

基于对称相位一致性的图像质量评价方法

张帆, 张偌雅, 李珍珍

河南大学图像处理与模式识别研究所, 河南 开封 475000

摘要 针对基于特征相似性的图像质量评价方法(FSIM)在检测图像阶跃边缘时存在的局限性,提出一种将FSIM与对阶跃边缘敏感的对称相位一致性(SPC)相结合,并利用各向同性Sobel算子计算梯度幅值的新方法——对称特征相似度(SFSIM)。该方法利用SPC通过相位相邻像素响应的符号确定对称相位的特性和更加准确的各向同性Sobel算子加权系数,能够很好地检测和定位尖锐的图像边缘特征。对不同失真类型的图像进行仿真实验,结果表明,在保留原始方法优良性能的基础上,SFSIM对比较尖锐的图像边缘特征和高斯模糊图像具有更高的敏感性。

关键词 图像处理; 对称特征相似度; 对称相位一致性; 图像质量评价

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101003

Image Quality Assessment Based on Symmetry Phase Congruency

Zhang Fan, Zhang Ruoya, Li Zhenzhen

Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Henan University, Kaifeng, Henan 475000, China

Abstract The image quality assessment algorithm based on feature similarity (FSIM) has certain limitations to some extent when detecting image step edges. A new algorithm named symmetry feature similarity is put forward by combining the FSIM with the symmetry phase congruency (SPC), which is sensitive to step edges, and calculating the gradient magnitude through the isotropic Sobel operator. The proposed algorithm makes use of the symbols responded to the phase adjacent pixels by SPC and the more accurate weighting coefficient of isotropic Sobel operator to detect and locate the image edge feature. The simulation experiments on various kinds of distorted images are carried out, and the results indicate that the SFSIM is more sensitive to sharper image edge features and Gaussian blurred images, on the basis of retaining the excellent performance of the original method.

Key words image processing; symmetry feature similarity; symmetry phase congruency; image quality assessment

OCIS codes 100.2960; 110.3000; 110.2960; 100.3008

1 引言

图像质量评价的方法多种多样,传统方法主要分为主观和客观两种^[1]。主观评价通过人眼对图像进行感知,根据一定的参考标准和评价尺度进行打分,所得分数最符合人们对图像的认识,但其耗时耗力^[2],很难快速获得质量评价的结果;客观评价方法通过建立数学模型设计算法,利用具体的公式计算图像的质量^[3],简单、实时、可重复和易集成等特点使其成为质量评价体系中的研究热点^[4],旨在通过模拟人眼视觉系统,设计出能精准、自动评判图像质量的计算模型^[5]。根据对原始图像的依赖程度,可以将客观评价方法分为全参考型、部分参考型和无参考型图像质量评价三种评价机制^[6],其中全参考型图像质量评价方法最常用。

全参考型图像质量客观评价方法主要考察均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)^[7]。MSE大小可以判断图像的失真程度,而PSNR通过计算最大信号量与噪声强度的比值得到。利用这两种指标评价图像虽然速度快、效率高,但是性能并不稳定,不具备较好的主客观一致性。

为了提高评价效果,许多将人类视觉系统(HVS)融入图像质量评价的方法相继被提出,基于结构相似

收稿日期: 2017-04-24; 收到修改稿日期: 2017-05-31

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAK01B06)、河南省自然科学基金(162300410032)

作者简介: 张帆(1967—),男,博士,教授,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: zhangfan@henu.edu.cn

度的图像质量评价方法(SSIM)、基于视觉显著性的方法(VSI)、残差相似方法(SR-SIM)、基于底层特征的图像质量评价方法(FSIM)^[8]等。其中,FSIM中使用的相位一致性方法能够较好地评价图像质量,但是在对一些比较尖锐的图像特征(如阶跃边缘)进行检测时还存在局限性。为了进一步解决该问题,肖志涛等^[9]提出对称相位一致性(SPC),并以此为基础设计的边缘检测算子能够很好地检测图像阶跃边缘,弥补了FSIM在检测图像质量时的缺陷。在此基础上,本文提出一种新的方法——对称特征相似度(SFSIM),该方法利用相位相邻像素响应的符号确定对称相位的位置,可以更好地检测图像的特征,提高图像质量评价效果。

2 相位一致性

Morrone等^[10]在马赫带的研究过程中发现信号的特征总是出现在其傅里叶相位叠合最大点处,从而提出相位一致(PC)模型。PC是度量相位信息一致性的标准^[11],其原理是假定图像傅里叶分量最一致的点为特征点,这样相位信息就能准确地检测图像特征。Liu等^[12]将PC模型用于图像质量评价,利用相位信息检测图像特征从而进行质量评价,在此之前需要详细定义PC^[13]。为了得到给定图像的PC值,首先计算图像一维信号的PC值,设 $f(x)$ 为任意一维信号, M_n^e 和 M_n^o 分别表示在尺度 n 上的偶对称滤波器和奇对称滤波器,两者构成一对镜像滤波器,那么 x 位置上的镜像滤波器与信号 f 的卷积可以表示为

$$[e_n(x), o_n(x)] = [f(x) \times M_n^e, f(x) \times M_n^o]。 \quad (1)$$

在尺度 n 上的幅值可以表示为

$$A_n(x) = \sqrt{e_n(x)^2 + o_n(x)^2}。 \quad (2)$$

局部能量函数为

$$E(x) = \sqrt{F(x)^2 + H(x)^2}, \quad (3)$$

$$F(x) = \sum e_n(x), \quad (4)$$

$$H(x) = \sum o_n(x)。 \quad (5)$$

由此,一维信号的PC值可以表示为

$$P_C(x) = \frac{\sqrt{F(x)^2 + H(x)^2}}{\epsilon + \sum_n A_n(x)}, \quad (6)$$

为了避免分母为零, ϵ 取值为一个较小的正数。

M_n^e 和 M_n^o 采用Field提出的Log Gabor滤波,考虑到二维信号的PC值,同时为了保留图像的相位特征,采用高斯函数作为扩展函数,此时图像的PC值可表示为

$$P_C(x) = \frac{\sum_d |E_d(x) - T_d|}{\epsilon + \sum_d \sum_n A_{nd}(x)}, \quad (7)$$

式中 T_d 为噪声补偿因子, d 表示方向, ϵ 为非常小的正数,其作用是避免分母为零。

文献[8]指出,PC模型简单实用,不仅描述了图像的特征,而且体现了局部结构特征的重要程度。在某些图像的边缘部分,特征对比不够强烈,这时边缘特征能够很好地通过PC体现。在进行图像质量评价时,PC在一定程度上能够提高评价精度,改善评价结果,但其也有局限性。研究发现,人眼对于图像的边缘和纹理最敏感,边缘和纹理是图像结构信息中比较重要的部分,但PC却无法很好地表达这些特征。在Kovesi^[14]给出的PC例子中,检测比较尖锐的图像特征(如阶跃边缘)时,所有傅里叶频率分量的相位都会对齐于一个特定的角度,但这些相位并不是严格对齐的,在边界和连接处会出现明显的伪轮廓,该现象称为“余震”^[9]。这时,PC无法充分利用图像边缘处相位随频率变化的特点。图像的主要特征和信息在很大程度上决定和影响图像视觉质量,在对图像质量进行评价时,经常会遇到类似的尖锐图像特征,“余震”现象极大地影响了最终的评价结果,因此,需要在原始算法的基础上进行改进以得到更准确的质量评价。

3 基于对称相位一致性的图像质量评价

3.1 灰度图像的 FSIM 计算

在观察图像时,人眼对图像的颜色、纹理等底层特征性状比较敏感,而 FSIM^[15]就是基于特征相似性的图像质量评价方法,因此,该算法比其他方法更具优势,评价结果也比较稳定^[16]。FSIM 以原始图像和失真图像的 PC 和梯度强度为特征,以 PC 加权来提取与图像相位保持高度一致性位置上的纹理结构特征,因此,在评价图像质量时效果较好。在图像数据库进行实验,FSIM 与主观得分更具一致性。

P_c 表示图像 x, y 的 PC 信息, G 表示参考图像和待测图像的梯度幅值。两幅图像的特征相似性及梯度相似性可分别表示为

$$S_{PC}(x, y) = \frac{2P_c(x) \cdot P_c(y) + T_1}{P_c^2(x) + P_c^2(y) + T_1}, \quad (8)$$

$$S_G(x, y) = \frac{2G(x) \cdot G(y) + T_2}{G^2(x) + G^2(y) + T_2}, \quad (9)$$

式中 T_1, T_2 均为常量,两者的引入是为了避免因分母为零而出现不稳定的情况。

结合特征相似性和梯度幅值,可以得到两幅图像之间的相似性为

$$S_L(x, y) = [S_{PC}(x, y)]^\alpha [S_G(x, y)]^\beta, \quad (10)$$

式中 α, β 均大于 0,用于调整特征相似性和梯度相似性之间的权重,这里取 $\alpha = \beta = 1$ 。

得到每一点的相似性之后,可以进一步得到两幅图像之间的相似度。由此可以得到其特征相似性为

$$F_{SIM} = \frac{\sum_{x, y \in \Omega} S_L(x, y) \cdot P_{Cm}(x, y)}{\sum_{x, y \in \Omega} P_{Cm}(x, y)}, \quad (11)$$

式中 Ω 表示整个空域, $P_{Cm}(x, y) = \max[P_c(x), P_c(y)]$ 用来加权图像 x, y 整体的相似性。FSIM 越接近 1,失真程度越小,图像质量越高。

3.2 彩色图像的 FSIM 计算

FSIM 主要适用于评估灰度图像质量,由于色度信息也会影响人眼对图像的感知,如果 FSIM 中的色度信息能够得到较好的整合,那么就可以得到更好的图像质量评价结果。为了使 FSIM 获得更好的效果,在 FSIM 的基础上扩展得到 FSIM_c 算法。

首先,转换彩色图像将亮度与色度分离,把原始的 RGB 图像转换到另一个色彩空间 YIQ^[17],该色彩空间可以将图像的亮度和色度区分开。在 YIQ 色彩空间中, Y 分量代表图像的亮度信息, I 和 Q 两个分量代表色度信息。颜色空间的转换公式为

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (12)$$

然后,用定义 $S_{PC}(x, y)$ 和 $S_G(x, y)$ 的方法将色度特征之间的相似性定义为

$$S_I(x, y) = \frac{2I(x) \cdot I(y) + T_3}{I^2(x) + I^2(y) + T_3}, \quad (13)$$

$$S_Q(x, y) = \frac{2Q(x) \cdot Q(y) + T_4}{Q^2(x) + Q^2(y) + T_4}, \quad (14)$$

式中 T_3, T_4 均为常量。因为 I 和 Q 两个色度信息部分有相近的动态范围,所以假设 $T_3 = T_4$,此时,可以用 $S_I(x, y), S_Q(x, y)$ 表示色度相似性度量

$$S_C(x, y) = S_I(x, y) \cdot S_Q(x, y). \quad (15)$$

最终,FSIM_c 可以以直观的合并彩色信息的方式表示为

$$F_{SIMc} = \frac{\sum_{x, y \in \Omega} S_L(x, y) \cdot [S_C(x, y)]^\lambda P_{Cm}(x, y)}{\sum_{x, y \in \Omega} P_{Cm}(x, y)}, \quad (16)$$

式中 λ 为调节色度信息在所有彩色信息中权重的重要参数。

在评价图像质量时,彩色图像的计算比灰度图像的计算复杂,但是应用更广泛。由于彩色图像的质量评价对色度信息进行了整合,其质量评价比基于灰度图像的质量评价更可靠,评价结果也更优。

4 基于对称相位一致性的图像质量评价方法

4.1 对称相位一致性

SPC是在PC的基础上,研究4个对称相位的特性及其定位的方法^[9]。这4个特殊的对称相位分别为 0 、 $\pi/2$ 、 $-\pi/2$ 、 π ,对称相位在各种尺度下都表示对称或者反对称。SPC就是将图像傅里叶分量相位最一致且相位为4个对称相位的点作为特征点,其优点在于可以快速准确地定位对称相位^[9]。

SPC将像素 p 、尺度 n 和方向 d 映射为 $\text{sym } P_C(p)$ 和对称相位 $\phi_{n(i)d(i)}$,即

$$S_{PC}(p, n, d) = [\text{sym } P_C(p), \phi_{n(i)d(i)}(p)], \quad (17)$$

$$\text{sym } P_C(p) = \frac{\text{sum } E}{\text{sum } A + \epsilon} = \frac{\sum_{k,q} E_{n(k)d(q)}(p)}{\sum_{k,q} A_{n(k)d(q)}(p) + \epsilon}, \quad (18)$$

式中对称相位由 $\phi_{n(i)d(i)}(p) \in \{0, \pi/2, -\pi/2, \pi\}$ 给定,在所有方向和尺度下的相位 $\phi_{n(j)d(j)}$ 相同;sum E 为像素 p 点在相位一致时的能量和;sum A 为 p 点相位一致时的幅度和; ϵ 为很小的正数。

由于PC在检测尖锐的图像边缘时存在缺陷,分别运用PC和SPC处理边缘特征比较明显的区域,对比处理后的图像,结果如图1所示。

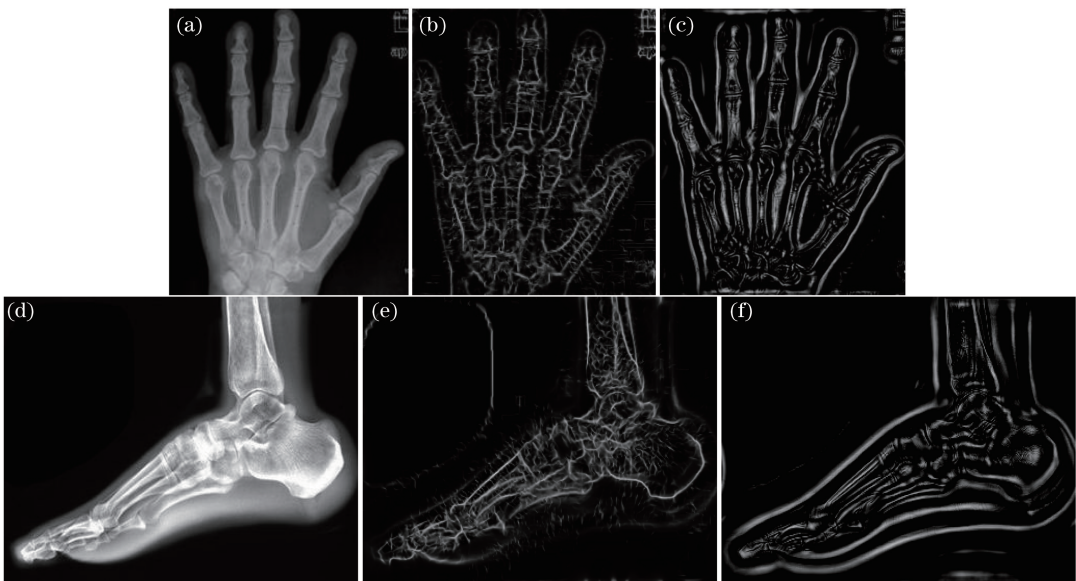


图1 两种算法对阶跃边缘的检测结果。(a)(d)原图;(b)(e) PC处理图;(c)(f) SPC处理图

Fig. 1 Testing results of two algorithms on step edges. (a)(d) Original images; (b)(e) images processed by PC; (c)(f) images processed by SPC

由图1可以明显看出,原始图像在PC处理之后,尖锐的阶跃边缘并不十分明显,边界和连接处还很模糊,即出现“余震”现象,说明PC方法无法很好地还原原始图像的边缘特征;经过SPC处理之后,图1(c)和图1(f)的边缘特征比图1(b)和图1(e)中的边缘特征更明显,说明在处理尖锐的图像边缘特征时SPC算法性能优于PC,有效避免了“余震”现象。

4.2 梯度算子的改进

在判断纹理块的相似性程度时,加入纹理图像的梯度信息有助于提高纹理图像的质量^[18]。PC值和梯度幅值是FSIM计算质量评价结果的两个重要部分。传统的图像边缘检测方法大多从图像的高频分量中提取边缘信息,而传统的边缘检测算子都是局域窗口梯度算子^[19]。Zhang等^[8]对Scharr、Sobel、Prewitt三个算子进行实验,比较客观参数斯皮尔曼秩相关系数(SROCC)值,结果表明,Scharr算子所得SROCC的值稍

高于其他两种算子。因此,FSIM 中梯度的计算采用 Scharr 算子。

常用的 Sobel 算子有两个卷积核,两者分别反映垂直和水平方向的变化程度。而各向同性 Sobel 算子能分别检测水平边缘和垂直边缘,与普通的 Sobel 算子相比,各向同性 Sobel 算子的位置加权系数更准确,在检测不同方向的边沿时梯度幅度一致。将 Sobel 算子矩阵中的所有 2 改为 $\sqrt{2}$ 即可得到各向同性 Sobel 算子矩阵。Scharr、Sobel 和各向同性 Sobel 算子的方向模板如表 1 所示。

表 1 三种算子的方向模板
Table 1 Direction templates of three operators

Operator	Template of horizontal gradient	Template of vertical gradient
Scharr	$\begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$
Sobel	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Isotropic Sobel	$\begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

分别使用 Scharr 算子和各向同性 Sobel 算子在 LIVE 数据库中进行实验,得到各同向性 Sobel 算子和 Scharr 算子的 SROCC 值分别为 0.9785 和 0.9780,各向同性 Sobel 算子得到的参数值比 Scharr 算子略有提高,说明在计算 SFSIM 的梯度幅值时使用各向同性 Sobel 算子更有优势,这样在评价图像质量时结果也会相应提高。

4.3 SFSIM 的计算

SFSIM 图像质量评价方法建立在 FSIM 的基础上,同时改进 PC 值和梯度幅值,利用相位相邻像素响应的符号确定 SPC 和具有更准确加权系数的各向同性 Sobel 算子,两者对于提高质量评价结果都有各自的优势。与 FSIM 类似,SFSIM 质量评价过程如下:

- 1) 分别将原图像和待测图像转化为 YIQ 色彩空间图像,得到 Y_x, I_x, Q_x 和 Y_y, I_y, Q_y ;
- 2) 将转化后的图像进行二维 Log-Gabor 转换,并计算图像的 SPC 值;
- 3) 结合(8)式和(9)式,利用 SPC 和各向同性 Sobel 算子计算两幅图像色度特征之间的相似性以及梯度相似性;
- 4) 结合两幅图像特征相似性和梯度相似性得到每一点之间的相似性;
- 5) 利用(15)式计算 I_x, Q_x 以及 I_y, Q_y 的色度相似性度量值;
- 6) 合并两幅图像的彩色信息,加权色度相似性度量,结合点与点之间的相似性,利用(16)式计算 SFSIM 的图像质量评价结果。

通过大量仿真实验可以发现,在计算 SPC 值的时候,增加方向个数和尺度数可以提高计算精度,但同时也会增加计算时间。随着方向个数和尺度数增加到一定程度,计算结果将不再有明显改善。经过综合对比后,SPC 和 SFSIM 算法所得实验结果均采用同样的参数,即方向个数为 6,滤波器尺度为 4。

5 图像质量评价结果与分析

5.1 SFSIM 和 FSIMc 高斯模噪声感程度比较

相对于 PC,基于 SPC 的算法 SFSIM 对图像边缘信息的敏感性更强。边缘检测是基于物体和背景间灰度或纹理特性上某种不连续或突变性的一种检测,传统的边缘检测对噪声较敏感^[20]。为了验证其敏感程度,对边缘信息比较丰富的自然图像加入不同程度的高斯噪声,即分别对同一图像加入方差为 0.001~0.009 和均值为 0.1~0.9 的高斯噪声,在噪声均值和方差逐渐增大的情况下对 FSIMc 和 SFSIM 两种算法进行比较,实验结果如图 2 所示。

从图 2(a)可以看出,当高斯噪声的方差逐渐增大时,两种方法都呈现出逐渐减小的趋势,但是随着方差

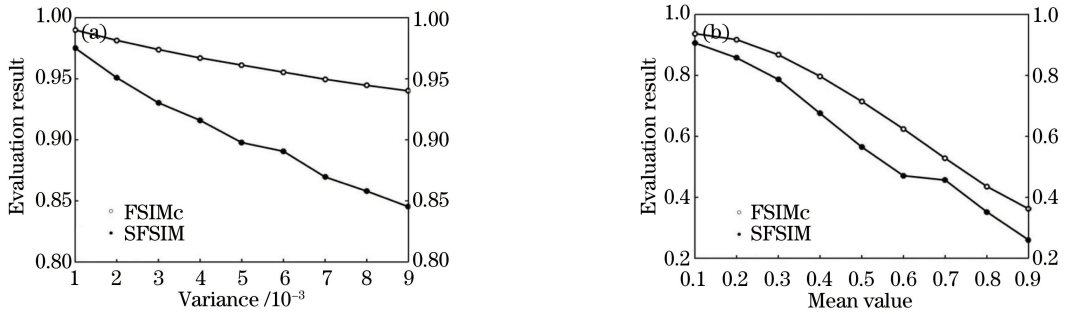


图2 不同程度高斯噪声下的评估值曲线。(a) 不同方差下的评估值;(b) 不同均值下的评估值

Fig. 2 Curves of the evaluation values under different degrees of Gaussian noise.

(a) Evaluation values under different variances; (b) evaluation values under different mean values

越来越大,SFSIM比FSIMc减小的幅度大,数值的减小程度存在明显差异;由图2(b)可以看出,当噪声均值逐渐增大时,两种算法的评估值虽然也都减小,但在这个过程中,数值的减小程度不同,主要表现为噪声均值在0.3~0.6时,SFSIM的评估值比FSIMc减小的幅度稍大,数值的变化程度也相对较大。两个评价结果充分说明,SFSIM对高斯噪声表现出了更高的敏感性。

5.2 LIVE库所有失真图像实验结果与分析

为了验证改进后的方法对图像阶跃边缘的敏感性,使用美国德州大学的LIVE图像数据库^[21]进行仿真实验。LIVE图像库由29幅参考图像、779幅失真图像组成,其中包括JPEG2000失真(JP2K)图像、JPEG失真图像、白噪声失真(WN)图像、高斯模糊失真(GB)图像和快速衰退失真(FF)图像。该数据库同时给出了所有失真图像的平均主观意见分(MOS)和差异平均主观意见分(DMOS), $DMOS=100-MOS$,MOS越大,表明对应图像的主观质量越好。选择4个常用的客观参数:SROCC、肯德尔秩次相关系数(KROCC)、皮尔森线性相关系数(PLCC)和均方根误差(RMSE)^[22]作为评价结果的指标。SROCC和KROCC均用来评价两个变量的等级相关性,PLCC反映两个变量线性相关程度,这三个参数的值越接近于1表示两个变量之间相关程度越高,客观评价模型越好;RMSE代表客观评分在非线性回归条件下与主观评分DMOS之间的误差,其值越小表示客观评价模型越好。

为了验证SFSIM算法的性能优劣,根据视频质量专家组(VQEG)提出的准则^[23],可以检测图像的客观及主观评价的测度是否满足一定的非线性关系,以及自然图像的纹理和边缘等信息是否呈现高度非结构化的特点。文献[8]将这种非线性映射关系定义为

$$f(x) = \alpha_1 \left\{ 0.5 - \frac{1}{1 + \exp[\alpha_2(x - \alpha_3)]} \right\} + \alpha_4 x + \alpha_5. \quad (19)$$

利用SFSIM算法计算出所有图像的客观评分,再与MOS进行非线性拟合,最后按照VQEG对客观质量评价算法的标准进行检验^[24]。图3分别给出了原始算法PSNR、SSIM,改进后的算法VSI、SR-SIM、FSIMc以及SFSIM的客观评价值和主观评价分数的散点图,散点图的密集程度可以直观地反映图像质量模型预测值与主观评价的相关程度,散点图越集中,表明算法的评价效果越好,与主观评价的相关性越好。

从图3可以看出,图3(a)中的点最分散,最不接近拟合曲线,说明算法PSNR与主观评分相关程度较差,与人类视觉系统差异较大;图3(b)~(d)中三种方法的结果比PSNR方法有所提高,但是当图像存在严重失真时,主客观评分的相关性较差,结果仍不理想。PLCC是对变量之间关系密切程度的度量,不同评价方法的PLCC值越大,表明该方法的MOS散点图密集程度越高,评价效果越好。表3中给出了以上6种方法的PLCC参数值,SR-SIM和FSIMc的PLCC值明显高于前三种方法。数据表明,SR-SIM和FSIMc方法得到的点相对密集,而SFSIM算法的PLCC值最高,其散点图的聚合程度和拟合效果较好,说明该算法比其他方法更优。

总之,SFSIM方法更接近理想的线性关系,这表明SFSIM所预测图像质量与主观评价具有很好的一致性。

为了进一步验证SFSIM图像质量评价方法的优越性,分别用不同的图像质量评价方法对LIVE图像数据库中的失真图像进行仿真实验,比较已有算法中图像质量评价性能较好的FSIMc和SFSIM,表2给出了

分别处理 5 种不同类型失真图像后得到的 4 个性能指标,表 3 给出了几种不同的评价模型在 LIVE 图像数据库中的测试性能指标。

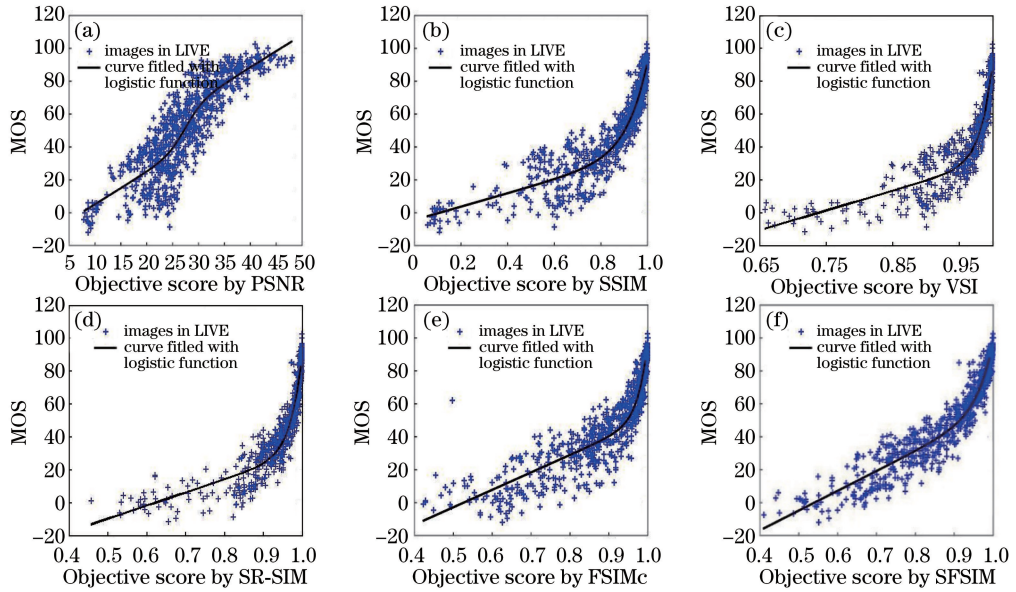


图 3 失真图像客观评分对于主观评分的 MOS 散点图。(a) PSNR;(b) SSIM;(c) VSI;(d) SR-SIM;(e) FSIMc;(f) SFSIM

Fig. 3 MOS scatter diagrams about objective scoring of distorted images for subjective rating.

(a) PSNR; (b) SSIM; (c) VSI; (d) SR-SIM; (e) FSIMc; (f) SFSIM

表 2 LIVE 数据库中不同类型失真图像的测试结果

Table 2 Test results of different kinds of distortion images in LIVE database

Image	SROCC		KROCC		PLCC		RMSE	
	FSIMc	SFSIM	FSIMc	SFSIM	FSIMc	SFSIM	FSIMc	SFSIM
JP2K	0.9724	0.9879	0.9129	0.9132	0.9875	0.9862	4.5558	4.778
JPEG	0.984	0.9869	0.9218	0.9202	0.9894	0.99	5.108	4.9628
WN	0.9716	0.9789	0.8744	0.9045	0.9713	0.9783	7.88	6.8571
GB	0.9708	0.9775	0.8955	0.877	0.977	0.9768	5.1167	5.1322
FF	0.9709	0.9789	0.8707	0.879	0.9611	0.9733	8.6492	7.1887

JP2K 采用以小波变换为主的多解析编码方式,这种方式克服了 JPEG 压缩中的块效应,其产生的失真为模糊失真。由表 2 的数据可以看出,SFSIM 算法处理 JP2K 失真图像的 SROCC 和 KROCC 结果都高于 FSIMc;GB 失真图像的各项实验参数也有相应提高,说明 SFSIM 对模糊失真的图像更敏感,质量评价效果更好;WN 失真图像是将白噪声直接加在原来的图像上,这类图像的检测结果总体上也有所提高,说明 SFSIM 在评估图像质量时对噪声的敏感性要高于 FSIMc。

另外,光学中常见的像移和离焦产生的失真效果主要表现为图像边缘变模糊、细节减少、分辨率降低等。在评价这类失真图像时,SPC 主要计算图像的边缘细节,当像移量和离焦程度增大时,图像边缘细节减少,SPC 的计算结果会降低,图像的质量评价结果也随之降低,因此本文方法对离焦和像移产生的失真也有较好的评价效果。

表 3 不同图像质量评价算法在 LIVE 数据库中的测试结果

Table 3 Test results of different image quality assessment algorithms in LIVE database

Value	Algorithm					
	PSNR	SSIM	VSI	SR-SIM	FSIMc	SFSIM
SROCC	0.8730	0.9226	0.9524	0.9618	0.9619	0.9785
KROCC	0.6801	0.7474	0.8058	0.8299	0.8337	0.8798
PLCC	0.8682	0.9212	0.9482	0.9553	0.9578	0.9707
RMSE	13.5582	10.6320	8.6818	8.0881	7.8523	7.5179

传统的 PSNR 算法使用广泛,仅统计像素点之间的误差,但人眼对一个区域的感知结果会受到其邻域

的影响,而 PSNR 并没有考虑到该特性,也没有考虑到像素点之间的相关性和人眼视觉感知特性,因而经常出现评价结果与主观感觉不一致的情况,不能真实地反映图像质量。SSIM 没有区别对待图像中人眼感兴趣和非感兴趣区域,这在评价严重模糊图像时存在很大局限性,模糊导致数字图像的整体失真,图像越模糊,清晰度越低^[25],这样的图像质量评价效果很不理想。由表 3 可以明显看出,改进的 SFSIM 较早期的多种算法在 LIVE 数据库测试所得结果都有优势,SFSIM 模型在 SROCC、KROCC 和 PLCC 系数上均优于其他模型。这是因为 SFSIM 继承了 FSIM 算法的优良特性,更好地保留了检测到的图像细节特征,对尖锐的图像边缘比较敏感,而且和 FSIM 算法一样考虑了人眼对图像结构的高度敏感,同时对高斯模糊图像更好地进行处理。

6 结 论

在基于 FSIM 的基础上,改进 PC,研究了 4 个对称相位的特征及其定位算法,并改进原有的梯度算子,提出了一种新的结合 FSIM 和 SPC 的图像质量评价算法 SFSIM。SPC 对尖锐的图像边缘特征及高斯模糊图像的高敏感度在图像质量评价时起到重要作用,各向同性算子又具有更精准的加权系数,二者同时作用提高了质量评价模型的性能。

为了验证算法的评价效果,利用 LIVE 图像数据库的图像进行仿真实验,结果表明改进的算法弥补了 PC 的不足,保留了原始算法精度高和效率快的优良性能,同时解决了处理图像阶跃边缘时出现的“余震”现象,使得质量评价结果更加符合人眼视觉系统。

参 考 文 献

- [1] Wang Z, Bovik A C. Modern image quality assessment[M]. New York: Morgan and Claypool Publishing Company, 2006: 20-30.
- [2] 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.
- [3] Chang H W, Yang H, Gan Y, *et al.* Sparse feature fidelity for perceptual image quality assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(10): 4007-4018.
- [4] Lv X, Wang Z J. Reduced-reference image quality assessment based on perceptual image hashing[C]. Proceedings of the 2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2009: 4361-4364.
- [5] Xue Xiaobo, Yu Mei, He Meiling. Stereoscopic image-quality-assessment method based on visual cell model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041004.
薛小波, 郁梅, 何美伶. 基于仿视觉细胞模型的立体图像质量评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041004.
- [6] Wang Z, Wu G X, Sheikh H R, *et al.* Quality-aware images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1680-1689.
- [7] Tian Haonan, Li Sumei. Objective evaluation method for image quality based on edge structure similarity[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 110-114.
田浩男, 李素梅. 基于边缘的 SSIM 图像质量客观评价方法[J]. 光子学报, 2013, 42(1): 110-114.
- [8] 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.
- [9] Xiao Zhitao, Hou Zhengxin, Guo Chengming. Image feature detection technique based on phase information: symmetry phase congruency[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(8): 695-699.
肖志涛, 侯正信, 国澄明. 基于相位信息的图像特征检测算法: 对称相位一致性[J]. 天津大学学报, 2004, 37(8): 695-699.
- [10] Morrone M C, Owens R A. Feature detection from local energy[J]. Pattern Recognition Letters, 1987, 6(5): 303-313.
- [11] Yang Diwei, Yu Shaoquan. Image quality assessment based on phase congruency[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(2): 16-20.

- 杨迪威, 余绍权. 利用相位一致性的图像质量评价方法[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(2): 16-20.
- [12] Liu Z, Laganière R. Phase congruence measurement for image similarity assessment[J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(1): 166-172.
- [13] Morrone M C, Ross J, Burr D C, *et al.* Mach bands are phase dependent[J]. Nature, 1986, 324(6094): 250-253.
- [14] Kovesi P. Invariant measures of image features from phase information[D]. Perth: Department of Computer Science, University of Western Australia, 1996.
- [15] Fu S J, Ruan Q Q, Wang W Q. A shock-diffusion equation with local coupling term for image sharpening[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(2): 245-248.
- [16] Chu Jiang, Chen Qiang, Yang Xichen. Review on full reference image quality assessment algorithms[J]. Application Research of Computers, 2014, 31(1): 13-22.
- 褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 13-22.
- [17] Yang C, Kwok S H. Efficient gamut clipping for color image processing using LHS and YIQ[J]. Optical Engineering, 2003, 42(3): 701-711.
- [18] Tan Yongqian, Zeng Fanju, Yue Li, *et al.* An improved texture image synthesis algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 121001.
- 谭永前, 曾凡菊, 岳莉, 等. 一种改进的纹理图像合成算法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 121001.
- [19] Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou, *et al.* A novel arithmetic of image edge detection of canny operator[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(s1): 50-54.
- 李俊山, 马颖, 赵方舟, 等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法[J]. 光子学报, 2011, 40(s1): 50-54
- [20] Xiang Yan, Ye Qinghao, Liu Jianguo, *et al.* Retrieve of planetary boundary layer height based on image edge detection [J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0704003.
- 项衍, 叶擎昊, 刘建国, 等. 基于图像边缘检测法反演大气边界层高度[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0704003.
- [21] Sheikh H R, Wang Z, Cormack L, *et al.* LIVE image quality assessment database release 2[EB/OL]. [2017-04-24] <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [22] 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.
- [23] Corriveau P J, Webster A A, Rohaly A M, *et al.* Video quality experts group: the quest for valid objective methods [C]. Electronic Imaging. International Society for Optics and Photonics, 2000: 129-139.
- [24] Brunnstrom K, Hands D, Speranza F, *et al.* VQEG validation and ITU standardization of objective perceptual video quality metrics[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(3): 96-101.
- [25] Goodman J W. Introduction to Fourier optics[M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi, *et al.* Transl. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016: 114-116.
- 古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家碧, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2016: 114-116.