

# 一种基于模糊图像处理的透镜快速测焦方法

陈荣军<sup>1,2</sup> 谭洪舟<sup>1</sup> 谭伟清<sup>1</sup> 熊文婷<sup>1</sup> 朱雄泳<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中山大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510006

<sup>2</sup>中山大学南方学院, 广东 广州 510970

<sup>3</sup>广东第二师范学院计算机科学系, 广东 广州 510000

**摘要** 焦距的精确测量直接关系到光学仪器的正常使用和技术性能的充分发挥。基于光学离焦成像模型, 结合模糊图像处理快速算法, 提出了一种新的实用性强的快速自动测焦方法。根据光学成像原理提出模糊图像条件下测焦原理的数学模型, 运用最小二乘法拟合圆的图像处理算法计算模糊图像中两弥散光斑间的距离, 利用这个距离值计算出透镜焦距。实验证明该方法能够以较高的精度估计出弥散光斑间的距离值, 从而实现精准且快速的自动测焦。该方法只需一幅模糊图像, 相对于传统的测焦方法, 减少了计算量, 提高了速度和可靠性, 降低了系统的复杂度。

**关键词** 图像处理; 成像系统; 自动测焦; 模糊图像处理; 前景提取

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0210002

## A Fast Lens Focus Measurement Method Based on Blurred Image Processing

Chen Rongjun<sup>1,2</sup> Tan Hongzhou<sup>1</sup> Tan Weiqing<sup>1</sup> Xiong Wenting<sup>1</sup> Zhu Xiongyong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*School of Information Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China*

<sup>2</sup>*Southern College, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510970, China*

<sup>3</sup>*Department of Computer Science, Guangdong University of Education, Guangzhou, Guangdong 510000, China*

**Abstract** The precise measurement of the focal length is directly related to the normal use of optical instruments and give full play to its technical performance. A new practical method based on the model of optical out of focus imaging and blurred image processing of quickly and automatically measuring the focal length is proposed. Based on the principle of optical imagery the mathematical model of focus measurement principle is proposed under the condition of blurred image. The proposed method adopts the least square method for fitting circles and calculates the distance between two diffuse light spots in blurred image. The lens focal length use the calculated distance is calculated. Experiments prove that the proposed method can estimate the distance between diffuse light spots with high accuracy so as to realize the measurement of automatic focus more accurately and quickly. The proposed approach takes only one blurred image, compared with traditional focus measurement method, the amount of calculation is reduced, the speed and reliability is improved, the complexity of system is reduced.

**Key words** image processing; imaging systems; automatic focus measurement; blurred image processing; foreground extraction

**OCIS codes** 100.2000; 120.6150; 080.2720

收稿日期: 2014-08-01; 收到修改稿日期: 2014-09-17

基金项目: 国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目(U0935002)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(2013LYM\_0122)

作者简介: 陈荣军(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事智能信息检测与处理、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: crj321@163.com

导师简介: 谭洪舟(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能信息检测与处理、数字图像处理、芯片设计等方面的研究。E-mail: issthz@mail.sysu.edu.cn

## 1 引 言

随着光学技术的发展,已经对透镜焦距的测量理论以及测量技术进行了大量的研究。满足工业应用要求,操作简单、成本低廉的测焦方法逐渐成为研究的热点。焦距的测量精度作为透镜及其阵列原件的重要参数将直接影响透镜光学系统的性能。在透镜测焦领域,已经提出了很多种测量焦距的方法<sup>[1-15]</sup>,其中比较新的方法主要有:1)基于光栅多缝衍射的转角法<sup>[8]</sup>,该方法具有较高的测量效率,适合阵列数较多、焦距较短的微透镜阵列测量,但对于不同的微透镜阵列,利用光栅衍射转角法测量需要选取合适的光源和光栅以避免衍射光斑发生干扰;2)基于微分图像的自相关法<sup>[9]</sup>,该方法从自相关图的环形槽鉴别出离焦图像的弥散半径,结合几何光学关系推导对焦位置,具有较高测量精度,但在离对焦位置较近时误差增大;3)三维梯度法<sup>[10]</sup>,即不断改变物距,获得一系列像,采用高通滤波器得到离焦图像,建立起一个三维梯度模型,从而计算出透镜的焦距,这种方法的缺陷就是需要一连串的图片,且计算量大;4)基于 Shack-Hartmann 波前测量法<sup>[11-12]</sup>,该技术测量精度高,缺点是需要选取合适的光源,不同波长的光源对同一测量目标的影响较大;5) Talbot-Moire 条纹法<sup>[13-15]</sup>,该方法只需瞄准条纹和测量透镜移动量,精度高,操作也十分简单,但易受噪声影响,而且只适合于像差小的透镜,对于长焦距透镜,操作不方便。

为了克服上述测焦方法的不足,本文提出了一种透镜自动测焦的方法,与现有测量焦距的方法不同,利用光学成像原理拍摄一幅不需要精确对焦的模糊图像即可快速自动测定透镜的焦距。经过实验验证,该方法具有较高的测量速度和精度。

## 2 算法原理

利用光源位置固定的两束相同波长的同一激光垂直通过透镜后产生折射,在透明光屏上形成两个模糊像点(忽略像差造成的影响),然后启动自动测焦系统,对光屏拍照、读取图像、调用图像处理算法计算得出图像上两点间的距离,最后利用本文提出的数学模型计算出透镜的焦距,通过显示屏输出焦距值。成像原理如图 1 所示,在  $K$  点和  $L$  点分别固定一个激光源。过  $K$ 、 $L$  两点光线垂直入射透镜  $MN$  相交于  $A$  点和  $B$  点,在光屏上分别形成弥散光斑  $E$  和  $D$ 。实际测量时,激光能量主要集中在主光线  $KA$ 、 $LB$  上,因此以主光线在光屏上所形成的光斑  $D$ 、 $E$  为主要测量目标。

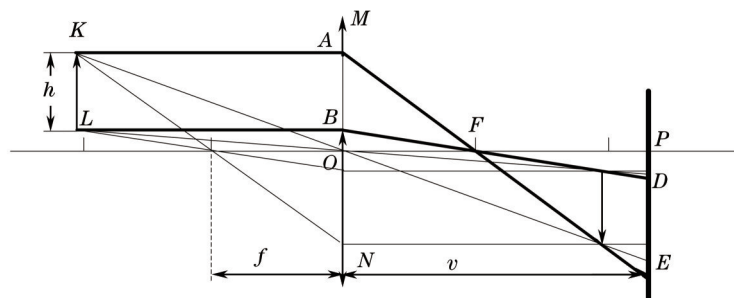


图 1 光学成像示意图

Fig.1 Schematic diagram of the optical imaging

由光学成像原理可以推导得到:

$$\begin{cases} f = \frac{hv}{h - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, & |OP| = f \\ f = |OD| = |OE| = v, & |OP| < f, \\ f = \frac{hv}{h + \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}, & |OP| > f \end{cases} \quad (1)$$

式中  $f$  为透镜焦距,  $h$  为  $KL$  的高度, 像平面上建立直角坐标系原点为  $O'(0,0)$  两个弥散光斑的质心坐标分别记为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ ,  $v$  为像距即  $OP$  间的长度。其中两束激光间的高度  $h$  和透镜与光屏间的距离  $v$  是可以自主设定的,  $d$  为弥散光斑  $D$ 、 $E$  质心间的距离, 是需要求解的物理量。

由(1)式可知,要计算焦距需要求出两个弥散光斑质心间的距离  $d$ ,采用图像处理算法对模糊光斑做拟合,然后求出质心获得距离值。

### 3 利用模糊图像求弥散光斑间的距离

依据第2节中的算法原理,在计算透镜焦距时,面临的主要问题之一是由两束激光经过透镜非对焦照射到光屏产生两个弥散光斑,继而求弥散光斑质心之间的距离。由于光屏上所得图像为两个近似圆的弥散光斑,因而可以将问题转化成寻找圆的质心并求质心之间的距离。

在数字图像处理技术中,寻找质心的方法很多,需要解决的关键问题是如何定位圆的位置<sup>[16-17]</sup>。目前解决类似问题的方法中,多采用边缘检测或亚像素边缘检测提取圆边缘,再用 Hough 变换<sup>[18]</sup>或几何学方法或直接计算欧式几何中心来求质心,但 Hough 变换计算量大,在算法速度上受到很大限制,难以达到快速测焦的应用需求;也有采用曲线拟合的方法对圆边缘进行拟合<sup>[19-21]</sup>。然而在实际应用当中,采用现有的边缘检测方法将耗费大量计算时间,难以获得理想的效果,且对硬件系统的要求相对较高。在保证检测效果的前提下尽可能提高运算速度,提出采用跟踪物体外部边缘的方法,代替边缘检测,然后采用最小二乘法<sup>[22]</sup>拟合圆边缘并求出质心。

基于上述分析,通过以下算法流程来实现透镜焦距的计算:1)图像预处理;2)跟踪弥散光斑外边缘;3)拟合圆并求圆心;4)计算圆心之间的距离;5)计算透镜焦距。

#### 3.1 图像预处理

图像预处理主要分为二值化和去噪两个过程。其中二值化采用全局阈值算法,选取的阈值通过实验统计获得。通过对实验图片的分析发现激光成像图片存在大量背景和少量高亮度前景。图2为选取的四幅实验图像,分别对四幅图像进行直方图统计。

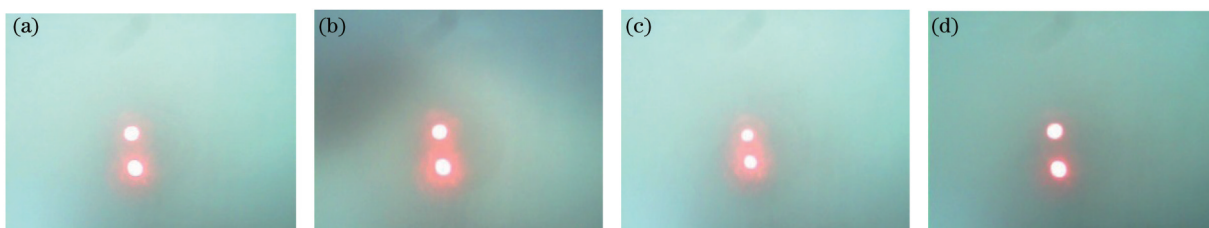


图2 实验图像

Fig.2 Experimental images

直方图统计结果如图3所示,横坐标为灰度值,纵坐标为像素值,其背景所在灰度区间与前景所在灰度区间有明显的界限。两者之间存在较长的一段灰度区间(230,240)像素点个数为零。因而采取全局阈值二值化方法,经过多次实验统计分析得最佳阈值范围为0.90~0.94,本文算法将二值化阈值取为0.92。根据弥散光斑图像二值化后可能存在盐噪声的特征,采用中值滤波算法能达到很好的去噪效果。

#### 3.2 跟踪弥散光斑外边缘并拟合圆求圆心距

预处理过程所得二值图像的主要特征是前景为两个不规则的圆盘。区别于传统的基于梯度变化的边缘检测算法,不考虑边缘问题,直接利用不规则圆盘的连通性,采用搜索连通域的方法定位圆的位置,并将不同连通域用不同的链表标注,从而得到圆外边缘像素点的坐标。采用跟踪弥散光斑轮廓的方法,不仅提高了运算速度,而且避免了边缘检测中存在的误差。

激光照射存在弥散现象,因而由上述边缘跟踪方法获得的轮廓并非规则圆。为提高计算精度,采用最小二乘法拟合圆边缘。最小二乘法是一种精确分析法,它通过最小化误差的平方和找到一组数据的最佳函数匹配。如本文所研究的这类问题,当圆心之间的距离的真值绝对不可知的时候,可以用最小二乘法<sup>[22]</sup>,使得误差的平方和为最小。

圆的一般方程为

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0. \quad (2)$$

如图4所示样本集  $(X_i, Y_i), i \in (1, 2, 3, \dots, N)$  的点到质心  $(x, y)$  的距离为

$$d_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}, \quad (3)$$

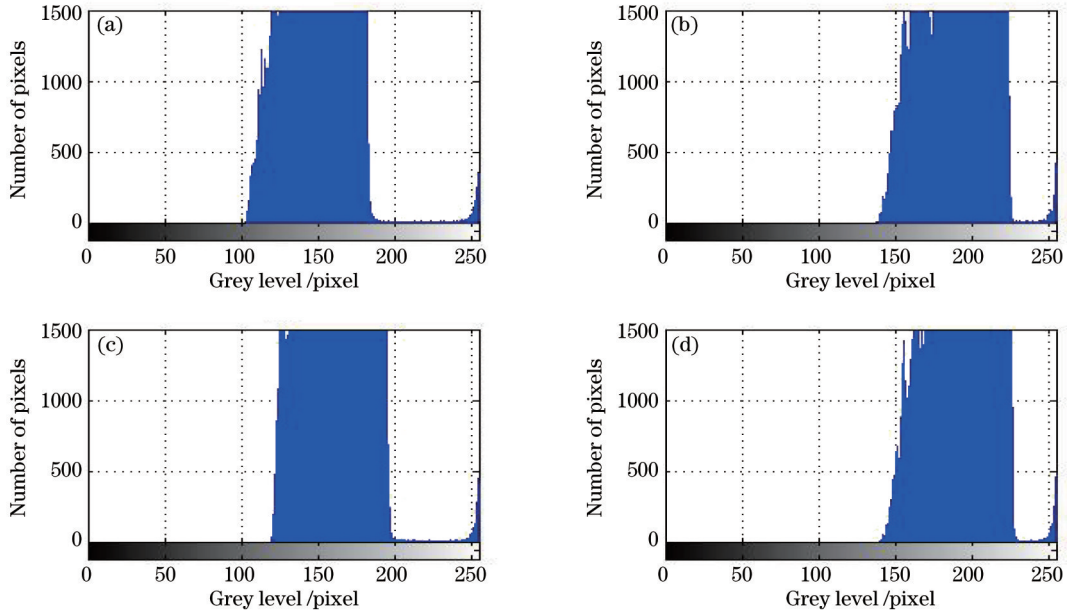


图3 直方图统计结果

Fig.3 Histogram statistics results

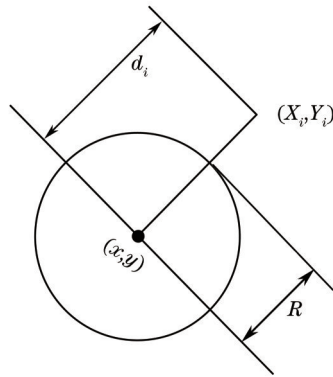


图4 圆拟合示意图

Fig.4 Diagram of circle fitting

设点  $(X_i, Y_i)$  到圆心的距离  $d_i$  与半径  $R$  的平方差为

$$\delta_i = d_i^2 - R^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 - R^2 = X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c, \quad (4)$$

令  $Q(a, b, c)$  为  $\delta_i, i \in (1, 2, 3, \dots, N)$  的平方和为

$$Q(a, b, c) = \sum \delta_i^2 = \sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2, \quad (5)$$

式中使得  $Q$  值为最小的  $a, b, c$  即为所求参数, 描述为

$$(a, b, c) = \arg \min Q = \arg \min \sum (X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)^2, \quad (6)$$

因为  $Q(a, b, c) > 0$ , 所以此函数存在大于或等于 0 的极小值。

$Q(a, b, c)$  分别对  $a, b, c$  求偏导, 令偏导等于 0, 得到极值点, 比较所有极值点的函数值即可得到最小值。

$$\begin{cases} \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial a} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)X_i = 0 \\ \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial b} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c)Y_i = 0 \\ \frac{\partial Q(a, b, c)}{\partial c} = \sum 2(X_i^2 + Y_i^2 + aX_i + bY_i + c) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

解这个方程组得：

$$\begin{cases} (N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i)a + (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i)b + N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i = 0 \\ (N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i)a + (N \sum Y_i^2 - \sum Y_i \sum Y_i)b + N \sum Y_i^3 + N \sum Y_i X_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i = 0 \end{cases} \quad (8)$$

令

$$\begin{cases} \alpha = N \sum X_i^2 - \sum X_i \sum X_i \\ \beta = N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i \\ \gamma = N \sum Y_i^2 - \sum Y_i \sum Y_i \\ \rho = N \sum X_i^3 + N \sum X_i Y_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum X_i \\ \omega = N \sum Y_i^3 + N \sum Y_i X_i^2 - \sum (X_i^2 + Y_i^2) \sum Y_i \end{cases}, \quad (9)$$

则

$$\begin{cases} a = \frac{\omega\beta - \rho\gamma}{\alpha\gamma - \beta^2} \\ b = \frac{\omega C - \rho\beta}{\beta^2 - \gamma\alpha} \end{cases} \quad (10)$$

那么, 质心坐标(x,y)的估计值为

$$\begin{cases} x = \frac{\omega\beta - \rho\gamma}{\alpha\gamma - \beta^2} / -2 \\ y = \frac{\omega C - \rho\beta}{\beta^2 - \gamma\alpha} / -2 \end{cases} \quad (11)$$

以这种方法求出来的两个圆心分别记为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ , 则要求的圆心之间的距离为

$$d = \left\{ \left[ \left( \frac{\omega_1 \beta_1 - \rho_1 \gamma_1}{\alpha_1 \gamma_1 - \beta_1^2} / -2 \right) - \left( \frac{\omega_2 \beta_2 - \rho_2 \gamma_2}{\alpha_2 \gamma_2 - \beta_2^2} / -2 \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\omega_1 C_1 - \rho_1 \beta_1}{\beta_1^2 - \gamma_1 \alpha_1} / -2 \right) - \left( \frac{\omega_2 C_2 - \rho_2 \beta_2}{\beta_2^2 - \gamma_2 \alpha_2} / -2 \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

### 3.3 求圆心距实验结果与对比分析

图像处理算法实验采用 Matlab 7.11.0 仿真。图 5 为圆心定位的实验结果图, 其中图 5(a)为原图像, 图 5(b)为对应的二值化图像, “\*”号标记处为检测到的圆心位置。

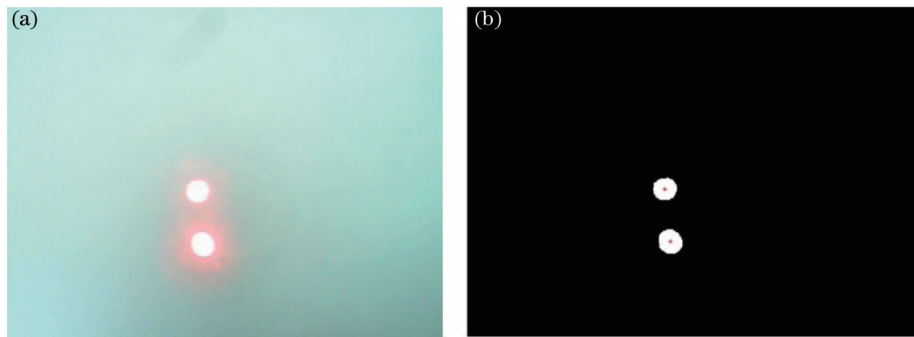


图 5 圆心检测结果图。(a)原图; (b)二值图

Fig.5 Center of circle detection results. (a) Original image; (b) binary image

目前定位圆位置的方法中, 多使用边缘检测提取前景图像边缘, 但边缘检测算法通常计算量较大, 速度慢。表 1 是采用 Sobel、Prewitt、Roberts、LoG、Canny 边缘检测算子<sup>[23]</sup>与本文方法在对图 5(a)处理时的结果及运算速度对比。

为方便实验结果的对比, 有必要做以下说明:

- 1) 定义 4 邻接的两个相邻像素之间为 1 个距离单位;

2) 实验图像中两弥散光斑间的标准参考距离为 76.3989 个距离单位(对激光光斑进行能量检测,定位能量最集中的点为光斑质心,再调用 Matlab 中的 norm 函数计算欧几里得距离,从而确定为标准参考值)。

表 1 本文算法与边缘检测算法的对比

Table 1 Comparison of the proposed algorithm and edge detection algorithms

Algorithm	Sobel	Prewitt	Roberts	LoG	Canny	Proposed algorithm
Distance	77.4145	77.3175	77.3175	77.4145	76.3217	76.4199
Error	1.0156	0.9186	0.9186	1.0156	-0.0772	0.021
Time /s	0.29	0.31	0.26	0.58	0.54	0.04

通过实验对比分析,本文算法相比经典边缘检测算子精度更高,速度提高了一个数量级,达到了较低成本硬件系统也能快速准确测焦的目的。

### 3.4 计算透镜焦距

通过前景图像轮廓追踪方法获得弥散光斑边缘像素的坐标值,再由最小二乘法拟合圆边缘求出质心坐标,计算出两个弥散光斑的质心间的距离  $d$ 。将  $d$  值代入测焦系统数学模型即(1)式,可求得透镜焦距为

$$\left. \begin{aligned}
 f &= \frac{hv}{\left\{ h + \left[ \left[ \frac{\omega_1\beta_1 - \rho_1\gamma_1}{\alpha_1\gamma_1 - \beta_1^2} / -2 \right] - \left[ \frac{\omega_2\beta_2 - \rho_2\gamma_2}{\alpha_2\gamma_2 - \beta_2^2} / -2 \right] \right]^2 + \left[ \left[ \frac{\omega_1\beta_1 - \rho_1\gamma_1}{\alpha_1\gamma_1 - \beta_1^2} / -2 \right] - \left[ \frac{\omega_2\beta_2 - \rho_2\gamma_2}{\alpha_2\gamma_2 - \beta_2^2} / -2 \right] \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}, & |OP| < f \\
 f &= |OD| = |OE| = |OP|, & |OP| = f. \quad (13) \\
 f &= \frac{hv}{\left\{ h - \left[ \left[ \frac{\omega_1\beta_1 - \rho_1\gamma_1}{\alpha_1\gamma_1 - \beta_1^2} / -2 \right] - \left[ \frac{\omega_2\beta_2 - \rho_2\gamma_2}{\alpha_2\gamma_2 - \beta_2^2} / -2 \right] \right]^2 + \left[ \left[ \frac{\omega_1\beta_1 - \rho_1\gamma_1}{\alpha_1\gamma_1 - \beta_1^2} / -2 \right] - \left[ \frac{\omega_2\beta_2 - \rho_2\gamma_2}{\alpha_2\gamma_2 - \beta_2^2} / -2 \right] \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}, & |OP| > f
 \end{aligned} \right\}$$

## 4 实验分析

为了验证提出的基于模糊图像的快速透镜测焦方法,搭建了实验平台如图 6 所示。实验设计的条件:光源选取卓立汉光的红光半导体激光器,其型号为 LD-650-2.5-5T,波长  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,功率  $P = 2.5 \text{ mW}$ ;接收光屏选择毛玻璃片;摄像头选取天敏公司生产的 S301 摄像头,为互补金属氧化物半导体(CMOS)传感器,像素为 1600 万,最高分辨率为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ ;操作系统为 Microsoft Windows XP Professional,中央处理器(CPU)为 Intel(R) Core(TM)2 Duo。

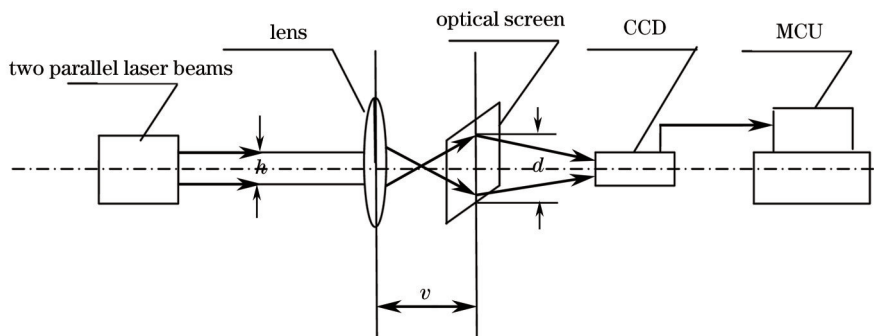


图 6 透镜测焦原理图

Fig.6 Principle diagram of the lens focus

透镜测焦原理如图 6 所示,将透镜位置固定,透镜与光屏间的距离值输入到控制单元(MCU),启动摄像头对光屏上的图像进行拍照,图像通过串口输入到控制单元,启动图像处理模块,由于两束激光间的距离  $h$  为

定值,光屏与透镜间的距离  $v$  为已知量,关键点为  $d$  的测定,采取如下方法,图 1 中  $DE$  为透明光屏上接收到的两个模糊光斑质心间的距离,调用图像处理模块计算出图像上两模糊光斑质心间的距离  $d$ 。

控制器判断两弥散光斑是否重合,若重合则该点(即重合点)为焦点;若不重合且光屏上两像点的距离小于两激光源之间的距离时,先假定光屏所处的位置为大于一倍焦距处,利用(13)式选取  $|OP| < f$ ,计算出  $f$  的值,运用反馈原理,比较  $f$  与  $v$  值的大小,若  $f < v$ ,则计算的结果是正确,否则选取  $|OP| > f$  进行计算,最后,控制单元读取计算出的  $f$  值并控制显示设备以十进制方式显示焦距  $f$  的值。

实验中测量了多组数据,现选取其中一组进行详细分析,对焦距为 150 mm 的标准透镜进行测量,测量结果如表 2 所示。

表 2 150 mm 标准透镜测量结果  
Table 2 Measurement results of 150 mm standard lens

Measured value	Measuring result /mm	Bias /mm	Relative error /%
$f_1$	150.4080	0.4080	0.272
$f_2$	150.3939	0.3939	0.263
$f_3$	150.4325	0.4325	0.288
$f_4$	150.2911	0.2911	0.194
$f_5$	150.2757	0.2757	0.184
$f_6$	150.3201	0.3201	0.213
$f_7$	150.4804	0.4804	0.320

多次测量焦距平均值为

$$\bar{f} = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7}{7} = 150.3717. \quad (14)$$

标准偏差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{7-1} \sum_{i=1}^7 (f_i - \bar{f})^2} = 0.0714. \quad (15)$$

相对误差为

$$E = \frac{\Delta f}{f} = \frac{|f - \bar{f}|}{f} = 0.25\%. \quad (16)$$

测量结果为

$$f = \bar{f} \pm \sigma = 150.3717 \pm 0.0714. \quad (17)$$

为了进一步验证所提出方法的有效性,进行了其他不同类型透镜焦距测量实验,考虑到实验步骤相同,论文篇幅有限,这里直接给出实验测量结果,如表 3 所示。

表 3 数据分析  
Table 3 Data analysis

Lens	Standard reference value /mm	Measured value /mm	Error /%
$\phi 50$ flat convex spherical mirror	150.00	$150.3717 \pm 0.0714$	0.25
$\phi 25.4$ double concave spherical mirror	-75.00	$-75.1765 \pm 0.1058$	0.24
$\phi 12.7$ double convex spherical mirror	50.00	$50.0667 \pm 0.2310$	0.13
$\phi 12.7$ double convex spherical mirror	15.00	$15.0537 \pm 0.0420$	0.36

实验结果存在一定的误差,定标修正可以减小系统误差的影响。选取定标标准,对仪器进行修正,可进一步提高精度。多次测量取平均值可减少偶然误差的影响。

所述测量系统的精度达到应用要求,与国际上大多数公司的精度比较接近,测量精度的对比结果如表 4 所示。

目前市场上通用的测焦仪器成本高昂、装置的复杂度大,而本文提出的测量数学模型易于理解,测焦系统操作简捷,成本低廉。由实验数据分析结果可知,本文方法与现有的国际知名公司生产的测焦仪相比,在

表4 测量精度对比

Table 4 Comparison of measurement accuracy

Instrument name	Measurement accuracy /%
Germany TRIOPTIC Company OptiSpheric Series <sup>[24]</sup> Angular instrument	0.03~0.3
Germany MOELLER-WEDEL Optical MELOS 530 Series <sup>[25]</sup>	0.30
Germany OEG Company OTS 200 Series <sup>[26]</sup>	$\pm 0.04 \sim \pm 0.3$
Proposed measuring system	0.13~0.36

同等的精度水平上提高了测量速率,适用于测量大部分透镜的焦距。

## 5 结 论

提出了一种基于模糊图像处理的透镜快速测焦方法,利用基于光学离焦成像原理提出的测量焦距的数学模型,通过对不需要精确对焦得到的模糊图像进行前景图像轮廓提取、最小二乘法拟合圆等处理方法,计算两个弥散模糊像点间的距离,从而求得透镜焦距。实验结果表明,该方法仅需一幅离焦模糊图像就能快速测出透镜焦距,误差为0.13%~0.36%,与国际大公司测焦仪器精度接近。该方法以较低成本实现了高精度的测量工作,且操作简单实用,算法速度快。

## 参 考 文 献

- 1 P T Yap, P Raveendran. Image focus measure based on Chebyshev- moments [J]. IEEE, Vision, Image and Signal Processing, 2004, 151(2): 128-136.
- 2 D Chen, H Shao, Q Dai. Robust focal length estimation based on minimal solution method [C]. 3DTV Conference, 2011: 1-4.
- 3 A Anand, V K Chaniwal. Measurement of parameter of simple lenses using digital holographic interferometry and a synthetic reference wave [J]. Appl Opt, 2008, 46(11): 2022-2026.
- 4 Y P Kumar, S Chatterjee. Technique for the focal length measurement of positive lenses using Fizeau interferometry [J]. Appl Opt, 2009, 48(4): 730-736.
- 5 Chen Hao, Lu Heng, He Yong, *et al.*. Uncertainty analysis and design of long focal length measuring system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(6): 71-77.  
陈 好, 陆 衡, 何 勇, 等. 长焦距测量仪的设计和测量不确定度分析 [J]. 光电工程, 2013, 40(6): 71-77.
- 6 Huang Shengye, Lin Jiaming, Sha Dingguo, *et al.*. Study focus measurement based on LCD and digital image processing [J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 74-76.  
黄生野, 林家明, 沙定国, 等. 基于液晶分划和数字图像处理的正透镜焦距测量研究[J]. 光学技术, 2002, 28(1): 74-76.
- 7 Hu Xiaoming. The Research of Focal Length Automatic Measurement System on Infated Optical Lens [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.  
胡晓明. 红外物镜焦距自动测量系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- 8 Zhu Xianchang, Cao Xuedong, Wu Shibin, *et al.*. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multislit diffraction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(5): 0523001.  
朱咸昌, 曹学东, 吴时彬, 等. 基于光栅多缝衍射的转角法测量微透镜焦距[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523001.
- 9 Huang Yan, Xu Qiaoyu, Ye Dong, *et al.*. Auto-focus method based on autocorre--lation of derivative image [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3435-3440.  
黄 艳, 许巧玉, 叶 东, 等. 基于微分图像自相关的自动对焦法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3435-3440.
- 10 M B Ahmad. Focus measure operator using 3D gradient [C]. International Conference on Machine Vision, 2007. 18-22.
- 11 D R Neal, J Copland, D A Neal, *et al.*. Measurement of lens focal length using multi-curvature analysis of Shack-Hartmann wavefront data [C]. SPIE, 2004, 5523: 243-255.
- 12 Wu Jiajie, Chen Jiabi, Xu Ancheng, *et al.*. Focal length measurement based on Hartmann-Shack principle [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(6): 912-915.  
吴佳杰, 陈家璧, 徐安成, 等. 基于哈特曼-夏克波前测量原理的焦距测量[J]. 光子学报, 2011, 40(6): 912-915.
- 13 Zhao Kang. Long Focal Length Measurement Method Based on Talbot-Moiré [D]. Chengdu: Sichuan Universtiy, 2005.  
赵 康. 利用泰伯-莫尔法的透镜长焦距测量[D]. 成都: 四川大学, 2005.



- 14 Wu Lingling. The Research of Long Focal Length Measurement Method Based on Talbot-Moiré [D]. Xi'an: Graduate University of Chinese Academy of Sciences Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, 2010.  
吴玲玲. 基于Talbot-Moiré技术的长焦透镜焦距测量方法的研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2010.
- 15 Hou Changlun. Long Focal Length Measurement System Research Based on Talbot Effect [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.  
侯昌伦. 基于Talbot效应的长焦距测量系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- 16 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.  
李晶, 巩岩, 呼新荣, 等. 哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.
- 17 Xu Yong, Guo Pengyu, Long Gucan, *et al.*. Research on fully automatic camera calibration method [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612007.  
许勇, 郭鹏宇, 龙古灿, 等. 摄像机全自动标定方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612007.
- 18 M Silveira. Antibacterial activity detection and evaluation based on the detection of multiple concentric circles with the Hough transform [C]. Computer and Robot Vision, 2004: 329-335.
- 19 Ni Jun, Yuan Jiahui, Wu Qinzhang. 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断[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 172-176.
- 20 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocus criterion [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1): 35-39.  
孙杰, 袁跃辉, 王传勇. 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.
- 21 Wang Canjin, Sun Tao, Chen Juan. Hybrid filter based on pixel classification for laser active imaging [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0309001.  
王灿进, 孙涛, 陈娟. 基于像素点分类的激光主动成像混合滤波[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309001.
- 22 H Juanli, D Jiabin, H Chang. An algorithm for circle curve fitting based on the constrained least square model represented by mosaic observation points [C]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009: 1-4.
- 23 Rafael C Gonzal, Richard E Woods. Digital Image Processing [M]. Ruan Qiuqi, *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 443-467.  
冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 等. 译. 北京: 电子工业出版社, 2011. 443-467.
- 24 The OptiSpheric series focal length measuring instrument of German TRIOPTIC company [EB/OL]. [2013-06-25]. <http://www.trioptics.com/optispheric/description.php>.
- 25 The MELOS 530 series focal length measuring instrument of German MOELLER-WEDEL Optical [EB/OL]. [2013-06-25]. <http://www.moeller-wedel-optical.com/en/produkte/optical-testing-instruments/melos-530.html>.
- 26 The OTS 200 series focal length measuring instrument of German OEG company [EB/OL]. [2013-06-25]. <http://www.optophase.com/Brochure/OEG/OTS.pdf>.

栏目编辑: 苏岑