

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0163-05

一种基于边缘点计数的聚焦评价函数

高 潮 朱红军 郭永彩 林晓钢 王 涛

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要 在自动显微测量技术中,为了在保证对焦精度的同时具有较强的噪声抑制能力,在研究显微镜成像和聚焦原理的基础上提出了一种新的用于显微测量的聚焦评价函数。该聚焦评价函数利用改进的 SUSAN 算法识别待测边缘,当待测边缘点的数目最少时,显微镜聚焦最佳。实验表明,在粗调焦、细调焦、加高斯噪声后调焦和加椒盐噪声后调焦时,对同一位置的物体重复对焦 30 次,测得对焦位置的标准差分别为 0.000,0.0011,0.0126,0.0033。与经典的聚焦评价函数相比,BW 聚焦评价函数在精确性、单峰性、灵敏度、抗噪性能方面性能优越,是一种原理简单综合性能优越的聚焦评价函数,特别适用于显微测量。

关键词 图像处理;聚焦评价函数;SUSAN 算法;自动聚焦

中图分类号 TP319 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0163

A Focusing Criterion Function Based on Edge Point Counting

Gao Chao Zhu Hongjun Guo Yongcai Lin Xiaogang Wang Tao

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry of China,
Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract A new auto-focusing function for microscope measurement is presented after the research of imaging and focusing principles in order to, in automatic microscope measurement techniques, not only enhance the accuracy of the focus value but also suppress noise. At first, the measuring edges are detected by the improved SUSAN algorithm and lens is moved. When the total of edge points detected is least, then the best-focused lens position is found. We tests in the same condition for 30 times, and experimental results indicate that standard deviation of focusing position in coarse focusing and in fine focusing is 0.000 and 0.0011 respectively, focusing in Gauss noise case is 0.0126, and focusing in salt-and-pepper noise case is 0.0033. BW is accurate in focusing degree, unimodal, sensitive to focusing position and insensitive to noise compared with traditional focusing functions. BW is one of the superexcellent focusing evaluation functions with simple principles, which is a computationally efficient alternative for microstructure measurement.

Key words image processing; focusing criterion function; SUSAN algorithm; auto-focusing

1 引 言

随着现代制造业和检测技术的发展,工具显微镜作为被广泛使用的检测仪器,正在不断自动化和智能化。其中自动聚焦是关键的技术之一。对焦质量直接影响到成像的位置和清晰度^[1],进而影响测量精度。目前已存在多种聚焦评价函数,主要有灰度差分法(VAR)、图像梯度能量算法(EIG)、拉普拉斯能量算法(ELI)等^[2]。但是各种对焦算法对不同的图像在对焦精度、灵敏度和可重复性等方面的表现不同^[3,4],并且大多基于微分运算,利用高频分量

作为离焦程度评价,因而对噪声敏感^[5]。工具显微镜采集的图像主要是被测物体的轮廓,边缘线主要是直线。工具显微镜的自动对焦目的主要是为了获得清晰的待测边缘,而不是所有边缘,更不是整幅图像。而边缘最容易出现噪声而导致误检^[6]。为此,本文提出一种具有较强抗噪能力并符合工具显微镜图像特点的自动聚焦评价函数。

2 聚焦原理

在显微成像系统中,当对焦准确时,物平面上的

基金项目:教育部博士点基金(200806110016)资助课题。

作者简介:高 潮(1959—),男,教授,主要从事信息处理技术和测控技术等方面的研究。E-mail: gaoc@cqu.edu.cn

一个点光源 $A(x, y)$ 在像平面上成一个像点 $A'(x_0, y_0)$; 当离焦时, 物平面上的一个点光源在像平面上将形成一个光斑, 如图 1 中 H_2, H_3 上的圆面所示^[2]。

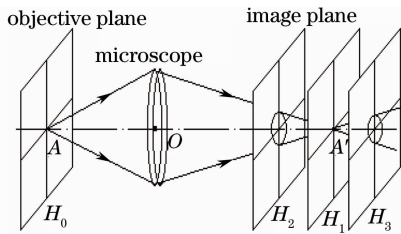


图 1 显微镜聚焦原理

Fig. 1 Microscope model and focusing mechanism

任何光学成像系统都可以等效为一个理想高斯成像系统^[7]。一个像边缘可以视为物体的边缘附近无数点光源的像的叠加。为简单起见, 以垂直于主光轴的直线边缘为例讨论边缘的对焦原理。当对焦准确时, 直线边缘在像平面上成的像也是一条直线; 当离焦时, 直线边缘在像平面上的成像变模糊, 形成具有一定宽度的带状区域。为描述这一区域内的各点, 需要建立一个二维坐标系。设沿着边缘的方向为 y 方向, 垂直边缘的方向为 x 方向。在显微镜中经过采集系统所成的像在同一 y 坐标上的灰度值一般都基本相同, 近似有 $\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = 0$, 离焦时成像的边缘区域内的灰度值在空间上只与 x 有关。各像点的灰度值可以简单表示为

$$f(x - x_0; b, c, \sigma) = [b + cU(x)] \otimes g(x; \sigma) = b + \frac{c}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - x_0}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right], \quad (1)$$

式中 $U(x)$ 为单位阶跃函数, $g(x; \sigma)$ 为高斯函数^[8]。当离焦的程度越大时 σ 越大。边缘处的灰度值如图 2 所示。

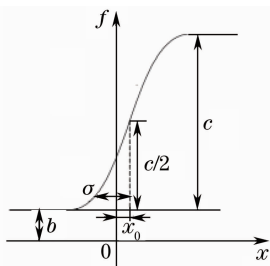


图 2 边缘模型

Fig. 2 Edge model

由图 2 容易看出, 当完全聚焦时, 物体边缘在像平面上成的像边缘最接近阶跃型边缘, 此时, 边缘处的灰度梯度最大, 但边缘宽度最小; 当离焦时, 图像

边缘就退化为斜坡型边缘, 此时, 边缘处的灰度梯度较小, 但边缘宽度较大。

3 聚焦评价函数及其量度

3.1 聚焦评价函数

在显微测量中, 测量精度是首要问题, 并且成像边缘的宽度越小测量结果越精确。因此工具显微测量中评价对焦是否最优的根本标准应该是像边缘宽度。能够在准确对焦时获得最窄的成像边缘的聚焦评价函数才是最好的聚焦评价函数。

令待测边缘宽度的最大值为 B_{\max} , 待测边缘成像宽度为 B , 当对焦越清晰时, 由图 2 知边缘的宽度越窄, B_{\max} 和 B 的差值就越大, 根据上述分析, 显微测量中的最优聚焦评价函数应该为

$$F = B_{\max} - B, \quad (2)$$

当 F 越大时对焦越清晰, F 最大时完全聚焦。

图像中, 边缘的宽度 B 可以用在垂直边缘线方向上的边缘像素的个数来量度, 但计算复杂。为简化计算, 考虑到边缘点的个数随边缘宽度减小而减少, 当边缘最窄时, 边缘点的个数最少。(2) 式可以替代为

$$F = NE_{\max} - NE, \quad (3)$$

式中 NE 为待测边缘点的像素个数, NE_{\max} 为待测边缘点的像素个数的最大值。

3.2 边缘点的确定

目前, 已存在的边缘检测算法很多, 但它们一般都对噪声敏感, 甚至在检测边缘的过程中加强了噪声^[9]。本文介绍的 SUSAN 算法是一种非线性算法, 在整个过程中, 只对像素的灰度进行比较, 完全不涉及微分运算, 不更改原始数据^[10]。在检测边缘的过程中, 边缘处的噪声对是否为边缘点的判定结果影响不大, 并且当分界线两侧同时存在噪声时, 能够抵消对判断结果的影响。因而, SUSAN 算法检测边缘时, 既不损失原有信息又有较强的抗噪能力。其基本原理可以表述为:

设计一个圆形模板, 文中以 37 pixel 模板 (如图 3 所示) 为例, 模板中心称为模板核。将模板在图像中移动, 如图 4 所示, 考查与模板重合的图像部分, 求出与模板核处的像素灰度值比较接近的像素个数。由图 4 可以看出: 当个数超过圆模板内总像素数一半时, 模板核不在边缘; 当个数大约为一半时, 模板核在边缘处; 个数约为圆模板内总像素数的 $1/4$ 时, 模板核在角点处。

模板内的其他像素与模板核的灰度值的比较

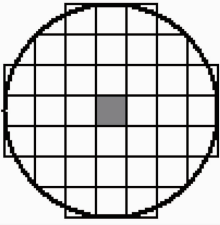


图 3 37 pixel 模板

Fig. 3 37 pixel circular mask

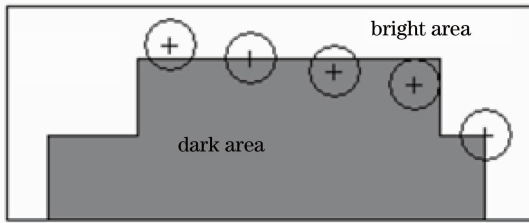


图 4 圆形模板在图像中的不同位置

Fig. 4 Circular masks at different places on a simple image

式为

$$C(x_0, y_0; x, y) = \begin{cases} 1, & |f(x_0, y_0) - f(x, y)| \leq T \\ 0, & |f(x_0, y_0) - f(x, y)| > T \end{cases} \quad (4)$$

令

$$S(x_0, y_0) = \sum_{(x, y) \in N(x, y)} C(x_0, y_0; x, y), \quad (5)$$

式中 S 称为游程和 (running total)。

边缘响应函数 R 可表示为

$$R(x_0, y_0) = \begin{cases} G - S(x_0, y_0), & S(x_0, y_0) < G \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式中游程和阈值 G 取 $3S_{\max}/4$, S_{\max} 为模板的像素数减 1, 所以在 37 pixel 模板中 G 取 27。 S 值小于 G 时为边缘点, 否则为非边缘点。

但是 SUSAN 算法存在不足之处, 容易将孤立噪声点误判为边缘点。为拒绝孤立噪声点, 将 (6) 式修改为

$$R(x_0, y_0) = \begin{cases} G - S(x_0, y_0), & C1 \\ G, & C2 \\ G, & C3 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $G = 33$; $C1$ 代表 $15 \leq S(x_0, y_0) \leq 27$; $C2$ 代表 $9 < S(x_0, y_0) < 15$ 且 8 邻域内有 3 个或 3 个以上的边缘像素; $C3$ 代表 $27 < S(x_0, y_0) < 33$ 且 8 邻域内有 $R = G$ 的像素。

当显微镜离焦时, 在图像边缘处存在灰度梯度

的区域增大, 满足 (7) 式的像素个数增加, 即被判定为边缘点的像素个数增加。因此利用 (7) 式确定边缘点的个数, 可以判定是否完全聚焦。

针对上述改进, 进行了定量的验证性实验。实验中通过比较改进前后两种算法对加入噪声后的图像与原始无噪声图像输出结果的一致性来检测其抗噪能力。限于篇幅, 此处仅给出实验结果, 在抑制椒盐噪声方面, 改进后的算法比原算法的性能提高了 50%; 在抑制高斯噪声方面, 改进后的算法比原算法的性能提高了 100%。

4 实验验证

聚焦评价函数的评价标准包括, 单峰性、精确性、可重复性、灵敏性、实用性等方面^[11]。这些判断标准可以作为粗调函数和细调函数优劣的通用判据。但在粗调焦和细调焦中, 对这些标准要求的严格程度不同。

为了检验上述基于边缘宽度的聚焦评价函数 (BW) 的性能, 在工具显微镜上做了大量的实验, 包括粗调焦实验、精调焦实验和噪声实验。实验中选择规则的几何体作为待测物体, 将 BW 算法与多个算法进行了比较。聚焦算法太多, 因此选择了被 Murali Subbara 严格证明过的灰度方差算法、图像梯度能量算法、图像拉普拉斯能量算法来进行对照。实验中, BW 只以边缘附近 30 个像素作为对焦窗口, 其他的以整幅图像作为对焦窗口。

4.1 归一化处理

为了通过图像比较各种聚焦评价函数在粗调焦和细调焦中的单峰性、灵敏性、精确性, 需要对各种聚焦算法的结果进行归一化处理。为了不改变各种聚焦评价函数单峰性、灵敏性、精确性必须保证对焦曲线中各拐点及极值点相对物距的位置不变, 因此, 选择线性函数转换法进行归一化, 其方法为

$$F_T = (F - F_{\min}) / (F_{\max} - F_{\min}), \quad (8)$$

4.2 粗调焦实验

粗调焦过程是利用单峰性快速确定显微镜完全聚焦的可能位置区域的过程, 在该过程中不需要精确定位。因此, 粗调焦实验中, 主要试验聚焦评价函数的单峰性和可重复性。

4.2.1 单峰性

当焦距在对焦清晰位置附近 1.5 mm 范围内以 50 μm 步长变化时, 聚焦评价函数的测试结果归一化处理后曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, BW 算法和 VAR 算法在整

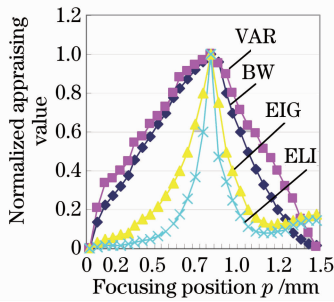


图5 对焦曲线图 I

Fig.5 Focus curve I

个调焦范围内具有一致的凸凹性,没有出现局部最大值,具有良好的单峰性。此特性有利于全自动对焦中确定步进电机的运动方向,具有较强的实用价值。

4.2.2 可重复性

在多次重复对焦中,均方差最小的对焦算法是最佳算法^[2]。采用不同的对焦算法对同一位置的物体以 $50\ \mu\text{m}$ 步长变化焦距重复对焦 30 次,在每次搜索起点相同的情况下,分别测得对焦位置的均值和标准差,这几种算法基本没有区别。

4.3 细调焦实验

精确对焦要求对焦函数准确、稳定并且在准确对焦位置附近的灵敏度较高。细调焦实验中,主要试验聚焦评价函数的单峰性、精确性、灵敏性和可重复性。

4.3.1 单峰性

在对焦清晰位置附近 $170\ \mu\text{m}$ 范围内以 $1\ \mu\text{m}$ 步长变化焦距,以测试聚焦评价函数的单峰性、精确性、灵敏度。测试结果归一化处理后的曲线如图 6 所示。

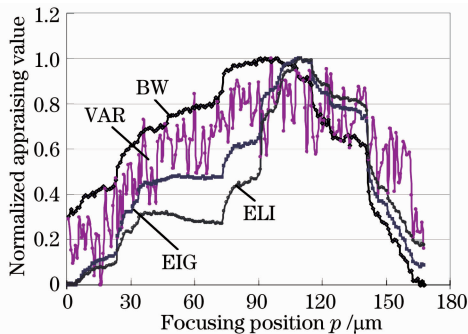


图6 对焦曲线图 II

Fig.6 Focus curve II

从图 6 可以看出,EIG 算法、ELI 算法和 BW 算法在整个调焦范围内基本没有出现局部最大值,具有较好的单峰性。VAR 算法单峰性较差。

4.3.2 精确性

算法 EIG 和算法 ELI 求得的最佳对焦位置与

BW 算法的结果不同,这说明这两种算法在显微测量的边缘对焦中是有偏差的。也就是说,在 EIG 和 ELI 算法的聚焦评价函数取得最大值时,图像边缘宽度并未达到最小,并未达到显微测量中要求的最理想的边缘。VAR 算法和 BW 算法在聚焦评价函数取得最大值时,图像边缘宽度最小。

4.3.3 灵敏性

从图 6 可以看出,EIG 算法、ELI 算法的灵敏度最高,BW 算法次之,VAR 算法的灵敏度最低。

4.3.4 可重复性试验

采用不同的对焦算法对同一位置的物体以 $1\ \mu\text{m}$ 步长变化焦距重复对焦 30 次,在每次搜索起点相同的情况下,分别测得对焦位置的均值和标准差如表 1 所示。

表 1 几种聚焦评价函数的细调焦测试结果

Table 1 Test results of focusing functions on fine auto-focusing stage

Criterion function	BW	VAR	EIG	ELI
Mean value /mm	1.4581	1.4645	1.4731	1.4787
Standard deviation /mm	0.0011	0.0023	0.0014	0.0015

4.4 抗噪声实验

在对焦清晰位置附近 $500\ \mu\text{m}$ 范围内以 $1\ \mu\text{m}$ 步长变化焦距,并对摄入的图像分别加入高斯噪声和椒盐噪声以测试聚焦评价函数抗噪能力。在不改变的被测对象位置的情况下重复对焦 30 次,在每次搜索起点相同的情况下,对不同算法的结果分别计算标准差如表 2 所示。

表 2 几种聚焦评价函数抗噪测试结果的标准差

Table 2 Standard deviation of focusing functions in noise suppression

Criterion function	BW	VAR	EIG	ELI
Gauss noise /mm	0.0126	0.0854	0.0532	0.0464
Salt-and-pepper noise /mm	0.0033	0.0734	0.0437	0.0312

5 结 论

提出了一种新的适用于显微测量的聚焦评价函数,该算法在不失灵敏度的同时具有较强的抗噪能力,而且在大范围内具有凸凹一致性,不存在局部最大值,使自动对焦过程中不存在多峰干扰。这将极

大简化全自动对焦过程中搜索的难度^[12],并且只需要搜索边缘附近的像素,缩小了搜索范围,从而提高了对焦速度。

另外,该算法可以将对焦过程与边缘检测过程融为一体,从而减小整个工程算法的复杂度。

参 考 文 献

- 1 E. P. Krotkov. Focusing[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1987, **1**: 223~237
- 2 Murali Subbarao, Jenn-Kwei Tyan. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus[J]. *IEEE T. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1998, **20**(8): 864~870
- 3 G. Lighthart, F. Groen. A comparison of different autofocus algorithms[C]. *IEEE 6th International Conference on Pattern Recognition*, 1982. 597~600
- 4 Mike Heath, Sudeep Sarkar, Thomas Sanoeki *et al.*. Comparison of edge detectors: a methodology and initial study[C]. *IEEE T. Comput. Vision Pattern Recogn.*, 1996. 143~148
- 5 Zhang Le, Jiang Wei. Application of multi-resolution analysis in anti-noise capability of auto-focusing algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2150~2154
张 乐, 姜 威. 多分辨率分析在自动聚焦算法抗噪声性能中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2150~2154
- 6 E. Z. Tihanyi, J. L. Barron. Spatio-temporal edge focusing[C]. *IEEE Transactions Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition*, 1990, **1**: 213~216
- 7 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 35~39
孙 杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 35~39
- 8 Chi-Keung Fong, Wai-Keun Cham. Edge model based segmentation[J]. *IEEE T. Pattern Recogn.*, 2004, **3**: 618~621
- 9 Linan Fan, Yong Wen, Xinhe Xu. Research on edge detection of gray-scale image corrupted by noise based on multi-structuring elements[C]. *IEEE T. Parallel Distrib. Comput., Application and Technologies*, 2003, 840~843
- 10 S. M. Smith, Brady J. Michael. SUSAN: An new approach to low level image processing[J]. *Int. J. Comput. Vision*, 1997, **23**(1): 45~78
- 11 Frans C. A. Groen, Ian T. Young, Guido Lighthart. A comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms[J]. *Cytometry*, 1985, **6**: 81~91
- 12 Kang-Sun Choi, Sung-Jae KO. New autofocusing technique using the frequency selective weighted median filter for video cameras [J]. *IEEE T. Consum. Electron.*, 1999, **3**(45): 820~827