

DOI: 10.3724/SP.J.1187.2011.00485

# 变形测量系统中激光光斑中心精确定位算法\*

王志乾<sup>1</sup> 刘兆蓉<sup>1,2</sup> 赵雁<sup>1</sup> 李建荣<sup>1,2</sup> 刘畅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 针对变形测量系统中激光光斑中心精确定位的要求, 在重心法的基础上, 提出了基于重心法的曲线拟合亚像素定位算法。该算法首先用变结构元多尺度广义形态滤波算法滤除图像噪声, 然后用重心法计算出激光光斑的亚像素位置, 最后用曲线拟合对激光光斑的中心位置进行精确定位。根据变形测量原理, 搭建了实验平台, 通过多次实验, 变形角的标准差均小于 20"。实验结果表明, 该算法能有效地提高变形测量系统的测量精度。

**关键词:** 变形测量; 亚像素定位; 变结构元多尺度形态滤波; 重心法; 曲线拟合

中图分类号: TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

## Precise center location algorithm for laser spot in distortion measuring system

Wang Zhiqian<sup>1</sup> Liu Zhaorong<sup>1,2</sup> Zhao Yan<sup>1</sup> Li Jianrong<sup>1,2</sup> Liu Chang<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;  
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The barycentric sub-pixel location algorithm of curve fitting is proposed to meet the requirements of precise laser spot center positioning in distortion measurement system. First, the multi-scale generalized morphological filtering algorithm of variable structure element is used to filter image noise. Then, the sub-pixel position of laser spot is calculated in barycenter algorithm. Finally, curve fitting is used to locate the laser spot center precisely. The experimental platform is set up according to the distortion measurement principle. With many experiments, standard deviation of distortion angle is less than 20". The experiment results show that the location algorithm can improve distortion measurement accuracy effectively.

**Keywords:** distortion measurement; sub-pixel location; multiple structuring element and multi-scale morphological filtering; barycenter algorithm; curve fitting

## 1 引言

变形测量系统分为接触式和非接触式两种, 随着二十世纪七十年代初期由 Dr. Willard S. Boyle 和 Dr. George E. Smith 在贝尔实验室发明的电荷耦合器件(CCD)的出现, 基于光学测量原理形成的一种新型高精度非接触测量技术已经成为现在主要的测量技术。由于非接触式测量系统的精度较高, 本文采用以 CCD 为核心的非接触式测量系统对架体的变形进行测量。其系统主要由照明系统、被测物体、光学成像系统、光电传感器、信号处理电路和计算机等组成, 并以激光光斑作为被

测基准点<sup>[1]</sup>。

提高测量系统的测量精度, 一方面可以从硬件入手, 如选用高分辨率的摄像机, 或采用特殊的光源进行照明, 但这些方法的使用有时会受到某种限制, 如光学系统放大倍数太大时, 像的质量会下降, 甚至会使有用的目标超出视场范围<sup>[2]</sup>; 另一方面可以利用目标的成像特性, 采用亚像素定位技术提高测量定位的精度, 现有的最简单也是最常用的亚像素定位算法是重心法, 它要求目标区域面积适中, 并且噪声对其定位精度干扰较大<sup>[3-5]</sup>。本文针对上述变形测量系统, 在重心法的基础上, 提出了基于重心法的曲线拟合亚像素定位算法, 首

本文于 2011 年 3 月收到。

\*基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60507003)资助项目; 吉林省自然科学基金(编号: 201115124)资助项目。

先用变结构元多尺度广义形态滤波算法滤除图像噪声, 然后用重心法计算出激光光斑的亚像素位置, 最后用曲线拟合对激光光斑的中心位置进行精确定位。

## 2 变形测量原理

大型架体的变形测量一般采用以 CCD 为核心

的光学成像非接触测量系统, 将两个激光器安装在架体两端的受力点上, 在初始安装时, 选择激光器 A、B 的安装位置, 保证激光器 A、B 在像方互不重叠, 均能成像到 CCD 上。通过光学成像系统得到两激光器投射到 CCD 上的图像, 对采集到的图像进行分析计算得出架体的变形量<sup>[4]</sup>。测量系统原理如图 1 所示。

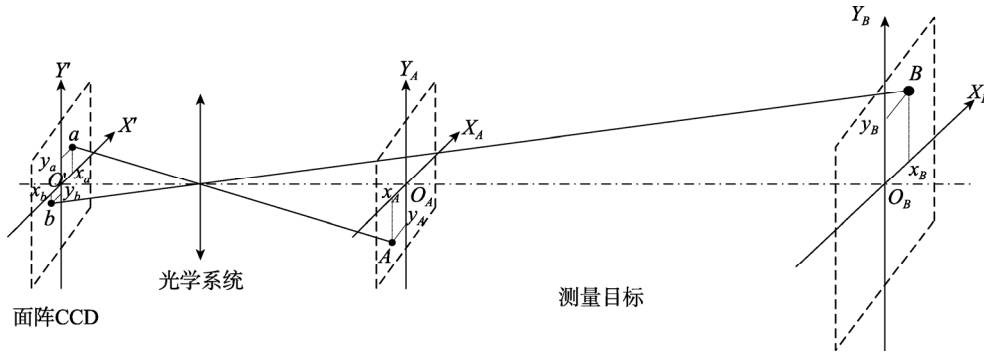


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring principle

为了分析方便, 在 X 方向进行投影, 如图 2 所示。图中  $D_1, D_2$  分别为激光器 A、B 到光节点的距离,  $f$  为光学系统的焦距。A、B 为起始标定的零位位置, 直线 AB 与光轴的夹角设定为相对零位角  $\theta_0$ ,  $(X_A, Y_A)$  和  $(X_B, Y_B)$  分别为激光器 A、B 的物方坐标,  $(X_a, Y_a)$  和  $(X_b, Y_b)$  分别为 A、B 成像到 CCD 上的像方坐标。架体发生一定的变形后, A、B 两点位置变为 A' 和 B', 此时直线 A'B' 与光轴的夹角为  $\theta'$ , 像方坐标为  $(X_{a'}, Y_{a'})$  和  $(X_{b'}, Y_{b'})$ 。

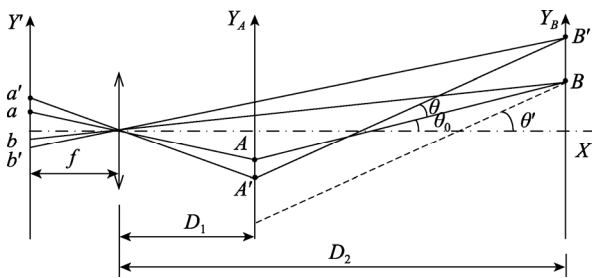


图 2 X 方向投影图

Fig. 2 Projection of X-axis

根据三角形定理可以得出俯仰方向的变形角  $\theta$  为<sup>[6]</sup>:

$$\bar{F}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_j \frac{1}{4} [(f \circ B_{i,j-1}) \bullet B_{i,j} + (f \bullet B_{i,j-1}) \circ B_{i,j} + (f \bullet B_{i,j}) \bullet B_{i,j-1} + (f \circ B_{i,j}) \circ B_{i,j-1}] \quad (3)$$

$$\theta = \theta' - \theta_0 = \arctan \frac{D_2 y_{b'} - D_1 y_{a'}}{(D_2 - D_1) f} - \arctan \frac{D_2 y_b - D_1 y_a}{(D_2 - D_1) f} \quad (1)$$

同理在 Y 方向投影, 可得方位变形角  $\varphi$  为:

$$\varphi = \arctan \frac{D_2 x_{b'} - D_1 x_{a'}}{(D_2 - D_1) f} - \arctan \frac{D_2 x_b - D_1 x_a}{(D_2 - D_1) f} \quad (2)$$

在式(1)和(2)中, 距离  $D_1, D_2$  及焦距  $f$  为已知量, 可以通过精确标定得到实际数据, 并使其误差在允许的范围内, 再通过面阵 CCD 的图像计算出激光光斑的中心位置, 就能求出架体的变形量。由此可见, 通过提高激光光斑中心位置的定位精度, 就能够有效地提高整个测量系统的精度。

## 3 算法研究

### 3.1 变结构元多尺度广义形态滤波算法

采集到的图像都会有噪声干扰, 因此在对激光光斑图像中心定位前, 需要对图像进行滤除噪声处理。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的数学表达式如式(3)所示<sup>[7-9]</sup>。

式中： $f(x,y)$  为定义在二维离散空间上的数字图像； $B_{i,j}$  为变结构元； $f \circ B_{i,j}$ 、 $f \bullet B_{i,j}$  分别为多尺度形态开、闭滤波。

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，取图 3 所示的  $3 \times 3$  领域内的三点线性变结构元进行多尺度广义形态滤波。

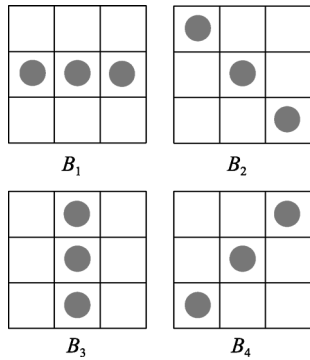


图 3 三点线性变结构元

Fig. 3 Multiple structuring elements of three-point linearity

该滤波算法具有空间不变性，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，为后续处理提供了高质量的图像。

### 3.2 基于重心的曲线拟合算法

在通常的情况下，最常用的亚像素定位算法是重心法<sup>[10-12]</sup>，这种算法处理的目标一般是一个点团，例如天文学测量中的星体、点状网格中的网格点等。重心法的定位精度一般为 0.2 个像素，为了提高定位精度，提出一种基于重心的曲线拟合算法，首先利用重心法找到图像的重心位置，重心算法如式(4)所示：

$$\begin{cases} x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iI(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N} \\ y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jI(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N} \end{cases} \quad (4)$$

得到图像的重心位置后，再以该像素点为中心点对水平方向和垂直方向进行曲线拟合<sup>[13-16]</sup>。下面以水平方向为例，设二次曲线的形式如下：

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (5)$$

根据 CCD 方形孔采样定理<sup>[2]</sup>，可以得出每个像素的输出灰度值为：

$$f_{nx} = \int_{n-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx \quad (6)$$

通过重心法求出的坐标为  $(x_0, y_0)$ ，设该像素的灰度值为  $f_{0x}$ ，以该点为中心点，向前向后各取一个像素点，记为  $f_{-1x}$  和  $f_{1x}$ 。根据  $f_{-1x}$ 、 $f_{0x}$  和  $f_{1x}$  的灰度值，代入到公式(6)中，可以得到关于二次曲线参数  $A, B, C$  的三元一次方程组：

$$\begin{cases} f_{0x} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{1}{12} A + C \\ f_{-1x} = \int_{-\frac{3}{2}}^{-\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{13}{12} A - B + C \\ f_{1x} = \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{13}{12} A + B + C \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)求解，可以计算出二次曲线的参数  $A, B, C$ ：

$$\begin{cases} A = \frac{1}{2}(f_{1x} + f_{-1x} - 2f_{0x}) \\ B = \frac{1}{2}(f_{1x} - f_{-1x}) \\ C = \frac{13}{12} f_{0x} - \frac{1}{24} f_{-1x} - \frac{1}{24} f_{1x} \end{cases} \quad (8)$$

可以进一步求出二次曲线的顶点：

$$x = \frac{-B}{2A} = \frac{f_{-1x} - f_{1x}}{2(f_{1x} + f_{-1x} - 2f_{0x})} \quad (9)$$

因此，就得到水平方向的亚像素中心为：

$$x_{sub} = x_0 + \frac{f_{-1x} - f_{1x}}{2(f_{1x} + f_{-1x} - 2f_{0x})} \quad (10)$$

同理按照上述方法，可以求出垂直方向的亚像素中心为：

$$y_{sub} = y_0 + \frac{f_{-1y} - f_{1y}}{2(f_{1y} + f_{-1y} - 2f_{0y})} \quad (11)$$

## 4 实验及实验结果

### 4.1 实验平台

采用三菱公司生产的 ML1013R 型半导体激光器作为被测基准点，激光器的波长为 658 nm，最大输出功率为 50 mW，激光光斑为圆形，直径 5 mm。变形测量装置的光学成像系统采用像方远心光路的反远摄结构的光学镜头，焦距  $f=30$  mm，相对孔

径  $D/f=1:7$ , 视场角  $2\omega=56^\circ$ , 波长范围  $\lambda=589.29\sim 706.52\text{ nm}$ 。相机采用的是 IMPERX 公司生产的型号为 ICL-B1410M 的 CCD 相机, 像元数  $1360\times 1024$ , 像元尺寸  $6.45\ \mu\text{m}\times 6.45\ \mu\text{m}$ , 信噪比 60 dB, 通过 Camera Link 接口与计算机相连, 能直接的输出 BMP 图像并存储在计算机里。

在实验时, 首先利用两台徕卡经纬仪 TM5100A 组成的三坐标测量系统对激光光斑的位置进行精确标定, 该系统的定位精度达到  $0.05\text{ mm}$ <sup>[17]</sup>。通过测量, 得到两个激光光斑的位置距离分别为  $D_1=2\ 406.55\text{ mm}$ 、 $D_2=4\ 934.25\text{ mm}$ 。然后将变形测量装置固定在多齿分度台上, 多齿分度台精度为  $1''$ , 通过转动多齿分度台来设定目标变形的角度。

在每个测量角度, 采集 CCD 的图像数据, 先计算激光光斑的中心位置, 再进一步计算出变形角的测量值, 统计测量值与多齿分度台转动角度的误差, 即可计算出变形测量系统的标准差。

## 4.2 实验结果

测量时多齿分度台每次转动  $5'$ , 正负方向各转动到  $30'$ , 共 13 个测量位置。在每个转动的角度位置, 利用 CCD 相机采集图像, 将采集到的图像首先采用变结构元多尺度广义形态滤波算法去除图像噪声, 再分别利用重心法和重心曲线拟合法计算变形角。

由于多齿分度台只能在水平方向转动, 无法实现俯仰方向上的转动, 所以先得到一组方位变形测量的数据, 然后再将变形测量装置垂直方向转  $90^\circ$ , 横着固定到多齿分度台上, 实现俯仰方向上的变形测量。通过两组实验得到的实验数据如表 1 所示。

对表 1 中的测量误差进行统计计算, 可以得到变形测量的标准差: 采用重心法时, 方位角的标准差为  $27.4''$ , 俯仰角的标准差为  $22.5''$ ; 采用重心曲线拟合时, 方位角的标准差为  $17.6''$ , 俯仰角的标准差为  $12.1''$ 。可以看出本文方法得到的测量误差明显小于重心法。

表 1 变形测量实验数据  
Table 1 Experiment data of distortion measurement

分度台 标定值	方位变形角				俯仰变形角			
	重心法	误差	重心曲线拟合	误差	重心法	误差	重心曲线拟合	误差
-30'	-29' 46"	14"	-30' 13"	-13"	-30' 28"	-28"	-30' 13"	-13"
-25'	-24' 38"	22"	-24' 50"	10"	-25' 29"	-29"	-25' 21"	-21"
-20'	-20' 18"	-18"	-19' 51"	9"	-20' 26"	-26"	-20' 20"	-20"
-15'	-15' 26"	-26"	-14' 58"	2"	-15' 26"	-26"	-15' 15"	-15"
-10'	-10' 16"	-16"	-9' 42"	18"	-10' 14"	-14"	-10' 09"	-9"
-5'	-5' 25"	-25"	-5' 10"	-10"	-5' 29"	-29"	-5' 07"	-7"
0'	0' 0"	0"	0' 0"	0"	0' 0"	0"	0' 0"	0"
5'	5' 18"	18"	5' 5"	5"	4' 44"	-16"	4' 55"	-5"
10'	10' 40"	40"	10' 24"	24"	10' 12"	12"	10' 11"	11"
15'	15' 52"	52"	15' 39"	39"	14' 45"	-15"	14' 55"	-5"
20'	20' 20"	20"	20' 12"	12"	19' 47"	-13"	19' 53"	-7"
25'	25' 31"	31"	25' 23"	23"	24' 31"	-29"	25' 01"	1"
30'	30' 22"	22"	30' 12"	12"	29' 39"	-21"	30' 06"	6"

## 5 结 论

本文首先介绍了能够对大型架体的变形以及建筑物的形变进行精确的测量的非接触测量系统的原理, 然后在原有算法的基础上提出了基于重心的曲线拟合亚像素中心定位算法, 实现了激光光斑中心位置的精确定位。通过多次实验, 该方法的定位精度明显优于重心法, 变形角的标准差均

小于  $20''$ , 有效地提高了变形测量系统的精度。同时该算法只需对采集到的图像数据做少量运算, 易于编程实现, 有利于在实际工程领域中的应用。

### 参考文献:

- [1] 孙宁, 乔彦峰, 林为才. 一种使用面阵 CCD 的非接触位置测量系统[J]. 长春理工大学学报, 2002, 25(4): 71-82.  
SUN N, QIAO Y F, LIN W C. Noncontact position

- measuring system with planar array CCD [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2002, 25(4): 71-82.
- [2] 张丽群. 基于相关法的多重成像亚像素定位算法的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.  
ZHANG L Q. Study on multiple-camera sub-pixel locating algorithm based on correlation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [3] 杨博雄. CCD 细分技术及其应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.  
YANG B X. CCD subdivision technology and its application research [D]. Beijing: Institute of Geophysics CEA, 2005.
- [4] 张毅刚, 曹阳, 项学智. 静态背景差分运动目标检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(5): 494-499.  
ZHANG Y G, CAO Y, XIANG X ZH. Moving targets detection of static background subtraction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(5): 494-499.
- [5] 邢德奎, 达飞鹏, 张虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(12): 2593-2598.  
XING D K, DA F P, ZHANG H. Research and application of locating of circular target with high accuracy [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(12): 2593-2598.
- [6] 刘绍锦, 王志乾. 基于 DSP 的高精度变形角测量系统[J]. 测控技术, 2009, 28(9): 14-16.  
LIU SH J, WANG Z Q. Design of high precision measuring system for angle distortion [J]. Measurement & control technology, 2009, 28(9): 14-16.
- [7] 敖磊, 谭久彬, 崔继文, 等. 激光 CCD 二维自准直仪中圆目标中心精确定位算法[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 668-673.  
AO L, TAN J B, CUI J W, et al. Precise center location algorithm for circle target in CCD laser dual axis auto-collimator [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(6): 668-673.
- [8] 胡学龙, 程茜, 杨莉. 基于形态滤波和梯度模糊 GHMT 的组合边缘检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(3): 55-58.  
HU X L, CHENG X, YANG L. Combined edge detection method based on morphology filtering and gradient fuzzy GHMT [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(3): 55-58.
- [9] 魏本征, 赵志敏, 华晋. 基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 838-844.  
WEI B ZH, ZHAO ZH M, HUA J. Sub-pixel edge detection method based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 838-844.
- [10] 潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1787-1792.  
PAN B, YANG G Q, LIU Y. Study on optimization threshold of centroid algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1787-1792.
- [11] 陈晓东, 李为民, 李静, 等. 利用重心法求光斑信号位置的误差分析[J]. 光学技术, 2000, 26(1): 5-8.  
CHEN X D, LI W M, LI J, et al. Error analysis of the center of gravity method when used to get the position of a facula [J]. Optical Technique, 2000, 26(1): 5-8.
- [12] 秦然. 基于神经网络的 CT 脑血管图像边缘检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(4): 346-352.  
QIN R. Edge information extraction algorithm for CT cerebrovascular medical image based on neural network [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(4): 346-352.
- [13] 赵爱明. 基于二次曲线拟合的图像亚像素边缘定位算法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(3): 68-70.  
ZHAO AI M. Sub pixel edge detection algorithm based on quadrativ curve fitting [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2006, 11(3): 68-70.
- [14] 刘金华, 余堃. 双树复小波域图像非线性扩散滤波[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(3): 268-273.  
LIU J H, SHE K. Image nonlinear diffusion filtering in dual tree complex wavelet domain [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(3): 268-273.
- [15] 郑月英, 钱唯德, 罗俊, 等. 基于曲线拟合的亚像素边缘定位方法的研究[J]. 光学技术, 2007, 32(3): 386-394.  
ZHENG Y Y, QIAN W D, LUO J, et al. Study on sub-pixel edge location method based on curve fitting [J]. Optical Technique, 2007, 32(3): 386-394.
- [16] 鲁昌华, 付能. 基于数字形态学的医用管制瓶边缘检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(6): 87-90.  
LU CH H, FU N. Edge detection of tube-type bottle based on mathematical morphology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22(6): 87-90.
- [17] 黄桂平, 钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(4): 15-19.  
HUANG G P, QIN G Q. Measurement methods of the large scale 3D coordinate and its system [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, 27(4): 15-19.

#### 作者简介:

王志乾: 1969 年出生, 现任中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员。目前主要研究方向为光电测量与数字信号处理。

E-mail: zhiqian\_wang@sina.com

Wang Zhiqian: born in 1969, and is researcher in Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics CAS now. His present research interests include photoelectric measurement and digital signal processing.