

基于小波变换与结构特征的立体图像质量评价

侯春萍, 林洪湖*

天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

摘要 立体图像失真会影响图像边缘、结构和深度等低层次结构特征,为此,基于人眼对图像低层次结构的理解提出一种无参考立体图像质量评价方法。首先,对输入左右视图、合成图和视差图进行双树复小波变换;其次,提取左右视图、合成图和视差图小波子带的相位幅度特征,以及左右视图和合成图小波子带的梯度特征;最后,将所得特征输入支持向量回归(SVR)中训练,获得特征到质量分数的映射关系模型,预测立体图像质量。分别在 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库和 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库中测试本文算法性能,实验结果表明,本文算法与人眼视觉特性保持很高的一致性,且优于目前大多数主流算法。

关键词 图像处理;无参考立体图像质量评价;双树复小波变换;相位幅度特征;支持向量回归

中图分类号 TN919.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061005

Stereoscopic Image Quality Assessment Based on Wavelet Transform and Structure Characteristics

Hou Chunping, Lin Honghu

School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The stereoscopic image distortion can affect the edge, structure, depth and other information of image. In this paper, we propose a no-reference stereoscopic image quality assessment metric based on the human eyes' comprehension of image's low-level structure. First, the left and right views, cyclopean map and disparity map are decomposed by the dual-tree complex wavelet transform. Second, the phase amplitude characteristics of the wavelet sub-band of the left and right views, cyclopean image and disparity map are extracted. Similarly the gradient features of the wavelet sub-band of the left and right views and cyclopean image are extracted. Finally, these features are feeded into the support vector regression to train the mapping model for predicting the quality score of tested stereoscopic image. The experimental results on LIVE3 DIQD Phase 1 and LIVE3 DIQD Phase 2 show that the proposed method is highly correlated with the human visual system, achieving excellent prediction performance.

Key words image processing; no-reference stereoscopic image quality assessment; dual-tree complex wavelet transform; phase amplitude feature; support vector regression

OCIS codes 100.2000; 100.6980; 100.7410; 110.3000

1 引言

随着科学技术的发展,图像质量评价在处理、传输和存储等应用中变得日益重要,因此,建立有效的图像质量评价机制至关重要。图像质量评价主要包括主观图像质量评价和客观图像质量评价,主观图像质量评价是基于人的感受对图像进行主观评分,

耗时耗力,难以推广实现,因此客观图像质量评价更受青睐。依据对原始图像的依赖程度,可将客观图像质量评价分为全参考型^[1-2]、半参考型^[3]和无参考型^[4-5]三种类型。本文主要研究无参考型立体图像质量评价。

立体图像质量评价与平面图像质量评价的主要区别在于立体图像存在深度信息^[1,6]。人眼对图像

收稿日期: 2017-11-02; 收到修改稿日期: 2017-12-03

基金项目: 国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究项目(61520106002)、国家自然科学基金面上项目(61471262)

作者简介: 侯春萍(1957—),女,博士,教授,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: hcp@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: linhonghu@tju.edu.cn

深度信息的感知是由左右视图不对齐的叠加造成,左右视图之间的位移称作视差。Chen 等^[7]使用基于结构相似性的视差估计算法,提高了立体图像质量评价性能;Md 等^[1]提出在小波域应用广义高斯分布提取特征,进行图像质量评价,由于双树复小波变换(DTCWT)具有方向选择性并且能克服对平移敏感的缺陷,因而其在图像质量评价领域效果显著^[8];梯度特征能够直观地反应图像的边缘和结构信息^[4,9-10],Zhang 等^[9]利用相位一致性(PC)描述图像结构,利用梯度幅值描述图像对比度失真从而提出特征相似性;Li 等^[10]提出在梯度域运用韦布尔分布提取韦泊统计特性的形状参数和尺度参数;Li 等^[4]对梯度图分块运用离散正交矩对模糊图像进行评价;PC 在图像质量评价领域能够描述图像全局结构失真^[9],受 PC 的启发,提出了采用图像的相位和幅度描述图像失真^[10-13];考虑到幅度对图像失真的影响较小,Lin 等^[11]利用视觉显著性图提高幅度对

图像质量的影响程度。

本文借鉴文献[1]在小波域提取表征图像结构失真特征的思想,同时考虑了相位幅度和梯度描述图像局部结构特征的能力,通过分析失真图像的相位幅度和梯度在 DTCWT 子带上的表现,提出了一种新的基于 DTCWT 和局部结构特征的无参考立体图像质量评价方法。实验结果证明,本文提取的结构特征与主观一致性强。

2 立体图像质量评价模型

所提出的无参考图像质量评价模型主要包含三步:1) 利用左右视图计算视差图及合成图;2) 小波分解左右视图、视差图和合成图,并从左右视图、视差图及合成图的各小波子带中提取相位幅度,从左右视图和合成图中提取梯度特征;3) 将所得特征输入支持向量回归(SVR),建立模型并进行图像质量评价。具体流程如图 1 所示。

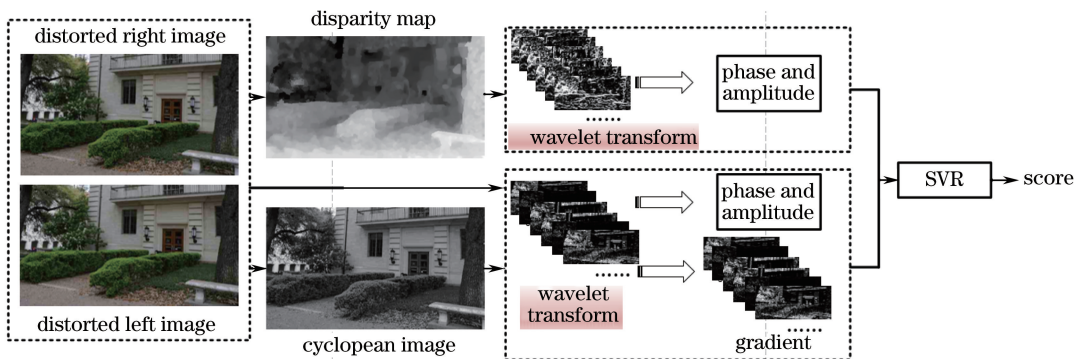


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

2.1 构建合成图

有别于平面图像,立体图像融合了视差信息,当立体图像失真时,仅仅采用通过对左右图像质量分数求均值得到的立体图像客观质量分数的方法达不到好的效果,因此本文综合考虑左右视图、视差图以及融合了视差信息的合成图对立体图像质量进行评价。

合成图由左右视图及其视差计算而得,其公式为

$$C(x, y) = \omega_L(x, y) \cdot I_L(x, y) + \omega_R(x + d, y) \cdot I_R(x + d, y), \quad (1)$$

式中 d 表示视差, C 是合成图, I_R 、 I_L 分别表示右视图和左视点图, ω_L 和 ω_R 为左右视图的权重值。左右权重通过归一化二维复 Gabor 滤波器四个方向的能量响应赋值得到。

二维复 Gabor 滤波器定义为

$$G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \zeta_x, \zeta_y, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}$$

$$\exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{R_1}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{R_2}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right\} \cdot \exp [i(x\zeta_x + y\zeta_y)], \quad (2)$$

式中 $R_1 = x \cos \theta + y \sin \theta$, $R_2 = -x \sin \theta + y \cos \theta$, θ 是滤波方向(滤波方向包括主、次对角线,水平方向,垂直方向); σ_x 、 σ_y 是标准差; ζ_x 、 ζ_y 为空间频率,空间频率设为 3.67 cycle/(°)。

Gabor 滤波器不同滤波方向的幅值能量响应 $Q_z(x, y, \theta)$ 可通过二维复 Gabor 滤波器与图像卷积得到:

$$Q_z(x, y, \theta) = |I_z(x, y) * G(x, y, \sigma_x, \sigma_y, \zeta_x, \zeta_y, \theta)|^2, \quad (3)$$

式中 $z \in \{L, R\}$, $*$ 表示卷积。Gabor 滤波器在四个滤波方向的 $Q_z(x, y, \theta)$ 之和作为滤波器能量响应值 G_E^z 。

因此得到左右权重:

$$\begin{cases} \omega_L(x, y) = \frac{G_E^L(x, y)}{G_E^L(x, y) + G_E^R(x + d, y)} \\ \omega_R(x + d, y) = \frac{G_E^R(x + d, y)}{G_E^L(x, y) + G_E^R(x + d, y)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 DTCWT

DTCWT 是由传统小波变换发展而来。传统小波变换可分解成水平、垂直和斜方向三个方向的细节信息, DTCWT 继承了传统小波变换的优良特性, 还能够更多地描述图像的方向性信息, 因此本文应用 DTCWT 解决图像质量评价问题。通过实数小波变换来实现复数小波变换, 将实部和虚部分开, 通过两组并行的实数滤波器组来获取实部和虚部的小波变换系数^[14]。

图 2 是 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库中一幅失真图像及其经过一层 DTCWT 后各方向的高频子带信息, 第二行(第三行)从左至右分别是实部(虚部)水平方向、斜方向和垂直方向的细节信息。小波

子带中不同方向的子带具有不同的高频分量, 不同的高频分量描述不同的图像结构细节信息, 因此可在小波各子带上提取能表示结构和边缘等细节信息的特征。考虑到不同分辨率反映不同的图像结构, 因此参照文献[14]方法对小波变换进行分析, 本文算法的三层 DTCWT 如图 3 所示。将每幅输入图像分解成三层, 每层 6 个方向, 即 $s_{15_n}, s_{45_n}, s_{75_n}, s_{-15_n}, s_{-45_n}, s_{-75_n}$, 它们分别表示第 n 层的 $+15^\circ, +45^\circ, +75^\circ, -15^\circ, -45^\circ, -75^\circ$ 子带的小波系数, n 取值为 1, 2, 3。

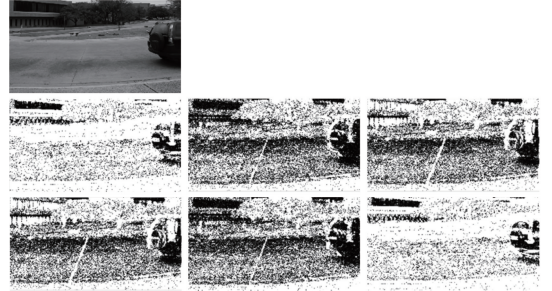


图 2 小波分解

Fig. 2 Wavelet decomposition

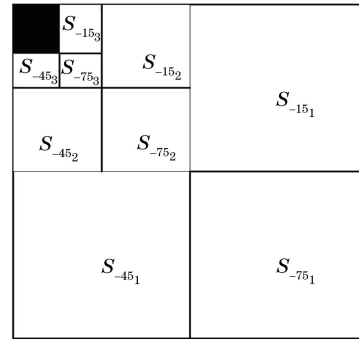
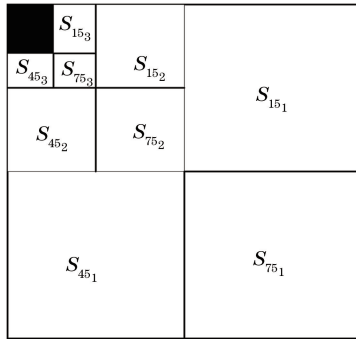


图 3 双树复小波变换

Fig. 3 Dual-tree complex wavelet transform

2.3 特征提取

2.3.1 相位幅度特征

由于离散傅里叶变换获得的全局 PC 不能有效描述图像结构失真, 而由 PC 引出的相位和幅度特征对度量图像的局部结构失真程度有重要意义^[12-13], 因此本文借助图像相位和幅度特征参与描述失真立体图像。与文献[11]有所区别的是, 本文对图像小波子带的相位和幅度特征线性加权后作均值, 目的是为了更好地反映相位和幅度的变化以及降低复杂度。将提取的失真图像小波子带的局部相位幅度特征定义为

$$S = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N S(x, y) / (M \times N), \quad (5)$$

式中 (x, y) 是像素点位置, $M \times N$ 是小波子带的大小, $S(x, y)$ 是对相位和幅度进行线性加权的函数, 计算如下:

$$S(x, y) = W_{LP} \cdot L_P(x, y) + W_{LA} \cdot L_A(x, y) + b, \quad (6)$$

式中 W_{LP} 和 W_{LA} 分别为相位和幅度的权重, b 是一个常数。考虑到相位比幅度更能有效地反映图像失真, 设 $|W_{LP}| > |W_{LA}|$ 。 $L_P(x, y)$ 、 $L_A(x, y)$ 分别是局部相位和局部幅值。

定义局部相位 $L_P(x, y)$ 为当相位一致性取最大值所得方向 o 时 $F_o(x, y)$ 与 $H_o(x, y)$ 的夹角:

$$L_P(x, y) = \arctan [H_{o_m}(x, y), F_{o_m}(x, y)], \quad (7)$$

式中 O_m 是 P_c 最大时的方向。 $F_o(x, y) = \sum_s \eta_{s,o}(x, y)$, $H_o(x, y) = \sum_s \zeta_{s,o}(x, y)$, $[\eta_{s,o}, \zeta_{s,o}]$ 定义为不同尺度不同方向下频域 log-Gabor 滤波器的响应, s 是滤波器的空间尺度系数。频域 log-Gabor 滤波器 $G_{s,o}$ 定义如下:

$$G_{s,o}(\omega, \theta) = \exp\left\{-\left[\lg\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)\right]^2 / 2\sigma_s^2\right\} \cdot \left\{-\frac{(\theta - \theta_o)^2}{2\sigma_o^2}\right\}, \quad (8)$$

式中 ω 是归一化径向频率, ω_s 是相应的中心频率, θ 是滤波器方向角, θ_o 为相应的滤波器方向, 参数 σ_s 和 σ_o 决定滤波器强度。参照文献[11]方法, 本文设 log-Gabor 中各参数为 $\omega_s = 1/6$, $\theta_o = 0$, $\sigma_s = 0.3$, $\sigma_o = 0.4$ 。滤波器的尺度和方向均设为 4。定义沿滤波器方向 o 的 P_c 为

$$P_{c_o}(x, y) = E_o(x, y) / \left[\epsilon + \sum_s A_{s,o}(x, y)\right], \quad (9)$$

式中 $E_o(x, y)$ 是沿方向 o 的局部能量, ϵ 是一个很小的正常数, $A_{s,o}(x, y)$ 为在 s 尺度下沿 o 方向位置 (x, y) 处的幅值, $E_o(x, y)$ 和 $A_{s,o}(x, y)$ 可通过下式计算而得:

$$\begin{cases} E_o(x, y) = \sqrt{F_o(x, y)^2 + H_o(x, y)^2} \\ A_{s,o}(x, y) = \sqrt{\eta_{s,o}(x, y)^2 + \zeta_{s,o}(x, y)^2} \end{cases}, \quad (10)$$

定义局部幅值 $L_A(x, y)$ 为沿方向 O_m 所有尺度下幅值之和为

$$L_A(x, y) = \sum_s A_{s,o_m}(x, y). \quad (11)$$

2.3.2 梯度特征

图像失真可以通过边缘表现, 图像中的边缘与像素的变化有直接的关系, 而像素的变化可以通过相邻像素的梯度求得。文献[15]通过分析人眼对梯度域对比度的敏感性将图像在梯度域进行小波变

换, 本文借助小波子带的梯度向量能够检测图像边缘的思想^[16], 在小波子带上采用梯度特征描述图像边缘失真。定义梯度特征为

$$G = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |G(x, y)| / (M \times N), \quad (12)$$

梯度幅度 $|G(x, y)|$ 表示为

$$|G(x, y)| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (13)$$

式中 G_x 、 G_y 分别表示水平方向和垂直方向图像 $f(x, y)$ 的偏导数:

$$G_x = \partial f(x, y) / \partial x, G_y = \partial f(x, y) / \partial y. \quad (14)$$

本文通过图 4、图 5(a) 和图 5(b) 分析图像经小波变换后提取的相位幅度和梯度特征对图像结构和边缘的影响, 图 4 是 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库的一幅原始左视图及其 5 种失真类型图像, 失真类型依次为快衰弱 (FF)、高斯模糊 (G blur)、高斯白噪声 (WN)、JPEG 压缩和 JP2K 压缩。图 5(a) 和图 5(b) 分别是图 4 中不同失真类型图像进行 DTCWT 后第一层实部水平方向的子带系数在不同失真强度下相位幅度分布图和梯度分布图, 其中横坐标均为图像失真程度, 随着坐标轴数字的增大失真也随之变得严重。从图 5 可以看出: 不同失真类型的相位幅度和梯度分布均不同, 对于 JPEG、JP2K、G blur 和 FF 来说, 随着失真程度的增加, 图像边缘弱化及图像对比度减小, 因此相位幅度及梯度均随之逐渐减小, 图像失真达到一定程度后, 相位幅度及梯度几乎均无变化; 但是对于 WN 而言, 受噪声污染后局部相位幅度及梯度随图像失真程度增大而逐渐增大。由图 5(a) 和图 5(b) 可知, 对同一幅原始图像而言, 不同失真类型的图像经小波变换后相位幅度分布图和梯度分布图明显不同, 且参数随着失真程度的增加而呈现规律性变化, 因而相位幅度和梯度特征能够很好地描述图像失真。

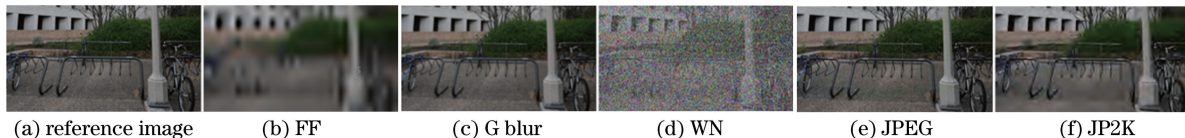


图 4 不同失真类型图像

Fig. 4 Different types of distortion images

2.4 图像质量预测

对左右视图、合成图和视差图分别进行 DTCWT 后提取每个子带信号的相位幅度特征, 以及对左右视图和合成图进行 DTCWT 后求取小波

子带的梯度特征作为图像质量感知特征, 共提取特征数为 126。特征提取后, 采用一个回归模型将各特征映射为表示图像总体质量的分数, 考虑到 SVR 具有较强的稳定性和泛化性, 采用以径向基

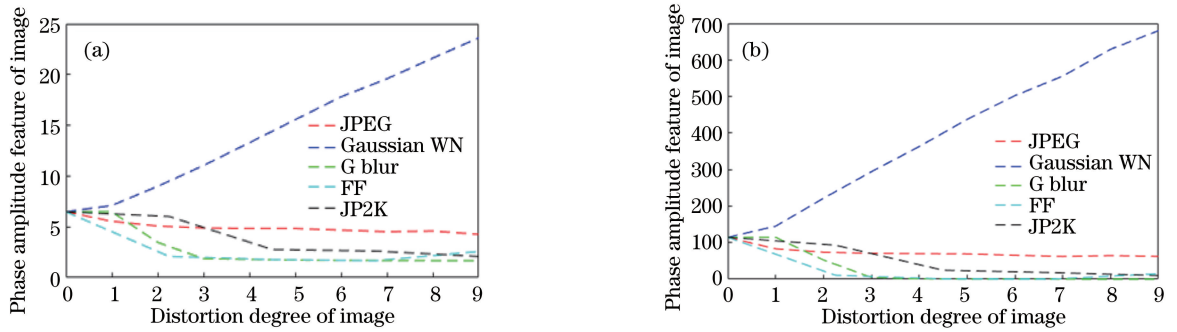


图 5 不同失真类型图像的特征分布。(a)相位幅度分布;(b)梯度分布

Fig. 5 Feature distributions of 5 distortion types on an image. (a) Phase amplitude distribution; (b) gradient distribution

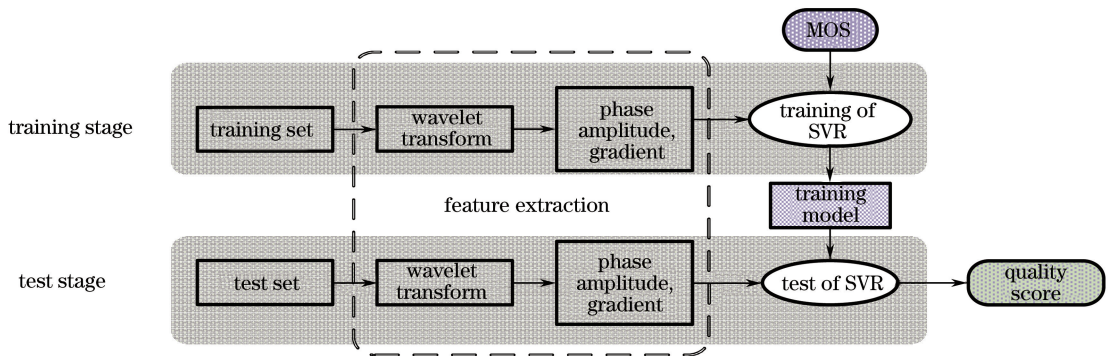


图 6 图像质量预测模型

Fig. 6 Prediction model of image quality

核作为核函数的 SVR 图像质量预测的回归模型^[17]。本文将 SVR 模型分成训练部分和测试部分,如图 6 所示:在训练部分中,对提取的 126 个图像特征及其相应的主观评分值应用 SVR 进行训练网络;在测试部分,将提取出的图像特征输入到已训练好的网络中,得到预测的质量分数,从而实现立体图像质量评价。

3 实验结果及分析

3.1 数据库和评价指标介绍及参数选取

本文算法性能测试在两个公开图像质量数据库 (LIVE3 DIQD Phase 1 和 LIVE3 DIQD Phase 2) 中进行。LIVE3 DIQD Phase 1 数据库中共有 365 幅失真立体图像及 20 幅原始图像,均是左右失真程度相同的对称失真,包含 5 种失真类型:JPEG、JP2K、G blur、WN 以及 FF。LIVE3 DIQD Phase 2 数据库有 360 幅失真立体图像及 8 幅原始图像,包括对称和非对称两种失真,包含 5 种失真类型:JPEG、JP2K、G blur、WN、FF。

采用国际通用的图像质量评价算法性能指标皮尔森线性相关系数 (PLCC)、斯皮尔曼排序相关系数 (SROCC) 和均方根误差 (RMSE) 对算法进行评

价。其中 PLCC 和 RMSE 指标用以衡量客观算法的预测准确性,SROCC 指标用以衡量客观算法的预测单调性。PLCC 和 SROCC 的范围是 $[0, 1]$,其值越接近 1 表明算法性能越好;RMSE 的值越小算法性能越好,同时也说明图像客观预测质量分数与主观质量分数相关性越高。

考虑到不同的相位和幅度对图像失真程度反映不同,并且相位对失真图像的影响远远大于幅度^[11],需要适当选取 W_{LP} 、 W_{LA} 和 b 等参数。在文献^[18]中, $W_{LP} = -10.57$, $W_{LA} = -5.59$, $b = 16.14$;在文献^[13]中, $W_{LP} = 0.9834$, $W_{LA} = 0.2915$, $b = 0$;本文算法中, $W_{LP} = 0.92$, $W_{LA} = 0.08$, $b = 0$ 。实验结果说明,本文算法选择的参数可以达到很好的图像质量预测准确性。

3.2 建立特征融合模型

采用 SVR 网络建立立体图像质量评价模型,分别在 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库和 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库中测试本文算法性能。模型建立及算法测试具体方法如下:1) 在每个数据库中随机选择 80% 的立体失真图像作为训练部分,剩余 20% 的失真图像作为测试部分;2) 输入训练部分图像的相位幅度和梯度特征及对应图像的主观质量分数值,

采用 SVR 网络进行训练,获得特征到主观质量分数的映射关系模型;对测试部分图像,利用得到的模型预测图像质量,并分别计算 PLCC、SROCC 和 RMSE 值;3) 重复 1) 和 2) 过程 1000 次,分别对 1000 次测试得到的 PLCC、SROCC 和 RMSE 值取均值,作为最终的 PLCC、SROCC 和 RMSE 值,用作算法性能比较参数。

3.3 算法比较和分析

表 1 和表 2 所示为本文算法与一些主流图像质量评价算法的性能比较结果。这些算法包括特征相似性(FSIM)^[9]、多尺度结构相似性(MS-SSIM)^[19]、

信息保真度(VIF)^[20]、文献[21]、文献[11]、文献[22]、文献[23]、文献[24]方法等。其中 FSIM、MS-SSIM、VIF 为平面图像质量评价算法,将每种平面图像质量算法分别对左右视图进行图像质量预测,再取二者均值作为立体图像质量预测分数。表 1 和表 2 中用加粗字体表示性能最好的算法。表 3 所示为计算时间的比较结果,利用 Matlab2016a 软件平台计算一幅图像分辨率为 640 pixel×360 pixel 的质量分数所需的时间来表示,软件安装计算机的配置为英特尔 i7,3.40GHz 处理器、12GB 内存、Nvidia GeForce GTX560 显卡。

表 1 算法性能比较

Table 1 Performance comparison of algorithms

Algorithm	LIVE3 DIQD Phase 1			LIVE3 DIQD Phase 2		
	SROCC	PLCC	RMSE	SROCC	PLCC	RMSE
FSIM	0.9135	0.9270	6.0104	0.7874	0.7977	6.4984
MS-SSIM	0.9233	0.9252	6.2245	0.7707	0.7758	7.1221
VIF	0.9087	0.9117	6.7368	0.7167	0.7865	6.9708
Ref. [24]	0.8559	0.8645	8.2424	0.6375	0.6584	8.4956
Ref. [21]	0.9251	0.9350	5.8155	0.8494	0.8628	5.7058
Ref. [11]	0.9347	0.9388	5.6470	0.8935	0.9113	4.6480
Ref. [22]	0.8920	0.8870	6.9950	0.8250	0.8180	6.5000
Ref. [23]	0.3830	0.6260	14.8270	0.5430	0.5680	9.2940
Proposed	0.9336	0.9440	5.3718	0.9074	0.9215	4.3821

表 2 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库上单一失真性能比较

Table 2 Single distortion performance comparison on LIVE3 DIQD Phase 1

Distortion	Criteria	FSIM	MS-SSIM	VIF	Ref. [24]	Ref. [21]	Ref. [11]	Ref. [22]	Ref. [23]	Proposed
JP2K	PLCC	0.9188	0.9188	0.9373	0.8381	0.9213	0.9520	0.8480	0.9050	0.9716
	SROCC	0.9038	0.8917	0.9015	0.8388	0.8945	0.9127	0.8370	0.8660	0.9279
	RMSE	4.5051	6.8141	6.0168	7.0658	-	3.9631	-	-	3.0330
JPEG	PLCC	0.6234	0.6859	6.0168	0.2866	0.5200	0.7546	0.6260	0.7290	0.8712
	SROCC	0.5772	0.6123	0.5807	0.0931	0.4951	0.7164	0.6380	0.6750	0.8117
	RMSE	4.8394	6.3445	6.4097	6.2650	-	4.2912	-	-	3.0953
WN	PLCC	0.9283	6.3445	0.9203	0.9280	0.9448	0.9266	0.9250	0.9040	0.9617
	SROCC	0.9345	0.9320	0.9221	0.9284	0.9405	0.9289	0.9310	0.9140	0.9314
	RMSE	5.6401	8.0413	8.6781	6.1964	-	6.2569	-	-	4.3513
G blur	PLCC	0.9370	0.9435	0.9568	0.9475	0.9592	0.9583	0.8990	0.6170	0.9573
	SROCC	0.9223	0.9261	0.9341	0.9345	0.9403	0.9332	0.8330	0.5550	0.8667
	RMSE	4.8019	6.3973	5.4161	4.6291	-	4.1371	-	-	4.0158
FF	PLCC	0.7839	0.8018	0.8600	0.7086	0.8594	0.8620	0.7070	0.5030	0.8431
	SROCC	0.7298	0.7231	0.8042	0.4709	0.7963	0.8286	0.6490	0.6400	0.7265
	RMSE	7.1759	9.8997	8.4537	8.7671	-	6.2993	-	-	6.3050

表 3 计算时间的比较

Table 3 Comparison of computation time

Algorithm	FSIM ^[9]	MS-SSIM ^[19]	VIF ^[20]	Ref. [24]	Proposed
Time cost /s	1.7771	0.9426	1.6726	0.7503	19.1035

从表 1 中可以看出:1) 本文算法在 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库和 LIVE3 DIQD Phase 2 数

据库上的性能都优于其他算法,具有比较高的准确性;2) 因为 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库只包含对

称失真, LIVE3 DIQD Phase 2 数据库既有对称失真又有非对称失真, 所以大多数算法在 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库上的性能远低于在 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库的性能, 但是本文算法在 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库上仍然有较高的准确性。本文算法还分别对 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库的 5 类失真图像逐一进行质量分数预测, 且与各算法的结果对比如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 本文算法总体优于其他算法, 对 JP2K、WN、G blur 三种失真图像均有很高的主客观一致性。DTCWT 与相位幅度特征的提取均具有一定的冗余性, 从表 3 可以看出, 本文算法的时间复杂度稍高。

小波系数中不同的高频分量描述了不同的图像结构细节信息, 本文算法首次在小波域提取能够表征图像局部结构等信息的相位、幅度和梯度特征。考虑到相位比幅度更能有效反映图像结构失真, 本文算法对相位赋予更大的权值。图像失真会引起像素跳变, 像素变化与图像边缘有直接关系, 梯度能够反映相邻像素的变化, 因而求取梯度特征能够反映图像边缘等结构信息。因此本文算法在 LIVE3 DIQD Phase 1 数据库和 LIVE3 DIQD Phase 2 数据库中主客观质量分数相关性较好, 实验结果证明, 小波子带的相位幅度和梯度特征可以描述图像结构失真和边缘变化。

4 结 论

提出一种在小波子带上提取相位幅度特征和梯度特征作为输出特征的无参考立体图像质量评价方法。具体是将在训练部分左右视图、合成图和视差图的各小波信号上提取的特征输入 SVR 网络训练, 得到特征到质量分数的映射的训练模型, 提取测试部分图像的特征输入到已训练好的网络中, 以实现预测立体图像质量的方法, 本算法性能优于目前大多数主流算法。

参 考 文 献

- [1] Md S K, Appina B, Channappayya S S. Full-reference stereo image quality assessment using natural stereo scene statistics [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(11): 1985-1989.
 - [2] Zhang F, Zhang R Y, Li Z Z. Image quality assessment based on symmetry phase congruency[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 101003.
- 张帆, 张偌雅, 李珍珍. 基于对称相位一致性的图像

质量评价方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 101003.

- [3] Tao D, Li X, Lu W, *et al.* Reduced-reference IQA in contourlet domain [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2009, 39(6): 1623-1627.
 - [4] Li L, Lin W, Wang X, *et al.* No-reference image blur assessment based on discrete orthogonal moments [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(1): 39-50.
 - [5] Hou C P, Ma T T, Yue G H, *et al.* Multiply-distorted image quality assessment based on high-order phase congruency[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071001.
- 侯春萍, 马彤彤, 岳广辉, 等. 基于高阶相位一致性的混合失真图像质量评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071001.
- [6] Xue X B, Yu M, He M L. 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.
- [7] Chen M J, Su C C, Kwon D K, *et al.* Full-reference quality assessment of stereopairs accounting for rivalry [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2013, 28(9): 1143-1155.
 - [8] Bensalma R, Larabi M C. A perceptual metric for stereoscopic image quality assessment based on the binocular energy [J]. *Multidimensional Systems & Signal Processing*, 2013, 24(2): 281-316.
 - [9] Zhang L, Zhang L, Mou X, *et al.* FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(8): 2378-2386.
 - [10] Li Q, Lin W, Fang Y. BSD: blind image quality assessment based on structural degradation [J]. *Neurocomputing*, 2017, 236: 93-103.
 - [11] Lin Y, Yang J, Lu W, *et al.* Quality index for stereoscopic images by jointly evaluating cyclopean amplitude and cyclopean phase[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, 11(1): 89-101.
 - [12] Thomson M G A, Foster D H, Summers R J. Human sensitivity to phase perturbations in natural images: a statistical framework [J]. *Perception*, 2000, 29(9): 1057-1069.

- [13] Shao F, Lin W, Gu S, *et al.* Perceptual full-reference quality assessment of stereoscopic images by considering binocular visual characteristics [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(5): 1940-1953.
- [14] Kingsbury N. The dual-tree complex wavelet transform: a new efficient tool for image restoration and enhancement [C] // Signal Processing Conference, 1998: 1-4.
- [15] Golestaneh S A, Karam L. Reduced-reference quality assessment based on the entropy of DWT coefficients of locally weighted gradient magnitudes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11): 5293-5303.
- [16] Liang M Y, Sun Q S. Image quality assessment method based on edge and gradient information [J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2012, 6(11): 1019-1025.
梁敏瑜, 孙权森. 基于边缘梯度信息的图像质量评价方法 [J]. 计算机科学与探索, 2012, 6(11): 1019-1025.
- [17] Scholkopf, Bernhard, Smola, *et al.* Learning with Kernels: support vector machines, regularization, optimization, and beyond [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(3): 781-781.
- [18] Narwaria M, Lin W, McLoughlin I V, *et al.* Fourier transform-based scalable image quality measure [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3364-3377.
- [19] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C] // IEEE Conference on Signals, Systems and Computers, 2003, 2: 1398-1402.
- [20] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 430-444.
- [21] Shao F, Li K M, Lin W S, *et al.* Full-reference quality assessment of stereoscopic images by learning binocular receptive field properties [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(10): 2971-2983.
- [22] Zhou W J, Yu L, Qiu W W, *et al.* Utilizing binocular vision to facilitate completely blind 3D image quality measurement [J]. Signal Processing, 2016, 129: 130-136.
- [23] Akhter R, Baltas J, Parvez Z, *et al.* No-reference stereoscopic image quality assessment [C]. SPIE, 2010, 7524: 75240T.
- [24] Lin Y H, Wu J L. Quality assessment of stereoscopic 3D image compression by binocular integration behaviors [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(4): 1527-1542.