

基于线扩散函数提取的无参考图像清晰度评价

王俊琦^{1,2)}, 张立国¹⁾, 刘磊^{1,2)}

¹⁾ (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

²⁾ (中国科学院大学 北京 100049)

(wind.wjq@163.com)

摘要: 为了评价实际拍摄场景中图像的清晰度状况, 提出一种无参考的质量评价方法. 首先提取图像边缘并去除纹理复杂区域, 得到可使用的边缘图; 然后沿各边界点梯度方向作对应线扩散函数曲线, 各点的线扩散函数半高全宽组成了清晰度参数集合; 最后以集合的统计特性来分析图像清晰度变化情况. 分别从图像与清晰度关系分析、算法稳定性、算法的抗噪声能力和离焦图像清晰度评价几个方面进行实验, 结果表明, 该方法能够评价图像的清晰度, 不需要参考图像, 评价结果具有良好的稳定性与抗噪声性能, 具有广泛的应用价值.

关键词: 图像质量评价; 无参考方法; 图像清晰度; 线扩散函数;
中图分类号: TP391

No-Reference Image Quality Assessment for Sharpness Based on Line Spread Function

Wang Junqi^{1,2)}, Zhang Liguang¹⁾, and Liu Lei^{1,2)}

¹⁾ (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

²⁾ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: A no-reference quality evaluation algorithm is presented in this paper, in order to estimate the sharpness of images in practice. Firstly, useful information is obtained by extracting edge from original images and removing their complex texture region. Then line spread function curves are plotted along the gradient direction of each edge pixel, so that their full width values at half maximum can form the sharpness parameter congregation. Finally, the changes of image sharpness can be known by analyzing that congregation's static characteristics. Experiments are carried out in three aspects: the relationship between images and their sharpness, the algorithm's stability and anti-noise capability, the sharpness assessing ability for defocus images. The results show that this algorithm is effective in sharpness evaluation in the case with no reference. Furthermore, it has high stability and noise-resist capacity, indicating extensive value for engineering application.

Key words: image quality assessment; no-reference method; image sharpness; line spread function

清晰度是衡量图像质量的重要指标之一, 人们在采用主观方法评价一幅图像时最直观的感受也是清晰度的变化, 目前针对图像清晰度的计算机客观评价标准还不成熟, 尤其对无参考图像质量评价更少.

图像的模糊形式有很多, 大体上可以分为 2 种: 由于景物与相机之间的相对移动产生的运动模糊; 由于相机离焦或者透镜像差产生的离焦模糊. 本文旨在解决离焦模糊图像的清晰度评价.

常用的图像清晰度评价函数有梯度函数法^[1]、

收稿日期: 2015-08-16; 修回日期: 2015-12-22. 基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划 (863-2-5-1-13B). 王俊琦(1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为图像质量评价; 张立国(1961—), 男, 硕士, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为空间光学遥感器; 刘磊(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式图像处理.

统计学法、频谱函数法以及熵函数法等^[2]。按参考图像存在与否的情况,可以将图像质量评价分为 3 种:全参考、半参考与无参考评价。全参考和半参考评价^[3-4]需要在有参考图像或特征的前提下才能实现,实际应用中很难实现这些条件。陈亮等^[5]考察了 5 种传统的图像清晰度评价函数,并分析了它们在不同模糊程度下对不同图像的清晰度评价能力,认为评价结果都与图像本身的内容有较大关联,图像本身的细节多寡影响了评价的结果,这种局限性使得这些评价函数并不能在完全无参考的情况下对图像进行准确评价。无参考质量评价方法^[6]成为图像质量评价的重点,文献^[7-9]从自然图像统计及空域变换出发,直接以图像特征反映图像质量,对所有类型的图像失真进行了质量评价;但在复杂场景中,不同降质因素之间相互干扰,因而评价结果并不能反映图像的真实降质情况。Wang 等^[10]提出了测量模糊图像在边缘处的边缘扩散函数倾斜斜率的方法来评估清晰度,Marziliano 等^[11-12]通过计算图像模糊边缘的宽度实现无参考清晰度评价。

倾斜刃边法^[13-14]是计算系统调制传递函数的主要方法之一,在其计算过程中提取出倾斜刃边的线扩散函数和调制传递函数。线扩散函数的半高全宽(full width at half maximum, FWHM)和调制传递函数(modulation transfer function, MTF)可以作为系统的质量评价,但是倾斜刃边法对刃边形状的要求比较严格,在绝大多数的场景中很难找到符合要求的刃边,导致最终无法准确评估图像质量。

本文提出了一种基于线扩散函数提取的无参考图像清晰度评价方法。

1 原理分析

一个场景中,在 2 个景物过渡处的边缘通常是一种阶跃变化。在目标成像过程中,由于系统受到各种因素的影响,如离焦、机械振动、气流扰动等,使得最终获取的图像被模糊了^[15]。阶跃边缘的灰度变化也成为了一种渐进变化。提取一行对应像元,可以得到图像的边缘扩散函数(edge spread function, ESF),对 ESF 求导可得到线扩散函数(line spread function, LSF),图 1 所示为这种退化过程。

如图 2 所示,要获取这种渐进变化的程度也可以对图像直接求梯度,图像边缘的梯度变化形成了线扩散函数曲线。LSF 最大值点是梯度变化最大的地方,也就是图像的边缘分界点;图像模糊越严

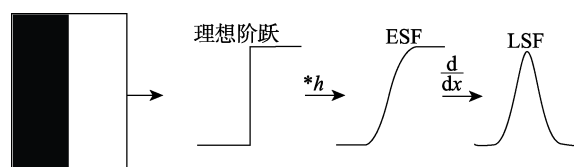


图 1 图像退化过程

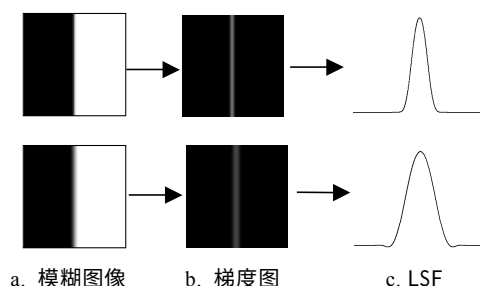


图 2 对梯度图像提取 LSF 曲线

重, LSF 越宽。因此,将 LSF 归一化后用其 FWHM 作为清晰度评价参数是可行的。

图像的梯度方向主要由边缘的法线方向决定,在一定程度上也受到模糊核的影响。对于仅有一个移动方向的运动模糊,当边缘法线方向与运动模糊方向相同时,模糊程度达到最大,梯度方向上的模糊大小与运动模糊核大小线性相关;当边缘法线方向与运动模糊方向垂直时,该边缘不受模糊核影响,梯度方向上的模糊程度与运动模糊核无关。本文中,通过采集沿图像梯度方向的像元作 LSF 曲线,可以评价每个方向都受到模糊的离焦模糊图像,而无法解决运动模糊图像的清晰度评价。

2 算法设计

图 3 所示为本文算法流程图。

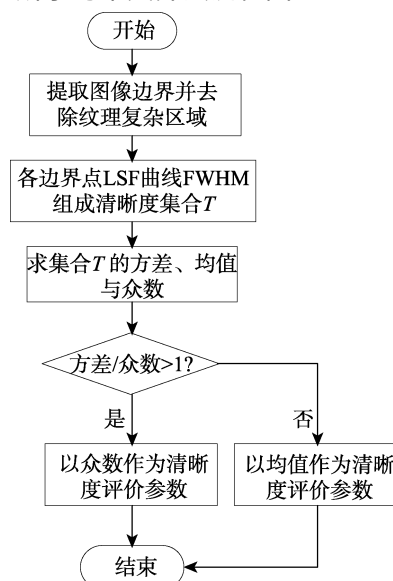


图 3 算法流程图

2.1 图像边缘检测及处理

使用边缘探测器探测图像边缘, 边缘探测算子有很多种类, 如 Sobel, Canny, Prewitt, Robert 等, 本文选择 Canny 算子作为边缘探测算子. 图 4a 所示为对 Lena 图像提取的边缘, 在纹理复杂的区域, 如 Lena 的头发区域, 边缘之间距离太近, 相互影响, 在一定程度上会影响 LSF 曲线提取精度. 为提高计算精度, 应先去除纹理复杂的区域, 然后对纹理简单的区域计算边缘对应的 LSF 曲线.

纹理复杂区域的主要特征为边缘相互之间距离很近, 可以根据这种性质采用形态学处理的方法来剔除纹理复杂区域.

形态学的闭运算可以填充近距离边缘之间的缝隙, 一般模糊图像的最大 LSF 宽度小于 15 个像素. 因此, 采用 15×15 的矩形结构元素 S_1 对边缘图像 A 进行闭运算得到图像 B , 间距小于 15 个像素的纹理边缘将会连接起来, 而非纹理区域的边缘

保持单像素不变, 即

$$B = A \cdot S_1 = \bigcup \{(S_1)_z \mid (S_1)_z \cap A \neq \emptyset\};$$

其中 $\cdot$ 为闭运算, 它是 S_1 对 A 先膨胀再腐蚀的结果, 运算结果如图 4b 所示.

对图 B 使用大小为 5×5 的矩形结构元素 S_2 进行形态学开运算, 即可除去非纹理区域的边缘

$$C = B \circ S_2 = \bigcup \{(S_2)_z \mid (S_2)_z \subseteq B\};$$

其中 $\circ$ 为开运算, 它是 S_2 对 B 先腐蚀再膨胀的结果. 对剩下的区域 C 稍加膨胀, 即得到图像的纹理覆盖区域

$$D = C \oplus S_2 = \{z \mid (S_2)_z \cap C \neq \emptyset\};$$

其中 $\oplus$ 为膨胀操作. 图 4c 所示为纹理覆盖区域 D .

对边缘图像 A 去除纹理覆盖区域 D , 得到如图 4d 所示的平坦区域的边界 E , 即

$$E(i, j) = A(i, j) \times \bar{D}(i, j);$$

其中, $\bar{D}(i, j)$ 为对 D 取反.

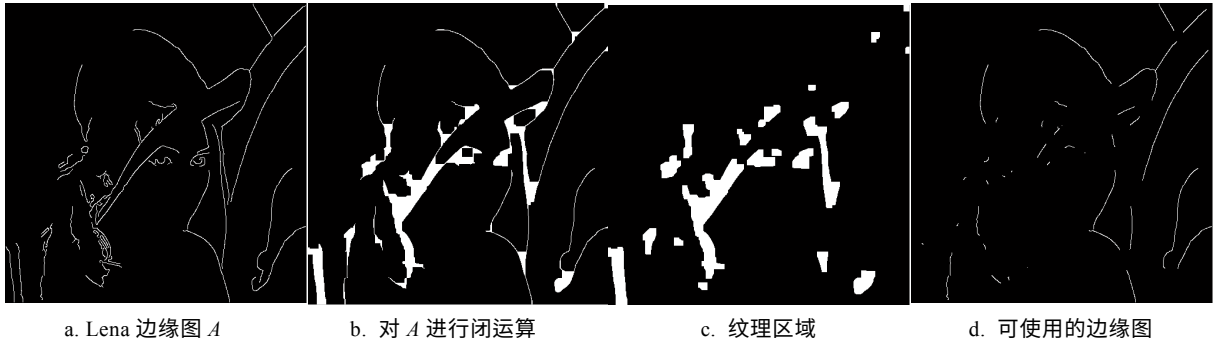


图 4 Lena 图像边缘检测及处理

2.2 沿梯度方向路径曲线的选取及数据处理

图像 f 的梯度定义为向量

$$\nabla f = [G_x, G_y] = \left[\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right].$$

梯度向量的本质是 f 在 (x, y) 处的最大变化率, 向量的幅值为

$$|\nabla f| = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2} = [(\partial f / \partial x)^2 + (\partial f / \partial y)^2]^{1/2};$$

梯度向量的方向角度为 $\alpha(x, y) = \arctan(G_y / G_x)$.

以边界 E 上的各个像素作为边界点并计算其梯度方向, 在梯度图上选取边界点沿梯度方向的相邻像素与梯度反方向的相邻像素作为一组待处理元素, 该组待处理元素排列成的路径我们将其命名为梯度路径曲线.

一条路径曲线能采集到至少 5 个点, 可作出一条粗略的 LSF 曲线. 采用三次样条插值的方法, 以扩充 LSF 曲线的数据点, 参考倾斜刃边法^[13], 经

过大量试验, 确定插值分辨率为 0.02; 找出插值后 LSF 的最大值, LSF 曲线上的每一个数据点都除以最大值, 得到归一化的 LSF 曲线.

找出 LSF 曲线左右两边纵轴为 0.5 (或距离 0.5 最近) 的点, 求出其对应的横坐标 x_1 与 x_2 , 由 x_1 与 x_2 可以求出 LSF 曲线的 FWHM, 即 $\text{FWHM} = \text{abs}(x_2 - x_1)$.

由分析可知, 图像边缘越模糊, 对应的 LSF 越宽, FWHM 也越大; 即在评价图像清晰度时, 质量越差的图像, 评价值越大.

边界 E 上每一个点都能得到一条 LSF 曲线, 以对应 LSF 曲线的 FWHM 作为该点的局部清晰度参数 l , E 上所有点的局部清晰度参数 l 组成集合 T , 即 $T = \{l \mid l = f(e), e \in E\}$; 其中, f 为对边界点求取 LSF 曲线的 FWHM.

对清晰度参数集合 T 进行统计学处理, 可以得到图像整体的清晰度变化情况.

2.3 图像清晰度分析

在轨道固定、对地面目标成像的空间遥感相机,或者一般景深变化不大的拍摄场景中,拍摄下的图像模糊程度是均匀的;当景深较大时,拍摄图像会出现一部分清晰,一部分模糊的状态,图像模糊程度不均匀.图5展示了不同拍摄场景下图像边界点处得到的集合 T 的直方图.

对图5中图像计算得到的集合 T 计算各自均值、众数、方差、三阶矩.均值代表整幅图像的平均清晰度;众数表示图像中出现频次最高的清晰度参数;方差表示图像清晰度变化程度,方差越大,图像中具有不同模糊程度的区域越多;三阶矩是直方图偏斜的测度,度量为0时,直方图是对称的,度量为正值,直方图向右偏斜.

图5a所示为一幅空间遥感图像,遥感相机在固定轨道上对地面成像,地面景物均位于相机焦面处,成像后各部分受成像系统影响,降质均匀,直方图具有明显峰值,且数据集中在峰值附近;方差较小,众数较接近均值.图5b所示为Lena,人物前景清晰,背景较模糊,直方图较分散,前景与背景的信息都较多,但主要信息还是集中在前景人物肖像上.因此,直方图有明显峰值,但拖尾较长;均值相比众数较大,方差较大.图5c所示为景深较小的相机对花成像,景物由近到远逐渐变模糊,直方图分布有明显的2个峰值,拖尾较长,方差较大.图5d所示为LIVE图像库中的一幅图像,直方图较集中,方差较小,均值与众数间相对误差不大.

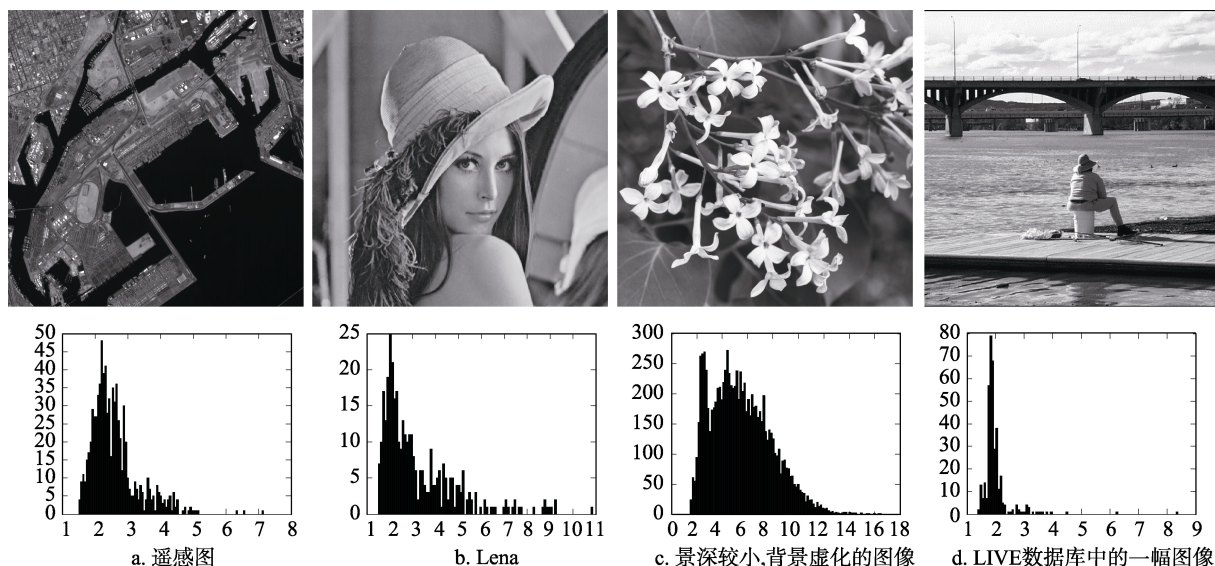


图5 不同场景下的清晰度参数集合 T 对应直方图

增大图像样本,对LIVE数据库^[16]及不同场景下的实际拍摄图像计算边缘清晰度参数集合 T ,由表1可以看出,其直方图具有几个相同特性:1)图像的三阶矩均大于0,直方图向右偏斜;2)所有直方图均近似呈瑞利分布;3)当成像场景在景深范围内时,图像模糊程度变化不大,如遥感图像及部分LIVE数据库中的图像, T 均值与众数间误差较小,方差均小于众数;4)当成像场景范围较大,成像后图像各部分模糊不均匀,在景深范围内的目标景物成像清晰,背景部分成像模糊,此时,均值与众数之间误差较大,方差较大,众数可代表前景目标的清晰度测度,而均值是整幅图像的清晰度评价结果.

综上,以均值或众数作为图像前景的清晰度评价值是可行的;同时,方差作为衡量图像模糊程度变化情况的测度,方差越大,图像模糊越不均匀.

表1 图5中各图 T 的统计结果

统计量	图编号			
	5a	5b	5c	5d
均值	2.594	3.269	5.473	2.014
众数	2.140	2.340	2.460	1.780
方差	0.520	2.792	5.554	0.331
三阶矩	0.658	7.815	8.049	1.133

判断众数与方差之间的关系,当方差与众数之比小于1时,该图像清晰度参数均集中在众数附近,可近似认为图像是均匀模糊的,并以均值作为

图像的整体清晰度评价结果; 否则, 该图像包含多个具有不同模糊程度的区域, 在提取边缘时, 由于模糊程度较大的部分其梯度值较小, 在一定程度上, 边缘检测的过程会将模糊程度较大的背景信息过滤。因此, 前景部分的信息总是要比背景信息要多, 可将众数作为前景区域的清晰度评价参数。以此方法得到的清晰度评价参数命名为(sharpness assessment based on LSF, SABL)。

3 实验及数据处理

3.1 模糊度与评价函数关系分析

图 6 所示为从 IVC 数据库^[17]中选取一幅未降质的图像, 对其使用不同程度的高斯模糊, 再采用不同的评价函数对模糊后的图像进行评价。



图 6 待测试未降质图像

选择信息熵(entropy, EN)、灰度平均梯度(gray mean gradient, GMG)、拉普拉斯能量(energy of Laplacian, EOL)及 Wang 等^[10]的方法和 Marziliano 等^[11-12]的方法(no-reference edge-based blur measurement, NEBM)与本文方法(SABL)作对比。由于前 4 种评价函数在模糊程度大、图像质量差的情况下, 评价参数越小; 而本文方法评价结果随着模糊程度增大, 图像质量越差, 参数越大。为了使不同方法的评价结果具有一致性, 在进行评估时, NEBM 与 SABL 取倒数, 每种评价结果都以各自对原始图像的评价为标准进行归一化。各种评价函数在不同模糊下的评价结果如图 7 所示, 由图可

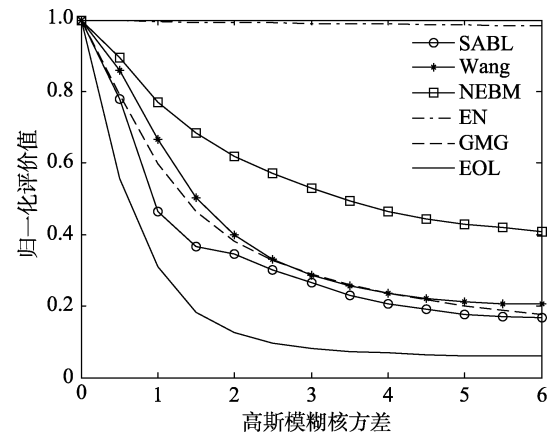


图 7 模糊度与评价函数结果对比

见, 随着图像模糊程度增大, EN 变化非常缓慢, 几乎是一条水平的直线, 并不能评价图像的清晰度变化程度; EOL 在高斯核的方差大于 2 之后, 评价结果变化缓慢, 对模糊程度大的图像评价不敏感; GMG, Wang, NEBM 及 SABL 的评价结果均随图像质量降低而减小, 具有良好的单调性, 对不同程度模糊下的图像评价结果良好。

3.2 不同图像下评价函数稳定性分析

选取 LIVE 图像数据库^[16]中的 10 幅未退化图像, 即 DMOS 值为 0 的图像作为原始图像, 图像编号为 a~j, 各幅图像的边缘清晰度集合 T 统计计算结果如表 2 所示, 由表 2 可见, 均值在 2.0 附近, 众数在 1.9 附近, 方差远小于众数, 可认为该组图像模糊分布是均匀的, 三阶矩均大于 0, 直方图向右偏斜。

对第 1~10 幅编号为 a~j 的图像分别使用方差逐渐增大的高斯模糊核处理, 模糊后的图像如图 8 所示。

从评价结果表 3 可以看出, 图 8 中 a~j 的图像, 评价函数 EN, GMG, EOL 评价结果混乱, 均不能给出良好的评价结果。这是由于这些方法均受到图像本身信息量的影响, 无法客观描述不同图像的清晰度变化。NEBM 在模糊程度较小时能得到较好的无参考评价结果, 但是总体评价结果较混乱, 评价结果并不稳定。Wang 等^[10]与 SABL 可以评价不同图像受到的模糊程度, 但是 Wang 等^[10]的方法不

表 2 10 幅图像边缘清晰度集合 T 的统计结果

统计量	图编号									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
均值	2.033	1.986	1.953	2.112	2.005	2.036	2.021	2.014	1.818	2.046
众数	1.940	1.820	1.880	1.860	1.720	1.860	1.980	1.780	1.520	1.960
方差	0.191	0.227	0.135	0.281	0.197	0.155	0.208	0.331	0.104	0.248
三阶矩	0.269	0.532	0.124	0.627	0.210	0.152	0.290	1.133	0.088	0.438

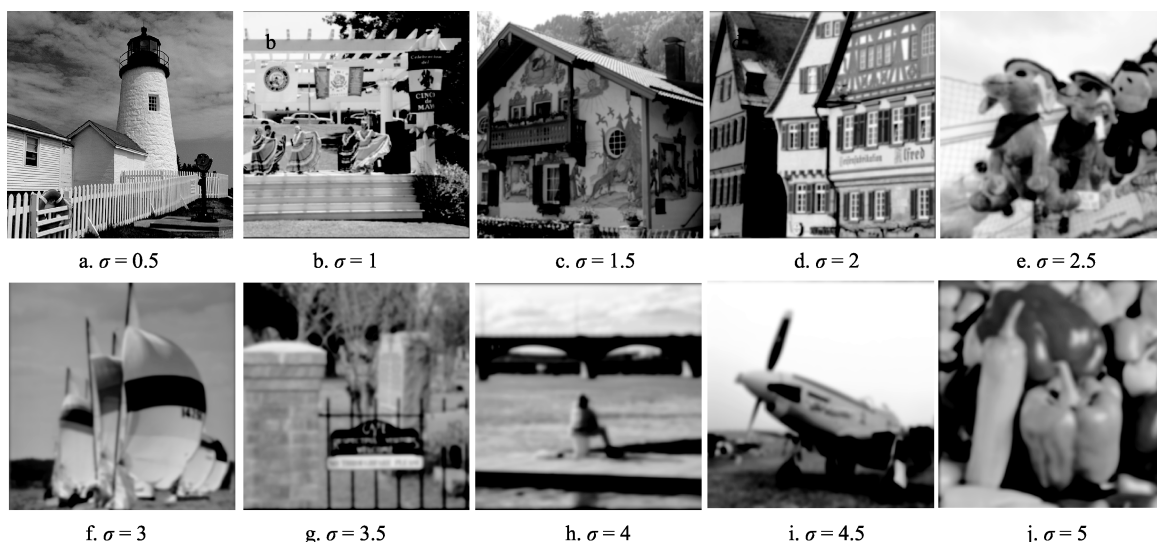


图 8 算法稳定性分析

表 3 图 8 中不同图像下清晰度评价方法稳定性分析

评价方法	图编号									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
EN	4.646	5.349	4.932	5.277	5.188	4.903	5.162	5.410	4.388	5.264
GMG	0.030	0.067	0.045	0.073	0.044	0.025	0.063	0.051	0.023	0.028
EOL	0.129	0.347	0.242	0.413	0.197	0.132	0.300	0.274	0.120	0.141
Wang	91.041	84.710	53.404	46.871	35.531	31.063	30.738	33.002	22.043	21.035
NEBM	3.685	4.994	5.645	6.483	8.055	7.110	6.945	9.178	9.343	9.548
SABL	2.195	2.410	5.136	5.994	6.730	7.476	8.575	10.210	10.934	11.992

够稳定, 对第 h 图的评价结果不准确. 因此, 本文方法真正实现了无参考的图像清晰度质量评价, 可以对任意一幅图像进行单独评价, 数值越大, 模糊程度越高, 图像清晰度越低, 具有较好的稳定性.

3.3 算法的抗噪声性能

图像的清晰度与噪声是评价图像质量的 2 个独立指标, 一方的评价结果不应受到另一方的影响; 因此, 清晰度评价的结果应具有一定的抗噪声性能. 本文从 IVC 数据库中选择一幅已模糊的图像, 并对其加入不同大小的高斯噪声, 噪声方差为 σ^2 , 以图像最大灰度值 $I_{\max}$ 作为图像信号, 计算图像信噪比(signal to noise ratio, SNR)^[18]

$$\text{SNR} = 10 \times \lg \left(\frac{I_{\max}^2}{\sigma^2} \right).$$

比较不同的清晰度评价函数在同一幅图像受到不同噪声污染时的评价结果. 为了方便比较, 使用本文方法与 NEBM 评价时取倒数, 以每一种评价函数对 SNR=60dB 时的评价结果为标准进行归一化, 结果如图 9 所示.

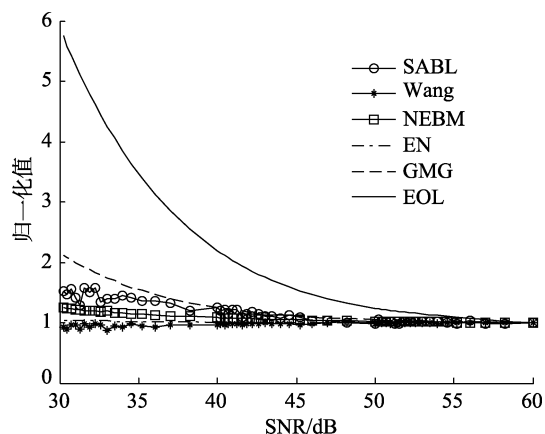


图 9 不同评价方法抗噪声性能分析

由图 9 可以看出, 随着信噪比增大, 评价结果趋于平缓. EOL 与 GMG 在信噪比低的区域, 即噪声污染严重的区域, 评价结果偏大, 受噪声影响明显, EN, Wang 等^[10], NEBM, SABL 受噪声影响不大, 清晰度评价结果几乎不随信噪比变化而发生变化, SABL 具有良好的抗噪声性能.

3.4 清晰度评价在实际离焦图像中的应用

使用本课题组研制的可调焦相机拍摄 bmp

格式的图像, 图像的大小为 576×768 . 在拍照过程中调节镜头焦距, 使获取的图像从离焦状态逐渐调节到聚焦状态, 再从聚焦状态逐渐调节到离焦状态, 得到 26 幅不同清晰度的图像, 使用不同的评价函数评价这一组图像. 图 10 所示为 26 幅图像中的 4 幅典型状态, 分别为第 1, 4, 8, 11 幅图; 其中, 第 11 幅为相机对焦时拍摄的图像.

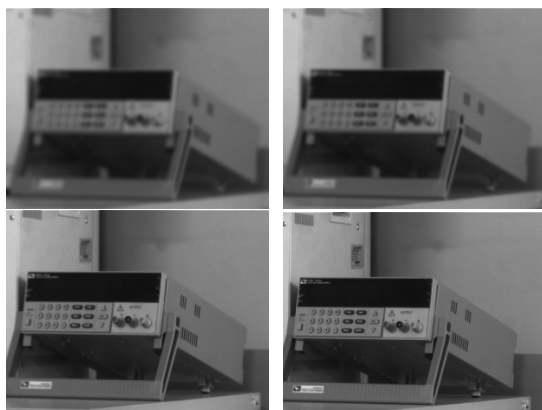


图 10 典型离焦图像

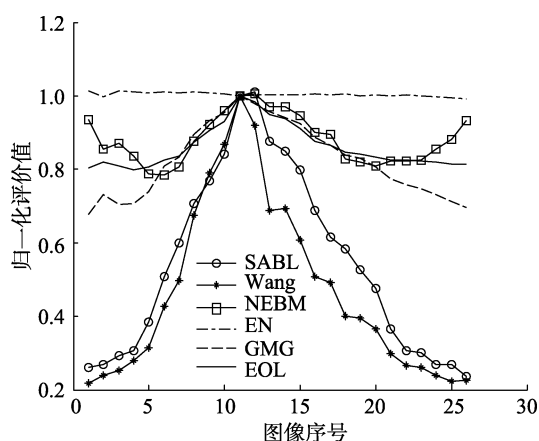


图 11 6 种清晰度评价方法对比图

从图 11 中不同评价函数得到的结果可以看出: 与其他方法相比, 本文评价函数 SABL 与 Wang 等^[10]的方法在离焦-聚焦整个范围内都具有较大的斜率, 单调性良好, 且动态范围与值域均较大, 有较高灵敏度, 能够较好地捕捉图像清晰度的变化. 但在图像从聚焦到离焦的阶段, Wang 等^[10]的方法评价结果并不平稳, 对第 13 和 14 幅图的评价不准确; 而本文方法的评价效果明显优于其他几种评价函数.

3.5 自然场景中的清晰度评价

在景深较大的自然拍摄场景中, 通常会出现前景清晰、背景虚化的问题, 使用本文方法来评价此种情况下图像的清晰度.

图 12 所示为离焦量相同, 调节 F 数后拍摄的自然场景图像, 其中图 12a 所示全部景物都在景深范围内, 图 12b 中, 条纹花盆前景为聚焦位置, 背景为小花盆和显示器.



a. 景物在景深范围内 b. 前景聚焦

图 12 背景逐渐模糊的自然图像

从表 4 所示评价结果可以看出, 当景物在景深范围内时, 背景与前景清晰度相近, 均值与众数较接近; 当减小 F 数, 使背景虚化后, 均值增大, 方差增大, 但在前景已对焦时, 表示前景清晰度的参数-众数并未发生较大改变. 在此实验中, 以众数作为图像前景清晰度是可行的.

表 4 自然场景中清晰度评价

统计量	图 12a	图 12b
均值	2.686	4.756
众数	2.100	2.140
方差	1.436	8.384

4 结 语

清晰度是衡量图像质量的一个重要指标. 通过分析图像的退化过程, 提出了一种计算图像清晰度的方法, 提取边缘点的线扩散函数, 并以其 FWHM 组成参数集合, 通过对集合进行统计学处理, 以均值或众数作为最终的清晰度评价参数. 从模糊度与清晰度关系分析算法的稳定性与抗噪声能力, 对实际拍摄图像的清晰度评价几个方面对比了本文方法与其他不同评价函数之间的差异. 实验表明, 随着模糊度增加, 本文方法评价结果随之变化, 具有良好的单调性; 在对受到不同程度模糊的不同图像清晰度评价时, 本文方法与 Wang 等^[10]的方法不受图像本身信息量的影响, 能够计算各种模糊程度下的图像清晰度; 但 Wang 等^[10]的方法稳定性较差, 本文方法的计算结果随高斯模糊核的增大而增大, 实现了无参考的图像清晰度评价. 在抗噪声性能方面, 对于同一幅降质图像加入不同程度的噪声, 并采用不同的评价函数进行清晰度评价, 结果表明, 本文方法与 Wang 等^[10], NEBM,

EN 均有良好的抗噪声性能, 清晰度评价结果几乎不受噪声影响. 对实拍离焦图像评价, 本文评价方法相对于其他方法具有准确性高、单调性好、值域与动态范围广的优点; 当场景中存在模糊不均匀的区域时, 以众数作为前景的清晰度参数.

本文方法的评价结果与高斯模糊核的大小存在一定关系, 因此, 在未来的研究过程中, 可以继续探讨评价结果与高斯核的具体关系, 使评价结果更准确.

参考文献(References):

- [1] Hong Yuzhen, Ren Guoqiang, Sun Jian. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3401-3408(in Chinese)
(洪裕珍, 任国强, 孙健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3401-3408)
- [2] Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai, *et al.* Digital image sharpness evaluation function[J]. ACTA Photonica Sinica, 2002, 31(6): 736-738(in Chinese)
(李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图像清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, 31(6): 736-738)
- [3] Chen Fang, Zhang Cunji, Han Yanxiang, *et al.* Fast focus on simple images[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 220-227(in Chinese)
(陈芳, 张存继, 韩延祥, 等. 简单图像的快速聚焦[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 220-227)
- [4] Tong Yubing, Hu Weiwei, Yang Dongkai, *et al.* A review on the video quality assessment methods[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(5): 735-741(in Chinese)
(佟雨兵, 胡薇薇, 杨东凯, 等. 视频质量评价方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(5): 735-741)
- [5] Chen Liang, Li Weijun, Chen Chen, *et al.* Efficiency contrast of digital image definition functions for general evaluation[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(14): 152-155(in Chinese)
(陈亮, 李卫军, 谌琛, 等. 数字图像清晰度评价函数的通用评价能力研究[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(14): 152-155)
- [6] Huang Huijuan, Yu Jing, Sun Weidong. A no-reference SVD-based image quality assessment method for super-resolution reconstruction[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(9): 1204-1210(in Chinese)
(黄慧娟, 禹晶, 孙卫东. 基于 SVD 的超分辨率重建图像质量无参考评价方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(9): 1204-1210)
- [7] Liu Xuechao, Wu Zhiyong, Huang Detian, *et al.* No-reference image quality assessment combined with natural scene statistics and spatial transformation[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2015, 27(2): 249-255(in Chinese)
(刘雪超, 吴志勇, 黄德天, 等. 结合自然图像统计和空域变换的无参考图像质量评价[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(2): 249-255)
- [8] 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
- [9] Mittal A, Soundararajan R, Bovik A C. Making a “completely blind” image quality analyzer[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(3): 209-212
- [10] Wang X, Tian B F, Liang C, *et al.* Blind image quality assessment for measuring image blur[C] //Proceedings of Congress on Image and Signal Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2008, 1: 467-470
- [11] Marziliano P, Dufaux F, Winkler S, *et al.* Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000[J]. Signal Processing: Image Communication, 2004, 19(2): 163-172
- [12] Marziliano P, Dufaux F, Winkler S, *et al.* A no-reference perceptual blur metric[C] //Proceedings of the International Conference on Image Processing. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002, 3: 57-60
- [13] Hwang H, Choi Y W, Kwak S, *et al.* MTF assessment of high resolution satellite images using ISO 12233 slanted-edge method[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2008, 7109: 710-905
- [14] Li Tiecheng, Tao Xiaoping, Feng Huajun, *et al.* Modulation transfer function calculation and image restoration based on slanted-edge method[J]. ACTA Optica Sinica, 2010, 30(10): 2891-2897(in Chinese)
(李铁成, 陶小平, 冯华君, 等. 基于倾斜刃边法的调制传递函数计算及图像复原[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2891-2897)
- [15] Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguang, *et al.* A precise method to measure the on-orbit point spread function of remote sensors[J]. Acta Gerdaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(3): 284-289(in Chinese)
(郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 遥感相机在轨点扩散函数高精度测量方法[J]. 测绘学报, 2014, 43(3): 284-289)
- [16] Sheikh H R., Sabir M F., Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference quality assessment algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3440-3451
- [17] Ninassi A, Callet P L, Atrousseau F. Pseudo no reference image quality metric using perceptual data hiding[C] //Proceedings of SPIE. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Press, 2006, 6057: 60570G
- [18] Zou Mouyan. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001(in Chinese)
(邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001)