

[13] Chen G H, Yang C L, Xie S L. Gradient-based structural similarity for image quality assessment [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, Atlanta, GA, USA: IEEE, 2006: 2929-2932.

[14] Aja-Fernández S, Estépar R S, Alberola-López C, *et al*. Image quality assessment based on local variance [C]. 28*th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, New York City, USA: IEEE, 2006: 4815-4818.

[15] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, *et al*. LIVE image quality assessment database, release 2[OL]. http://live.ece.utexas.edu/research/quality.

[16] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment, Phase II VQEG, Aug. 2003 [OL]. Available: http://www.vqeg.org/,2014.

作者简介：卢彦飞(1989－)，男，河南驻马店人，博士研究生，主要从事成像技术、图像处理与模式识别方面的研究。
E-mail: bestluyf@163.com