

文章编号 1004-924X(2015)11-3211-08

基于空间依存的无参考图像质量评价

张 闯*, 王亚明, 陈苏婷

(南京信息工程大学 江苏省气象探测与信息处理重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要: 为了实时监测图像质量, 建立了像素小波系数的二元空间依存关系模型, 并利用该模型实现了图像质量的无参考评价。首先, 将 RGB 图像映射到 HSV 空间; 对图像进行小波分解, 并建立小波系数的二元空间依存关系模型, 即以广义高斯分布来拟合小波系数的二元联合分布。然后, 分析二元空间依存关系与图像质量的相关性, 建立了无参考图像质量评价指标。最后, 对图像质量评价指标进行了测试及对比研究。基于 TID2013、LIVE 及 CSIQ 数据库完成了测试, 结果表明: 基于空间依存的无参考图像质量评价指标可以对图像的失真程度进行准确分级, 分级准确率达到 96% 以上; 采用基于空间依存的无参考图像质量评价方法可以实现对图像质量失真度的准确分级。

关键词: 二元空间依存; 无参考图像质量评价; 小波分解; 广义高斯分布

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152311.3211

No-reference image quality assessment based on spatial dependency

ZHANG Chuang*, WANG Ya-ming, CHEN Su-ting

(*Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

* *Corresponding author, E-mail: zhch_76@163.com*

Abstract: To monitor the image quality in real-time, a binary spatial dependence model of pixel wavelet coefficients was established, and the model was used to realize the image quality assessment by the no-reference image method. Firstly, the RGB image was mapped into a HSV (Hue, Saturation, Value) space and was processed by wavelet decomposition. A binary space dependent relationship model of wavelet coefficients was established, in which the generalized Gaussian distribution was used to fit the binary joint distribution of wavelet coefficients. Then, the correlation between the binary spatial interdependence relationship and the image quality was analyzed, and the no-reference image quality assessment index was obtained. Finally, the proposed image quality assessment indexes were studied and tested comparatively based on the TID2013, LIVE and CSIQ databases. The results show that the image quality assessment index based on the spatial dependency can be used to classify the image distortion degree accurately, and the classification accuracy rate reaches above 96%. It concludes that proposed no-reference image method based on the spatial dependency achieves accurate image quality classification.

Key words: binary spatial dependency; no-reference image quality assessment; wavelet decomposition; generalized Gaussian distribution

收稿日期: 2015-06-26; 修订日期: 2015-09-19.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2015M571781); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61271412)

1 引言

如何使图像质量保真是图像及视觉处理技术中的关键问题,在图像压缩、编码、传输、显示各个图像处理过程中都需要保真图像质量。主观图像质量评价方法存在耗时,受主观因素影响大、无法实现系统嵌入等问题,为了克服上述困难,客观图像质量评价方法得到了长足的发展。客观图像质量评价方法的目标是获得与人类主观感受一致的图像质量评价结果,它具有方便系统嵌入,实时监测的优点。

根据是否需要参考标准图像,可将客观图像质量评价(Image Quality Assessment, IQA)方法分为全参考、半参考和无参考 3 种评价方法。学者们先后提出了多种图像质量评价方法,其中比较著名的有 SSIM (Structural Similarity)^[1-4] 方法、基于自然场景统计特征 (Natural Scene Statistics, NSS)^[5-8] 的方法和基于人类视觉系统^[9-12] 的方法。与图像质量相关的特征提取方法是 IQA 方法的关键环节。使用 SSIM 算法时,若采用图像结构特征作为像质特征与标准图像进行比较,则难以直接应用于无法获得标准图像的情况;NSS 法由于图像来自于各种自然场景,故可灵活用于评价自然图像的像质,但其不适用于由其它成像手段获得的图像的像质评价;基于人类视觉系统的 IQA 方法考虑人类视觉系统的观察图像的特点,模拟人类视觉细胞的生物响应过程,具有良好的发展前景,但其受到生物学发展的限制,而且算法复杂度较高。美国德州大学奥斯汀分校的 SU C C^[13] 等人提出了一种 NSS 特征提取方法,该方法用于在 $L\alpha\beta$ 空间分析二元相邻像素的分布,但并未将该方法应用于质量评价。无参考 IQA 方法^[14-17] 由于无法获得标准图像,所以对图像质量特征提出了更高的要求,它不仅需要像质特征符合人类视觉系统特点,能够表示图像的失真程度,而且要求其于图像内容尽量无关。为此,本文采用 HSV (Hue, Saturation, Value) 色空间突出人类视觉系统的色彩响应机制,应用图像的小波分解系数减少像质特征的内容相关性,采用像素二元空间依存关系来表示图像的失真程度,提出了一种无参考图像质量评价方法。

该方法首先将 RGB 图像映射到 HSV 空间;然后通过分析像素小波系数的二元空间依存关系,建立二元依存关系的统计模型,即用广义高斯分布来拟合小波系数的二元联合分布;接着分析二元空间依存关系与图像质量的相关性,并建立无参考图像质量评价指标;最后,应用 TID2013 数据库^[18] 对图像质量评价指标进行测试及对比研究。

2 像素二元空间依存关系

图像小波分解系数包含图像质量信息^[19],像素小波系数的二元空间依存关系特征可以作为像质特征,在 IQA 方法中用于表示图像的失真程度。提取像素小波系数的二元空间依存关系需要经过色空间映射、小波系数联合分布、参数拟合 3 个步骤。

2.1 色空间映射

HSV^[20] 是 A. R. Smith 根据颜色的直观特性在 1978 年创建的一种颜色空间,也称六角锥体模型 (Hexcone Model)。HSV 模型是针对人类观感的一种颜色模型,侧重于色彩表示。模型中的颜色参数分别是:色调 (h),饱和度 (s),亮度 (v)。色调 h 用角度度量,取值为 $0^\circ \sim 360^\circ$,表示感知到的色彩,即主要的波长;饱和度 s 表示颜色被白光冲淡的程度,取值为 $0.0 \sim 1.0$,其值越大,颜色越饱和。亮度 v 取值为 0 (黑色) ~ 255 (白色)。

将图像由 RGB 色空间映射到 HSV 空间,需要对 RGB 空间的数值进行归一标准化,即 $0 \leq r, g, b \leq 1$ 。

计算得:

$$h = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{\frac{1}{2}}} \right\}, \quad (1)$$

$$s = 1 - \frac{3}{r+g+b} \min(r, g, b), \quad (2)$$

$$v = \frac{r+g+b}{3}. \quad (3)$$

如果 $b/v > g/v$, 则设置 $h = 2\pi - h$ 。可以通过令 $h = h/2\pi$, 将数值范围规范到 $[0, 1]$ 区间;并且当 $r = g = b$ 时, h 没有定义;当 $v = 0$ 时, s 没有定义。

2.2 二元空间依存像素的小波系数分布

如图 1 所示,像素八邻域的二元空间位置可归为 3 类,即水平相邻、垂直相邻和对角线相邻。图像的小波分解高频系数包括水平系数 h , 垂直系数 v 和对角系数 d 。对于二元像素的每种空间位置,只需讨论表 1 中的小波系数联合分布。以对角相邻的二元像素的高度值为例,其小波系数联合分布如图 2 所示。图中第 1、3 行表示三维联合分布,第 2、4 行是三维联合分布对应的二维投影。

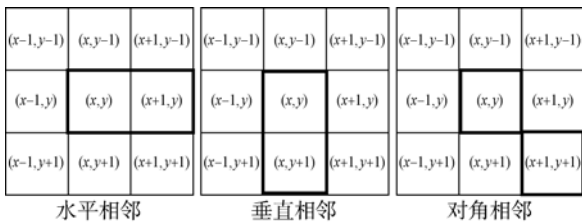


图 1 像素二元空间位置

Fig. 1 Binary spatial positions of pixels

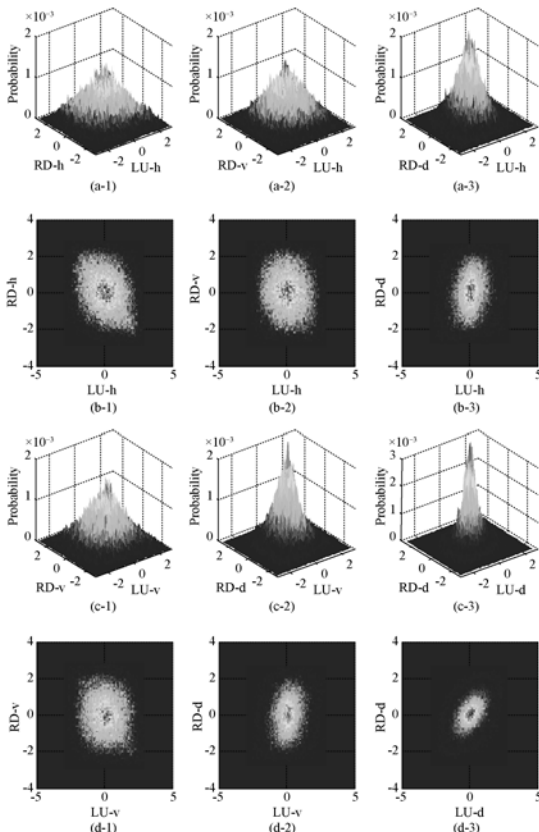


图 2 像素二元空间小波系数分布

Fig. 2 Wavelet coefficient distribution of spatial binary pixels

以图 2 中的空间对角相邻像素的小波系数联合分布为例,可知:

(1)空间对角相邻像素的水平-水平、垂直-垂直小波系数联合分布二维图((b-1)为小波水平系数联合分布,(d-1)为小波垂直系数联合分布)呈现出略扁的椭圆形,长轴与竖直方向夹角大约 45° ,且相互差异不大;

(2)空间对角相邻像素的水平-垂直小波系数联合分布二维图(b-2)为比较圆的椭圆形,长轴竖直;

(3)空间对角相邻像素的水平、垂直-对角线小波系数联合分布二维图((b-3)为小波水平-对角线系数联合分布,(d-2)为小波垂直-对角线系数联合分布,均呈现略扁小的椭圆形,长轴与竖直方向有较小的夹角;

(4)空间对角相邻像素的对角线-对角线小波系数联合分布二维图(d-3)则为较小的椭圆形,长轴与竖直方向夹角也大约为 45° 。

表 1 像素二元空间小波系数分布

Tab. 1 Wavelet coefficient distribution of spatial binary pixels

像素位置	水平相邻		垂直相邻		对角相邻	
	右 R	左 L	下 D	上 U	右下 RD	左上 LU
小波高频系数	水平 h	水平 h	水平 h	水平 h	水平 h	水平 h
	水平 h	垂直 v	水平 h	垂直 v	水平 h	垂直 v
	水平 h	对角 d	水平 h	对角 d	水平 h	对角 d
	垂直 v	垂直 v	垂直 v	垂直 v	垂直 v	垂直 v
	垂直 v	对角 d	垂直 v	对角 d	垂直 v	对角 d
	对角 d	对角 d	对角 d	对角 d	对角 d	对角 d

2.3 特征参数拟合

由于单变量的小波系数分布符合广义高斯分布模型,为了描述小波系数之间的联合分布,需要采用双变量方法,所以本文利用式(4)所示的二元广义高斯分布进行数据拟合^[13]。

$$GGD_{\sigma,\beta}(x) = C(\sigma,\beta)e^{-[\alpha(\sigma,\beta)|x|]^\beta}, \quad (4)$$

式中:

$$\alpha(\sigma,\beta) = \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\Gamma(3/\beta)}{\Gamma(1/\beta)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$C(\sigma,\beta) = \beta \frac{\alpha(\sigma,\beta)}{2\Gamma(1/\beta)}.$$

该分布有两个参数： σ 为信号的方差，用于控制函数的扩散程度； β 为形状参数，决定了函数的衰减速度。特别地，当 $\beta = 1$ 时，式(4)变为 Laplace 分布；当 $\beta = 2$ 时，式(4)变为高斯分布。随着 β 的增加，分布曲线逐渐趋向于平滑。

采用二元广义高斯分布拟合小波系数联合分布，需要估计出二元广义高斯分布参数 \mathbf{M} , α , β 。这里采用最大似然估计^[21]。特别地，当 β 未知时，可通过概率密度函数求对数微分获得。其中 $\{\mathbf{X}_k\}$ 是 k 对小波系数对，估计公式如下所示：

$$\hat{\mathbf{M}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left[\frac{2K}{y_k + y_k^{1-\beta} \sum_{j \neq k}^K y_j^\beta} \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^T \right], \quad (5)$$

$$\hat{\alpha} = \left[\frac{\beta}{2K} \sum_{k=1}^K y_k^\beta \right]^{\frac{1}{\beta}}, \quad (6)$$

$$f(\beta) = \frac{K}{\sum_{k=1}^K y_k^\beta} \sum_{k=1}^K [y_k^\beta \ln(y_k)] -$$

$$\frac{K}{\beta} \left[\Psi \left(\frac{1}{\beta} \right) + \ln \left(\frac{\beta}{K} \right) \sum_{k=1}^K y_k^\beta \right] - K = 0. \quad (7)$$

其中： $y_k = \mathbf{X}_k^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{X}_k$ ，发现 β 和 \mathbf{M} 的估计值相互依赖， α 能够直接被 β 估计。因此，采用牛顿-拉弗森法迭代算法产生最终估计值，具体算法流程如图 3。

$$x_i = x_{i-1} - \frac{f(x_{i-1})}{f'(x_{i-1})}. \quad (8)$$

本文仅选取水平相邻的 3 种(垂直-垂直、垂直-水平、水平-对角线)小波系数对的联合分布作为代表，使用二元广义高斯分布分别进行拟合，拟合结果如图 4 所示。

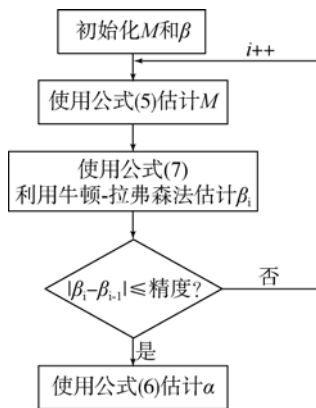


图 3 参数估计算法流程图

Fig. 3 Flowchart of parameter estimation algorithm

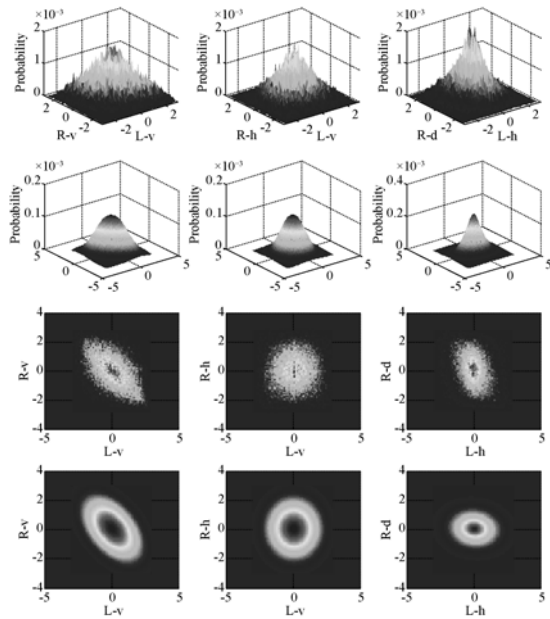


图 4 广义高斯分布拟合

Fig. 4 Generalized Gauss distribution fitting

图 4 中，第 1、3 行为原始数据分布图，第 2、4 行为拟合图。通过观察可以发现，二元广义高斯模型非常适合用于描述这种小波系数间的联合分布。

由二元广义高斯分布描述像素的二元空间依存关系可以得到两个有效参量：尺度参数 α 用于控制函数的分布范围；形状参数 β 决定了函数的衰减速度。本文第 3 部分将讨论噪声对描述二元空间依存关系的两个参数 α 和 β 的影响，并用这两个参数来评价图像质量。

3 图像质量评价

3.1 噪声对二元空间依存特征的影响

本文选取 TID2013 中 5 种噪声失真类型，4 个失真等级，每种情况选择 3 张图像，共 60 幅失真图像进行水平相邻的垂直-垂直小波系数对联合分布的二元广义高斯拟合讨论。图像 I01 的原始图片拟合参数 $\alpha = 1.774 3$, $\beta = 1.128 5$ ，而失真图像拟合参数如表 2 所示。

由表 2 中所列数据可以看出，随着图像失真程度的增加，拟合系数 α 和 β 明显增加。

表 2 图像 I01 失真图像拟合系数

Tab.2 Fitting coefficients of distorted images from image I01

拟合系数 α				
失真类型	失真程度			
	1	2	3	4
加性高斯噪声	2.795 2	3.059 5	3.189 0	3.505 3
分量加性高斯噪声	2.284 1	2.613 7	3.151 8	3.506 4
空间相关噪声	2.454 0	2.784 4	3.542 0	3.536 2
掩模噪声	2.766 1	3.037 8	3.221 4	3.545 9
高频噪声	3.065 4	3.414 4	3.828 8	4.169 6

拟合系数 β				
失真类型	失真程度			
	1	2	3	4
加性高斯噪声	1.427 0	1.485 1	1.495 6	1.592 6
分量加性高斯噪声	1.281 9	1.388 6	1.470 7	1.576 9
空间相关噪声	1.292 0	1.374 5	1.590 0	1.574 0
掩模噪声	1.355 9	1.404 0	1.419 6	1.496 5
高频噪声	1.434 6	1.518 4	1.595 3	1.674 6

3.2 二元空间依存特征与图像质量的关系

由表 2 数据画出图像 I01 失真拟合系数 α 堆积折线图,如图 5 所示。

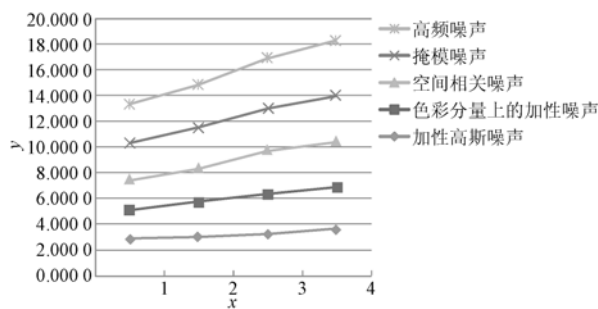


图 5 失真拟合系数 α 堆积折线图

Fig.5 Accumulated lines of distorted fitting coefficient α

不难看出,随着失真程度的加大,拟合参数 α 逐渐增大,并且,不同失真情况累加下的总趋势为线性增长,这表示失真图像的联合分布统计高度更低,更平滑,底部展宽更大,对应二维图上椭圆形的面积更大。

同样地,拟合系数 β 的堆积折线图如图 6 所示,其存在与图 5 相同的变化趋势。

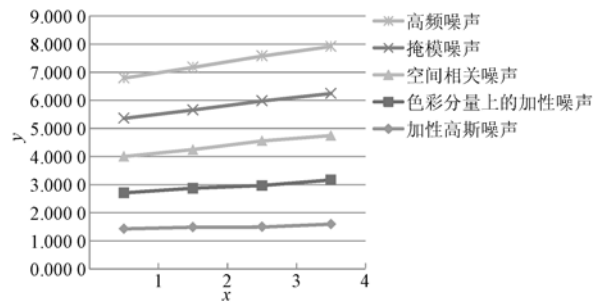


图 6 失真拟合系数 β 堆积折线图

Fig.6 Accumulated line of distorted fitting coefficient β

观察图 6 可见,不同失真累加下拟合系数 β 也呈现出了相似的“线性增长”趋势。进一步分析其它失真图像中拟合系数 α 和 β 的变化发现,对于不同的图像都满足类似的统计规律。所以,下文对这种统计规律进行量化,来描述二元空间储存特征与图像失真质量的关系。

3.3 像质指标拟合

选取拟合系数均呈“线性增长”的 3 幅图像分析图像失真等级与二元空间依存参数的关系。由于实际失真图像的失真类型不仅限于这 5 种,因此使用拟合系数的平均值用于表征所有噪声,这样既可以描述统计规律,又具有代表性。

下面给出 3 幅图像不同噪声下失真拟合系数 α 平均数的散点图,并用直线进行线性拟合。

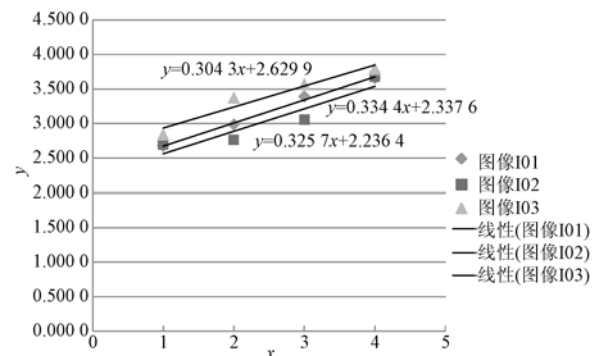


图 7 拟合系数 α 的平均值散点图及线性拟合

Fig.7 Mean scatter plot and linear fitting of coefficient α

同样地,对系数 β 也做相同处理,结果如图 8 所示。如图 7、8 所示,失真情况下的拟合系数并没有受到原始图像内容的影响,因此失真系数拟合结果对于一般图像都成立,特别是对加性高斯噪声失真,其线性效果更为理想。由折线图拟合

得到如下表达式:

$$\alpha = 0.3215n + 2.4013, \quad (9)$$

$$\beta = 0.052n + 1.3311, \quad (10)$$

其中: n 表示失真程度, 一般取 1~4 时拟合式成立。

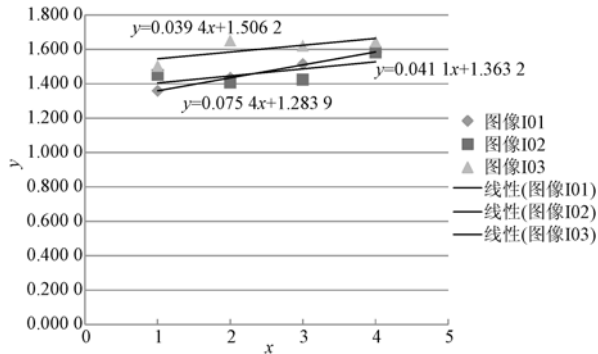


图 8 拟合系数 β 的平均值散点图及线性拟合

Fig. 8 Mean scatter plot and linear fitting of coefficient β

若已知 1 幅图像存在噪声, 就可以通过计算图像水平相邻像素的空间依存关系参数, 再利用式(9)和(10)得到图像的失真程度, 间接地确定图像质量。

由于 α 和 β 属于同一个拟合分布中的参数, 所以它们的拟合误差影响因素相同, 这里取它们的失真程度的平均值来表征图像的失真程度, 用于对图像的失真程度进行分级, 如式(11)所示:

$$n = \frac{1}{2} \left[\frac{\alpha - 2.4013}{0.3215} + \frac{\beta - 1.3311}{0.052} \right]. \quad (11)$$

4 测试实验与数据分析

4.1 测试实验

选取 5 幅失真图像来验证式(11)的准确性, 经过计算, 二元空间依存关系特征系数与图像质量判定结果如表 3 所示。

表 3 质量判定

Tab. 3 Quality assessment

图像/数据	α	β	实验 n 值	计算 n 值
图像 I07-01-1	2.006 2	1.444 0	1	0.471 1
图像 I06-01-2	2.528 8	1.563 4	2	2.432 0
图像 I06-01-3	2.862 6	1.662 7	3	3.905 6
图像 I07-01-4	3.021 1	1.716 3	4	4.667 2
图像 I05-01-4	3.089 7	1.658 5	4	4.218 7

由表 3 数据可知, 公式(11)能够有效地评估出图像的失真程度, 以失真等级的形式对图像质量给出了定量的评价。

4.2 数据分析

由式(11)估算出的图像的失真结果的取值为 1~5。估算值越大, 表示图像失真越严重; 也可以将估算值取整后, 将失真程度用失真等级表示, 以增加失真程度判断的准确性。为了验证质量指标 n 是否能够准确地表示图像质量, 用 TID2013 数据库、LIVE 数据库^[22-24]及 CSIQ 数据库^[25]的图像进行测试, 将结果 n 与主观分数进行了比较, 并采用 SROCC (Spearman Rand Order Correlation Coefficient)、PLCC (Pearson Linearly Correlation Coefficient)^[22]和 RMSE (Root Mean Square Error)三个指标度量其评价结果; 同时, 又与其它效果良好的无参考评价指标进行了比较。

4.2.1 与主观评价结果进行比较

采用 PLCC 来判定评价指标 n 与失真等级间评价结果的准确性, 用 SROCC 估计评价指标的单调性, 用 RMSE 来评价指标的一致性, 其测试结果如表 4 所示。

表 4 与主观评价结果的比较

Tab. 4 Comparison with subjective evaluation

	PLCC	SROCC	RMSE
TID2013	0.969 6	0.911 0	0.596 6
LIVE	0.968 2	0.912 5	0.587 4
CSIQ	0.970 2	0.923 0	0.552 8

分析表 4 中结果可知, 评价结果与失真等级之间的准确性高达 0.96 以上, 单调性为 0.91 以上, 针对计算 n 值一致性欠缺的问题, 对计算值进行取整后, 失真等级划分的一致性高达 96%。

4.2.2 与其它评价方法进行比较

用 LIVE 数据库将本文结果 n 与主观分数进行了比较, 并采用 SROCC、PLCC 和 RMSE 度量其评价结果; 同时, 又与 SSIM^[1]、FSIM^[3]、GMSD^[12]、BRISQUE^[27-28]、BIQI^[29]、SSEQ^[30]等

评价指标进行了比较。其测试结果如表 5 所示。

表 5 与其它评价方法的比较

Tab. 5 Comparison with other evaluated methods

	MS-SSIM	FSIM	GMSD
PLCC	0.949	0.960	0.960
SROCC	0.951	0.963	0.960
RMSE	8.619	7.670	7.620
	BRISQUE	BIQI	SSEQ
PLCC	0.942 4	0.872 2	0.938 3
SROCC	0.939 5	0.866 5	0.934 8
RMSE	—	13.240 0	8.003 9

参考文献:

- [1] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale Structural Similarity for Image Quality Assessment (Invited Paper) [C]. *Proceedings of 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA*, 2003: 1398-1402.
- [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] CHEN M J, BOVIK A C. Fast structural similarity index algorithm [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2011, 6(4): 281-287.
- [4] SAMPAT M P, WANG Z, GUPTA S, *et al.*. Complex wavelet structural similarity: a new image similarity index [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(11): 2385-2401.
- [5] SHEIKH H R, BOVIK A C, CORMACK L K. Blind quality assessment of JPEG2000 compressed images using natural scene statistics (Invited Paper) [C]. *Proceedings of 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA*, 2003: 1403-1407.
- [6] SAAD M A, BOVIK A C. Blind image quality assessment: A natural scene statistics approach in the DCT domain [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(8): 3339-3352.
- [7] ZHANG M, MURAMATSU C, ZHOU X R. Blind image quality assessment using the joint statistics of generalized local binary pattern [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(2):207-210.
- [8] ZHANG Y, MOORTHY A K, CHANDLER D M. C-DIVINE: No-reference image quality assessment based on local magnitude and phase statistics of natural scenes [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29: 725-747.
- [9] 陈勇, 李愿, 吕霞付, 等. 视觉感知的彩色图像质量积极评价[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 742-750.
- CHEN Y, LI Y, LV X F, *et al.*. Active assessment of color image quality based on visual perception [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 742-750. (in Chinese)
- [10] 袁飞, 黄联芬, 姚彦. 基于视觉掩盖效应和奇异值分解的图像质量评测方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 706-713.
- YUAN F, HUANG L F, YAO Y. Image quality evaluation based on visual masking effect and singular value decomposition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 706-713. (in Chinese)
- [11] 郁梅, 孔真真, 朱江英. 基于视觉阈值及通道融合的立体图像质量评价[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(6):1605-1612.
- YU M, KONG ZH ZH, ZHU J Y. Stereoscopic image quality assessment based on visual threshold and channel fusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1605-1612. (in Chinese)
- [12] XUE W, ZHANG L, MOU X, *et al.*. Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2014, 23 (2):

分析表 5 中结果可知,本文方法能够取得理想的失真等级评价结果。与其它评价方法相比,所划分的失真等级能够有效评价图像质量失真程度。

5 结 论

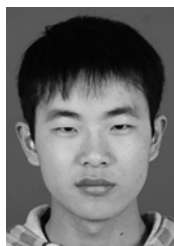
为克服小波变换的统计非独立性,研究了相邻像素间小波系数的联合分布特性和质量影响因素,讨论了噪声对联合分布的影响,并且定量描述了二元空间依存关系特征参数与失真图像质量的关系。实验结果表明,本文质量评价方法得到的质量评价结果可以有效地对图像失真程度进行分级,分级正确率达到 96%。

- 684-695.
- [13] SU C C, CORMACK L K, BOVIK A C. Bivariate statistical modeling of color and range in natural scenes [C]. *Proceedings of SPIE*, San Francisco, California, USA, 2014, 90141G: 1-10.
- [14] LI C F, JU Y W, BOVIK A C, *et al.*. No-training, no-reference image quality index using perceptual features [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5):057003-1-057003-6.
- [15] PENG P, LI Z N. General-purpose image quality assessment based on distortion-aware decision fusion [J]. *Neurocomputing*, 2014, 134:117-121.
- [16] YUN N, FENG Z Y, YANG J C, *et al.*. The objective quality assessment of stereo image [J]. *Neurocomputing*, 2013, 120:121-129.
- [17] MITTAL A, MURALIDHAR G S, GHOSH J, *et al.*. Blind image quality assessment without human training using latent quality factors [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, 19(2): 75-78.
- [18] PONOMARENKO N, JIN L, IEREMEIEV O, *et al.*. Image database TID2013: Peculiarities, results and perspectives [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2015, 30: 57-77.
- [19] DUMIC E, GRGIC S, GRGIC M. IQM2: new image quality measure based on steerable pyramid wavelet transform and structural similarity index [J]. *Signal Image and Video Processing*, 2014, 8(6):1159-1168.
- [20] STRICKER M A, ORENGO M. Similarity of color images [C]. *Proceedings of SPIE*, San Jose, USA, 1995: 1-12.
- [21] BOMBRUN L, PASCAL F, TOURNERET J Y, *et al.*. Performance of the maximum likelihood estimators for the parameters of multivariate generalized gaussian distributions [C]. *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, Kyoto, Japan, 2012: 3525-3528.
- [22] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, *et al.*. LIVE image quality assessment database release 2 [OL]. [2015-06-15] <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] LARSON E C, CHANDLER D M. Most apparent distortion: full-reference image quality [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2010, 19(1): 011006.
- [26] VQEG. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment-Phase II [OL]. [2003-06-20] <http://www.vqeg.org/>.
- [27] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(12): 4695-4708.
- [28] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. Blind/referenceless image spatial quality evaluator [C]. *Forty-fifth Annual Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Pacific Grove, CA, 2011: 723-727.
- [29] MOORTHY A K, BOVIK A C. A two-step framework for constructing blind image quality indices [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(5): 513-516.
- [30] LIU L, LIU B, HUANG H, *et al.*. No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2014, 29(8): 856-863.

作者简介:



张 闯(1976—),女,河北唐山人,博士,讲师,2008年于南京理工大学获得博士学位,现为南京信息工程大学电子与信息工程学院博士后,主要从事光信息探测与处理方面的研究。E-mail: zhch_76@163.com



王亚明(1993—),男,江苏东台人,2015年于南京信息工程大学获得学士学位,主要从事嵌入式系统及电子信息处理的算法研究。E-mail: allelew@163.com