

结合自然图像统计和空域变换的无参图像质量评价

刘雪超¹⁾, 吴志勇²⁾, 黄德天³⁾, 云海蛟^{2,4)}

¹⁾(西安建筑科技大学电工教研室 西安 710054)

²⁾(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电测控部 长春 130033)

³⁾(华侨大学物联网系 泉州 362021)

⁴⁾(中国科学院大学 北京 100049)

(chaochao27819@126.com)

摘要: 为解决数字图像处理中的质量评价问题, 从自然图像统计和空域变换角度出发, 提出一种无参质量评价方法. 首先采用空域变换并结合梯度关系获得图像的统计特性分布; 然后采用非对称广义高斯分布进行模拟, 在充分考虑非对称因素的情况下求得特征参数, 以反映分布特征; 最后利用失真图像与原始图像统计分布的差异, 将特征参数与参考标准直接进行 K-L 距计算获得评价. 实验结果证明, 文中方法无需参考图像, 适用于任意失真类型图像的质量评价, 与同类方法相比, 评价结果与主观 DMOS 值更具一致性; 同时, 该方法计算复杂度较低, 对 Live 库中图像运算耗时少于 130 ms, 具有广泛的实际应用价值.

关键词: 图像质量评价; 自然图像统计; 非对称广义高斯分布

中图法分类号: TP391

No-reference Image Quality Assessment Combined with Natural Scene Statistics and Spatial Transformation

Liu Xuechao¹⁾, Wu Zhiyong²⁾, Huang Detian³⁾, and Yun Haijiao^{2,4)}

¹⁾(Electrical Engineering Teaching and Research Section, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710054)

²⁾(Department of Photoelectric Measurement and Control, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

³⁾(Department of the Internet of Things, Huaqiao University, Quanzhou 362021)

⁴⁾(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: To solve the problem of image quality assessment, a novel no-reference image quality assessment method is proposed based on natural scene statistics and spatial transformation. Firstly, statistical distribution of image by spatial transformation and grads are got. Secondly, asymmetric generalized Gaussian distribution model is used to simulate the distribution. And by reflection on unsymmetrical character, parameters are calculated to show distribution feature. Finally, diversity between distortion image and original image is compared and assessment value by K-L divergence is computed. Experiments reveal that this method can evaluate pictures with any kind of distortion without reference. The assessment results are better than other methods in accordance with subjective DMOS. At the same time, the complexity of calculation of this method is comparatively lower, the time for simple processing each of images in Live database is less than 130ms, which makes it great and wide

收稿日期: 2013-11-25; 修回日期: 2014-11-26 基金项目: 国家自然科学基金(61108066); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2010AA8080202); 中国科学院三期创新工程和长春光机所所内创新工程(Y10532B110). 刘雪超(1985—), 女, 博士, 主要研究方向为图像处理、机器视觉; 吴志勇(1965—), 男, 研究员、博士生导师, 主要研究方向为光电测控设备总体技术、视频调光调焦、光纤通讯; 黄德天(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为图像处理、视频调焦; 云海蛟(1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、机器视觉.

value for engineering application.

Key words: quality assessment; natural scene statistics; asymmetric generalized Gaussian distribution

图像作为一种重要的信息载体被广泛应用于网络、监控、通信和广播等领域,其质量的好坏直接影响使用效果及后续处理传输过程,因此在应用图像的同时也应进行质量评价.图像质量评价方法可分为主观和客观2种.主观方法依据大量人眼观测数据,评价结果比较可靠,但耗时费力,更不能满足观测设备的自动化要求.客观方法又可分为全参考、半参考和无参考的质量评价.全参考和半参考需要在有参考图像或参考特征的前提下才能实现,但实际应用中这些条件往往很难获得.因此,无参质量评价方法成为图像质量评价领域的重点.

已有的无参质量评价方法大多针对特定失真类型建立有针对性的质量评价模型,如针对模糊图像进行再模糊处理的方法^[1]、针对 JPEG 压缩计算块边界和边界统计性的方法^[2]等.然而,在工程应用中观测设备采集的图像内容往往不可预知,且失真也是多种因素共同作用的结果,限制了这些方法的实际应用范围.经研究发现,自然图像统计理论从图像自身特征出发,避免图像内容和失真特点的影响,直接以图像特征反映图像质量,能有效地克服上述弊端,利于广泛的工程应用^[3].

对自然图像统计特性的探索最早可追溯到 20 世纪 50 年代对功率谱定律的研究.但该定律所能描述的特性有限.随着数学理论的发展,学者们找到了更能准确描述自然图像统计特征的模型^[4].文献[3, 5]分别从小波变换和 Contourlet 域变换的角度出发,用对数表示所提取的图像子带分布,通过对子带的预测和比较实现无参质量评价;文献[6-7]用广义高斯分布(generalized Gaussian distribution, GGD)直接描述小波变换和离散余弦变换(discrete cosine transform, DCT)后的统计特征,再分别建立二阶结构模型和小波子带关系实现无参质量评价.本文从空域变换的角度出发,以梯度体现空间相关性,建立图像的空域统计分布,用非对称广义高斯分布(asymmetric generalized Gaussian distribution, AGGD)描述该分布并获得特征参数,再与参考标准进行 K-L 距(Kullback-Leibler diver-

gence, KLD)比较,实现能适用于任意失真特点的无参图像质量评价.

1 自然图像空域变换

自然图像可视为非“人造图像”,其本质是一种信号子集,失真的自然图像就会呈现出“不自然”的状态,通过分析这种差异能得出该图像的失真程度^[8].1994 年, Ruderman^[9]通过分析自然图像非线性变换后的结果,验证了 Daugman^[10]发现的自然图像统计特性理论,并正式将空域变换方法引入该理论.但在小波、DCT、Contourlet 等理论的发展下,该方法在自然图像统计方面并未受到重视.之后, Mittal 等^[11-12]再次将空域变换应用到自然图像统计中,并在质量评价方面取得了良好效果.

Ruderman^[9]的空域变换为

$$M(i, j) = \frac{I(i, j) - \mu(i, j)}{\sigma(i, j) + C} \quad (1)$$

其中, $I(i, j)$ 是输入图像, $\mu(i, j)$ 是均值, $\sigma(i, j)$ 是方差, $C=1$ 以避免分母为 0, M 为得到的变换矩阵.

Ruderman 指出,采用高斯函数进行非线性变换比其他函数更能提取完整的图像特征.在此基础上, Mittal 等^[11]进一步明确均值和方差的表达式为

$$\mu(i, j) = \sum_{h=-H}^H \sum_{w=-W}^W g_{h,w} \cdot I_{h,w}(i, j) \quad (2)$$

$$\sigma(i, j) = \sqrt{\sum_{h=-H}^H \sum_{w=-W}^W g_{h,w} \cdot [I_{h,w}(i, j) - \mu(i, j)]^2} \quad (3)$$

其中, $g_{h,w}$ 为大小 $(2H+1) \times (2W+1)$ 的高斯模板.

经实验发现,高斯模板的标准差过大易使分布受图像内容影响,不利于特性描述;模板尺寸过大会增加计算量,但对统计结果影响不大.因此,本文选用模板为 5×5 、标准差为 1.对 Live 库^①中 29 幅原始图像用文献[9]方法得到的统计分布如图 1 所示,可以看出,统计分布相对分散且部分分布出现畸变,不具有典型数学描述特征.

① <http://Live.ece.utexas.edu/research/Quality/>

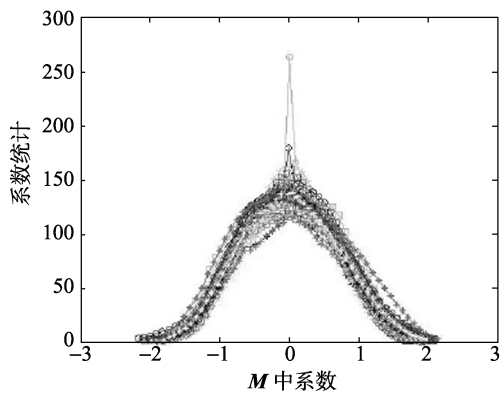


图 1 直接空域变换的统计分布

自然图像经空域变换后依然具有空间相关性, 但 Ruderman 并未充分考虑到这一特点. 文献 [11-12] 试图通过方向弥补这一不足, 但该文献中并未体现出 4 个方向分布的明显区别, 且该过程计算量较大. 梯度作为图像的一种基本特征, 能在空间上直接反映图像细节的变化程度, 体现其空间相关性. 本文在式(1)基础上对矩阵 M 按

$$|\nabla M| = |(\partial_x M, \partial_y M)| = \sqrt{(\partial_x M)^2 + (\partial_y M)^2} \quad (4)$$

取梯度模值, 并按

$$M_A = |\nabla M| \cdot M \quad (5)$$

修正, 获得图像统计分布 M_A .

对 Live 库中 29 幅原始图像用式(5)变换得到的统计分布如图 2 所示. 可以看出, 与图 1 相比, 其分布的收敛性更好, 无畸变, 且具有长拖尾和高尖峰的特点, 符合 GGD 的描述特征.

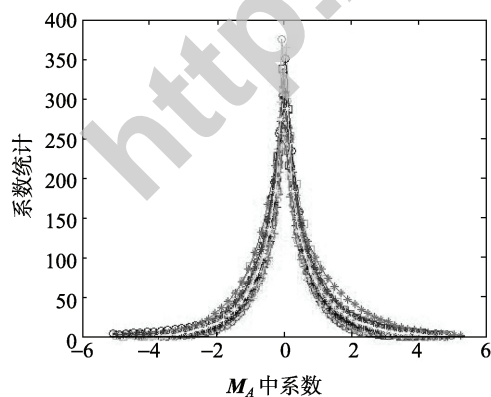
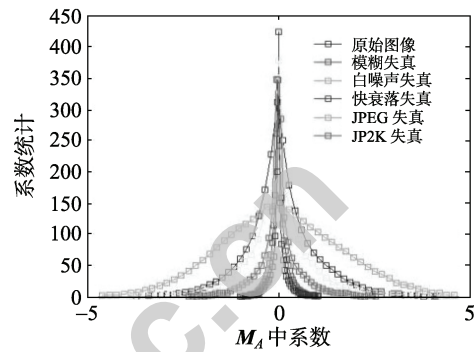


图 2 结合空间相关性的统计分布

以式(5)对 Live 库中 church 图及其高斯模糊、白噪声、快衰落、JPEG 压缩和 JP2K 压缩失真图像进行空域变换, 得到的统计分布如图 3 所示.



a 原始图像



b 本文方法得到的不同失真情况下统计分布

图 3 分布对比

结合图 2, 3, 对本文空域变换方法可得 3 点结论:

- 1) 原始图像的统计分布与图像内容无关, 与图像质量有关;
- 2) 不同因素导致的失真都会改变图像的统计分布特征;
- 3) 比较待评价图像统计分布与原始图像统计分布的差异可实现对图像质量的评价.

因此, 相比于小波、DCT 和 Counterlet 等常用方法, 本文方法更简洁且计算复杂度低.

2 自然图像统计特性的 AGGD 描述

GGD 是一种先验模型并被广泛使用, 其表达式为

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\alpha}{2\beta\Gamma(1/\alpha)} \exp\left[-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (6)$$

其中, $\alpha (\alpha > 0)$ 是形状参数, 决定衰减速度, β 是尺度参数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数. 当 α 为 1 和 2 时, 式(6)为 Laplacian 和 Gaussian 分布; $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 式(6)为均匀分布^[13].

从图 2 可以看出, 自然图像经本文空域变换获得的统计分布不仅具有 GGD 的特点, 还具有明显

的不对称特点, 表现为存在偏移和左右两侧衰减程度不同. 因此, 应将式(6)推广至非对称的 AGGD, 即

$$f(x; \alpha, \beta_l, \beta_r, \mu) = \begin{cases} \frac{\alpha}{(\beta_l + \beta_r)\Gamma(1/\alpha)} \exp\left[-\left(\frac{-(x-\mu)}{\beta_l}\right)^\alpha\right], x < \mu \\ \frac{\alpha}{(\beta_l + \beta_r)\Gamma(1/\alpha)} \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\beta_r}\right)^\alpha\right], x \geq \mu \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ 为众数, 表示峰值点对应的横坐标, 当 $\mu \neq 0$ 时说明该分布存在偏移; β_l 为左尺度, β_r 为右尺度.

使用 AGGD 描述图 2 的分布特点, 将其参数 $(\alpha, \beta_l, \beta_r, \mu)$ 视为能反映图像质量的特征参数, 因此对特征参数求解的准确性也直接影响对分布描述的准确性. 文献[11-12]在不存在偏移 ($\mu=0$) 的前提下实现对 AGGD 参数的求解, 影响质量评价结果的准确性. 通过推导发现, 若直接求解式(7)会出现不完整的 Gamma 函数, 不利于进一步计算. 为解决该问题, 本文先对分布进行矫正, 弥补偏移, 再采用二阶矩的方法求解, 充分考虑 μ 对 α , β_l 和 β_r 的影响, 同时又克服求解具体 μ 值为计算带来的困难, 即

$$E(|X|)^2 \rightarrow E(x-\mu)^2 \quad (8)$$

$$E(X^2) \rightarrow E[(x-\mu)^2] \quad (9)$$

将式(8)(9)结合得

$$R = \frac{E[(x-\mu)^2]}{E(x-\mu)^2} = A \cdot B(\alpha) \quad (10)$$

根据

$$\int_0^{+\infty} x^{v-1} e^{-\mu x^r} = \frac{1}{r} \mu^{-v/r} \Gamma(v/r) \quad (11)$$

的积分关系得到 A 和 $B(\alpha)$ 的表达式

$$A = \frac{(\beta_l^3 + \beta_r^3) \cdot (\beta_l + \beta_r)}{(\beta_l^2 + \beta_r^2)^2} \quad (12)$$

$$B(\alpha) = \frac{\Gamma(1/\alpha) \cdot \Gamma(3/\alpha)}{\Gamma(2/\alpha)^2} \quad (13)$$

获得 α , β_l , β_r 和 R 的关系. β_l , β_r 和 R 的值均可由统计求出得 $\hat{\beta}_l$, $\hat{\beta}_r$ 和 \hat{R} ,

$$\hat{\beta}_l = \sqrt{\frac{1}{N_l - 1} \sum_{k=1, x_k < \mu}^{N_l} x_k^2} \quad (14)$$

$$\hat{\beta}_r = \sqrt{\frac{1}{N_r - 1} \sum_{k=1, x_k \geq \mu}^{N_r} x_k^2} \quad (15)$$

$$\hat{R} = \frac{\sum (x-\mu)^2}{(\sum |x-\mu|)^2} \quad (16)$$

将 $\hat{\beta}_l$, $\hat{\beta}_r$ 代入式(12)可得 A 的估计值 \hat{A} , 并得到

$$P = \hat{R} / \hat{A} = B(\alpha) \quad (17)$$

式(17)中仅有一个未知参数 α , 但因存在于 Gamma 函数内不易直接求解, 为方便参数求解及工程化应用应对其求解方式进行简化. 经实验验证, 将 P 与 α 的关系按

$$P = 0.5144 \cdot \alpha^{-2} + 1.378 \quad (18)$$

进行拟合效果较好, 拟合程度如图 4 所示. 可以看出, P 与 α 的实际分布与拟合分布基本重合, 证明拟合较准确.

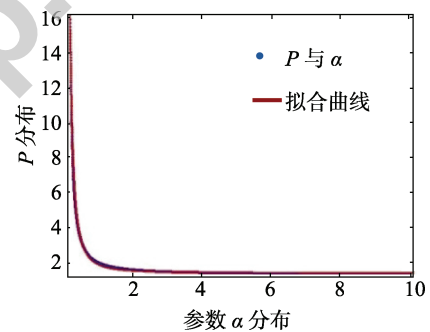


图 4 拟合分布与实际分布比较

根据上述方法可直接得出分布的特征参数, 为基于自然图像统计的图像质量评价提供了必要条件.

3 参考标准建立

为获得质量评价的参考标准, 本文根据文献[11]的分析建立了包含 100 幅标准质量图像的参考库, 其中 29 幅源自 Live 库中的原始图像, 其余 71 幅参照该 29 幅选取. 对该库中图像按第 2 节方法提取特征参数 $F = (\alpha, \beta_l, \beta_r)$, 得到包含 100 组图像特征的特征集 $F_N = \{F_1, \dots, F_n, \dots, F_{100}\}$, n 代表对应图像. 如图 2 所示, 原始图像库中的图像统计分布具有收敛性, 但不具有唯一性. 因此, 建立参考特征 $F_{sd} = (\alpha_{sd}, \beta_{sd}^l, \beta_{sd}^r)$, 使其与特征集中所有特征

的误差和为最小, 即

$$e = \arg \min \left\{ \|F_{sd} - F_1\| + \dots + \|F_{sd} - F_n\| + \dots + \|F_{sd} - F_{100}\| \right\} \quad (19)$$

根据三角不等式原理得

$$\|F_{sd} - F_1\| + \dots + \|F_{sd} - F_{100}\| \geq \|100F_{sd} - (F_1 + \dots + F_{100})\| \quad (20)$$

再结合式(19)得到

$$e = \arg \min \|F_{sd} - (F_1 + \dots + F_{100})/100\| \quad (21)$$

当 e 为最小时求出所需的 F_{sd} .

4 无参质量评价

KLD 即相对熵^[14], 能反映事件概率分布的差异. 对于图像质量评价而言, 计算待评价图像的特征参数 F 与参考特征 F_{sd} 的 KLD 获得差异值, 可实现质量评价, 即

$$KLD(F_{sd}, F) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{sd} \cdot \ln \left(\frac{F_{sd}}{F} \right) dx \quad (22)$$

相对熵值越小表示差异越小, 也说明待测图像质量越好.

式(22)需对分布的所有样本点逐个计算并累加, 应进行化简降低计算复杂度.

将式(7)的表达方式简写为

$$f = D \cdot h(x) \quad (23)$$

其中 D 与 $h(x)$ 对应式(24), (25), 参考分布的 D_{sd} 和 $h_{sd}(x)$ 表达方式类似

$$D = \frac{\alpha}{(\beta_l + \beta_r)\Gamma(1/\alpha)} \quad (24)$$

$$h(x) = \begin{cases} -\left(\frac{-(x-\mu)}{\beta_l}\right)^\alpha, & x < \mu \\ -\left(\frac{x-\mu}{\beta_r}\right)^\alpha, & x \geq \mu \end{cases} \quad (25)$$

将式(23)代入式(22)得

$$KLD(F_{sd}, F) = \int_{-\infty}^{+\infty} [D_{sd} \cdot \exp(h_{sd}(x))] \cdot \ln \left(\frac{D_{sd} \cdot \exp(h_{sd}(x))}{D \cdot \exp(h(x))} \right) dx \quad (26)$$

再根据式(10)的积分关系和 $\Gamma(n) = (n-1)\Gamma(n-1)$ 得

$$KLD(F_{sd}, F) = \ln \left[\frac{\alpha_{sd}(\beta_l + \beta_r)\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{\alpha(\beta_{sd}^l + \beta_{sd}^r)\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_{sd}}\right)} \right] + \left[\left(\frac{\beta_{sd}^l}{\beta_l}\right)^\alpha \cdot \beta_{sd}^l + \left(\frac{\beta_{sd}^r}{\beta_r}\right)^\alpha \cdot \beta_{sd}^r \right] \cdot \frac{1}{(\beta_{sd}^l + \beta_{sd}^r)} \cdot \frac{\Gamma\left(\frac{\alpha+1}{\alpha_{sd}}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\alpha_{sd}}\right)} - \frac{1}{\alpha_{sd}} \quad (27)$$

转变为对分布特征参数的直接计算, 极大地降低了运算量.

5 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 我们对 Live 库中各失真类型图像应用本文方法进行无参质量评价, 将客观评价结果与主观 DMOS(difference mean opinion scores)值进行比较, 得到散点分布如图 5 所示. 可以看出, 图 5a, 5b 的效果最明显, 说明本文方法能对白噪声和高斯模糊造成的失真进行有效评价. 压缩产生的振铃效应和快衰落失真使图像产生纹理、边界叠加, 影响图像结构, 而图 5c, 5d 的评价结果依然显示了较好的收敛性和单调性. 该实验说明本文方法可评价任意失真类型图像, 且得到的客观评价与主观 DMOS 值具有较好的一致性, 能准确地反映图像的真实质量. 同时, 图 5 也反过来证明了失真对自然图像统计特性的影响.

为进一步说明算法性能, 建立统计性对比. 用本文方法对 Live, TID2008^[15]和 IVC 图像库^①进行质量评价, 并与常用的峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)、结构相似度(structural similarity, SSIM)^[16]、多尺度结构相似度(multi-scale SSIM, MS-SSIM)^[17]、文献[5, 11-12]的方法进行比较(其中 PSNR, SSIM 和 MS-SSIM 均为全参考, 文献[5, 11-12]及本文方法为无参考), 参考对应的主观 DMOS 值, 用秩相关系数(spearman rank order correlation coefficient, SROCC)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)度量评价结果, 如表 1 所示. 其中, 较高的 SROCC 值能反映较好的单调性, 较低的 RMSE 和 MAE 能反映较好的一致性^[18-19].

① <http://www2.irccyn.ec-nantes.fr/ivcdb/>

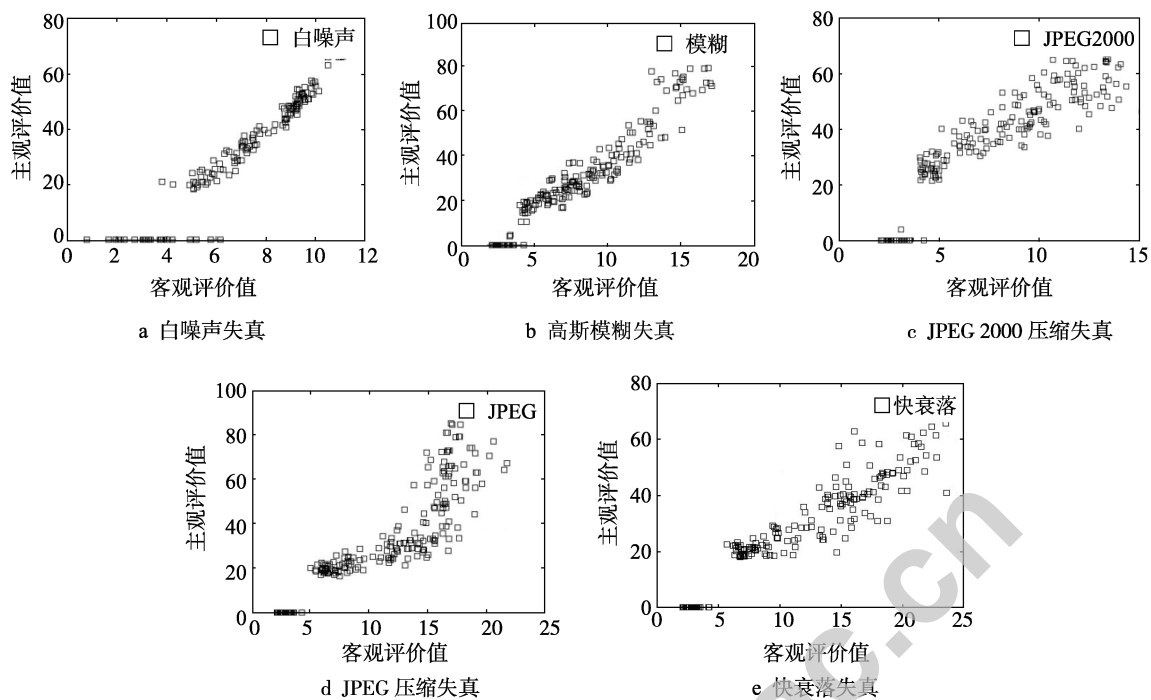


图 5 本文方法对不同失真类型图像的评价值与 DMOS 值比较

表 1 算法性能对比

图像库	性能	PSNR	SSIM	MS-SSIM	文献[5]	文献[11]	文献[12]	本文方法
Live	SROCC	0.864 7	0.913 9	0.953 1	0.911 4	0.937 6	0.914 2	0.942 1
	RMSE	8.279 5	7.572 3	6.381 2	7.028 1	6.457 6	6.485 7	6.374 3
	MAE	7.897 5	6.573 8	6.015 6	6.887 2	6.389 1	6.024 6	6.141 6
TID2008	SROCC	0.525 2	0.625 1	0.853 2	0.791 5	0.825 6	0.847 9	0.862 4
	RMSE	1.031 2	0.747 5	0.566 3	0.604 9	0.587 9	0.570 1	0.569 7
	MAE	0.693 6	0.632 4	0.587 1	0.597 6	0.593 7	0.586 2	0.590 2
IVC	SROCC	0.762 9	0.775 6	0.876 3	0.807 9	0.881	0.894 5	0.901 3
	RMSE	0.843 7	0.663 2	0.540 6	0.591 4	0.548 9	0.530 2	0.532 7
	MAE	0.628 7	0.580 1	0.432 5	0.526 9	0.429 6	0.407 8	0.415 1

从表 1 可以看出, PSNR 的评价效果最差, 因其原理特性不符合人眼对图像的敏感规律; SSIM 和 MS-SSIM 从视觉敏感程度出发, 比 PSNR 的效果有很大提高, 且已被广泛认可, 但需已知参考图像; 文献[5]方法从自然图像统计特性考虑, 无需参考图像, 但因所用子带的线性关系不够严格, 影响了评价结果; 文献[11-12]方法获得的效果较好, 但因对空域变换和特征描述考虑不够充分, 评价效果的提高有限. 相比之下, 本文方法对各图像库都显示出较高的 SROCC 值和较低的 RMSE, MAE 值, 说明该方法对图像质量的评价与主观 DMOS 值的一致性较好, 符合人眼的视觉特点, 且不需要参考图像, 在总体性能上优于其他同类方法; 同时,

本文方法在计算过程中引用对自然图像统计模型的推导结论, 具有较低的计算复杂度, 在 Matlab 环境下运算耗时少于 130 ms.

6 结 语

本文基于自然图像统计理论, 结合空间相关性在空域变换中建立自然图像统计特征, 充分考虑非对称性并用 AGGD 描述特征, 以 KLD 计算差异, 实现对图像的无参质量评价. 该方法能克服图像内容对图像质量评价的影响, 无需预知参考图像, 适用于任意失真情况, 鲁棒性强. 实验结果表明, 本文方法明显优于传统的 PSNR, SSIM, MS-

SSIM 和同样基于自然图像统计的文献[5, 11]方法, 与主观 DMOS 值对比的散点图显示了较好的单调性和收敛性, 为机器视觉提供符合主观标准的客观图像质量评价结果; 该方法计算复杂度低, 耗时少于 130 ms, 对于图像质量评价理论的研究和实际工程都具有重大意义. 但是, 因空域变换得到的参考模型不具有唯一性, 使质量评价产生误差. 如何降低这种误差或获得具有唯一性的参考模型是进一步研究的重点.

参考文献(References):

- [1] Crete F, Dolmiere T, Ladret P, *et al.* The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric[C]//Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers press, 2007, 6492: 01-0J
- [2] Pan F, Lin X, Rahardja S, *et al.* Using edge direction information for measuring blocking artifacts of images[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2007, 18(4): 297-308
- [3] Jin Bo, Li Chaofeng, Wu Xiaojun. No-reference image quality assessment based on natural scene statistics and wavelet[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(1): 33-39(in Chinese)
(金波, 李朝锋, 吴小俊. 结合 NSS 和小波变换的无参考图像质量评价[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(1): 33-39)
- [4] Zhang Dong. Applications of natural image statistics in image processing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013(in Chinese)
(张东. 自然图像统计在图像处理领域的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013)
- [5] Lou Bin, Shen Haibin, Zhao Wufeng, *et al.* No-reference image quality assessment based on statistical model of natural image[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2010, 44(2): 248-252(in Chinese)
(楼斌, 沈海斌, 赵武锋, 等. 基于自然图像统计的无参考图像质量评价[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2010, 44(2): 248-252
- [6] 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
- [7] Saad M A, Bovik A C, Charrier 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
- [8] Shi Yunyu. The research on objective quality assessment of natural images[D]. Shanghai: Shanghai University, 2011(in Chinese)
(石蕴玉. 自然图像的客观质量评价研究[D]. 上海, 上海大学, 2011)
- [9] Ruderman D L. The statistics of natural images[OL]. [2013-11-25].
<http://www.cs.unm.edu/~williams/cs591/ne940406.pdf>
- [10] Daugman J G. Complete discrete 2-D Gabor transforms by neural networks for image analysis and compression [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1988, 36(7): 1169-1179
- [11] 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
- [12] Mittal A, Soundararajan R, Bovik A C. Making a "completely blind" image quality analyzer[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(10): 209-212
- [13] Yu Shaoquan, Zhao Qian, Li Hongwei. Parameter estimation and its convergence properties of generalize Gaussian distribution[J]. *Mathematica Applicata*, 2004, 17(S1): 199-202(in Chinese)
(余绍权, 赵倩, 李宏伟. 广义高斯分布的参数估计及其收敛性质[J]. *应用数学*, 2004, 17(S1): 199-202)
- [14] Hu Yong, Zhao Chunxia, Guo Zhibo, *et al.* Improved relative entropy-based thresholding algorithm for segmentation [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(12): 3731-3733(in Chinese)
(胡勇, 赵春霞, 郭志波, 等. 一种基于相对熵阈值分割的改进算法[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(12): 3731-3733)
- [15] Ponomarenko N, Lukin V, Zelensky A. TID2008—a database for evaluation of full reference visual quality assessment metrics[J]. *Advances of Modern Radioelectronics*, 2009, 10: 30-45
- [16] 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, 14(4): 600-612
- [17] Wang Z, Simoncelli E P, Bovik A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C]//Proceedings of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2003, 2: 1398-1402
- [18] Ma Qi, Zhang Liming. A fast computation of attention selection map and its application in image quality assessment[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2009, 21(7): 973-983(in Chinese)
(马奇, 张立明. 快速注意力选择计算及其在图像质量评价中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2009, 21(7): 973-983)
- [19] Wei Xuehui, Li Junli, Chen Gang. A perception based image quality assessment model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(12): 1540-1545(in Chinese)
(韦学辉, 李均利, 陈刚. 一种图像感知质量评价模型[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(12): 1540-1545)