

# 透镜检测中复合自动对焦技术的研究及应用

张振久<sup>1</sup> 胡 泓<sup>1</sup> 李天利<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)  
(<sup>2</sup> 深圳大学机电与控制工程学院, 广东 深圳 518060)

**摘要** 针对光学透镜参数测量系统中的对焦问题,设计了一种粗细结合的复合自动对焦方案。在粗对焦过程中,选用全局图像的方差函数作为清晰度评价函数,用均值比较的爬山法实现焦面搜索,并用三点法判断初始对焦方向。在精对焦过程中,利用基于数学形态学的条件膨胀算法和形状因子提取目标图像,并以目标图像区域内的 Brenner 函数作为清晰度评价函数,用单点比较的爬山法实现焦面精细搜索。实验表明,该对焦方案不仅对焦精度高,还有较大的对焦范围,能够保证对焦位置包含在镜头景深范围内,且透镜参数的测量结果准确,稳定。

**关键词** 光学器件;透镜参数测量;自动对焦;连通域提取;清晰度评价函数;爬山法

**中图分类号** TP391.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0312005

## Application and Research of Composite Autofocusing Technique in Optical-Lens Measurement

Zhang Zhenjiu<sup>1</sup> Hu Hong<sup>1</sup> Li Tianli<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)  
(<sup>2</sup> School of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** A composite autofocusing technique consisting of coarse autofocusing and fine autofocusing is proposed for test system of optical-lens parameter. In the coarse autofocusing procedure, variance function achieved from the whole image is selected as sharpness evaluation function, mean comparison method is applied to realize the hill-climbing algorithm for focal plane searching, and a 3-point method is used to initialize the searching direction. In the fine autofocusing procedure, a conditional dilation method based on mathematical morphology and a shape factor are employed to extract the connected regions, namely, the target images. Brenner function within the target image is selected as the sharpness evaluation function, and the hill-climbing algorithm with single-point comparison is used to find the focal plane accurately. The experiments validate that the composite autofocusing technique possesses not only high accuracy but also large autofocusing range. It can guarantee that the focusing position locates in the depth of field of the camera lens and the lens parameter measuring results possess good accuracy and repeatability.

**Key words** optical devices; optical-lens parameter test; autofocusing; connected-region extraction; sharpness evaluation function; hill-climbing method

**OCIS codes** 120.4800; 150.0155; 100.3008; 100.2960; 150.1135

## 1 引 言

随着 CCD 和 CMOS 技术以及计算机控制技术的迅速发展,数字图像处理技术在工业精密检测中

的应用越来越广泛<sup>[1,2]</sup>。作为自动图像测量的关键技术,自动对焦技术的应用不仅可以保证测量结果的精确性,还能大大提高测量效率<sup>[3~5]</sup>。

**收稿日期**: 2010-08-16; **收到修改稿日期**: 2010-09-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(60974069)和深圳市科技计划(JC200903120188A)资助课题。

**作者简介**: 张振久(1982—),男,博士研究生,主要从事精密加工与检测、计算机视觉和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: ajiuhit@hotmail.com

**导师简介**: 胡 泓(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事传感器和精密仪器微机电系统等方面的研究。

E-mail: honghu@hit.edu.cn

清晰度评价函数(SEF)和对焦策略的选择是自动对焦技术的两个重要方面。清晰度评价函数是表征离焦量的一个度量值,需要符合单峰性、抗噪性和无偏性的要求<sup>[6]</sup>,可分为灰度梯度类函数、频谱函数和熵函数三大类。通常灰度梯度类函数<sup>[7~9]</sup>计算量不大,且对边缘信息丰富的图像对焦效果良好<sup>[10]</sup>;频谱函数一般基于傅里叶变换或者小波变换,对焦精度较高,但对噪声敏感且计算量较大<sup>[11,12]</sup>;由于熵的计算涉及对数运算,所以熵函数的计算量较大<sup>[13]</sup>。对焦策略是指用于搜索对焦位置(SEF的最大值位置)的一维最优搜索算法。常用的对焦策略有插值法、拟合法、Fibonacci法、黄金分割法和爬山法等。插值法和拟合法<sup>[14,15]</sup>的精度需要大量数据点的采集来保证,效率较低;Fibonacci法和黄金分割法<sup>[16,17]</sup>需要镜头在对焦区间内大距离移动,对焦效率也不高且对局部极值敏感;爬山法利用向目标函数值增加(减少)的方向持续移动的简单循环过程来搜索局部极大(极小)值,简单有效<sup>[18]</sup>,但爬山法也对局部极值敏感。许多研究人员在爬山搜索方式上进行了改进,例如穷举法粗略搜索、引入均值灰度比较和多点比较等<sup>[19,20]</sup>。

本文分析了目标区域提取技术对清晰度评价函数性能的影响,并对多种清晰度评价函数进行了对比,选择远焦性能最好的全局方差函数和灵敏性最好的目标区域内的 Brenner 函数分别作为粗对焦和精对焦的清晰度评价函数,并利用改进的爬山法实现焦平面的搜索,实现了一种适用于透镜参数测量系统的复合对焦方案。

## 2 目标区域提取

本文所涉及的目标图像都可以看作连通区域,如图 1 所示(由于两种目标图像风格类似,本文仅针对焦距测量中的双缝图像为例进行说明)。区域提取技术可以保证后续图像处理仅限于目标区域,不仅大大减小运算量,还可以避免干扰区域的影响,提高对焦精度。研究人员曾提出多种区域提取及区域

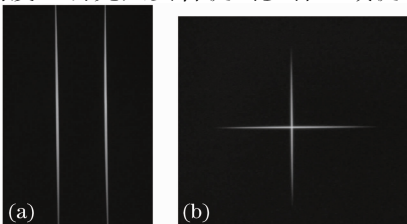


图 1 目标图像。(a)双缝图像,(b)十字图像

Fig. 1 Target images. (a) double-stripe, (b) cross

分割方法,如生长法、扫描法、Snake 模型法和基于粗糙集的改进生长法<sup>[21]</sup>等。本文利用一种基于数学形态学的条件膨胀算法识别目标区域。相对于上述方法,此方法在运算速度和提取精度方面虽然没有显著提高,但是形式简洁、原理易懂,且结合 C++ 中的链表数据结构易于实现。

首先,将图像通过

$$T_{[t_i, t_j]}[f(x)] = \begin{cases} 255, & t_i \leq f(x) \leq t_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

进行阈值化处理,阈值运算  $T$  将输入图像  $X$  中所有像素  $x$  的灰度值  $f(x)$  在范围  $[t_i, t_j]$  内时置为 255,其余置为 0。

阈值化的目的是获得图像定位的初始区域,为后续的条件膨胀算法打下基础。为有效剔除背景部分,依据多次实验结果的经验,本文在(1)式中选择  $t_i = 1.2P_c, P_c$  是所有像素灰度的平均值,  $t_j = 255$ 。阈值化之后的图像如图 2 所示。

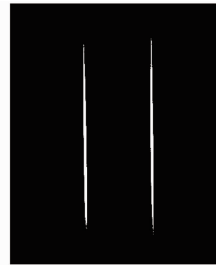


图 2 阈值化处理后的图像

Fig. 2 Thresholding results of target images

然后利用基于条件膨胀的连通域提取算法获得目标图像所在连通域。膨胀是数学形态学的基本运算,其表达式为

$$X \oplus S = \{x \mid S[x] \cap X \neq \Phi\}, \quad (2)$$

式中  $X$  表示二值图像,  $S$  是用于膨胀运算的结构元素。膨胀运算的含义是可以“击中”目标图像的结构元素的分布区域,它能把目标图像周围的背景点合并到目标图像中。

条件膨胀算法表示为

$$X_{i+1} = X_i \oplus S = \{x \mid S[x] \cap X \neq \Phi, f(x) = 255\}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

式中结构元素  $S$  是  $3 \times 3$  的方形元素,其原点为其中心单元,如图 3 所示。在膨胀算法基础上,需要条件

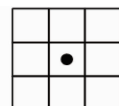


图 3 用于条件膨胀算法的结构元素

Fig. 3 Structure used in conditional dilation algorithm

$f(x)=255$  成立,即要求结构元素  $S$ “击中” $X_i$ ,还要求  $S$  原点处的灰度值为 255。 $X_0$  是目标区域内的任意一点,即灰度值为 255 的任意一点。当  $X_{i+1} = X_i$

时,算法收敛,提取连通分量成功。条件膨胀的过程说明如图 4 所示。

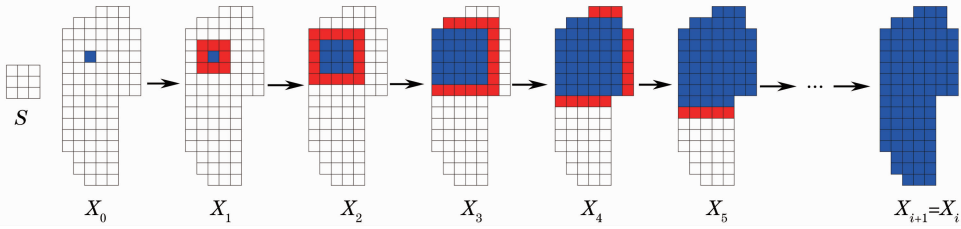


图 4 条件膨胀算法示意图

Fig. 4 Sketch of conditional dilation algorithm

由于透镜表面微尘反射或者散射光等原因, CCD 采集的图像可能存在一些散乱的小面积干扰区域,甚至因外界光干扰,存在大面积的高亮度区域,因而在提取出连通分量后,需要消除这些干扰区域。经实验发现,测量过程出现的噪声干扰主要是类圆形区域。为此定义形状因子

$$F = \frac{Y}{\pi r_{\max}^2}, \quad (4)$$

式中  $Y$  为已经提取出来的某连通域的面积,  $r_{\max}$  为此连通域的中心  $(x_c, y_c)$  到边缘的最大距离。连通域中心坐标可用重心法求出:

$$x_c = \sum_{i=1}^N x_i / N, \quad y_c = \sum_{j=1}^N y_j / N \quad (5)$$

式中  $N$  为连通域的像素总数。

对于类圆形连通区域,  $F$  值接近 1。对于双缝图像,每个单缝都是连通域,依据经验,每个单缝连通域的形状因子值都小于 0.06。结合下面的条件,可以滤除其他形状的干扰区域并确定目标图像的存在性:存在两个形状因子小于 0.06 的连通域,且二者的形状因子、面积(像素总数)和重心的纵坐标相差不大。

由于经过阈值化处理,候选目标区域将不包括目标图像边缘附近灰度值比较低的区域,这会影响到后续图像处理精度,因此需要进一步扩大目标图像所在区域。本文在基本膨胀算法的基础上,引入膨胀终止条件:

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k \oplus S = \{x \mid S[x] \cap X \neq \Phi, f(x) > P_c\}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

式中  $S$  为  $3 \times 3$  的方形结构元素,其原点为正中的单元,如图 3 所示。在膨胀算法基础上,需要条件  $f(x) > P_c$  成立,即要求结构元素  $S$ “击中” $X_k$ ,还要求  $S$  原点处的灰度值大于整个图像的灰度均值。 $X_0$  是上一阶段得到的候选目标区域。当  $X_{k+1} = X_k$  时,算法收敛,得到目标图像有效目标区域,记为  $Y = X_k$ 。

### 3 清晰度评价函数的选择

考虑到目标图像的特点,即图形简单且在边缘位置的灰度值变化剧烈,本文选用灰度梯度类函数作为自动聚焦的评价函数,其优点为:计算量小、灵敏度高。虽然该方法在增强图像边缘的同时也增强了图像的噪声,但在精对焦过程中,由于计算清晰度评价函数前经过了目标图像分割定位和去噪声处理,因此可减轻噪声的影响。

下面对常用的灰度梯度类函数,如灰度差绝对值之和函数( $F_1$ )、能量梯度函数( $F_2$ )、Brenner 函数( $F_3$ )、方差函数( $F_4$ )、Tenengrad 函数( $F_5$ )和 Laplacian 函数( $F_6$ )等<sup>[6~8]</sup>进行分析。透镜参数自动测量仪的测量头上下移动,分别采集了双缝图像的离焦图像和聚焦图像,如图 5 所示。上述的灰度梯度类清晰度评价函数曲线如图 6 所示,为方便比较,函数值都进行了归一化。



图 5 双缝的离焦-对焦-离焦图像

Fig. 5 Focused and defocused images of double stripe

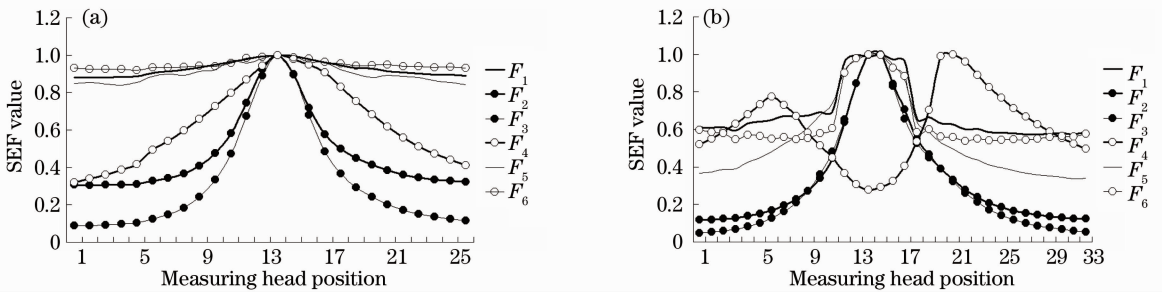


图6 图像的 SEF 值随测量头位置的变化曲线。(a)双缝图像的全局 SEF,(b)双缝图像在目标区域内的 SEF

Fig.6 Plot of image sharpness of different SEF with the change of measuring head position. (a) SEF of whole double-stripe images, (b) SEF of double-stripe images within target region

由图 6(a)可知,在全局图像内, $F_1$ 、 $F_5$  和  $F_6$  不适合做 SEF;  $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  有很好的单峰性且光滑,其中  $F_2$  和  $F_3$  在近焦区域的灵敏度好于  $F_4$ ,但  $F_4$  在离焦较大时的性能明显更好,所以  $F_4$  适合于粗对焦。

由图 6(b)可知,如果使用目标区域提取技术, $F_1$  不适合做 SEF;  $F_6$  虽然近焦性能不错,但远焦性能太差;  $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_5$  有很好的单峰性且光滑,其中  $F_2$  和  $F_3$  在近焦区域的灵敏度好于  $F_5$ ,三者在离焦较大时的性能(梯度)相差不大,其中  $F_3$  稍好一点;值得注意的是  $F_4$ ,目标区域面积随着对焦的进行在减小,导致  $F_4$  曲线具有两个波峰和一个波谷,谷值对应聚焦位置。显然  $F_4$  的整体特性使之不适合做 SEF,但其近焦区的特性还是可以满足应用要求的,即其可作为精对焦 SEF 的候选。最后要说明的是,目标区域提取技术的使用,明显改善了  $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_5$  的灵敏度。

综上所述,由于方差函数在远焦时的优秀性能,因此决定在不采用目标区域提取技术的前提下,以方差函  $F_4$  数作为粗对焦的 SEF。由于是粗对焦,可能存在的干扰区域对对焦精度的影响可以容忍。Brenner 函数的灵敏度好于能量梯度函数,所以采用 Brenner 函数  $F_3$  作为精对焦的 SEF,且结合区域提取技术,只对目标区域计算 SEF。

Brenner 函数为

$$F_3 = \sum_{x,y} [f(x+2,y) - f(x,y)]^2, \quad (7)$$

式中  $f(x,y)$  是像素  $(x,y)$  的灰度值。

方差函数为

$$F_4 = \sum_{x,y} [f(x,y) - u]^2, \quad (8)$$

式中  $u$  是灰度值均值,  $u = (1/N) \sum_{x,y} f(x,y)$ ,  $N$  是像素数。

## 4 对焦策略

单点灰度比较的爬山法对局部极值敏感,本文采用比较成熟的均值比较法<sup>[22]</sup>,即比较当前 SEF 值  $x$  和前面  $n$  个 SEF 值的均值  $\bar{x}$  的大小。如果  $\bar{x} < x$ ,说明未达到山顶,继续同向搜索,反之则改变方向且缩小步长搜索。一般局部极值多出现在远焦处,均值比较法可以有效减少随机误差。

为减少对焦时间且增加对焦可靠性,本文采用三点法预测对焦初始方向。如图 7 所示,不失一般性,假设对焦预测初始位置对应清晰度评价函数上的  $A$  点,以特定的步长向右(向左亦然)走两步,分别到达  $B$ 、 $C$  点,三点的分布共有 6 种情况。显然, $B$  点的 SEF 值不可能最小,且  $B$  点总是和最小值点位于“山”的同一侧,所以,如果  $A$  点的 SEF 值最小,则初始位置可定为  $B$  点,且初始方向向右;如果  $C$  点的 SEF 值最小,则初始位置可定为  $B$  点,且初始方向向左。总之,初始位置总是  $B$  点,初始方向背离最小值点。

考虑到 SEF 曲线的对称性并不非常完美,对该三点法进行补充,如果  $A$  点的 SEF 值与  $C$  点的 SEF 值相差不大(例如差值小于二者各自 SEF 值的  $1/10$ ),说明  $B$  点靠近正确对焦位置,则以  $B$  点为预测初始点,以特定的小步长再次执行三点法预测对焦方向,必能确定对焦初始位置和方向。

另外, $A$ 、 $B$  和  $C$  三点的间距可以设为最大对焦距离(范围)的  $1/6$  左右,以保证多数情况下三点都不会落在对焦范围之外,或者最多有一个点在对焦范围之外(在对焦范围之外时,SEF 值会很小)。而最大对焦距离一般需要由实验来确定,下文所提及的实验设备是自制测焦仪,能实现的最大对焦距离约为  $2 \text{ mm}$ 。

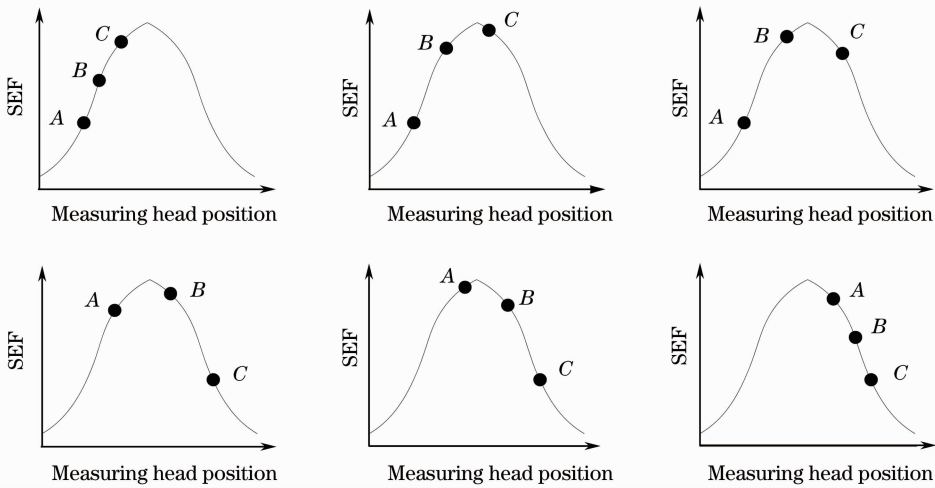


图7 三点法确定对焦初始方向

Fig. 7 Determination of the initial direction of autofocusing with three-point method

## 5 复合对焦方案与实验分析

依据清晰度评价函数和对焦策略的分析结果,设计了一种粗对焦与精对焦结合的复合自动对焦方案:

1) 图像的预处理。对 CCD 所采集的图像进行滤波。相对于均值滤波,中值滤波可以更好地保留图像边缘细节,并对扫描噪声的抑制效果非常好<sup>[23]</sup>。这对计算清晰度非常重要,所以本文采用中值滤波;

2) 粗对焦。采用全局图像的方差函数作为 SEF。用三点法确定初始对焦方向,采用均值比较的爬山搜索策略,第一次找到极值即停止;

3) 精对焦。采用 Brenner 函数(仅对目标区域进行计算)作为 SEF。以传统定步长爬山法搜索焦面,初始方向与粗对焦初始方向相反。

针对焦距为 99.55 mm 的平凸透镜进行测量实验,测量原理如图 8 所示。被照亮的分划板经平行光管和被测透镜成像于 AB 平面,测量头通过附加物镜采集此像。经测量,测量头位于系统零点时附加物镜的焦面距离透镜夹具定位面 37.21 mm。由透镜厚度为 2.37 mm 可知被测透镜焦面与夹具定位面之间的距离为  $99.55 + 2.37 = 101.92$  mm。因此,理想情况下,测量头应运动到  $101.92 - 37.21 = 64.71$  mm 处,就能恰好准确捕捉到图像。

实验中,粗对焦的三点法步长为  $300 \mu\text{m}$ ,爬山步长为  $100 \mu\text{m}$ ,  $n=3$ 。精对焦初始步长为  $50 \mu\text{m}$ ,收敛步长为  $5 \mu\text{m}$ 。每次对焦结束都对透镜焦距进行测量,测量结果如表 1 所示。双缝图像的平均对焦位置在 64.702 mm 处,理想对焦位置应该是 64.71 mm

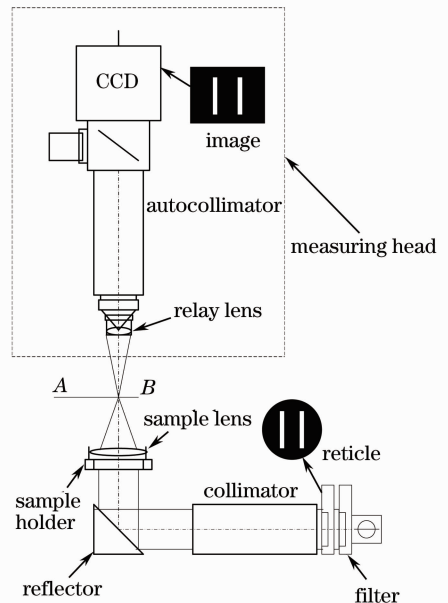


图8 透镜焦距测量原理图

Fig. 8 Principle of measuring effective focal length of optical lens

处,误差最大的一次对焦位置为 64.689 mm,误差为 0.021 mm。相应地,焦距测量精度为 0.1375%,重复精度更是达到了 0.029%,说明对焦位置对焦距的测量结果影响很小

由于在景深范围内的成像清晰度不会发生变化,对于聚焦评价函数来说不能判断出景深内两幅图像的离焦信号。如果采用相同的聚焦方式,在不考虑景深的情况下,调焦精度为  $1 \mu\text{m}$  的调焦系统也不一定比  $10 \mu\text{m}$  的系统精度好,为了合理比较不同条件下的调焦系统精度,将景深这一参量引入到精度指标中。

表 1 对焦结果  
Table 1 Results of autofocusing

No.	Focusing position /mm	EFL measurement results /mm
1	64.691	99.480
2	64.691	99.410
3	64.719	99.403
4	64.696	99.424
5	64.708	99.396
6	64.714	99.430
7	64.696	99.379
8	64.699	99.412
9	64.713	99.415
10	64.689	99.382
Average	64.702	99.413
Standard deviation	0.011	0.029
Accuracy		0.138%
Repeatability		0.029%

景深是指光学系统能同时清晰成像的物空间沿光轴方向的深度范围<sup>[24]</sup>。在 CCD 摄像系统中,设 CCD 摄像机的分辨率为  $\beta$ ,则景深由

$$D = \frac{\lambda}{2(NA)^2} + \frac{n_0 \times 10^3}{\beta M(NA)}. \quad (9)$$

表 2 不同对焦方案的性能比较

Table 2 Performance comparison of different autofocusing methods

	Consumed time/s	Focusing range/mm	Maximum error/mm
Traditional autofocusing with variance function as SEF	<3.0	≈2.00	0.032
Traditional autofocusing with Brenner function as SEF	<2.7	≈1.60	0.023
Composite autofocusing method	<3.2	≈2.00	0.021

## 6 结 论

针对光学透镜参数测量中的对焦问题,设计了一种粗对焦与精对焦结合的复合自动对焦方案。实验证明,基于数学形态学的条件膨胀算法及形状因子的应用能够实现目标图像的分割定位,并提高了清晰度评价函数的灵敏度。鉴于方差函数在远焦区的优秀性能和 Brenner 高灵敏性,在粗对焦中以全局图像的方差函数作为 SEF,并利用均值比较策略和三点法改进了爬山搜索性能,而在精对焦中选用目标区域内的 Brenner 函数作为 SEF,用传统爬山法实现焦面搜索。与传统方法相比,此方案不仅能够保证较高的对焦精度,还拥有更大的对焦范围。实验表明,本系统的对焦位置位于景深范围内,对焦误差小于 0.021 mm,而且能够保证透镜焦距的测量精度。本文提出的复合自动对焦技术已经成功应

计算,式中  $\lambda$  为光波波长; $n_0$  为介质折射率,在空气中为 1; $M$  为光学系统放大倍率; $NA$  为数值孔径。

实验所用的测量头放大倍率为 1,附加物镜焦距为 200 mm,数值孔径为 0.075,光波的波长为 0.546  $\mu\text{m}$ ,空气折射率为 1,实验中使用的 CCD 摄像机分辨率为 570 pixel,则系统物镜的景深为

$$D = \frac{\lambda}{2(NA)^2} + \frac{n_0 \times 10^3}{\beta M(NA)} = \frac{0.564}{2 \times 0.075^2} + \frac{1 \times 10^3}{570 \times 1 \times 0.075} = 71.92 \mu\text{m}$$

由于景深为 0.07192 mm,所以,在实验中只要保证测量头运动到 64.638~64.782 mm 之间,即能保证在景深范围内对焦。由表 1 数据可知,双缝对焦位置的下极限为 64.689 mm,上极限为 64.719 mm,完全在景深范围内,说明对焦效果良好。

用同样的设备,对三种对焦方案进行了对比,如表 2 所示。由表 2 可见,与传统方法相比,在对焦时间相差不大的情况下,复合对焦方案同时兼具了以 Variance 函数为 SEF 的对焦方法对焦范围大的特点和以 Brenner 函数为 SEF 的对焦方法精度高的特点。

用于多功能透镜参数自动测量仪中,此方法对其他领域的自动对焦方案设计亦有借鉴作用。

## 参 考 文 献

- 1 Qiao Naosheng, Ye Yutang, Mo Chunhua *et al.*. Method for the detection of concentric circles of photoelectric image of circular hole in printed circuit board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 75~78  
乔闹生, 叶玉堂, 莫春华等. 印刷电路板圆孔光电图像的同圆心检测方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 75~78
- 2 Z. J. Zhang, H. Hu. Measurement of the effective focal length by the centerline detection of light stripes [C]. *IEEE RAM*, 2010: 398~402
- 3 L. L. Li, W. J. Zhang, F. Li. A novel autofocusing approach for real-time through-wall imaging under unknown wall characteristics [J]. *IEEE Transac. Geosci. Remote Sensing*, 2010, **48**(1): 423~431
- 4 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhuo *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2989~2996  
刘长庚, 王大勇, 张亦卓等. 数字全息成像中基于导数的自动对

- 焦算法[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2989~2996
- 5 Ni Jun, Yuan Jiahu, Wu Qinzhong. Identification for optical image definition based on edge feature[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 172~176
- 倪 军, 袁家虎, 吴钦章. 基于边缘特征的光学图像清晰度判定[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 172~176
- 6 G. J. Chen, M. F. Zhu, Y. K. Wang *et al.*. Study on definition evaluation function based on image contrast variation [C]. Proceedings of the 2007 WSEAS International Conference on Computer Engineering and Applications, 2007: 254~258
- 7 J. Martinez-Baena, J. Fdez-Valdivia, J. A. Garcia. A multi-channel autofocusing scheme for gray-level shape scale detection [J]. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(10): 1769~1786
- 8 N. K. C. Nathaniel, A. N. Poo, M. H. Ang Jr. Practical issues in pixel-based autofocusing for machine vision [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, **3**: 2791~2796
- 9 Liu Jun, Zhao Jibing, Liu Weijun *et al.*. Gene chip microarray fluorescent spots images CCD scanning and acquiring system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 505~509
- 刘 军, 赵吉宾, 刘伟军等. 基因芯片荧光靶点阵列图像 CCD 扫描采集系统[J]. 中国激光, 2010, **37**(2): 505~509
- 10 Y. Song, M. T. Li. Research on SUSAN based auto-focusing algorithm for optical microscope application [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2006: 1237~1241
- 11 V. V. Makkapati. Segmentation based microscope autofocusing for blood smears[C]. *SPIE*, 2009, **7260**(3D): 1~8
- 12 Vesna. Popovic, Igor. Djurovic, LJubiša. Stankovic *et al.*. Autofocusing of SAR images based on parameters estimated from the PHAF[J]. *Signal Processing*, 2010, **90**(5): 1382~1391
- 13 S. Yazdanfar, K. B. Kenny, K. Tasimi *et al.*. Simple and robust image-based autofocusing for digital microscopy[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(12): 8670~8677
- 14 J. M. Geusebroek, F. Cornelissen, A. W. M. Smeulders *et al.*. Robust autofocusing in microscopy[J]. *Cytometry*, 2000, **39**: 1~9
- 15 M. Subbarao, J. K. Tyan. Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus [J]. *IEEE Transac. Pattern Analys. Mach. Intellig.*, 1998, **20**(8): 864~870
- 16 Zong Guanghua, Sun Minglei, Bi Shusheng *et al.*. Research on autofocus technique in micro-vision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1225~1232
- 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
- 17 Deng Yunkai, Wang Yu, Yang Xianlin *et al.*. The research of autofocus optimization algorithm based on contrast optimization criterion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(9): 1742~1744
- 邓云凯, 王 宇, 杨贤林等. 基于对比度最优准则的自动聚焦优化算法研究[J]. 电子学报, 2006, **34**(9): 1742~1744
- 18 P. Ge, B. F. Mao, H. J. Feng *et al.*. Design and optimization for microscope autofocus systems based on the analysis of video signals[C]. *SPIE*, 2009, **7459**(2U): 1~7
- 19 L. Q. Xu, Z. Ye, J. P. Wu *et al.*. Microscope auto-focusing system with the self-adaptive mountain-climbing search method based on PC control[C]. *SPIE*, 2008, **6834**(2E): 1~8
- 20 J. He, R. Z. Zhou, Z. L. Hong. Modified fast climbing search auto-focus algorithm with adaptive step size searching technique for digital camera[J]. *IEEE Transac. Consum. Electron.*, 2003, **49**(2): 257~262
- 21 Sun Junding, Chen Suxia, Guo Qiqiang. Automatic extraction of regions of interest based on rough sets [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2009, **28**(3): 101~107
- 孙君顶, 陈素霞, 郭启强. 基于粗糙集的图像感兴趣区域自动提取算法[J]. 传感器与微系统, 2009, **28**(3): 101~107
- 22 Yu Chao, Wang Boxiong, Zheng Hanqing *et al.*. Improved TennenGrad function for microscopic coarse autofocusing[J]. *Opt. Preci. Engng.*, 2007, **15**(5): 784~790
- 余 超, 王伯雄, 郑汉卿等. 显微镜自动粗调焦的 TennenGrad 改进算法[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(5): 784~790
- 23 Vladimir V. Khryashchev, Andrey L. Priorov, Ilya V. Apalkov *et al.*. Image denoising using adaptive switching median filter [C]. *ICIP*, 2005, **1**: 117~120
- 24 Xu Jiahua. Optical Engineering Fundamentals [M]. Beijing: China Machine Press, 1988. 117~121
- 徐家骅. 工程光学基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 117~121