

文章编号 1004-924X(2005)06-0668-06

# 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法

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, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出一种新的激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法。该算法采用变结构元多尺度广义数学形态学滤波算法滤除图像噪声,由 Zernike 矩定位算法得出目标轮廓的亚像素位置,用最小二乘拟合法精确获取圆目标的中心位置,并进行了实验。结果表明:该算法稳定性好,定位精度高,应用该算法后自准直仪的测量分辨力提高了 10 倍,在  $\pm 2'$  测量范围内测量不确定度优于  $0.3''$ ,有效地提高了自准直仪的测量分辨力和测量精度。

**关键词:**自准直仪;变结构元多尺度形态滤波;Zernike 矩;亚像素定位

**中图分类号:**TH741.14;TP391 **文献标识码:**A

## Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis autocollimator

AO Lei, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen, KANG Wen-jing

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

**Abstract:** A precise circle target center location algorithm was proposed and the multiscale generalized mathematical morphological filtering method with multiple structuring elements was utilized for eliminating noise in the image. The subpixel position of circle target was obtained by Zernike moment contour subpixel location algorithm, and the circle target center position was acquired ultimately and accurately using circle fitting method based on least square method. The experiment results show that the method is stable and accurate located for measuring 2D small angle, and the measuring uncertainty of this modified instrument is better than  $0.3''$  within  $\pm 2'$  range, with the measuring resolution increased by 10 times. The results also show that the measuring resolution and accuracy of the autocollimator can be improved effectively.

**Key words:** autocollimator; multiscale and multiple structuring element morphological filtering; Zernike moment; subpixel location

## 1 引言

现代化高精度测量技术和方位瞄准跟踪系统的发展对小角度的测量精度提出了越来越高的要求<sup>[1-2]</sup>。光电自准直仪是一种应用广泛的高精度瞄准及小角度测量仪器,可以作为测角仪、光学比较仪等光学计量仪器的组成部分,也可单独作为测量仪器用于光学测量、航空航天仪器装调和军用飞行器姿态测量等方面<sup>[3]</sup>。为了提高光束的准直性,仪器的测量分辨力和测量精度,近年来出现的 CCD 激光自准直仪<sup>[4-5]</sup>成为高精度自准直仪的主流,但常用的定位算法,如矩心内插法<sup>[2]</sup>、重心定位法<sup>[4]</sup>、CCD 像元脉冲计数法<sup>[6]</sup>等,均存在定位精度低、重复性差、计算效率不高的缺点,使自准直仪的测量精度和实用性受到影响。寻求高效稳健的软件定位算法用于提高自准直仪的测量分辨力和精度已成为高精度 CCD 自准直仪近年来迫切要求解决的问题<sup>[7]</sup>。为此本文提出了一种高精度激光 CCD 二维自准直仪的圆目标中心精确定位算法,采用变结构元多尺度广义数学形态学滤波算法滤除噪声,获取高质量的图像信息,Zernike 矩轮廓亚像素定位算法得到轮廓亚像素级位置信息,最后利用最小二乘拟合中心算法进行拟合,精确得到圆目标的中心位置。该算法应用于测量分辨力为 1"、测量不确定度为 2' 的自准直仪中,分辨力提高了 10 倍,在 ±2' 范围内测量不确定度优于 0.3",可实现对二维小角度的精确测量。

## 2 激光 CCD 二维自准直仪的测量原理

如图 1 所示,改进后的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。

当测量反射镜发生微小二维角度变化时,圆孔在 CCD 像面上的像将产生位移,由此可以计算出相应的二维角度变化。在被测角  $\theta$  很小,约在 10' 以内的时候,测量公式可近似表示为:

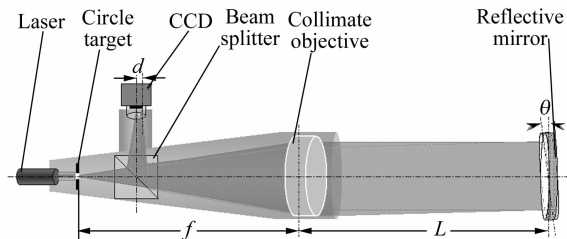


图 1 激光 CCD 二维自准直仪原理框图

Fig. 1 Frame of the CCD laser dual axis autocollimator

$$\theta = \frac{d}{2f}, \quad (1)$$

这里,  $d$  表示通光圆孔在 CCD 上成像的光斑位置的变化量;  $f$  表示准直物镜的焦距。

## 3 关键技术及其实现方法

### 3.1 变结构元多尺度广义形态滤波算法

数学形态滤波基于图像的几何结构特征,利用预先定义的结构元素对图像进行匹配或局部修正,来达到提取信号、抑制噪声的目的。但只采用单一的结构元在滤除噪声的同时会损失一些图像的细节特征,为此,本文采用一种新颖的变结构元多尺度广义形态滤波算法对图像进行滤除噪声处理。

设  $f(x, y)$  为定义在二维离散空间  $Z^2$  ( $Z$  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:

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

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

设变结构元为  $B_i(k, l)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),滤波尺度为  $j$ ,这里,  $B_{i,j} = B_i \oplus B_i \oplus \dots \oplus B_i$ ,由变结构元  $B_i(k, l)$  经过  $j$  次膨胀所得,多尺度形态开、闭滤波分别定义为:

$$(f \circ B_{i,j})(x, y) = [(f \ominus B_i) \oplus B_i](x, y), (j=1, 2, \dots, m), \quad (4)$$

$$(f \bullet B_{i,j})(x, y) = [(f \oplus B_i) \ominus B_i](x, y), (j=1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

为了得到足够平滑的图像,采用变结构元的多尺度滤波的累计平均值作为输出,多尺度变结

构元广义形态滤波器  $\bar{F}(x, y)$  表示为:

$$\bar{F}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{4} [(f \circ B_{i,j-1}) \cdot B_{i,j} + (f \circ B_{i,j-1}) \cdot B_{i,j} + (f \circ B_{i,j}) \cdot B_{i,j-1} + (f \circ B_{i,j}) \cdot B_{i,j-1}], \quad (6)$$

为了有效消除图像中比结构元小的噪声,同时避免大的结构元平滑图像边缘细节信息,取如图 2 所示的  $3 \times 3$  邻域内的三点线性变结构元进行多尺度广义形态滤波。

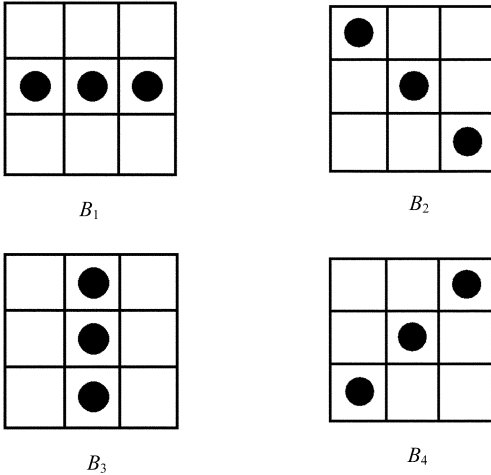


图 2 形态滤波器的变结构元

Fig. 2 Multiple structuring elements of morphological filters

文中提出的变结构元多尺度广义形态滤波器具有空间不变性,不仅有效地抑制了图像中的噪声,而且很好地保持了图像的边缘细节信息,为后续的图像处理提供了高质量的图像,该滤波器计算简单,易于并行处理,实时性强。

### 3.2 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法

为了提高测量分辨力,采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法将圆轮廓定位提高到亚像素级。图像  $f(x, y)$  的  $n$  阶  $m$  次 Zernike 矩定义为:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} \overline{V_{nm}(\rho, \theta)} \cdot f(x, y) dx dy, \quad (7)$$

其中,  $\overline{V_{nm}(\rho, \theta)}$  表示极坐标系单位圆内的正交  $n$  阶  $m$  次 Zernike 多项式  $V_{nm}(\rho, \theta)$  的复共轭。

建立用 Zernike 矩进行轮廓亚像素定位的理想阶跃轮廓模型如图 3 所示,图中  $k$  是阶跃高度;  $h$  是背景灰度;  $l$  是圆心到轮廓的垂直距离;  $\varphi$  是轮廓关于  $x$  轴所成的角度。

由 Zernike 矩的复数矩幅度的旋转不变性,

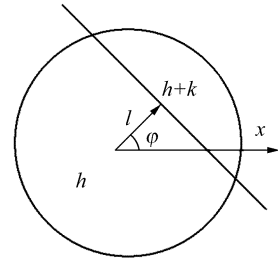


图 3 理想的二维边界模型

Fig. 3 Ideal two-dimension edge pattern

可知原始图像的 Zernike 矩与旋转后图像的 Zernike 矩的关系为:

$$A'_{00} = A_{00}, A'_{11} = A_{11} e^{j\varphi}, A'_{20} = A_{20}, \quad (8)$$

其中  $j$  为虚数单位,  $j = \sqrt{-1}$ 。轮廓平行于  $y$  轴时 1 阶 1 次 Zernike 矩的虚部为零,即:

$$\text{Im}[A'_{11}] = \sin(\varphi) \text{Re}[A_{11}] - \cos(\varphi) \text{Im}[A_{11}] = 0, \quad (9)$$

其中,  $\text{Im}[A'_{11}]$  与  $\text{Re}[A'_{11}]$  分别是旋转图像 Zernike 矩的虚部与实部,因此轮廓旋转的角度可由下式得出:

$$\varphi = \tan^{-1}(\text{Im}[A_{11}]/\text{Re}[A_{11}]), \quad (10)$$

对图 3 所示的模型经过计算可得:

$$\begin{cases} A'_{00} = h\pi + \frac{1}{2}k\pi - k\sin^{-1}l - kl\sqrt{1-l^2} \\ A'_{11} = \frac{2}{3}k(1-l^2)^{\frac{2}{3}} \\ A'_{20} = \frac{2}{3}kl(1-l^2)^{\frac{2}{3}} \end{cases}, \quad (11)$$

代入公式 8 可推导出圆心到轮廓的垂直位置为:

$$l = A_{20}/A'_{11}, \quad (12)$$

从而,由图 3 所示理想的阶跃轮廓模型可知,轮廓的亚像素位置可以由下式给出:

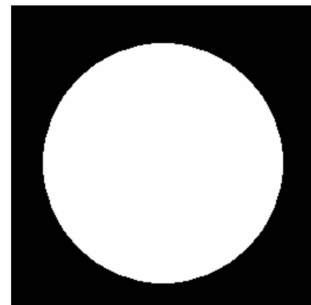


图 4 标准圆图像

Fig. 4 Standard circle image

$$\begin{cases} x_s = x + l \cdot \cos\varphi \\ y_s = y + l \cdot \sin\varphi \end{cases}, \quad (13)$$

对如图 4 所示的大小为  $256 \times 256$  的标准圆

图像,其中:圆心(128.5,121.5),半径:101.6,采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法进行圆轮廓的定位,计算结果如表 1 所示:

表 1 标准图像的 Zernike 矩轮廓亚像素定位结果(单位:像素)

Tab.1 Zernike moment contour subpixel results of standard image(unit:pixel)

	理论计算值	Zernike 定位值	定位偏差	定位不确定度(2σ)
X 方向	(44.423,178.540)	(44.423,178.600)	0.06	0.092
	(71.400,37.463)	(71.400,37.423)	-0.04	
	(71.400,205.536)	(71.400,205.577)	0.04	
	(179.400,209.430)	(179.400,209.423)	-0.01	
	(185.600,37.463)	(185.600,37.423)	-0.04	
Y 方向	(71.460,37.423)	(71.400,37.423)	-0.06	0.091
	(212.537,64.400)	(212.577,64.400)	0.04	
	(212.537,178.600)	(212.577,178.600)	0.04	
	(44.463,178.600)	(44.423,178.600)	-0.04	
	(179.413,209.423)	(179.400,209.423)	-0.01	

实验中 CCD 采集到的圆孔目标的图像如图 5 所示,采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法进行圆轮廓的定位,计算结果如表 2 所示:

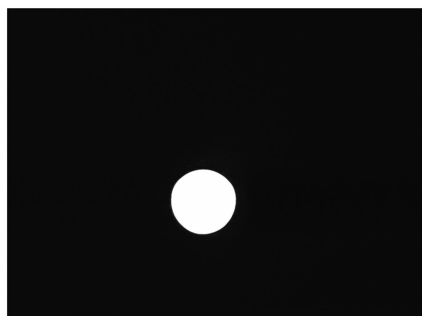


图 5 实验中采集到的目标图像

Fig.5 Target image acquired in experiment

表 2 实验采集图像的 Zernike 矩轮廓亚像素定位结果 (单位:像素)

Tab.2 Zernike moment contour subpixel location results of the image acquired in experiment(unit:pixel)

采集次数	Zernike 定位值	定位不确定度(2σ)
1	(654.892343,394.515589)	X 方向: 0.089
2	(654.933361,394.579728)	
3	(654.993010,394.534241)	
4	(654.880533,394.549904)	
5	(654.909107,394.513739)	
6	(654.899463,394.539682)	Y 方向: 0.094
7	(654.966585,394.663726)	
8	(654.867467,394.603169)	
9	(654.897442,394.587784)	
10	(654.847140,394.598572)	

由计算结果可见,采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法定位分辨率可达 0.1 像素,定位不确定度优于 ±0.1 像素,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>[8]</sup>

经过 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法得到圆轮廓上的  $n$  个点  $\{p_i(x_i, y_i) | i=1, 2, \dots, n\}$  的亚像素级位置信息  $\{(x_{s_i}, y_{s_i}) | i=1, 2, \dots, n\}$  后,为了精确定出圆心位置,本文根据最小二乘原理(残差平方和最小)用圆来逼近圆轮廓,得到被测圆轮廓的圆心坐标  $(a, b)$  为:

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} G_{11} = 8 \sum_{i=1}^N x_{s_i}^2 - \frac{8}{N} \left( \sum_{i=1}^N x_{s_i} \right)^2 \\ G_{12} = G_{21} = 8 \sum_{i=1}^N y_{s_i} x_{s_i} - \frac{8}{N} \sum_{j=1}^N x_{s_j} \sum_{k=1}^N y_{s_k} \\ G_{22} = 8 \sum_{i=1}^N y_{s_i}^2 - \frac{8}{N} \left( \sum_{i=1}^N y_{s_i} \right)^2 \\ C_1 = -\frac{4}{N} \sum_{i=1}^N x_{s_i}^2 \sum_{j=1}^N x_{s_j} - \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N y_{s_j}^2 \sum_{k=1}^N x_{s_k} + 4 \sum_{i=1}^N y_{s_i}^2 x_{s_i} + 4 \sum_{i=1}^N x_{s_i}^3 \\ C_2 = -\frac{4}{N} \sum_{i=1}^N y_{s_i}^2 \sum_{j=1}^N y_{s_j} - \frac{4}{N} \sum_{j=1}^N x_{s_j}^2 \sum_{k=1}^N y_{s_k} + 4 \sum_{i=1}^N x_{s_i}^2 y_{s_i} + 4 \sum_{i=1}^N y_{s_i}^3 \end{cases} \quad (15)$$

由公式 15 可以解得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数,时间复杂度为  $o(n)$ ,没有复杂的方根运算,因此整个算法的计算速度快。

## 4 实验结果及数据分析

为了验证本文的精确定位算法,将测量分辨力为  $1''$ 、不确定度为  $2''$ 、准直物镜焦距为 515 mm 的自准直仪的光源改进为半导体激光器,鼓轮读数改为 JAI 公司出产的像元大小仅为  $4.65 \mu\text{m}$  的 CV-A1 型面阵 CCD 采集,软件处理程序在 Windows2000 操作系统中采用 Visual C++6.0 编程开发。由测量原理公式 1 可知,采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法定位分辨力可达 0.1 像

素,则测量分辨力推导如下:

$$\theta = \frac{d}{2f} = \frac{0.1 \times 4.65}{2 \times 515 \times 10^3} \times \frac{180 \times 3600}{\pi} = 0.093'' \quad (16)$$

可见该激光 CCD 自准直仪测量分辨力由  $1''$  提升至  $0.1''$ ,提高了 10 倍。

测量不确定度主要由定位不确定度、光束漂移、温度变化产生的光管机械变形和平面反射镜面变形等因素引起,为标定该仪器的精度做了以下实验。实验条件:中国计量科学研究院恒温楼,环境温度:  $20.0^\circ\text{C}$ ,相对湿度:  $60\%$ ,采用高精度 ML10 型激光小角度测量仪对激光 CCD 二维自准直仪进行比对和校准实验,实验和校准数据如表 3 所示:

表 3 激光 CCD 二维自准直仪校准数据

Tab. 3 Calibration data of laser CCD dual axis autocollimator

X 轴				Y 轴			
测点	分度误差	测点	分度误差	测点	分度误差	测点	分度误差
0~20"	-0.20"	0~-20"	+0.10"	0~20"	+0.05"	0~-20"	-0.06"
~40"	-0.02"	~-40"	+0.25"	~40"	+0.02"	~-40"	0.00"
~60"	-0.16"	~-60"	+0.24"	~60"	-0.23"	~-60"	0.00"
~80"	-0.09"	~-80"	+0.23"	~80"	-0.09"	~-80"	+0.02"
~100"	-0.30"	~-100"	+0.11"	~100"	-0.03"	~-100"	-0.17"
~120"	-0.09"	~-120"	+0.09"	~120"	-0.13"	~-120"	-0.19"
X 轴不确定度: $0.25''$				Y 轴不确定度: $0.23''$			

由实验和校准数据和结果可以看出,改进后的激光 CCD 二维自准直仪,测量分辨力提高 10 倍达到  $0.1''$ ,在  $\pm 2'$  测量范围内测量不确定度由  $2''$  提高到优于  $0.3''$ ,实现了高精度二维小角度的测量。

## 5 结 论

本文提出的圆目标中心定位算法采用的变结

构元多尺度广义形态滤波方法,在滤除噪声的同时很好地保持了边缘细节信息;采用 Zernike 矩轮廓亚像素定位算法,精确获取了轮廓边缘的亚像素级位置信息,并用最小二乘拟合法得到圆轮廓中心的精确位置。实验表明,该算法定位精确、稳定。应用该算法改进后的自准直仪的测量分辨力提高 10 倍达到  $0.1''$ ,在  $\pm 2'$  的测量范围内,其测量不确定度由  $2''$  提高到优于  $0.3''$ ,具有很强的科研和实用价值。

## 参考文献:

- [1] YANDAYAN T, AKGÖZ S A, HAITJEMA H. A novel technique for calibration of polygon angles with non-integer subdivision of indexing table[J]. *Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2002, 26 (4): 412-424.
- [2] 魏仲慧. 数字光电自准直仪的研究与设计[J]. *光学 精密工程*. 1996, 4(3): 116-120.  
WEI ZH H. Research and design of the digital optoelectronic autocollimator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(3): 116-120. (in Chinese)
- [3] KONIAKHINE I A, TIMOFEEV A N, MUSYAKOV V L. The optic-electronic systems for control position of

the elements unblocked aperture radio telescope[J]. *Proceedings of the Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2004,3: 1-5.

- [4] JIE Y, LONG X. CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003,74(3): 1362-1365.
- [5] LEVITON D B. Ultrahigh resolution absolute Cartesian electronic autocollimator[J]. *SPIE*, 2003,5190:468-475.
- [6] 张尧禹,张明慧,乔彦峰. 一种高精度 CCD 激光自准直测量系统的研究[J]. *光电子·激光*. 2003,14(2):168-170.  
ZHANG Y Y, ZHANG M H, QIAO Y F. Research of a CCD laser collimation system with high precision[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2003,14(2):168-170. (in Chinese)
- [7] ZHAO M R, LIN Y CH, ZHANG P, *et al.* Research on improving the measuring accuracy of laser autocollimator used over long distance[J]. *SPIE*, 2002,4927:300-304.
- [8] CUI J, QIU L, JIN G L, *et al.* A new method used for measuring the parameter of elastic thin-neck based on CCD aiming[C]. *Proceedings of the Second International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2002:799-803.

**作者简介:**敖磊(1980—),男,四川成都人,哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所博士研究生,主要研究方向为超精密光学测试技术以及图像处理技术。

谭久彬(1955—),男,工学博士,教授,博士生导师;哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所所长;中国计量测试学会副理事长;中国计量测试学会计量仪器专业委员会主任委员;国际测量与仪器委员会委员;中国仪器仪表学会理事;黑龙江省标准化学会副理事长,主要研究方向为超精密测量技术与仪器工程。