一种覆盖范围可调的变频梯度自动对焦评价函数

王烨茹,冯华君,徐之海,李 奇,陈跃庭

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室,浙江 杭州 310027)

摘 要:针对传统调焦函数对噪声敏感和调焦范围小从而影响自动对焦准确性的问题,提出了一种基于变频梯度的自动对焦评价函数。解决了由于离焦量过大而引起的评价函数调焦范围小的问题,通过改变采样频率实现了评价函数调焦范围的可调性。其中,评价函数采用了带有阈值选取的梯度绝对值算子,提高了评价函数的抗噪性,降低了时间复杂度。分别利用仿真实验和实拍实验对该方法进行验证,实验表明:采用不同采样频率的梯度算子能够兼顾调焦范围广以及灵敏度高的两种特性,并与现有的对焦评价函数进行了比较,通过量化指标说明了该评价函数的运算速度较现有评价函数有较大的提升,证明了所提出方法抗噪性与实时性更好、灵敏度更高、调焦范围可调,同时能够准确评价离焦图像清晰度。

关键词:自动对焦; 梯度算子; 评价函数; 调焦范围

中图分类号:TP391 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.1028001

An adjustable coverage range autofocus evaluation function using gradient operator with variable frequency

Wang Yeru, Feng Huajun, Xu Zhihai, Li Qi, Chen Yueting

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the existing automatic focusing systems, the traditional evaluation functions are sensitive to noise and have small focusing range which will affect the accuracy of the auto-focusing results. An autofocus evaluation function based on gradient operator with variable frequency was proposed. It solved the problem that the coverage of the evaluation functions is small when the fuzzy degree is larger by sampling frequency reducing method in the image space. As mentioned above, an absolute value gradient operator with threshold value selection was adopted, which not only improved the noise resistance but also reduced the complexity. Then, the simulation experiments and actual tests were carried out to validate the satisfactory performance of the method. The experimental results indicate that it can meet the characteristics of wide focusing range and high sensitivity at the same time when the gradient operator with different sampling frequencies was used and then compared with the existing traditional methods. The quantitative indicators were used to illustrate that the calculation speed of the evaluation function were improved a lot compared with the existing evaluation function. The autofocus evaluation function

收稿日期:2016-02-03; **修订日期**:2016-03-10

基金项目:国家自然科学基金(61475135)

作者简介:王烨茹(1990-),女,博士生,主要从事图像处理方面的研究。Email:wyrlm@zju.edu.cn

导师简介:冯华君(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事光学成像系统和遥感等方面的研究。Email:fenghj@zju.edu.cn

proposed was demonstrated has better anti-noise performance and has variable focusing range with high sensitivity and high real-time, which can evaluate the sharpness degree of the images in the process of automatic focus accurately.

Key words: autofocus; gradient operator; evaluation function; focusing range

0 引 言

目前,基于数字图像处理的自动对焦方法[1]三个重要的核心问题分别为:对焦窗口的选择,对焦评价函数的选择,以及对焦搜索策略的选取。其中,选择性能良好的评价函数尤为重要。针对评价函数方面,已有很多学者专门研究了各种不同的清晰度评价函数,并指出了各种函数的优劣[2-5]。目前评价函数最常用的有基于梯度信息的函数[6]、频谱函数[7]以及熵函数[8]等。其中应用最为广泛的是基于梯度信息的评价函数,比如 Tenengrad 函数,能量梯度函数,Brenner 函数,方差函数,拉普拉斯函数等等。理想的对焦评价函数应该具有无偏性、单峰性、灵敏性、稳定性,当步进电机的调焦范围比较大即模糊量比较大时,还应该具有调焦范围广的性质。但普通梯度函数不仅对噪声敏感,而且峰顶宽度相对较窄,调焦范围比较小[9],仅限于模糊量比较小的情况,当模糊量略大时,图像的边缘的弥散情况就比较大,对应在对焦评价函数中则体现为曲线过于平缓,无法确定步进电机应该前进的方向,从而导致对焦失误。文中提出了一种基于变频梯度算子的评价函数,提高了算法的抗噪性,实现了根据系统离焦程度选择采样频率得到不同调焦范围评价函数的功能,从而有效地解决了灵敏性和调焦范围两个性质之间的矛盾。

1 传统的梯度评价函数

Ng Kuang Chern 等人的研究结果[10]表明,对于正常光照条件下所拍摄的图像,常用的评价函数都呈现出单峰特性,只是在聚焦速度与准确度上略有不同,基本上可实现正确聚焦。在图像处理中,梯度函数常被用来做边缘信息的提取。对于对焦良好的图像,即具有更尖锐的边缘图像,应该有更大的梯度函数值。目前常用的梯度函数有 Tenengrad 函数、能量梯度函数、Brenner 函数、拉普拉斯算子等。Tenengrad 函数利用 Sobel 算子来估计水平方向和垂直方向的梯度值,为使图像边缘的梯度放大,对梯度进行平方运算。评价函数 $f(I)$ 定义为梯度的平方和,表达式为:

$$f(I)=\sum_i\sum_j[S(i,j)]^2 \quad S(i,j)>T \tag{1}$$

式中:$S(i,j)$ 为像素 (i,j) 与 Sobel 算子的卷积,表达式如下:

$$S(i,j)=\sqrt{G_i^2(i,j)+G_j^2(i,j)} \tag{2}$$

引入阈值 T 用以调节评价函数的灵敏度。能量梯度函数用相邻点的差分计算一个点的梯度值,此时

$$f(I)=\sum_i\sum_j[I(i+1,j)-I(i,j)]^2+[I(i,j+1)-I(i,j)]^2 \tag{3}$$

式中:$I(i,j)$ 为图像在像素 (i,j) 的灰度值。Brenner 函数是最简单的与梯度有关的评价函数,又称为梯度滤波器法,它只对相差两个单元的两个像元灰级差进行平方。如下式所示:

$$f(I)=\sum_i\sum_j[I(i+2,j)-I(i,j)]^2 \tag{4}$$

2 变频梯度评价函数

2.1 梯度绝对值算子

自动对焦过程受到成像器件和周围环境的干扰,会引入噪声,从而影响图像质量,给图像质量评价带来困难,需要进行噪声分析从而确定噪声。同时,合理地利用相邻像素之间的差异可以很好地反映图像的这一性质,文中提出了一种梯度绝对值算子。

$$f(I)=\sum_i\sum_j T(i,j) \quad (T(i,j)>t) \tag{5}$$

$$T(i,j)=|I(i+1,j)-I(i,j)|+|I(i,j+1)-I(i,j)| \tag{6}$$

该算子用绝对值替代了能量梯度函数中的平方,提高了运算效率,并引入灰度阈值 t,提高了抗噪性。

文中利用相机分别拍摄了不同光照下的均匀白纸和白墙的八组实验,并对图像中每个像素所对应的 $T(i,j)$ 的值进行分析与统计,以图 1 所给出的梯度分布图为例,每组实验分别用不同颜色的条形图表

示,横坐标表示对焦窗口中像素点的灰度梯度值 T, $T\in\{0,1,2,\cdots,8\}$, 纵坐标表示该梯度值所对应的像素个数,这里对焦窗口任意选取图像的 200 pixel×200 pixel 的区域。通过统计发现 $T(i,j)$的值均分布在 6 以下。基于以上实验结论,为排除噪声干扰,认为 $T(i,j)\leqslant 6$ 是由噪声引起的,因此公式(5)中的噪声阈值 t 为 6。

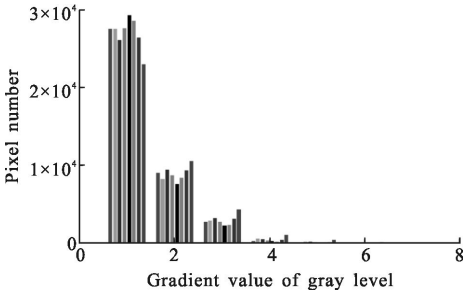

图 1 噪声梯度分析

Fig.1 Analysis noise gradient

2.2 变频梯度函数

由于现有的梯度算子都是处理相邻像素或单个像素之间的关系,而一旦模糊量较大,相邻像素的差异则被弱化, 只凭借相邻像素之间的差异不足以表现出图像的模糊程度,当离焦量过大时,函数曲线过于平滑无法有效地比较其评价函数值。根据成像模型,准焦时物方的物点对应于像方的一个像点, 离焦量越大像方像素点退化成的圆盘弥散斑也越大。因此,文中针对离焦量较大的情况, 在像方采用降低采样频率的方式,将弥散了的像素块作为 2.1 节中提出的像素点来处理, 解决了模糊量过大时评价函数调焦范围小的问题。

任意选取图像中的 $K\times K$ 像素数的对焦窗口,记为 C,图 2 以对焦窗口大小为 200×200 为例,即 $K=200$,图 2(a)表示选取框位于对焦窗口左上角并以其第一个像素 $C_{(1,1)}$为起点,从左上角起用 $N\times N$ 的像素框去构建一个小图像块, 选取框左上角第一个像素即为 $C_{(1,1)}$所在位置。并计算这一小块的平均灰度值 $C_{(1,1)}$,用公式表示为:

$$C_{(1,1)}=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}I_{i,j}}{N\times N} \tag{7}$$

将选取框分别移动至 $C_{(1,1)}$块的右侧和下侧,同样取 $N\times N$ 的像素块记为 $R_{(1,1)}$和 $D_{(1,1)}$,二者的灰度值采用如下公式计算:

$$R_{(1,1)}=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}I_{i,j}}{N\times N} \tag{8}$$

$$D_{(1,1)}=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{N}I_{i,j}}{N\times N} \tag{9}$$

得到 $C_{(1,1)}$、$R_{(1,1)}$、$D_{(1,1)}$后,计算第一块与其右侧一块平均灰度值之差的绝对值以及与下侧一块平均灰度值之差的绝对值,并将两差值求和,如 2.1 节中的公式(5),把每块的平均值当作公式(5)中的单个像素,如下式:

$$T_{(1,1)}=|R_{(1,1)}-C_{(1,1)}|+|D_{(1,1)}-C_{(1,1)}| \tag{10}$$

式中:$T_{(1,1)}$即为第一块的梯度值。

将选取框右移一个像素,如图 2(b)所示,使其左上角移至 $C_{(2,1)}$,用同样方法求出这一块的梯度值 $T_{(2,1)}$。重复上述过程,遍历第一行的像素,直到当前块第一个像素为 $C_{(1,K-2N+1)}$,此时转到第二行第一列的像素,用同样方法计算出梯度值 $T_{(1,K-2N+1)}$。不断用上述方法移动选取框,图 2(c)则为选取框移动至对焦窗口中间部分的示意图,直至取完第$(K-2N+1)$行,即算到第一个像素为 $C_{(K-2N+1,K-2N+1)}$为止,如图 2(d)所示。

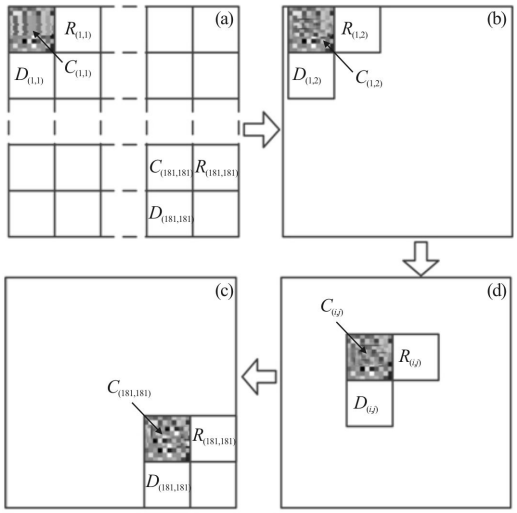

图 2 采样间隔为 N 的变频梯度算子示意图

Fig.2 Diagram of gradient operator with sampling interval of frequency N

最后将已求所有块的梯度值 $T_{(i,j)}$累加求和,得到最终评价值 F,如下式:

$$F=\sum_{j=1}^{K-2N+1}\sum_{i=1}^{K-2N+1}T_{(i,j)} \tag{11}$$

这里 N 的具体大小根据系统的模糊量而定,模糊量越大,选取更大的 N 值,因此,避免了模糊量很大时清晰度评价函数值趋于相近的情况出现,图 3(d)给出了用变频梯度算子(N=8)处理同样一组仿真离焦序列图所得到的评价函数曲线,与图 3(a)~(c)相比较,尤其是离焦量较大的时候曲线的区别更加明显,满足了对焦评价函数调焦范围广的性质。

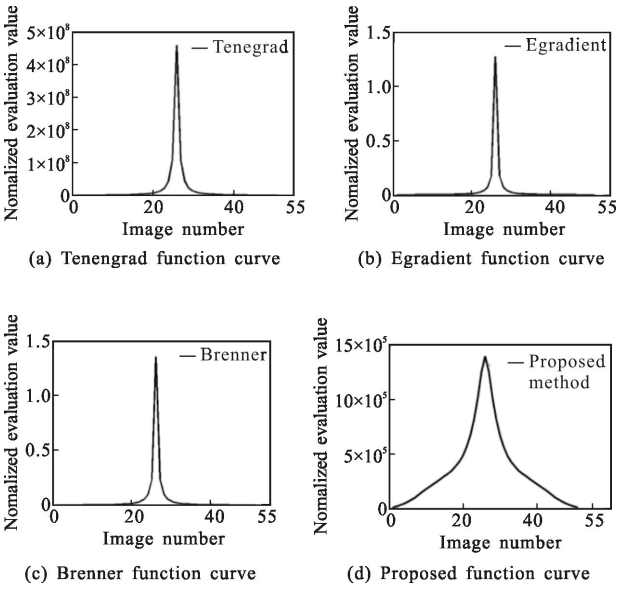

图 3 不同评价算子的评价函数曲线

Fig.3 Evaluation function curves of different evaluation operators

3 实验结果与分析

为了验证文中算子抗噪性和调焦范围可调的性质,分别利用上述的 Tenengrad 函数、能量梯度函数、Brenner 函数、熵函数与文中算子进行比较,并用不同采样频率 N 进行了仿真实验,证明了文中算子的抗噪性更强和调焦范围可调的特点,同时通过实拍实验证明了文中算子的有效性。

3.1 抗噪性分析

文中采用圆盘模糊对 200×200 像素的 Lena 图像进行处理,以 r=4 作为模糊圆的半径,向两侧依次增加图片的模糊量,从而得到 51 张从模糊到清晰再到模糊的离焦序列图像,按离焦-聚焦-离焦顺序排列,以此模拟对焦过程中电机处于不同位置所得的图片,如图 4 所示。

图 4 Lena 离焦序列图

Fig.4 Defocus sequence diagram of Lena

对上述 Lena 离焦图像序列加入均值为 0、方差为 0.005 的高斯噪声,得到带噪声的 Lena 离焦图像序列。图 5(a)为加入高斯噪声的准焦图,图 5(b)为准焦噪声图的对焦窗口区域。图 5(c)给出了对上述带噪声的 Lena 离焦图像序列分别采用上述评价函数计算的归一化结果。为了保证视图效果,此处仅给出了 N=4 的变频梯度算子的评价曲线。通过分析图 5 可以看出 Tenengrad 函数、Egradient 函数和 Brenner 函数的抗噪声性能稍差,出现了波动,影响了曲线的稳定性,而文中提出的梯度算子抗噪声性能较强。

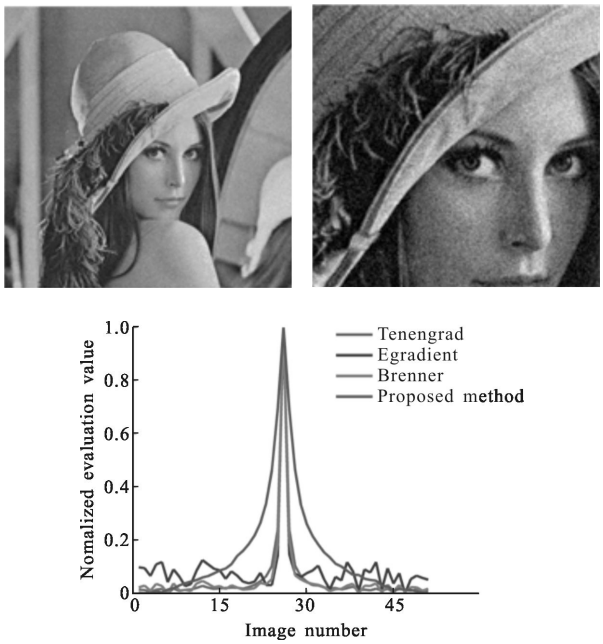

图 5 几种评价函数抗噪性能比较

Fig.5 Anti-noise performance comparison of several evaluation functions

3.2 运算速度分析

为考察各评价函数的运算速度,在一台 AMD Athlon(tm) II X4 Quad Core 2.79 GHz、内存为 6 Gb 内存的 PC 机上利用 MATLAB 进行了实验,分别测得上述各种评价函数的运行时间。表 1 给出了以

Lena 图像中心 200×200 像素区域仿真离焦序列图像进行 10 次实验的平均耗时。结果表明:变频梯度算子具有最优的速度性能，对于单帧图像的平均处理速度有很大提升,有利于实现自动对焦的实时性。

表 1 处理一个对焦窗口图像平均耗时比较 (单位:ms)

Tab.1 Comparison of average time consuming for processing an image in focus window (Unit: ms)

Evaluation function	Tenengrad	Egradient	Brenner	Proposed method
Average time consumption/s	310.79	10.56	4.85	3.55

3.3 变频梯度算子的调焦范围分析

文中采用不同采样频率 N=1,4,8,16 的梯度算子计算得到仿真离焦序列评价函数曲线，如图 6 所示。分析可知:随着采样频率的降低评价函数的灵敏度降低,但是调焦范围变大,因此,在实际的对焦系统中,可以通过转换 N 的值,当搜索范围较大时使用较低的采样频率,使评价函数调焦范围足够大,随着搜索范围逐渐缩小转换采样频率，调焦范围变小的同时灵敏度逐渐提高,直至搜索至准焦位置附近,采用最高采样频率即灵敏度最高即 N=1 的评价算子作为评价函数,保证了自动对焦的准确性和实时性。

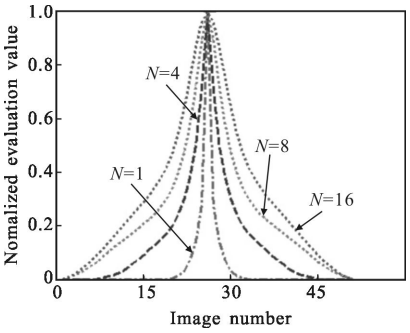

图 6 不同频率梯度算子对 Lena 离焦序列图的评价曲线

Fig.6 Evaluation curve of different frequency gradient operators for Lena defocus sequence diagram

同时比较了几种算子的调焦范围，图 7 给出了对 Lena 序列图的归一化评价函数曲线。

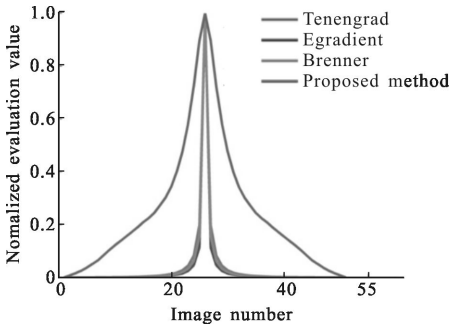

图 7 仿真序列图的几种评价函数归一化曲线

Fig.7 Normalized evaluation function curves of simulation sequence diagram

3.4 实拍实验

文中对室外实拍图片进行了大量实验，以拍摄花坛为例。准焦图片和所选对焦窗口如图 8(a)、(b)所示,图 8(c)给出了上述几种评价函数的归一化评价曲线。从图 8(c)可以看出:三种现有评价函数调焦范围过小,容易误判甚至对焦失败,而文中算子的调焦范围足够广,可以为调焦提供更可靠的依据。同时,针对上述实拍景物,图 8(d)分别给出不同采样频率算子得到的对焦评价函数曲线,对于实拍景物,文中提出算法的稳定性仍然较高。同时,N=1 的梯度算子

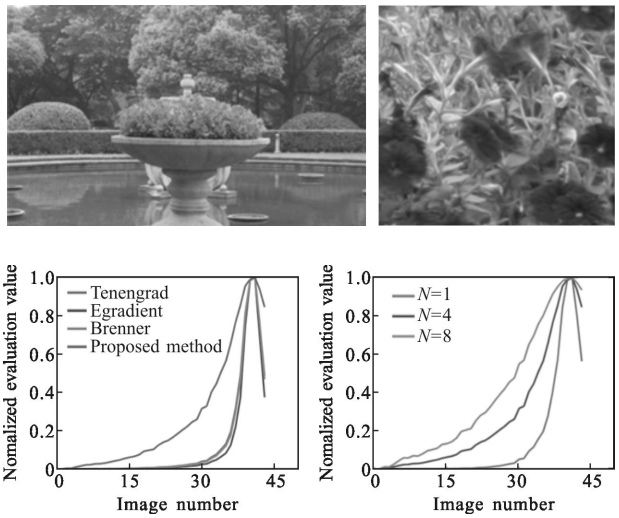

图 8 实拍场景及评价函数归一化曲线

Fig.8 Real shotted scene and the normalized evaluation function

采样频率最高,灵敏度最高,但调焦范围太小,无法直接用于搜索准焦位置,N 值增加，采样频率降低,调焦范围逐渐增大,灵敏度降低。因此,可以利用转换采样频率的方式进行搜索,当离焦量较大时,采用

低采样频率算子作为评价函数，并结合较大步长进行搜索;随着搜索范围的缩小提高采样频率,灵敏度提高,同时结合小步长搜索逼近准焦位置,保证了自动对焦的准确性。

4 结 论

自动调焦具有广泛的应用价值,文中改进了能量梯度函数,提出了一种带有阈值选取的梯度绝对值算子,并提出了一种变频率的梯度算子,分别用仿真图和实拍图进行了实验并与其他算法比较,证明所提出的算子具有较高的抗噪声性、实时性以及灵敏性并且适用于实拍场景。当离焦量较大时,采用较低的采样频率即可避免评价函数过于平坦、不易区分的问题。并通过转换采样频率即可解决传统自动对焦评价算子在调焦范围和灵敏度之间的矛盾。可以作为评价图像质量的重要判据用于实际的自动对焦系统中。

参考文献:

[1] Feng Huajun, Mao Bangfu, Li qi, et al. An auto-focusing system used for digital imaging [J]. ***Opto Electronic Engineering***, 2004, 31(10): 69-72. (in Chinese)
冯华君, 毛邦福, 李奇, 等. 一种用于数字成像的自动对焦系统 [J]. 光电工程, 2004, 31(10): 69-72.

[2] Zhu Kongfeng, Jiang Wei, Wang Duanfang, et al. New kind of clarity-evaluation-function of image [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2005, 34(4): 464-468. (in Chinese)
朱孔凤, 姜威, 王端芳, 等. 一种新的图像清晰度评价函数 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 464-468.

[3] Groen F C A, Young I T, Ligthart G. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. ***Cytometry***, 1985, 6(2): 81-91.

[4] Mo Chunhong, Liu Bo, Ding Lu, et al. A gradient threshold auto-focus algorithm [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(1): 323-327. (in Chinese)
莫春红, 刘波, 丁璐, 等. 一种梯度阈值自动调焦算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 323-327.

[5] Li Qi. Studies on the theory and implementation method of digital autofocus technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
李奇. 数字自动对焦技术的理论及实现方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[6] Xu Guili, Liu Xiaoxia, Tian Yupeng, et al. Image clarity-evaluation-function method [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2009, 38(1): 181-184. (in Chinese)
徐贵力, 刘小霞, 田裕鹏, 等. 一种图像清晰度评价方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 181-184.

[7] 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.

[8] Kang Zongming, Zhang Li, Xie Pan. Implementation of an automation focusing algorithm based on spatial high frequency energy and entropy [J]. ***Acta Electronica Sinica***, 2003, 31(4): 552-555. (in Chinese)
康宗明, 张利, 谢攀. 一种基于能量和熵的自动聚焦算法 [J]. 电子学报, 2003, 31(4): 552-555.

[9] Zhao Hui, Bao Getang, Tao Wei. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2004, 12(5):531-536. (in Chinese)
赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(5): 531-536.

[10] Marichal X, Ma W, Zhang H J. Practical issues in pixel-based auto focusing for Machine Vision [C]//IEEE Int Conf Image Processing, 1999, 2: 386-390.