

文章编号: 0253-2239(2007)12-2150-5

# 多分辨力分析在自动聚焦算法抗噪声性能中的应用\*

张 乐 姜 威

(山东大学信息科学与工程学院, 济南 250100)

**摘要:** 自动聚焦是数码设备、计算机视觉中的一项关键技术。自动聚焦过程中,聚焦的准确性和抗噪声性能至关重要。以高频分量作为度量的聚集评价函数具有灵敏度高、聚焦准确的优点,适用于实时系统,但是对噪声十分敏感,受噪声污染时可能导致聚焦失败。因此,提出了一种具有噪声稳健性的高频分量自动聚焦评价函数。该函数通过小波多分辨力分析提取高频分量,利用了信号的每个子带的小波系数存在一定相关性,而噪声不存在这样的相关性的特点,设定高频子带阈值,认为低于阈值的系数是噪声的贡献,大致分离图像信号与噪声信号,从而将其滤除。经过大量的实验,证明提出的方法具有单峰性好、灵敏度高等优点,特别是在抗噪声性能方面有很大提高。

**关键词:** 图像处理; 抗噪声性能; 阈值多分辨力分析; 高频能量; 自动聚焦

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Application of Multi-Resolution Analysis in Anti-Noise Capability of Auto-Focusing Algorithm

Zhang Le Jiang Wei

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250100)

**Abstract:** Auto-focusing is a key technology in digital instruments and computer vision. In the focusing procedure, the focusing accuracy and anti-noise capability is crucial. Evaluation functions which based on high-frequency components have many advantages, such as sensitivity and focusing accuracy. They are suitable for the real-time system, however, they are easily corrupted by noise. Therefore, a new focusing evaluation function with good anti-noise capability has been proposed. Firstly, the proposed function abstracts high-frequency components through wavelet multi-resolution analysis (MRA). Some neighbor correlation exists in each sub-band coefficients, but noise is random, so the noise coefficients have no such correlation. The new function introduces a frequency sub-band threshold, supposing that the component value below than the threshold is noise, then filter it. In this way, noise and image signal could in general be separated. Experiments have proved that the proposed function has a sharp single apex as well as high sensitivity. Furthermore, it is significantly advanced in the anti-noise capability.

**Key words:** image processing; anti-noise capability; multi-resolution analysis; high-frequency energy; auto-focusing

## 1 引 言

自动聚焦技术是数码设备、显微镜和计算机视觉等数字成像系统中的关键技术。主要分为主动式和被动式两种。随着 CCD/CMOS 图像传感器迅速发展,利用数字图像理论对获取的图像进行分析、反馈控制镜头以实现自动聚焦的被动式聚焦方式越来越

受到关注。自动聚焦分为三个模块<sup>[1]</sup>:聚焦区域选择,聚焦评价函数和极点搜索算法。聚焦的过程就是对选择的图像区域进行有参考的质量评价,比较评价函数值给出镜头移动的方向和步长,继而反馈控制直至成像质量最佳。因此,评价函数曲线是否具有尖锐的峰值,是否有窄的波峰宽度,以及是否

\* 山东省自然科学基金(Y2005G08)资助课题。

作者简介: 张 乐(1982—),女,山东济南人,硕士研究生,主要从事图像信息处理方面的研究。

E-mail: stellar-le@163.com

导师简介: 姜 威(1962—),男,山东济南人,教授,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: jwimage@sdu.edu.cn

收稿日期: 2007-01-22; 收到修改稿日期: 2007-06-07

能抵抗镜头成像系统噪声带来的不良影响是自动聚焦成败的关键。本文将介绍一种具有良好的尖锐性和抗噪声能力的阈值多分辨力分析能量评价函数。

## 2 理论依据

### 2.1 光学成像分析

从几何光学的观点看来,一个镜头成像系统的作用就是把发自物点的同心光束转换为像空间的同心光束。一个光学系统的性能,可以用该系统的点扩展函数来描述,其傅里叶变换称为光学传递函数。所谓的点扩展函数就是物面上的一个输入点脉冲,经过系统之后在像面造成的输出分布。将镜头成像系统的点扩展函数表示为  $h(x, y)$ 。设输入面上的物函数为  $f(x, y)$ , 像  $g(x, y)$  乃是物与系统点扩展函数的卷积:

$$g(x, y) = f(x, y) * h(x, y), \quad (1)$$

在频率域,时域函数的卷积可以转化为乘积运算,从物到像的变换相当于通过一个线性滤波器<sup>[1]</sup>。

对于镜头这样的圆形出瞳,光瞳函数表示为

$$p(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & \text{if } (\xi^2 + \eta^2 \leq a^2) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\xi, \eta$  是出瞳平面上的坐标,  $a$  是圆形出瞳的半径。

无论是相干照明还是非相干照明,只有不大于某一极大值的空间频率才能通过系统,且相干传递函数的截止频率为  $a/\lambda f$  (其中  $f$  为出瞳到像面的距离), 非相干传递函数的截止频率为  $2a/\lambda f$ <sup>[1]</sup>, 超过截止频率时光学传递函数为零,这意味着物的空间频率超过截止频率时在像面上将呈现为一片均匀亮度。换言之,光学系统不能传递截止频率以上的物信息,正是在这个意义下,镜头光学系统相当于一个线性低通滤波器。

为了比较通带宽度对图像离焦程度的影响,选取同一场景的一幅严重离焦和一幅精确聚焦的图像做快速傅里叶变换(FFT),并将频谱中心移到中央,如图 1 所示。

图 1 中,在严重离焦时,频域图像(b)的四角一片漆黑,说明高频信息大量丢失;中心区域明亮,说明图像大部分信息都是低频信息。而精确聚焦时频域图像(d)四角代表的高频信息丰富,高频分量和低频分量都得以保留。图像越清晰(即聚焦时),通带越宽,高频带能量越大;图像越模糊(即离焦时),通带越窄,高频带能量越小,衰减越快。图像细节模糊的原因是通带过窄,高频分量流失。因此高频分量

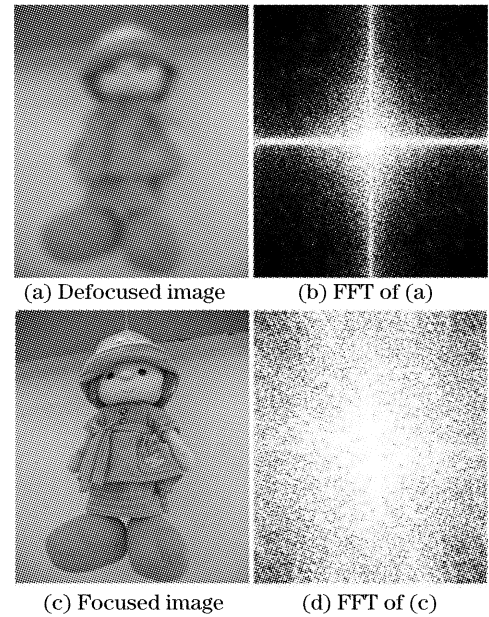


图 1 离焦-聚焦图像的频域比较

Fig. 1 Frequency-domain comparison between defocused and focused images

可作为图像离焦程度评价。基于高频分量的聚焦评价函数具有灵敏度高、曲线尖锐的特点,能够满足自动聚焦高精度的需要<sup>[2]</sup>。常用的有快速傅里叶变换函数,灰度方差函数<sup>[3]</sup>等(由帕斯瓦尔定理可知,灰度方差就是图像频率能量)。

### 2.2 噪声对图像的影响

由上面的分析可知高频分量可以作为离焦程度评价,但是高频分量对噪声是十分敏感的。数字图像理论指出,图像的功率谱随着频率的升高而下降。对于 CCD/CMOS 传感器采集的图像来说,噪声主要来自于光学畸变、非线性误差和传感器噪声。这些噪声往往具有平坦的功率谱。即使不是如此,噪声随频率升高而下降的趋势也比图像功率谱慢得多。因此受污染图像的高频部分,信噪比迅速下降,噪声起主要作用。通过这些分析得出,噪声严重影响以高频分量为参考的聚焦评价函数。

利用自设计平台采集了 140 幅以离焦-聚焦-离焦顺序排列的图像序列,其中第 72 幅为精确聚焦图像。离焦图像如图 1(a) 所示,精确聚焦图像如图 1(c) 所示。分别绘制其快速傅里叶变换函数和灰度方差函数曲线,如图 2(a)、图 2(b)。横坐标为图像序列  $n=1, 2, 3, \dots, 140$ , 纵坐标为归一化评价函数值。

对于不以高频分量为评价的聚焦评价函数<sup>[4~6]</sup>来说,噪声同样导致评价函数性能下降。将经典的梯度评价函数用于上述图像序列,绘制函数曲线如图 2(c)。

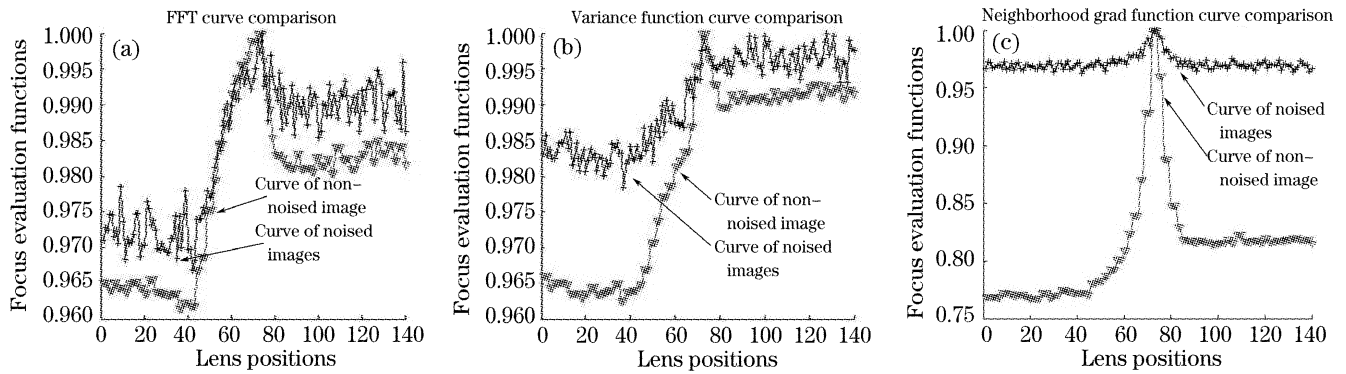


图 2 有噪声-无噪声评价函数性能比较

Fig. 2 Evaluation function comparisons between non-noise and noise images

可见,没有噪声时,评价函数性能良好,一旦出现噪声,评价函数往往出现整体上浮、尖锐性变差、波动严重、聚焦不准甚至失败的情况。

由此想到,若找到一种方式,既能分离出图像高频分量又能降低噪声对高频分量的影响,就可以做到准确聚焦的同时具有良好的抗噪声能力。小波分析是一种有力的工具。

### 2.3 阈值多分辨力分析

在多分辨力分析理论中,把图像  $I(x, y)$  看作是  $V_0$  空间的函数,通过一层多分辨力分析算法分解为 LL、HL、LH、HH 四个子带。根据 Mallat 分解算法<sup>[7]</sup>,一层分解的各子带系数为

$$\begin{aligned} S_{i,l}^1 &= \sum_{k,m} h(k-2i)h(m-2l)I(k,m), \\ \alpha_{i,l}^1 &= \sum_{k,m} g(k-2i)h(m-2l)I(k,m), \\ \beta_{i,l}^1 &= \sum_{k,m} h(k-2i)g(m-2l)I(k,m), \\ \gamma_{i,l}^1 &= \sum_{k,m} g(k-2i)g(m-2l)I(k,m), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $I(k, m)$  为图像灰度值矩阵,  $h(n), g(n)$  为双通道滤波器组,其中  $h(n)$  为低通滤波器,  $g(n)$  为高通滤波器。

由 CCD 摄像头采集到的图像有多种噪声,光照程度和传感器温度是引发噪声的主要因素。噪声概括起来主要分为三类:散粒噪声、暗电流噪声和转移噪声<sup>[8]</sup>。其中暗电流噪声和转移噪声是 CCD 器件本身固有的噪声,目前高质量的 CCD 摄像器件在冷却条件下工作,暗电流噪声和转移噪声都能降低到散粒噪声水平,散粒噪声便成为主要噪声。数字图像理论指出,散粒噪声一般服从高斯分布<sup>[9]</sup>。因此,假设图像受均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯噪声。选用 db4 小波,对自设计系统采集的一幅典型图像做一层小波分解,如图 3 所示。

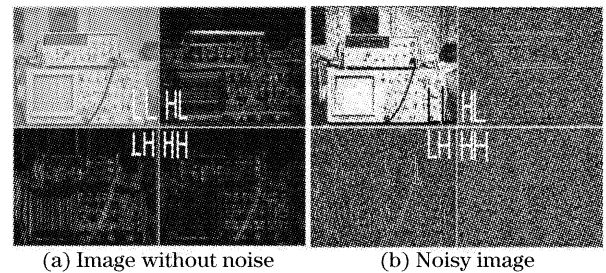


图 3 一层小波分解

Fig. 3 First layer wavelet decomposed

图 3 中 LL 为图像  $I(x, y)$  的概貌信号,它是在水平和垂直两个方向上低通滤波后的结果,即图像的低频部分。HL, LH, HH 子带系数分别对应图像的水平、垂直和倾斜方向的高频信息。由图 3(b)可见噪声对高频子带,特别是对 HH 子带的影响较大。

本文采用一种子带阈值分类的方法消除噪声对高频能量的影响。图像经过小波分解后,每个子带的小波系数存在一定的相关性,而噪声是加于图像之上的随机信号,与子带系数不存在这样的相关性。利用噪声与信号不相关这一特性,设定一个阈值  $T$ ,可以大致分离高频子带系数与噪声:

$$Y(i, j) = \begin{cases} Y(i, j), & \text{if } (A_{i,j}^1)^2 > T^2 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$A = \alpha \text{ or } \beta \text{ or } \gamma,$$

其中  $(A_{i,j}^1)^2$  是 HL, LH, HH 高频子带能量。

阈值选取的目的是在尽可能多地滤除噪声的同时最大限度地保留图像信息。因此采用 Donoho 提出的经典的用于小波去噪的软阈值<sup>[9]</sup>,这种阈值去噪效果好、算法简单,是最常用的小波去噪阈值。利用 Donoho 阈值对图像进行处理,可能将一些对视觉有意义的像素点置零,导致处理后的图像有些地方出现振荡。为了使去噪后的成像效果更好,现在许多小波去噪算法对 Donoho 阈值进行了改进,极大地增加了运算量。然而在自动聚焦中,聚焦评价

函数的目的是快速、准确地找到聚焦位置，因此，对于聚焦位置处，其评价函数值越明显地区别于离焦位置处的评价函数值越好。换言之，自动聚焦仅关心评价函数的峰值，而不关心去噪后的成像是否有振荡或失真。在这个意义之下，Donoho 阈值很适合于对自动聚焦图像的预处理，如(5)式所示：

$$T = \sigma \sqrt{2 \lg n}, \quad (5)$$

其中  $\sigma$  代表噪声标准差， $n$  是样本数，即当前子带中系数的个数。 $\sigma$  代表噪声标准差，由 Donoho 的稳健中值估计得到<sup>[10]</sup>：

$$\sigma = \text{median}(|\gamma_{i,j}^1|)/0.6745, \quad (6)$$

其中  $\gamma_{i,j}^1$  即(3)式中  $\gamma_{i,j}^1$ ，为高频对角线子带的小波系数。

若  $(A_{i,j}^1)^2 \leq T^2$ ，认为子带系数处于低能量，视为噪声的贡献，直接置零。而对于  $(A_{i,j}^1)^2 > T^2$  的部分，视为信号的贡献。出于对计算量的考虑，不对高于阈值的部分做任何调整，保持原值不变。

db4 是一种正交小波，多分辨力分析分解后图像能量不变。LL 子带系数反映图像的低频信息，根据 2.1 节的分析，选取各自进行阈值变换后的高频子带系数的能量和作为评价函数：

$$E = \sum_{i,j} (\alpha_{i,j}^1)^2 + (\beta_{i,j}^1)^2 + (\gamma_{i,j}^1)^2, \quad (7)$$

由于图像噪声能量主要集中在一层小波分解的高频子带，因此一层小波分解与多层小波分解的评价函数差别不大，考虑到多层分解增加的庞大计算量，仅采用一层小波分解就可以最优地协调聚焦性能与运算速度。

### 3 仿真结果及分析

为了对传统的以及提出的算法进行仿真实验。利用自设计平台再次按离焦-聚焦-离焦顺序采集含 140 幅图像的序列，其中第 72 幅为精确聚焦图像。此时实验中的拍摄镜头在低温度、低光照、低反差条件下工作，采取了一切可能的措施降低噪声，极大地抑制了噪声，图像接近于无噪。为了使实验结果具有可比性，采用人为加入较大噪声的方法来检验所提出的算法的性能。

图 4(a)为在上述一系列降噪措施下采集的接近无噪的原始图像序列中的一幅。在其中加入均值为零，方差为 0.01 的高斯噪声，如 1.3 节所述，相当于加入散粒噪声，人眼立即感觉到变化，如图 4(b)所示。

分别对原始图像序列和高斯噪声图像序列绘制

其快速傅里叶变换函数、灰度方差函数、四邻域梯度函数和阈值多分辨力分析评价函数曲线，如图 5 和图 6 所示。

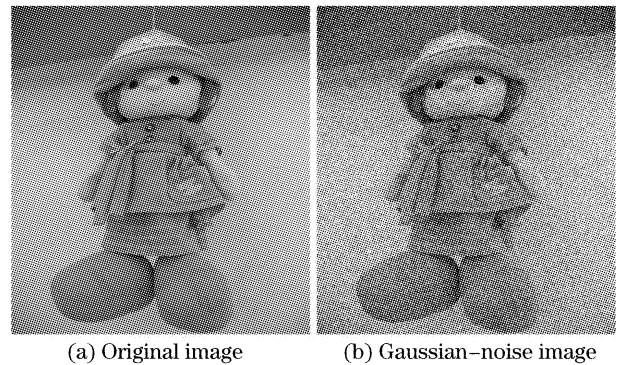


图 4 噪声分析图像

Fig. 4 Images for noise analysis

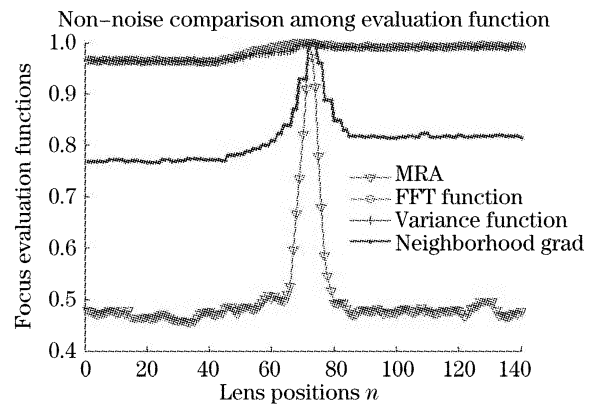


图 5 无噪声污染评价函数性能比较

Fig. 5 Non-noise comparison among evaluation functions

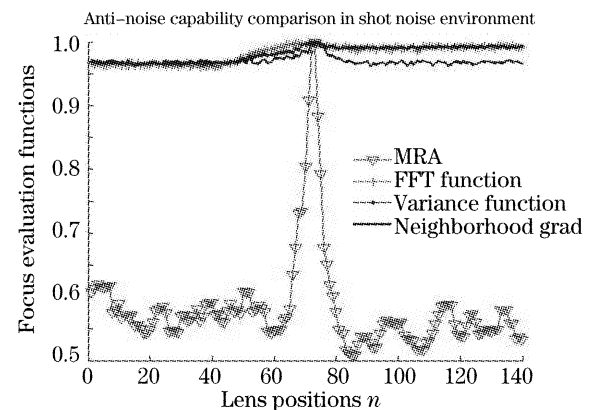


图 6 各评价函数对散粒噪声的抗噪声性能比较

Fig. 6 Anti-noise capability comparison among evaluation functions in shot noise environment

以上两幅图中，横坐标为图像序列  $n=1, 2, 3, \dots, 140$ ，纵坐标为归一化评价函数值。可以看到，在没有受到噪声污染时，快速傅里叶变换函数和灰度方差函数值在 0.95 到 1 之间，有唯一的峰值，但不够尖锐。梯度评价函数的平均值在 0.75 上下，有唯一尖锐的峰值，但仍不够理想。而提出的阈值多分

辨力分析函数具有最尖锐的峰值,以及最窄的波峰宽度,最利于镜头快速、准确地找到聚焦位置。

当受到较高水平噪声污染时,快速傅里叶变换函数和灰度方差函数的尖锐性很差,几乎成为一条直线,不能准确判断哪幅是聚焦图像。梯度函数的平均值提高到 0.95 以上,性能大大下降。而提出的阈值多分辨力分析函数仍然具有良好的尖锐性,波峰宽度很窄,保证镜头快速、准确地找到聚焦图像点。由于噪声的随机性,任何评价函数曲线都会不可避免地出现随机波动,对比于图 2 中各算法严重的波动,提出的方法在很大程度上有所改善,由于曲线峰值尖锐,可以准确搜索到聚焦点。可见提出的方法对高斯型噪声,即散粒噪声,有很好的抗噪性能。

暗电流噪声、转移噪声等是由 CCD 器件本身引起的,无法用统计特性来描述。为了验证提出的算法对这些噪声的抗噪能力,对正常条件下(常温、正常光照条件、无降噪措施)拍摄的图像序列重复以上实验,如图 7 所示。

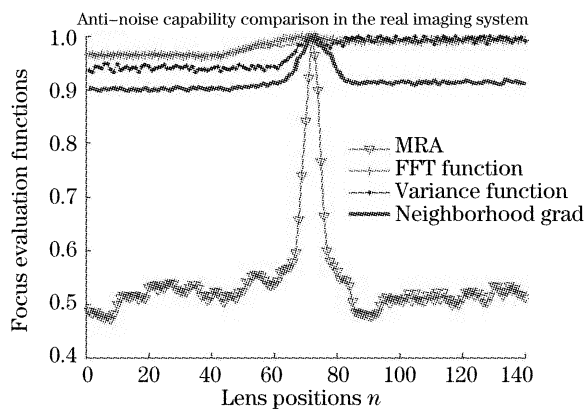


图 7 各评价函数对系统实际存在噪声的性能比较

Fig. 7 Anti-noise capability comparison among evaluation functions in the real imaging system

由图可见,相对于无噪声拍摄条件,各评价函数的值都有上浮;相对于加入高水平散粒噪声时,各评价函数的值又有所下降,且波形更加平稳。其中,快速傅里叶变换函数和灰度方差函数的峰值仍不够尖锐,不能保证准确地找到聚焦点。梯度函数的性能比快速傅里叶变换函数和方差函数有所提高但仍然不够理想。提出的方法具有最好的尖锐性和最窄的波峰宽度,灵敏度最高,能够保证镜头准确且快速地找到聚焦位置。可见,对图像传感系统实际存在的噪声,提出的方法也具有很好的抗噪声性能。

## 4 结 论

以高频分量为评价的聚焦函数具有灵敏性高,

尖锐性好的优点,很适合应用于实时系统。但是对噪声不具有稳健性,图像被噪声污染时聚焦性能严重下降。提出阈值多分辨力分析方法,利用信号的每个子带的小波系数存在一定相关性,而噪声子带系数不存在相关性的特点,设定阈值,大致分离高频子带系数与噪声。选取经过阈值变换后的高频子带系数的能量和作为聚焦评价函数,将较低的能量视为是噪声的贡献,从高频子带系数中滤除。实验证明该方法在准确聚焦的前提下提高了评价函数的尖锐性,波峰宽度变窄,有良好的抗噪声能力。目前正将其运用到自开发的硬件系统中,对消除曲线波动做进一步研究。

## 参 考 文 献

- 1 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun transl., Beijing: Science Press, 1978. 635~641 (in Chinese)  
波恩,沃尔夫. 光学原理[M]. 杨葭孙译,北京:科学出版社,1978. 635~641
- 2 Li Qi, Feng Huajun, Xu Zhihai *et al.*. Auto focus area design of digital imaging system[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 Fang Yi, Zheng Chongxun, Yan Xiangguo. Research on an auto-focusing algorithm for microscope [J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2005, **26**(12): 1275~1277 (in Chinese)  
方以,郑崇勋,闫相国. 显微镜自动聚焦算法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(12): 1275~1277
- 4 Chen She, Meng Yonghong, Jin Gang. Study on the autofocus evaluation function in ellipsometric imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 923~928 (in Chinese)  
陈涉,孟永宏,靳刚. 椭圆光学显微成像系统聚焦评价函数的研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 923~928
- 5 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1225~1232 (in Chinese)  
宗光华,孙明磊,毕树生等. 显微视觉自动聚焦研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(9): 1225~1232
- 6 Jie He, Rongzhen Zhou, Zhiliang Hong. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2003, **49**(2): 257~262
- 7 Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)  
吴艳,杨万海,李明. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 671~676
- 8 Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. *Digital Image Processing* [M]. Ruan Qiuqi, Ruan Yuzhi transl., The second edition, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 176~179 (in Chinese)  
Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods. 数字图像处理[M]. 阮秋奇,阮宇智译,北京:电子工业出版社,2005. 176~179
- 9 D. L. Donoho. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, **41**(3): 613~627
- 10 D. L. Donoho, I. M. Johnstone. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. *J. American Statistical Association*, 1995, **90**(432): 1200~1224