

文章编号: 0253-2239(2007)02-0253-6

# 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法\*

敖 磊 谭久彬 崔继文 康文静

(哈尔滨工业大学 超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为满足高精度测量和瞄准跟踪系统中对激光 CCD 自准直仪的测量精度和实时性的要求, 提出一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法。首先利用变结构元广义形态学边缘检测算法, 充分提取图像边缘细节信息的同时抑制图像噪声的影响, 然后采用多项式插值算法对圆目标轮廓进行快速亚像素定位, 最后利用最小二乘拟合方法实现了圆目标中心的精确定位。实验结果表明, 该定位方法稳定性好, 定位精度高且实时性强, 应用该方法改进后激光 CCD 自准直仪的测量精度由 2" 提高到  $\pm 0.25''$ , 且单次测量时间小于 0.23 s, 可满足激光 CCD 自准直仪在小角度测量和瞄准跟踪等领域的高精度实时测量需求。

**关键词:** 激光 CCD 自准直仪; 变结构元广义形态学; 多项式插值; 亚像素定位; 最小二乘拟合

中图分类号: TP391 文献标识码: A

## Fast and Precise Center Location for Circle Target of CCD Laser Autocollimator

Ao Lei Tan Jiubin Cui Jiwen Kang Wenjing

(*Institute of Ultra-Precision Optical & Electronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

**Abstract:** To meet the requirements for measuring accuracy and real-time performance of CCD laser autocollimators in fields of high-accuracy metrology and aiming and tracing system, a fast and precise center location method for circle target of CCD laser autocollimator is proposed. The specific characteristics of the circle target edge are fully extracted by using multiple structuring elements-based generalized morphological edge detection, while the influences of the noises in images are diminished. Then, the edge is quickly located in subpixel precision by adopting the polynomial interpolation method, and the center position of the circle target is acquired accurately by using circle fitting method based on least square fitting method. Experimental results show that the proposed method is fast, stable and accurate, and the measuring accuracy of the modified CCD laser autocollimator is improved from 2 arcsec to  $\pm 0.25$  arcsec in 0.23 s (a single measurement process) using the proposed method. The proposed method can efficiently fulfill the requirements for high accuracy and real-time performance of CCD laser autocollimators in small angle measuring and tracing systems.

**Key words:** CCD laser autocollimator; multiple structuring elements-based generalized morphology; polynomial interpolation; subpixel edge location; least square fitting method

### 1 引 言

光电自准直仪作为一种高精度的小角度测量仪器, 在高精度的瞄准及定位方面有着不可替代的作用, 现代化高精度测量和瞄准跟踪系统的发展对光

电自准直仪的测量精度提出了更高的要求<sup>[1~3]</sup>, 同时, 动态跟踪系统的发展也对 CCD 数据处理的实时性提出了更高的要求<sup>[4,5]</sup>等。光电自准直仪中典型的激光 CCD 自准直仪因其较高的测量精度和稳定

\* 国家自然科学基金(50275041)资助课题。

作者简介: 敖 磊(1980—), 男, 四川成都市人, 博士研究生, 主要从事超精密光电测试技术以及图像处理技术的研究。  
E-mail: ao\_lei@126.com

导师简介: 谭久彬(1955—), 男, 工学博士, 教授、博士生导师, 主要从事超精密测量技术与仪器工程的研究。  
E-mail: jbtan@hit.edu.cn

收稿日期: 2006-04-10; 收到修改稿日期: 2006-05-22

性得到了广泛的应用<sup>[6~10]</sup>,但其常用的定位方法,如重心定位法<sup>[7]</sup>、矩心内插法<sup>[8]</sup>等,均存在定位精度低、重复性差且计算速度慢的缺点。因此,寻求快速高精度的中心定位算法已成为提高激光 CCD 自准直仪测量精度和实时性的迫切要求解决的问题。

在图像处理中,边缘的有效检测直接影响后续边缘及中心的定位精度,传统的梯度检测算子<sup>[11]</sup>利用图像像素间的差分运算提取图像的边缘,虽能有效地提取边缘,但对图像噪声敏感且计算速度慢。目前,基于图像几何结构特征的数学形态学边缘提取由于其在快速检测边缘的同时能有效地抑制图像的噪声而得到了广泛的运用<sup>[12]</sup>。近年来亚像素边缘定位的提出可突破物理分辨力的限制,国内外大量学者对此进行了深入的研究并提出许多方法<sup>[13~17]</sup>,这些算法在抗干扰性、运算量与定位精度上都不同,其中多项式插值法<sup>[13]</sup>由于其运算量最

小,重复性好且定位精度较高的优点而得到了广泛的运用。为了进一步提高边缘的定位精度,本文提出一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法,首先采用变结构元广义形态学边缘检测算法,然后采用多项式插值算法对圆目标轮廓进行快速亚像素定位,最后采用最小二乘拟合法实现对激光 CCD 自准直仪圆目标中心的快速高精度定位。

## 2 测量原理

如图 1 所示,激光 CCD 自准直仪采用激光照亮位于准直物镜焦平面上的通光圆孔目标,经过分光镜和准直物镜后,准直为平行的准直光束射出,经过放置在被测物上的测量反射镜反射后,由准直物镜会聚,经分光镜成像于 CCD 像面上。

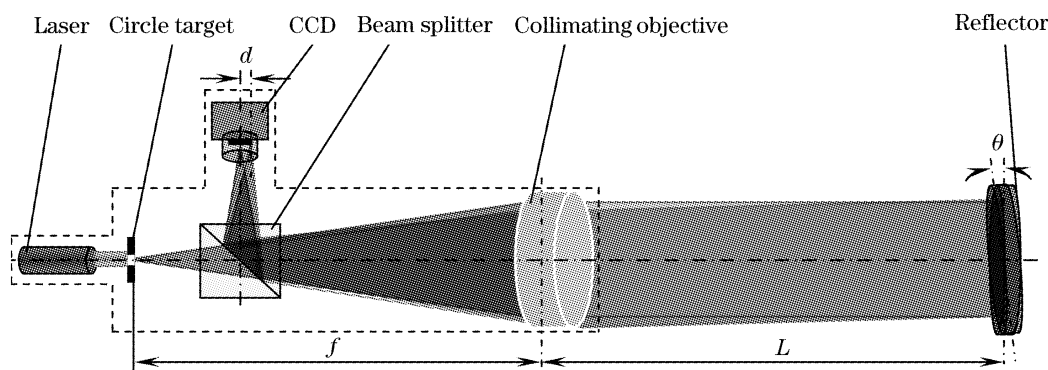


图 1 激光 CCD 自准直仪原理框图

Fig. 1 Frame of CCD laser autocollimator

当测量反射镜发生小角度变化时,通光圆孔在 CCD 像面所成的像将产生线位移,由此可计算出相应的角度变化。在被测角  $\theta$  很小,约在  $10'$  以内的时候,测量公式近似表示为

$$\theta = d/(2f), \quad (1)$$

其中  $d$  为通光圆孔在 CCD 上所成的圆目标像的中心位置变化量; $f$  为准直物镜的焦距。由(1)式可知,为了提高激光 CCD 自准直仪的测量精度,圆目标中心位置的变化量  $d$  必须被精确获取。

## 3 圆目标中心精确定位方法

### 3.1 变结构元广义形态学边缘提取算法

数学形态学边缘提取利用预先定义的结构元对图像进行匹配或局部修正,可在提取边缘细节信息的同时抑制噪声。但只采用单一的结构元素,在进行边缘提取并滤除噪声的同时,由于其方向和结构的单一性也会损失一些图像边缘的细节特征,为此,

本文采用一种新颖的变结构元广义形态学边缘提取算法对图像进行有效的边缘检测。

设  $f(x, y)$  为定义在二维离散空间  $Z^2$  (表示整数集合)上的数字图像,结构元  $B(k, l)$  为  $Z^2$  上的子集,即  $B(k, l) \subset Z^2$ ,形态膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f \oplus B)(x, y) = \max_{(k, l) \in B} [f(x - k, y - l) + B(k, l)], \quad (2)$$

$$(f \ominus B)(x, y) = \min_{(k, l) \in B} [f(x + k, y + l) - B(k, l)]. \quad (3)$$

采用广义形态学边缘提取算法检测得到的边缘图像  $E_{ij}(x, y)$  为

$$E_{ij}(x, y) = \{ [f(x, y) \oplus B_i(x, y)] - [f(x, y) \ominus B_j(x, y)] \}, \quad (4)$$

其中  $B_i(k, l)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 和  $B_j(x, y)$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) 为选定的变结构元。

利用变结构元在结构和方向上的对称和互补特性,取其边缘提取结果的累计平均值作为输出,可充

分提取图像边缘各个方向上的细节特征,同时有效地平滑图像的噪声,由此可得变结构元广义形态学边缘提取的边缘图像  $\bar{E}(x,y)$  为

$$\bar{E}(x,y) = \frac{1}{N} \left\{ \sum_{k=1}^m [E_{k,k+m}(x,y) + E_{k+m,k}(x,y)] \right\}, \tag{5}$$

其中  $N$  为选定的变结构元的个数,  $m = N/2$  为选定的变结构元中结构和方向上互补的元素组个数,对

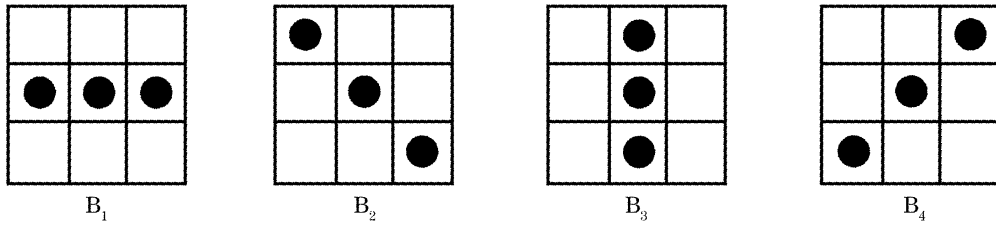


图 2 广义形态学边缘提取中使用的变结构元

Fig. 2 Multiple structuring elements of generalized morphological edge detection

为了验证该算法,对 256 pixel×256 pixel 大小的标准 Lena 图像加入椒盐噪声,如图 3 所示,其中椒盐噪声的噪声密度为 0.005,分别用经典的 Sobel 边缘提取算法和本文提出的算法对噪声污染后的 Lena 图像进行边缘提取,结果分别如图 4 和图 5 所示。



图 3 加噪声的 Lena 图像  
Fig. 3 Image of Lena with noise



图 4 采用 Sobel 边缘提取算法对加噪声 Lena 图像的边缘提取结果  
Fig. 4 Edge location result for image of Lena with noise extracted using Sobel method



图 5 采用本文提出的边缘提取算法对加噪声 Lena 图像的边缘提取结果

Fig. 5 Edge location result for image of Lena with noise extracted using this proposed method

由边缘提取结果可见,本文提出的变结构元广义形态学边缘提取算法不仅充分地提取了边缘细节信息,同时也有效地抑制了图像中的噪声。由(4)式和(5)式可知本算法采用简单的求极大和极小值的方法代替了传统边缘提取的复杂的模版内求和乘积运算,并且仅循环一次即可实现图像的边缘提取,计算简单且易于并行处理、实时性强。

### 3.2 多项式插值亚像素边缘定位算法<sup>[13]</sup>

利用变结构元广义形态学边缘提取算法可快速有效地获取激光 CCD 自准直仪的圆目标的边缘图像,为了进一步提高激光 CCD 自准直仪的定位精度,兼顾定位算法的实时性,本文采用多项式插值亚像素边缘定位算法对图像边缘进行快速亚像素定位。

设 CCD 光敏元在  $X$  方向上的间距为  $W$ ,  $Y$  方向上的间距为  $H$ ,则对边缘图像  $\bar{E}(x,y)$  上确定的边缘点  $(X_i, Y_i)$ , 在方向上取三点  $\bar{E}(X_i - 1, Y_i)$ ,

$\bar{E}(X_i, Y_j), \bar{E}(X_i + 1, Y_j)$ , 以这三点的灰度值作为函数值,  $X_i - 1, X_i, X_i + 1$  为插值基点, 代入二次多项式插值函数  $\phi(x)$ , 令  $d\phi(x)/dx = 0$  求出插值函数最大值的  $X$  方向的亚像素位置  $X_s$ ; 同理在  $Y$  方向上取三点  $\bar{E}(X_i, Y_j - 1), \bar{E}(X_i, Y_j), \bar{E}(X_i, Y_j + 1)$  进

行相同的操作, 可求得  $Y$  方向的亚像素位置  $Y_s$ , 则插值函数  $\phi(m)$  可为

$$\phi(m) = \sum_{j=0}^n l_j^{(n)}(m) \times f_j, \quad (6)$$

其中

$$l_j^{(n)}(m) = \frac{(m - m_0) \cdots (m - m_{j-1})(m - m_{j+1}) \cdots (m - m_n)}{(m_j - m_0) \cdots (m_j - m_{j-1})(m_j - m_{j+1}) \cdots (m_j - m_n)}$$

为插值基函数,  $m_j$  为插值基点,  $f_j$  为函数值。

令  $d\phi(x)/dx = 0$  和  $d\phi(y)/dy = 0$ , 经推导求得边缘点  $(X_i, Y_j)$  的亚像素位置  $(X_s, Y_s)$  为

$$\begin{cases} X_s = X_i + \frac{\bar{E}(X_i - 1, Y_j) - \bar{E}(X_i + 1, Y_j)}{\bar{E}(X_i - 1, Y_j) - 2\bar{E}(X_i, Y_j) + \bar{E}(X_i + 1, Y_j)} \times \frac{W}{2}, \\ Y_s = Y_j + \frac{\bar{E}(X_i, Y_j - 1) - \bar{E}(X_i, Y_j + 1)}{\bar{E}(X_i, Y_j - 1) - 2\bar{E}(X_i, Y_j) + \bar{E}(X_i, Y_j + 1)} \times \frac{H}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

根据误差理论可得该算法的边缘定位精度, 计算可得  $X$  和  $Y$  方向上的定位偏差  $dX_s$  和  $dY_s$  为

$$\begin{cases} dX_s = \frac{\partial X_s}{\partial \bar{E}(X_i - 1, Y_j)} d\bar{E}(X_i - 1, Y_j) + \frac{\partial X_s}{\partial \bar{E}(X_i, Y_j)} d\bar{E}(X_i, Y_j) + \\ \quad \frac{\partial X_s}{\partial \bar{E}(X_i + 1, Y_j)} d\bar{E}(X_i + 1, Y_j) + \frac{\partial X_s}{\partial W} dW, \\ dY_s = \frac{\partial Y_s}{\partial \bar{E}(X_i, Y_j - 1)} d\bar{E}(X_i, Y_j - 1) + \frac{\partial Y_s}{\partial \bar{E}(X_i, Y_j)} d\bar{E}(X_i, Y_j) + \\ \quad \frac{\partial Y_s}{\partial \bar{E}(X_i, Y_j + 1)} d\bar{E}(X_i, Y_j + 1) + \frac{\partial Y_s}{\partial H} dH. \end{cases} \quad (8)$$

由(8)式可知采用该算法边缘定位精度可达  $1/60$  像素, 但由于实际采集的图像受光学系统像差以及衍射效应等影响, 导致实际定位精度将偏低于理论值。为确定该算法在激光 CCD 自准直仪系统中的实际定位精度, 实验中 CCD 采集到的圆目标图像如图 6 所示, 采用变结构元广义形态学边缘提取算法得到标准圆的边缘图像如图 7 所示, 然后采用多项式插值亚像素边缘定位算法进行亚像素级定位后进行圆轮廓中心的重复定位, 计算结果如表 1 所示。

表 1 实验中获取的圆目标中心定位结果

Table 1 Center locations for circle target acquired in experiments

Number	Center location / pixel	Number	Center location / pixel
1	(655.46, 646.85)	6	(655.40, 646.84)
2	(655.51, 646.92)	7	(655.38, 646.92)
3	(655.47, 646.88)	8	(655.45, 646.83)
4	(655.49, 646.83)	9	(655.43, 646.81)
5	(655.42, 646.90)	10	(655.47, 646.80)
Location variance ( $3\sigma$ ) / pixel		Axis X: 0.121 Axis Y: 0.133	

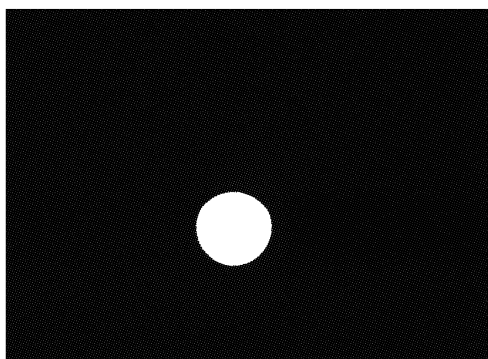


图 6 实验中采集到的圆目标

Fig. 6 Circle target acquired in experiments

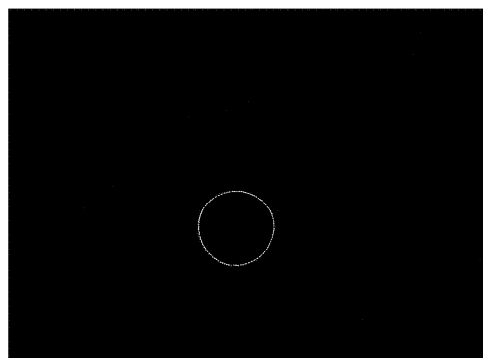


图 7 采用本文提出的方法获得的圆目标的边缘图像

Fig. 7 Edge image of circle target by using this proposed method

由计算结果可见,采用多项式插值亚像素边缘定位算法,计算简单,重复性好且定位精度高,对实验中采集到的圆目标轮廓中心的重复定位不确定度优于 0.13 pixel,实现了圆轮廓的亚像素级定位。

### 3.3 最小二乘圆拟合中心算法<sup>[18]</sup>

经多项式插值亚像素边缘定位得到圆轮廓上的  $n$  个点  $\{p_i(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$  的亚像素级位置信息  $\{(x_{Si}, y_{Si}) | i = 1, 2, \dots, n\}$  后,为了精确定出圆心位置,可根据最小二乘原理(残差平方和最小原理)用理想的拟合圆来逼近圆轮廓,得到圆轮廓的圆心坐标  $(a, b)$  为

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} G_{11} &= 8 \sum_{i=1}^N x_{Si}^2 - \frac{8}{N} \left( \sum_{i=1}^N x_{Si} \right)^2, \\ G_{12} &= G_{21} = 8 \sum_{i=1}^N y_{Si} x_{Si} - \frac{8}{N} \sum_{j=1}^N x_{Sj} \sum_{k=1}^N y_{Sk}, \\ G_{22} &= 8 \sum_{i=1}^N y_{Si}^2 - \frac{8}{N} \left( \sum_{i=1}^N y_{Si} \right)^2, \\ C_1 &= -\frac{4}{N} \sum_{i=1}^N x_{Si}^2 \sum_{j=1}^N x_{Sj} - \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N y_{Sj}^2 \sum_{k=1}^N x_{Sk} + \\ &\quad 4 \sum_{i=1}^N y_{Si}^2 x_{Si} + 4 \sum_{i=1}^N x_{Si}^3, \\ C_2 &= -\frac{4}{N} \sum_{i=1}^N y_{Si}^2 \sum_{j=1}^N y_{Sj} - \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N x_{Sj}^2 \sum_{k=1}^N y_{Sk} + \\ &\quad 4 \sum_{i=1}^N x_{Si}^2 y_{Si} + 4 \sum_{i=1}^N y_{Si}^3. \end{aligned}$$

由(8)式即可得到被测圆轮廓的圆心坐标  $(a, b)$ 。根据最小二乘原理的圆拟合推导出的圆目标中心检测算法定位精度高、重复性好,而且仅对圆轮廓的边界点循环一次就可计算出各参量,时间复杂度为  $o(n)$ ,而没有复杂的方根运算,就实现了快速的圆目标中心检测。

## 4 结果及数据分析

为了验证该定位算法,将测量精度为  $2''$ ,测量距离为 6 m,准直物镜焦距为 515 mm 的自准直仪改进为采用 DB635-1-3(5)-FA 型的功率为 1 mW 的半导体激光器光源和 CV-A1 型面阵 CCD 采集图像信号的激光 CCD 自准直仪,采用本文提出的方法进行快速精确中心定位,软件程序在 Windows2000 操作系统中采用 Microsoft Visual C++6.0 编程开发。

对该仪器精度的校准做了以下对比和校准实

验。实验条件:环境温度  $20.0^\circ\text{C}$ ,相对湿度 60% RH,采用测量分辨力和测量精度分别为  $0.01''$  和  $\pm 0.1''$  的 SZY-99 型高精度光电自准直仪对激光 CCD 自准直仪进行对比和校准实验,其中 SZY-99 型光电自准直仪的准直物镜焦距为 860 mm,测量范围为  $\pm 20''$ ,测量距离为 6 m。虽然激光 CCD 自准直仪的测量距离也可达 6 m,但由于随着准直仪和平面反射镜之间距离的增大,气流的扰动将严重影响测量结果,为此,为了减小气流扰动对校准结果的影响,激光 CCD 自准直仪和 SZY-99 型光电自准直仪与平面反射镜之间的距离均为 350 mm。对激光 CCD 自准直仪在  $\pm 20''$  测量范围内与 SZY-99 型光电自准直仪进行对比实验,结果和定位误差结果分别如图 8 和图 9 所示,其中 10 组单次测量的定位时间如表 2 所示。

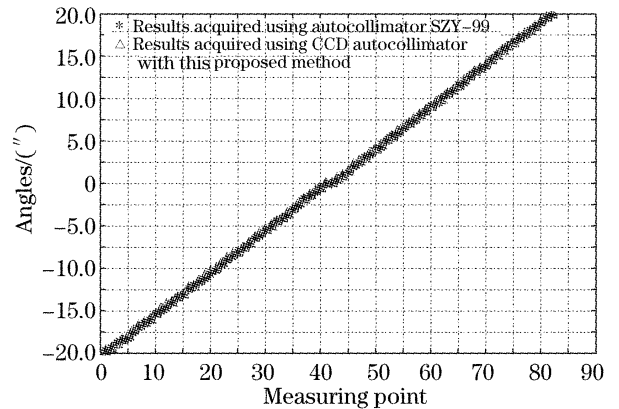


图 8 实验对比数据

Fig. 8 Contrasting results in experiments

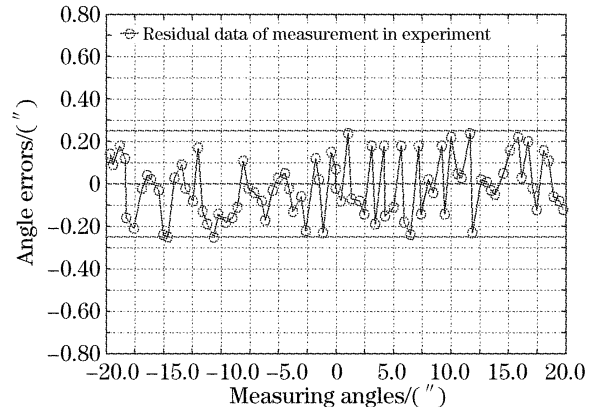


图 9 对比实验中的激光 CCD 自准直仪定位误差  
Fig. 9 Location errors of CCD laser autocollimator in the contrasting experiments

由实验结果可以看出,改进的激光 CCD 自准直仪采用本文提出的方法对圆目标中心进行快速精确定位,在  $\pm 20''$  测量范围内,测量精度由  $2''$  提高到  $\pm 0.25''$ ,且单次测量时间小于 0.23 s,实现了快速高精度的小角度测量。

表 2 单次测量所用时间

Table 2 Time used in a single measurement process

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average time
Time /s	0.223	0.225	0.224	0.223	0.222	0.222	0.221	0.223	0.221	0.222	0.223

## 5 结 论

提出了一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心定位方法。实验结果表明,该定位方法稳定性好,定位精度高且实时性强,应用该方法改进的激光 CCD 自准直仪的测量精度由 2" 提高到  $\pm 0.25''$ , 单次测量时间小于 0.23 s, 有效地提高了激光 CCD 自准直仪的测量精度和动态监测特性, 充分拓展了激光 CCD 自准直仪的应用领域, 可有效满足激光 CCD 自准直仪在小角度测量和动态瞄准跟踪等领域的高精度实时测量的需求。

## 参 考 文 献

- 1 S. J. Richman, T. J. Quinn, C. C. Speake *et al.*. Preliminary determination of  $G$  using the BIPM torsion strip balance [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**: 460~466
- 2 Yuan Feng, Ding Zhenliang, Chen Zhong *et al.*. Study on the design of testing system for dynamic misalignment angle in precision centrifuge [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(5): 28~31 (in Chinese)  
袁 峰, 丁振良, 陈 中等. 精密离心机动态失准角测试系统的设计研究[J]. *光电工程*, 2001, **28**(5): 28~31
- 3 P. Martinelli, S. Musazzi, U. Perini. An autocollimator based optical system for precise angular alignment control over large exploring areas[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(4): 1012~1014
- 4 Tu Haiyang, Cao Jian, Yuan Zhangxin. Application of object detection and tracking in navigable ship model test[J]. *Computer Engineering*, 2004, **30**: 410~411, 422 (in Chinese)  
屠海洋, 曹 健, 袁章新. 目标的检测和跟踪在通航船模试验中的应用[J]. *计算机工程*, 2004, **30**: 410~411, 422
- 5 Zhong Ping, Jin Guang, Liu Yanbin. Design of a novel testing system for measuring dynamic drift of gyroscope[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(1): 61~64 (in Chinese)  
钟 平, 金 光, 刘延斌. 一种新型陀螺动态漂移检测系统的设计[J]. *光学技术*, 2004, **30**(1): 61~64
- 6 L. Kremer, D. Budelsky, D. Platte *et al.*. Autocollimator for spectroscopy of broad resonances with pulsed lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4827~4834
- 7 Jie Yuan, Xingwu Long. CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(3): 1362~1365
- 8 Meirong Zhao, Yuchi Lin, Ping Zhang *et al.*. Research on improving the measuring accuracy of laser autocollimator used over long distance[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4927**: 300~304
- 9 Zhang Mingli, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Method of CCD scan for collimation testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1067~1071 (in Chinese)  
张明丽, 刘立人, 万玲玉等. CCD扫描检测光束准直度[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1067~1071
- 10 He Wei, Chen Qinghao, Xu Renfang *et al.*. Image transfer based automatic laser alignment technique for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1279~1283 (in Chinese)  
何 为, 陈庆浩, 徐仁芳等. 激光核聚变装置中基于像传递的激光自动准直技术研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1279~1283
- 11 Mike Heath, Sudeep Sarkar, Thomas Sanocki *et al.*. Comparison of edge detectors a methodology and initial study[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1998, **69**(1): 38~54
- 12 T. Chen, Q. H. Wu, R. Rahmani-Torkaman *et al.*. A pseudo top-hat mathematical morphological approach to edge detection in dark regions[J]. *Pattern Recognition*, 2002, **35**: 199~210
- 13 Wu Xiaobo, Zhong Xianxin, Liu Houquan *et al.*. High accuracy image measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, **3**(1): 28~33 (in Chinese)  
吴晓波, 钟先信, 刘厚权等. 高精度图像测量系统[J]. *光学精密工程*, 1995, **3**(1): 28~33
- 14 Edward P. Lyvers, Owen Robert Mitchell, Mark L. Akey *et al.*. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine intelligence*, 1989, **11**(12): 1293~1309
- 15 Sugata Ghosal, Rajiv Mehrotra. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. *Pattern Recognition*, 1993, **26**(2): 295~306
- 16 Jun-Wei Hsieh, Ming-Tat Ko, Hong-Yuan Mark Liao *et al.*. A new wavelet-based edge detector via constrained optimization[J]. *Image and Vision Computing*, 1997, **15**: 511~527
- 17 R. Sundaram. Analysis and implementation of an efficient edge detection algorithm[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(3): 642~650
- 18 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 275~279 (in Chinese)  
孔 兵, 王 昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 275~279