

# 激光光斑中心精确定位算法研究

刘兆蓉<sup>1,2</sup>, 王志乾<sup>1</sup>, 刘绍锦<sup>1</sup>, 沈铨武<sup>1</sup>

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

**摘要:** 研究激光光斑精确定位问题, 传统的亚像素定位算法, 面临抗干扰能力弱、定位精度低和软件实现复杂等问题。为了满足变形测量系统中对激光光斑中心精确定位的要求, 提出了基于重心的曲线拟合亚像素定位算法。在重心法的基础上, 引入了曲线拟合算法来提高激光光斑中心定位的精度。由于加入了图像预处理环节, 有效的降低了噪声干扰, 增强了算法的抗噪声性能。算法仅对图像中少量的数据点进行计算, 不但语言描述简单, 而且能大大节省系统资源。仿真结果表明算法是一种实用的精确定位算法, 提高变形测量系统的精度要求。

**关键词:** 变形测量; 亚像素定位; 激光光斑; 重心法; 曲线拟合

**中图分类号:** TP391    **文献标识码:** A

## Research of Precise Laser Spot Center Location Algorithm

LIU Zhao-rong<sup>1,2</sup>, WANG Zhi-qian<sup>1</sup>, LIU Shao-jin<sup>1</sup>, SHEN Cheng-wu<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun Jilin 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**ABSTRACT:** Traditional sub-pixel location algorithm often has some problems such as poor anti interference capability, low location precision and complexity of software realization. In order to meet the requirements of precise laser spot center positioning in distortion measurement system, the curve fitting sub-pixel location algorithm of barycenter is proposed. On the basis of barycenter method, curve fitting algorithm is proposed to improve the precision of laser spot center location. As the image preprocessing is added, the algorithm effectively reduced noise and enhanced noise robust. Only few data points are calculated by the algorithm which not only has simple language description, but also effectively saves system resources. The simulation results indicate that the sub-pixel location algorithm is a practical precise location method and meets the accuracy requirements of micro distortion measurement.

**KEYWORDS:** Distortion measurement; Sub-pixel location; Laser spot; Barycenter method; Curve fitting

### 1 引言

一般的变形测量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组成。由于 CCD 摄像器件具有高精度、高分辨率、高速度、测量非接触性等特点, 它在变形测量领域得到了广泛的应用。大多数的精密测量采用的都是激光作为被测基准点, 因此在测量过程中对投射到 CCD 上的激光光斑中心进行精确定位是保证测量精度的一个重要前提<sup>[1]</sup>。

早期常用的是像素级的中心定位算法, 将中心定位到一个像元上。一个像元的尺寸大约为几微米到十几微米, 使某些要求高的场合, 系统达不到精度要求。因此需要更高精度的中心定位算法——亚像素定位算法, 能将结果定位到亚像素级, 使测量结果达到一微米乃至零点几微米, 从而大大提

高系统的测量精度。现有的亚像素定位算法有重心法<sup>[2]</sup>、灰度重心法<sup>[3]</sup>、曲线拟合法<sup>[4]</sup>、相关法<sup>[5]</sup>和矩方法<sup>[6]</sup>等。这些定位算法都有各自的使用局限: 目前最常用的中心定位亚像素算法是重心法, 其算法简单且定位精度较高, 能达到 0.2 ~ 0.5 个像素, 但是它只能处理目标面积区域适中的图像, 并且受噪声干扰较大, 当图像信噪比较小时, 它的定位误差会变得很大。曲线拟合法也是图像处理中用的较多的一种数学方法, 但是其定位精度与图像的具体分布有关, 在实际处理中往往需要对每幅图像进行具体分析, 语言描述复杂并且需要耗费大量的程序运行时间。

本文针对变形测量系统, 在传统的定位基础上提出了一种适用于激光光斑曲线拟合亚像素中心定位算法, 它在传统算法的基础上加入了图像预处理环节, 能有效的滤除图像中的噪声, 增强算法的抗干扰性; 该算法对图像中的数据点并不是采用传统的逐点搜索计算的方法, 而仅对图像中有用的数据点进行计算分析, 计算量小, 使得软件实现简单并能大

基金项目: 国家自然科学基金项目(60507003)

收稿日期: 2010-03-25    修回日期: 2010-05-25

大节省系统的资源。

## 2 CCD 的光学成像原理

CCD 的激光光斑图像中心精确定位是测试目标。因此, 首先简单的介绍下 CCD 的光学成像原理。

由于 CCD 是光积分器件, 它以固定大小的面积在固定的时间间隔内对投射在它感光面上的光强进行积分, 输出的结果就是图像的灰度值, 某一像素的灰度值输出为:

$$f(i, j) = \int_{j-\frac{1}{2}}^{j+\frac{1}{2}} \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} g(x, y) dx dy \quad (1)$$

其中  $f(i, j)$  为像素输出值, 也就是灰度值,  $g(x, y)$  是连续图像的光强分布。由以上分析可以看出, 像素的输出值是像素感光面上各部分光强综合作用的结果, 这就是方形孔径采样定理, 采样结果是一个以灰度值为数值的离散矩阵。

## 3 重心的曲线拟合算法

### 3.1 重心法

重心法是对图像中圆、椭圆和矩形等中心对称的目标进行高精度定位常用的亚像素算法, 采用重心法时, 要对采集到的图像进行二值化处理。重心法的定位精度一般为 0.2 ~ 0.5 个像素。它的基本原理如下:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{m_{10}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} iI(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} i}{N} \\ y_0 = \frac{m_{01}}{m_{00}} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} jI(i,j)}{\sum_{(i,j) \in S} I(i,j)} = \frac{\sum_{(i,j) \in S} j}{N} \end{cases} \quad (2)$$

其中  $(x_0, y_0)$  为二值图像  $I(i, j)$  中的目标  $S$  的重心。

### 3.2 曲线拟合

根据 CCD 方形孔径采样定理可知, CCD 采集到的激光光斑近似符合高斯分布<sup>[7]</sup>, 高斯曲线的表达式可用下式表示:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

由于高斯曲线的积分表达式非常难求, 因此不直接对式 (3) 进行拟合, 而是对式 (3) 两端取对数:

$$\ln y = -\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2} + \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (4)$$

可以看出式 (4) 是关于  $x$  的二次曲线, 只需要对目标进行抛物线拟合即可, 大大简化了计算。

### 3.3 重心的曲线拟合

从式 (4) 可以看出, 对二次曲线进行拟合时, 需要知道差分最大的点, 也就是大概的中心位置, 可以采用逐像素求差分值的搜索方法求取中心像素, 但是这种方法有两个缺点, 一是如果图像较大, 这样的逐像素搜索计算量大且需要花费大量的程序运行时间; 二是在图像中很可能存在差分最大的像素有多个, 这时就需要根据实际情况进行选择, 软

件实现复杂。为了解决上述问题, 本文采用的是通过重心法定位找到图像的中心位置, 然后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, 下面就以水平方向为例说明。根据式 (4) 可设二次曲线的形式为:

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

根据式 (1) 可以得出每个像素的输出灰度值为:

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

设通过重心法求出的坐标为  $(x_0, y_0)$ , 该像素的灰度值为  $f_{0x}$ , 令该点的序号为 0, 根据式 (6) 可以得出:

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

以该点为中心点, 向前向后各取一个像素点, 记为  $f_{-1x}$  和  $f_{1x}$ , 根据式 (6) 可以得出:

$$f_{1x} = \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{26}{24}A + B + C \quad (8)$$

$$f_{-1x} = \int_{-\frac{3}{2}}^{-\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{26}{24}A - B + C \quad (9)$$

联立式 (7)、(8)、(9), 有:

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

$$B = \frac{1}{2}(f_{1x} - f_{-1x}) \quad (11)$$

$$C = \frac{13}{12}f_{0x} - \frac{1}{24}f_{-1x} - \frac{1}{24}f_{1x} \quad (12)$$

可以求出二次曲线的顶点为:

$$x = \frac{f_{1x} - f_{-1x}}{2(f_{0x} - f_{-1x} - f_{1x})} \quad (13)$$

求解出来的结果是对原高斯曲线取对数并记中心坐标为 0 的结果, 因此, 上式中的灰度值用对数值代替, 这样就得到水平方向的亚像素中心为:

$$x_{sub} = x_0 + \frac{\ln f_{1x} - \ln f_{-1x}}{2(2\ln f_{0x} - \ln f_{-1x} - \ln f_{1x})} \quad (14)$$

同理按照上式可以求出垂直方向的亚像素中心为:

$$y_{sub} = y_0 + \frac{\ln f_{1y} - \ln f_{-1y}}{2(2\ln f_{0y} - \ln f_{-1y} - \ln f_{1y})} \quad (15)$$

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真图像的生成

根据激光光斑的实际特点, 利用式 (16) 生成一个理想的圆图像, 其中  $(x_0, y_0)$  为理想的圆心坐标,  $R$  为半径, 可以根据需要选择半径的大小。

$$f(x, y) = \begin{cases} 0 & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} > R \\ a & \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \leq R \end{cases} \quad (16)$$

考虑到实际的光学成像系统和传感器对图像的平滑作用, 将激光光斑的灰度值设为与  $R$  相关的值  $a$ 。根据 CCD 方形孔径采样定理, 可知实际的激光光斑图像灰度值近似符合高

斯分布 因此 式(16) 中的  $a$  的取值如式(17) 所示。

$$a = 255 \times \exp \left[ -\frac{(x - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (17)$$

上式中  $x = R\cos\theta, y = R\sin\theta$  ,可以看出  $a$  的值随着  $R$  的变化而变化。

根据式(16) 和(17) ,可以生成最终实验用的激光光斑图像。本文生成的图像总大小为  $160 \times 160$  ,半径  $R$  为 10。

## 4.2 实验结果

利用 VC++ 对 4.1 中生成的激光光斑图像进行仿真实验 为了滤除图像中存在的噪声干扰 首先进行图像预处理。中值滤波的主要功能是让与周围像素灰度值的差比较大的像素改取与周围像素值接近的值 从而消除孤立的噪声点 ,所以首先利用中值滤波对仿真生成的激光光斑进行去噪处理。

中值滤波是一种邻域运算 在一个含有奇数个点的滑动窗口确定的图像邻域内 按该邻域内的图像像素灰度值进行升序或降序排列 取其中值为该邻域中点的像素灰度值。其数学表达式为:

$$y_{i,j} = \text{median}_A \{f(i,j)\} \quad (18)$$

其中  $f(i,j)$  为图像的灰度值  $y_{i,j}$  为邻域中点像素值  $A$  为窗口。一般而言 窗口的选取与所处理的图像有关 使用大的窗口 可以有效的抑制噪声 而使用小的窗口可以保留图像的重要结构特征。本文选用的是大小为  $3 \times 3$  的窗口。

对预处理后的激光光斑图像采用本文介绍的方法进行亚像素高精度定位 利用重心法初步定位时 须对图像进行二值化处理——图像的二值化处理就是按照一个指定的阈值将图像上的像素点的灰度值设置为 0 或 255 经过二值化处理后的图像将呈现出明显的黑白效果 阈值的选取以仍然可以反映图像整体和局部特征为标准。之后采用高斯拉普拉斯算子( LOG 算子) [8-9] 进行边缘提取。在图像的边缘提取中 通常使用的拉普拉斯算子是一个二阶导数 它会在边缘处产生一个陡峭的零交叉 加上噪声对边缘检测的影响 因此一般使用 LOG 算子。它把高斯平滑滤波器和拉普拉斯锐化滤波器结合起来 先平滑掉噪声 然后进行边缘检测 所以效果较好。

最后采用曲线拟合进行精确定位。其算法的实现流程如图 1 所示。实验中生成了已知中心点的 8 个仿真图像 作为对比 分别采用重心法和重心曲线拟合法进行实验 得到的实验结果如表 1 所示。

表 1 激光光斑中心定位结果(单位:像素)

中心点位置	重心法		重心曲线拟合法	
	计算中心	绝对误差	计算中心	绝对误差
(81.0, 81.0)	(81.48, 81.47)	(0.48, 0.47)	(81.07, 81.06)	(0.07, 0.06)
(81.1, 81.1)	(81.47, 81.52)	(0.37, 0.42)	(81.05, 81.17)	(0.05, 0.07)
(81.2, 81.2)	(81.55, 81.64)	(0.35, 0.44)	(81.23, 81.31)	(0.03, 0.11)

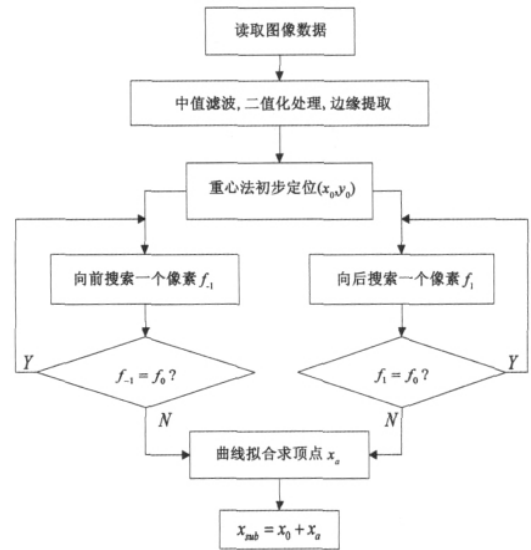


图 1 算法软件流程图

(81.3, 81.3)	(81.70, 81.79)	(0.40, 0.49)	(81.41, 81.37)	(0.11, 0.07)
(81.4, 81.4)	(81.89, 81.98)	(0.49, 0.58)	(81.49, 81.45)	(0.09, 0.05)
(82.3, 82.3)	(82.75, 82.78)	(0.45, 0.48)	(82.39, 82.29)	(0.09, 0.01)
(82.4, 82.4)	(82.85, 82.87)	(0.45, 0.47)	(82.48, 82.44)	(0.08, 0.04)
(83.3, 83.3)	(83.69, 83.72)	(0.39, 0.42)	(83.40, 83.36)	(0.10, 0.06)

在表 1 中 由于测量误差基本服从正态分布 因此采用标准差来计算定位精度<sup>[10]</sup>:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (19)$$

式中:  $v_i$  为各次测量的误差。

根据式(19) 可以计算出重心法定位的绝对误差在 0.4 ~ 0.5 个像素 其标准差为 0.46 个像素; 而本文提出的重心曲线拟合算法定位的绝对误差基本上都小于 0.1 个像素 标准差仅为 0.08 像素 图像光斑中心定位的精度有了显著提高。

## 5 结论

激光光斑中心位置的精确定位是变形测量系统中的一个关键步骤 本文提出了一种基于重心的曲线拟合亚像素中心定位算法。首先对激光光斑图像进行中值滤波、二值化以及边缘提取等预处理 然后对预处理后的图像采用重心法进行亚像素初步定位 最后采用曲线拟合进行精确定位。该方法的定位精度明显优于重心法 定位误差小于 0.1 个像素 达到了很高的定位精度 能有效地提高变形测量系统的测量精度 是一种实用的高精度定位方法。

(下转第 409 页)

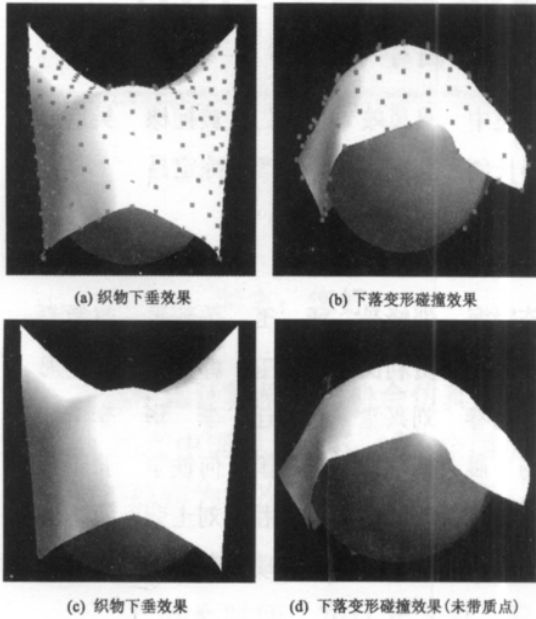


图4 本文算法效果图

[4] 李健,李鹏坤,廖秋筠.基于改进的质点-弹簧模型的织物模拟[J].计算机应用,2009,29(9):2386-2388.

(上接第401页)

参考文献:

[1] 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.  
 [2] 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.  
 [3] 郭玉波,姚郁,遆晓光.一种改进的亚像素算法[J].光电工程,2006,33(10):137-140.  
 [4] 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.  
 [5] 张军,等.基于微区统计特性的数字散斑相关测量亚像素位移梯度算法[J].光学技术,2003,29(4):467-472.  
 [6] 敖磊,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.  
 [7] 苏显渝,李继陶.信息光学[M].北京:科学出版社,1999.  
 [8] 宋毅,等.基于Barnard特征和LOG算子的月球车图像特征匹

(上接第405页)

[6] 陈海花,孟庆春.基于蚁群算法的语音信号动态时间规划[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(10):1758-1761,1780.  
 [7] 黄涛,肖宜.蚁群算法在语音识别中的应用研究[J].武汉理工大学学报,2007,29(12):92-95.  
 [8] 肖力.基于改进蚁群算法的物流配送问题研究[J].计算机仿真,2008,25(4):182-185.  
 [9] 高尚,钟娟,莫述军.连续优化问题的蚁群算法研究[J].微机发展,2003,13(1):21-23,69.

[5] 宁松,林木华,刘郊.一种快速的基于物理模型的织物模拟[J].计算机仿真,2006,12(23):118-121.  
 [6] Jaruwan M, Ratan G, Shafaq C. 3D Soft Body Simulation Using Mass-spring System with Internal Pressure Force and Simplified Implicit Integration[J]. Journal of Computers, 2007, 2(8):34-43.  
 [7] 李长峰,修毅.织物三维动态变形[J].计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(9):1372-1376.  
 [8] MEYER M, DEBUNNE G, BARR A. Interactive animation of cloth-like objects for virtual reality[J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12:1-12.  
 [9] 靳碧鹏.基于物理的计算机实时动画研究[D].合肥电子科技大学,2007.  
 [10] 汪剑春,胡新荣,王晖.基于质点-弹簧的动态织物仿真技术[J].武汉科技学院学报,2008,21(9):6-8.



[作者简介]

刘凌霄(1977-),女(汉),河南安阳人,硕士,讲师,主要研究领域为图像图形处理,数据挖掘等;  
 宋强(1971-),男(汉),河南安阳人,硕士,讲师,主要研究领域为人工智能,电子商务。



[作者简介]

刘兆蓉(1987-),女(汉族),贵州省六盘水市人,硕士研究生,主要研究领域为图像数据处理;  
 王志乾(1969-),男(汉族),吉林省吉林市人,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究领域为光电测量与数字信号处理;  
 刘绍锦(1979-),男(汉族),山西省大同市人,博士,副研究员,主要研究领域为光电测量;  
 沈铨武(1978-),男(汉族),吉林省松原市人,硕士,助理研究员,主要研究领域为惯性测量及数据处理。

[10] 张军,李学斌.一种基于DTW的孤立词语音识别算法[J].计算机仿真,2009,26(10):348-351,364.



[作者简介]

魏星(1980-),男(汉族),四川省资中县人,讲师,硕士研究生,主要研究领域为:语音信号处理、计算机网络;  
 周萍(1964-),女(汉族),教授,硕士研究生导师,主要研究领域为:语音信号处理。