

文章编号 1004-924X(2007)05-0784-07

# 显微镜自动粗调焦的 TennenGrad 改进算法

余 超, 王伯雄, 郑汉卿, 罗秀芝, 张明照  
(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

**摘要:**提出了使用 Sobel 算子或 Laplace 算子做卷积,对图像像素点进行绝对值相加的 TennenGrad 改进算法,以及 Laplace 改进算法,和几种已有评价函数进行分析比较。为了判断粗调评价函数的优劣,对评价函数的判断准则进行了逐一分析,并且将平滑性、高效率、强壮性作为最主要的衡量标准。在搭建的显微镜粗调实验系统中,对较为复杂的 MEMS 器件-微加速度计进行粗调成像。另外,对显微成像系统的调焦策略进行分析研究,提出并比较分析了 3 种调焦策略,其中  $n$  点灰度比较策略是较优的策略。实验处理结果表明,改进的 TennenGrad 算法具有最优的粗调特性,调焦范围较大,达到了  $210\ \mu\text{m}$ ;调焦分辨率高,达到  $7\ \mu\text{m}$ ,同时调焦图像显示出曲线变得更加平滑,曲线部极值点由 5 个减为 0 个。

**关键词:**显微镜;自动调焦;粗调;调焦评价函数;调焦策略

**中图分类号:**TP312;TH742.9 **文献标识码:**A

## Improved TennenGrad function for microscopic coarse autofocusing

YU Chao, WANG Bo-xiong, ZHENG Han-qing, LUO Xiu-zhi, ZHANG Ming-zhao

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** An improved TennenGrad criterion function and an improved Laplace criterion function are proposed for microscopic coarse autofocusing, which use Sobel operators and Laplacian operators to convolve and add together the absolute values of matrix pixels for a image. Several different existed criterion functions in microscope autofocusing are compared and analyzed. To judge the efficiencies of criterion functions, function criteria are analysed with smoothness, efficiency and robustness as the main criteria. In the CCD camera microscope experiment system, a micro accelerometer is used as the measured object. Three autofocusing strategies are proposed and compared, and the  $n$ -pixel grey level method is preferred for microscopic autofocusing. Coarse autofocusing results show that the improved TennenGrad function has the best performance, autofocusing range is  $210\ \mu\text{m}$ , and autofocusing resolution is  $7\ \mu\text{m}$ . Image results show that autofocusing curve becomes smoother, and the number of extremums reduce from 5 to 0.

**Key words:** microscopy; autofocusing; coarse adjustment; focusing criteria function; focusing strategy

收稿日期:2006-12-12;修订日期:2007-03-09.

基金项目:国家“863”高技术计划基金资助项目( No. 2005AA411914 )

# 1 引 言

在使用显微镜拍摄图像时,手动调焦方式难以保证调焦的一致性和重复性,从而会影响到后期图像的处理和分析精度。通过图像分析进行自动调焦的被动调焦方法,由于设备简单,而且不需要标定显微镜参数值,在显微成像系统中得到了广泛的应用。为了改进调焦效果,提高调焦效率,加大自动调焦范围,可以采用粗调和细调相结合的调焦方法。

调焦技术中两个重要的内容是评价函数和调焦策略的选择。细调方法与粗调方法各有特点,需要采用不同的评价函数和调焦策略。相对于细调方法国内外有较多的研究工作,对粗调方法的系统研究工作还较少。

本文对显微成像系统现有的粗调评价函数进行分析和研究,在此基础上提出改进的 Tennen-Grad 和 Laplace 函数。搭建显微摄像系统,进行粗调实验来比较各评价函数曲线的性质。最后,提出 3 种不同的调焦策略,并对它们的优缺点以及适用条件做出比较分析。

# 2 调焦原理和基本假设

用几何光学的知识,分析显微镜成像系统,可以得到它的点扩散函数,如图 1 所示。

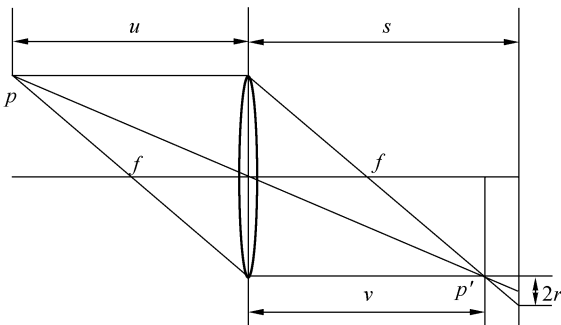


图 1 显微镜成像  
Fig. 1 Microscopic imaging

像点  $p$  通过显微物镜成像,清晰成像点为  $p'$ 。在  $p'$  后面的接收屏上,产生半径为  $r$  的弥散斑,用薄透镜成像公式可以得到:

$$r = s \frac{D}{2} \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{u} - \frac{1}{s} \right), \tag{1}$$

为了更方便地研究显微成像系统的图像模糊情况,通常假定光学系统满足线性条件和空间不变性条件。在满足这两个条件的前提下,可以将最终得到的模糊图像简化为点扩散函数与理想清晰图像之间的卷积。

定性的分析图像清晰度,不失一般性,可以假设  $v < s$ , 这时,待测物点成像在接收面前方。从式(1)中可以看出:当物距  $u$  增大时,点扩散函数的半径  $r$  也随之增大,在进行卷积处理后,图像像素间的差值变小。为了判断待测器件是否处于清晰成像位置,可以使用评价函数分析图像中各像素点间的差值,可以认为差值大的图像接近清晰位置,差值小的图像偏离清晰位置。

# 3 自动调焦评价函数综述

用  $f(I)$  表示评价函数值,  $S(i, j)$  表示  $M \times N$  的图像矩阵  $S$  中的元素。综合现有的自动调焦文献[1-5],使用较多的评价函数主要有以下几种:

(1) 图像方差

$$f(I) = \frac{1}{MN} \sum_M \sum_N [S(i, j) - \frac{1}{MN} \sum_M \sum_N S(i, j)]^2, \tag{2}$$

(2) 熵

根据香龙信息理论,熵值越大时,信息量越多,将此理论应用在调焦过程中,作为图像清晰度的评价函数。一幅图像的熵值可以表示为:

$$f(I) = - \sum_k p_k \log_2 p_k, \tag{3}$$

(3) 平方梯度

平方梯度方法希望突出较大梯度值对评价函数值的影响,从而在函数值曲线中,突出清晰成像位置处的峰值,提高曲线的灵敏度。

$$f_x(I) = \sum_M \sum_N |S(i, j + 1) - S(i, j)|^2, \tag{4}$$

上式只考虑了  $X$  方向的梯度情况,为了充分利用图像矩阵的信息,在此基础上,可以加上  $Y$  方向的平方梯度。得到:

$$f_x(I) = \sum_M \sum_N |S(i + 1, j) - S(i, j)|^2 + \sum_M \sum_N |S(i, j + 1) - S(i, j)|^2, \tag{5}$$

## (4) Brenner 函数

Brenner 提出在一阶微分大于某阈值时,使用微分中值定理计算像素梯度:

$$S'(i)=[S(i+1)-S(i-1)]/2, \quad (6)$$

然后将上式定义的梯度求平方和,得到:

$$f_{\text{Brenner}}(I) = \sum_M \sum_N |S(i, j+2) - S(i, j)|^2, \quad (7)$$

其中,  $|S(i, j+1) - S(i, j)| \geq T$

## (5) TennenGrad 函数

使用 sobel 算子计算一阶微分

$$\mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

卷积后得到的微分矩阵假设为  $\mathbf{G}_x(i, j)$  和  $\mathbf{G}_y(i, j)$ , 得到的判别函数是:

$$f_{\text{TennenGrad}}(I) = \sum_M \sum_N S(i, j), \quad (8)$$

其中:  $S(i, j) = G_x^2(i, j) + G_y^2(i, j)$

## (6) Laplace 函数

$$\mathbf{L} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

将该算子和图像进行卷积,可以得到梯度矩阵  $\mathbf{G}(i, j)$ 。与上面的方法类似,得到的判别函数是:

$$f_{\text{TennenGrad}}(I) = \sum_M \sum_N G^2(i, j), \quad (9)$$

## 4 TennenGrad 和 Laplace 的粗调改进算法

在 TennenGrad 和 Laplace 评价函数中,采用了 Sobel 算子和 Laplace 算子对图像进行卷积处理,得到图像梯度值,然后再对梯度矩阵的元素求平方和。

对梯度矩阵求平方和,在加大图像灵敏度的同时,也放大了图像像素梯度的随机波动,特别是在远离成像平面的位置上,图像梯度的较大波动可能会产生局部极值,从而损害曲线平滑性。

因此,希望能采用新的算法。

## (1) TennenGrad 改进算法。

使用 Sobel 算子和图像卷积,得到图像的微

分矩阵  $\mathbf{G}_x(i, j)$  和  $\mathbf{G}_y(i, j)$ , 求该矩阵元素的绝对值之和,得到的判别函数是:

$$f_{\text{TennenGrad}}(I) = \sum_M \sum_N |\mathbf{G}_x(i, j)| + |\mathbf{G}_y(i, j)|, \quad (10)$$

Sobel 算子与图像做卷积的结果,是对图像像素平均之后再求梯度值。评价函数值对随机误差的变动不太敏感,有利于得到平滑曲线。

## (2) Laplace 改进算法

使用 Laplace 算子和图像进行卷积,可以得到梯度矩阵  $\mathbf{G}(i, j)$ 。与上面的方法类似,得到的判别函数是:

$$f_{\text{TennenGrad}}(I) = \sum_M \sum_N |\mathbf{G}(i, j)|, \quad (11)$$

## 5 粗调评价函数的判断标准

对这些评价函数是否适用于粗调调焦做出合理的判断和选择,需要统一的判断标准。综合已有的文献[6-12],评价函数的判断标准一般有这几条:无偏性、灵敏性、单峰性、平滑性、强壮性以及高效率。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。

但是,与细调算法相比,粗调算法具有自己的特殊性,因此,为了找到最有效的粗调评价函数,有必要对判断标准进行详细的比较分析:

## (1) 无偏性要求很低。

在细调算法中,无偏性是调焦精度的保障,曲线峰值和真实值之间的偏差,是调焦算法的系统误差,也是调焦系统的精度极限。但是,在粗调系统中,由于调焦精度要求低,一般来说,评价函数曲线峰值的偏移量远小于调焦步距,因此,不会影响到粗调系统的调焦结果。

## (2) 灵敏性要求较低。

清晰成像位置附近的灵敏度往往是判断细调算法好坏的重要标准。灵敏性好的评价函数,曲线峰值突出,可以精确得到成像位置。但是,在粗调过程中,调焦系统只需要得到评价函数最大值的大致范围,更进一步的调焦工作可以由细调系统完成。因此,粗调算法对灵敏度,特别是清晰成像位置附近的灵敏度要求较低。

## (3) 单峰性要求较低。

在细调算法中,如果曲线真实峰值附近存在局部最大,细调焦系统就有可能停止在某一个

局部最大值的位置,从而影响到最终的调焦结果。但是,在粗调过程中,由于步距较大,因此,曲线峰值几乎都出现在两个粗调位置之间,它附近小的局部最大值不会影响到最终的粗调结果。

(4) 平滑性范围要求很高。

在细调算法中,算法所关注的是峰值附近的曲线状况,偏离峰值较大位移处的曲线情况,并不会影响到系统的细调结果。但是,在粗调系统中,为了能对各种高度的器件进行自动调焦,要求粗调系统的使用范围较大。当评价函数曲线平滑性范围较大时,可以在调焦过程中应用高效的调焦策略,从而快速准确地得到粗调结果。

(5) 强壮性要求较高。

这个判断标准对于细调和粗调算法来说都是比较重要的,在某种意义上来说,对于粗调算法甚至更加重要。如果外界干扰使得评价函数曲线产生波动,那么细调算法的最终调焦结果会出现一个小的偏差,而对于粗调过程,如果采用高效的调焦策略,调焦过程可能会停在调焦曲线的某个局部极值处,从而产生一个无法忍受的大误差,无法得到图像。

(6) 高效率要求较高。

粗调系统的调节范围较大,尽量减小评价函数的计算量,可以将系统快速调整到成像位置附近,这将有效提高系统的测量效率。

因此,在粗调算法的判断上,应该是以平滑性,强壮性和高效率作为算法优劣的判断标准。

## 6 实验结果与分析

在本文搭建的显微镜自动调焦实验平台中,使用 Sony XC ST-50 摄像机来获得显微镜图像,该摄像机的信噪比为 58 db,可以满足 10 bit 灰度的信噪比要求。与之匹配的图像采集卡选用的是 National Instrument 公司生产的 PCI-1409,该采集卡可以进行四路黑白图像采样,图像像素灰度值可以达到 10 bit。

用来实现粗调定位的是经过细分的步进电机,计算机根据图像评价函数的计算结果,判断待测器件接近成像位置的移动方向,并给出脉冲信号控制步进电机运动。步进电机带动显微镜载物台实现粗调,载物台的粗调步距为  $7 \mu\text{m}$ 。实验在清晰成像位置附近共取了 30 个成像位置,得到一

系列图像,载物台的总行程是  $210 \mu\text{m}$ 。

实验中的待测器件是清华大学精仪系董景新老师提供的陀螺微加速度计(如图 2 所示),这种梳齿式微加速度计图像较为复杂,由于各梳齿之间采用的是差动驱动,因此梳齿之间的间隔不相等。在使用 10 倍显微物镜在 CCD 摄像机中成像时,梳齿之间最小的间隔只有 3 个像素点,当器件偏离清晰成像位置较远时,梳齿的点扩散函数在和图像做卷积时会互相干扰,影响评价函数值。因此,在对该器件进行粗调聚焦之前,需要对粗调评价函数进行研究分析,挑选最适合的评价函数。

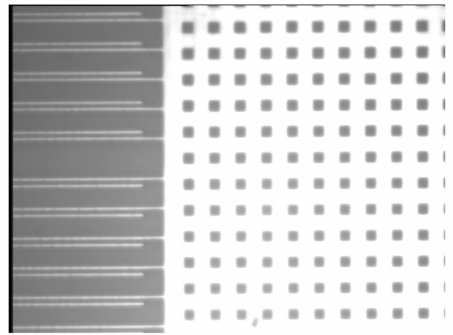


图 2 微加速度计的局部图像

Fig. 2 Local image of micro-accelerometer

本文中选用的评价函数为:(1)图像方差函数。(2)熵函数。(3)平方梯度函数。(4)Brenner 函数。(5)TennenGrad 函数。(6)Laplace 函数。(7)改进的 TennenGrad 函数。(8)Laplace 改进函数。

采用前面提到的各种评价函数对一系列图像进行处理,并且使用评价函数中的最大值作为基准进行标准化。处理后得到的曲线如图 3、图 4 所示。

对上面 8 种评价函数的曲线进行比较分析,可以得到:就平滑性而言,改进后的 TennenGrad 方法(7)体现出了明显的优势,使用该方法得到的曲线在器件  $210 \mu\text{m}$  的行程中,几乎是处处平滑的。

分析图 4,比较改进前后的 TennenGrad 函数以及 Laplace 函数,可以看出:TennenGrad 函数和 Laplace 函数方法对梯度值的平方运算会放大随机误差,从而使图像的平滑性受到影响,在曲线中出现局部最大值。而改进之后的算法使用的是绝对值之和,平滑性有了非常大的提高。

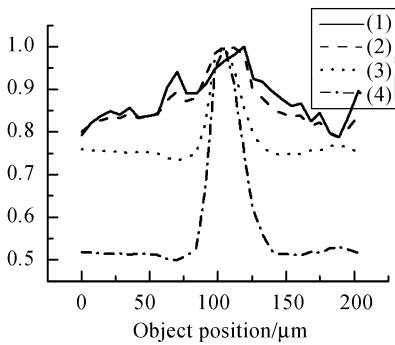


图 3 前四种评价函数曲线

Fig. 3 Curves for the first 4 criterion functions

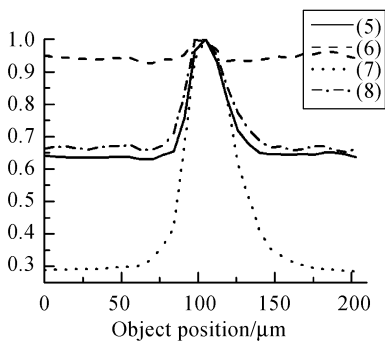


图 4 另四种评价函数曲线

Fig. 4 Curves for the latter 4 criterion functions

当同样是对梯度进行绝对值相加时,比较改进的 TennenGrad 函数和 Laplace 函数,可以看出:使用 Sobel 算子比使用 Laplace 算子的效果要好,即使是改进之前的 TennenGrad 函数,其平滑性也与改进后的 Laplace 算法相当。这是由于 Sobel 算子和 Laplace 算子对矩阵进行卷积处理的效果不同,Sobel 算子是对图像相邻像素进行平均之后再求梯度,而 Laplace 算子对图像进行了二次微分,这就使得 Laplace 方法对图像梯度的随机变动更加敏感。

本文选用改进后的 TennenGrad 函数作为粗调评价函数,分析该算法的计算效率。在实际的计算过程中,首先使用 Sobel 算子对图像进行卷积处理,得到梯度矩阵,然后进行绝对值相加。整体计算量不大,在所搭建的实际测量系统中,自动粗调过程中的每一步稍做停顿,对清晰度评价函数进行同步运算和判断,并通过清晰度评价函数的结果控制步进电机的转动方向,使步进电机带动载物台向清晰成像位置移动。实验证明是可行的。

该算法采用 Sobel 算子进行卷积,在求梯度之前先进行像素灰度平均,有效地抑制了误差的产生,具有较好的强壮性。

## 7 自动调焦策略

为了快速准确地将待测器件调整到清晰成像位置,还需要根据调焦评价函数设计适当的调焦策略。

本文提出 3 种调焦策略:均值灰度比较策略、单点灰度比较策略以及双点灰度比较策略。均值灰度比较策略的抗干扰性更强;单一灰度比较策略运算量较小,调焦步骤较少。它们分别适用于不同的系统环境。双点灰度比较策略在使器件迅速达到成像位置的同时,提高了抗干扰能力,是一种较优的调焦策略。

均值灰度比较策略的调焦步骤是:事先将待测器件调整到成像平面下方,逐步向上移动显微镜载物台,器件通过显微镜成像于 CCD 摄像机上,计算机读入图像并计算出评价函数值,比较评价函数值  $x$  与前面 4 个评价函数值均值  $\bar{x}$  的大小。如果  $\bar{x} < x$ ,说明还没有到达最佳成像位置,继续同向运动,直到  $\bar{x} < x$  不成立,步进电机开始方向运动。经过几次循环后,为了得到精确的峰值位置,不再对清晰度取平均值,直接和前一个位置的图像进行比较,从而可以判断出图像是否位于最佳的成像平面位置。

从图 3 和图 4 中的评价函数曲线可以看出:评价函数的局部极值多出现在远离清晰成像位置处,比较评价函数均值可以有效地减少随机误差。在几次循环之后,器件已经接近清晰成像平面,此时使用单点灰度比较就可以有效地到达成像位置。

该过程是一个循环过程,通过步进电机,使待测器件在成像位置上下做幅值递减的运动,并且最终达到清晰成像位置,移动情况示意图见图 6。

单一灰度比较策略较为简单,由步进电机带动载物台向上移动,将每一步的评价函数值  $x_i$  和前一步的评价函数值  $x_{i-1}$  做比较,当  $x_i > x_{i-1}$  时,说明图像还没有达到曲线最大值,步进电机继续同向转动,直到  $x_i < x_{i-1}$ ,说明载物台超过最佳成像位置 1 步。

使用这种方法可以将待测器件迅速移动到清

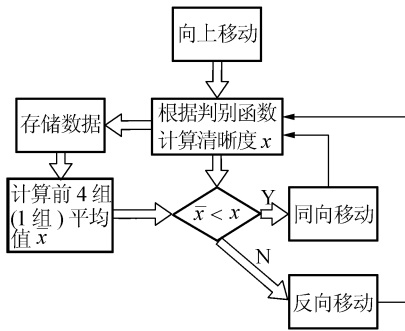


图 5 均值灰度比较策略流程图

Fig. 5 Flow-chart of average grey level comparing strategy

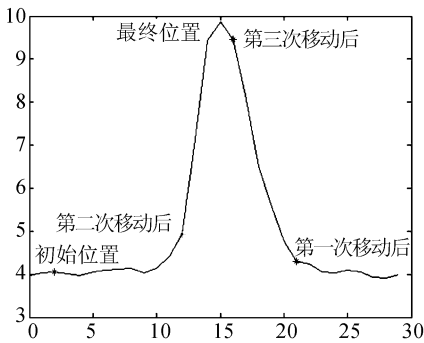


图 6 循环过程示意图

Fig. 6 Schematic drawing for repetition process

晰成像位置,但是这种方法对评价函数曲线要求很高,对成像误差也非常敏感。评价函数值必须在整个测量范围中保持平滑,否则,器件将会停止在评价函数曲线的局部极值处,影响成像效果。

为了迅速达到清晰成像位置,而且有一定的抗干扰能力,可以采用双点灰度比较策略。该策略由步进电机带动载物台移动,将每一步的评价函数值  $x_i$  和前一步的评价函数值  $x_{i-1}$  做比较,同时比较  $x_{i-1}$  和  $x_{i-2}$  的大小,只有当  $x_i < x_{i-1}$  且  $x_{i-1} < x_{i-2}$  时,才做出载物台超过最佳成像位置 2

步的结论。在评价函数曲线出现单个的局部极值时,这种调焦策略仍然可以准确地找到清晰成像位置。同时,由于该策略只是多做了一步调焦处理工作,所以计算量的增加很小。

在干扰进一步增大的情况下,还可以增加比较点个数,使用如 3 点灰度比较策略等  $n$  点灰度比较策略,这样可以提高抗干扰能力,在局部极值连续点个数  $k \leq n - 1$  时,仍然可以进行显微镜调焦。但是,在增加  $n$  值大小的同时,也对清晰成像位置附近的曲线平滑性提出了更高的要求。总体来说,评价函数在成像位置附近的平滑性,要比偏离成像位置处的平滑性好,但是,误差干扰较大的情况下,仍然会出现局部极值。因此, $n$  值取得太大,有可能无法得到成像位置。在实际调焦中,应该根据具体误差类型和评价函数在不同位置处的抗干扰性确定合适的  $n$  值。

## 8 结 论

比较 3 种粗调调焦策略,它们可以用在不同的实验条件下:当显微成像系统的外界干扰大,而对调焦速度要求不高时,可以采用均值灰度比较策略来进行自动调焦;当显微成像系统的外界干扰小,而调焦速度要求较高时,可以选用单点灰度比较策略;多数情况下,外界误差和计算速度介于两者之间,可以采用  $n$  点灰度比较策略,具体分析靠近和远离清晰成像平面处,评价函数值对误差的敏感性,从而确定出具体的  $n$  值。通过实验比较不同评价函数的实验曲线,可以看出:改进后的 TennenGrad 函数曲线平滑范围达到  $210 \mu\text{m}$ ,分辨率达到  $7 \mu\text{m}$ ,平滑性好;局部极大值由 5 个减少为 0 个,计算量小;由图象矩阵的 2 阶计算变为了 1 阶计算;是一种很好的粗调评价函数。

## 参考文献:

[1] SILVIA A, CHRISTOPHE C, JACQUES J. AutoFocus for automated microassembly under a microscope[C]. IEEE, 1996.

[2] PECH PACHECO J L. Diatom autofocusing in lighting microscopy: a comparative study[C]. Conf. On Pattern Recognition, 2000 : 318-321.

[3] 邱胜根, 周杰, 刘旭. 阵列像素器件投影显示系统中自动对焦评价函数研究[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 461-469.

- QIU SH G, SHOU J, LIU X. Research of sharpness evaluation function in array pixel device projection display's auto-focusing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(4) :460-464. (in Chinese)
- [4] 徐洁, 张之江, 陆林海. 靶丸定位系统中的图像处理[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6) :568-571.  
XU J, ZHANG ZH J, LU L H. Image processing for the automatic positoning system of pellet target[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(6) :568-571. (in Chinese)
- [5] 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, 10(5) :531-536.  
ZHAO H, BAO G T, TAO W. Experimetal research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 10(5) :531-536. (in Chinese)
- [6] YEO T. Autofocusing for tissue microscopy[J]. *Image and Vision Computing*, 1993, 11(10) :629-639.
- [7] GROEN F, IAN T Y, LIGHART G. A Comparison of different focus functions for use in autofocus algorithms [J]. *Cytometry*, 1985, 6(2) : 81-91.
- [8] HARMS H, AUS H M. Comparison of digital focus criteria for a TV microscope system[J]. *Cytometry*, 1984, 5(3) : 236-243.
- [9] FIRESTONE L, COOK K, CULP K, *et al.*. Comparison of autofocus methods for automated microscopy[J]. *Cytometry*, 1991, 12(3) : 195-206.
- [10] 尤政, 张高飞, 林杨, 等. MEMS 固体化学推进器设计与建模研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2) :117-126.  
YOU ZH, ZHANG G F, LIN Y, *et al.*. Design and modeling of MEMS-based solid propellant propulsion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2) : 117-126. (in Chinese)
- [11] 张明照, 王伯雄, 罗秀芝, 等. 一种高灵敏度阴影法内波显示系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6) : 664-667.  
ZHANG M ZH, WANG B X, LUO X ZH, *et al.*. Design of high sensitive shadowgraph system for internal wave visualization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6) : 664-667. (in Chinese)
- [12] 吴建华, 褚家如. 一种压电驱动微操作器及其释放位置精度分析[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(3) :283-290.  
WU J H, CH J R. Piezoelectric driven micromanipulator and its positioning accuracy analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3) : 283-290. (in Chinese)

作者简介:余 超(1981—),男,湖北武汉人,清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要研究方向为显微测量技术;E-mail: Yuc03@mails.tsinghua.edu.cn

王伯雄(1947—),男,江苏南通人,清华大学精密仪器与机械学系教授,博士生导师,主要研究方向为显微测量技术,精密仪器与测试技术, MEMS 技术, 光学测量技术。E-mail: Wangbx@mail.tsinghua.edu.cn