文章编号:1002-2082(2012)05-0985-06

基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法

王丽丽[1,2],胡中文[1],季杭馨[1,2]
(1. 中国科学院国家天文台 南京天文光学技术研究所,江苏 南京 210042;
2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘　要:激光光斑中心定位是光学测量中的关键技术之一。通过对常用定位算法的分析,给出利用光斑图像中的不饱和点对光斑进行高斯拟合,并以拟合函数的幅值点作为光斑中心的方法。利用人工光斑对该算法进行验证,结果表明该算法误差远小于 0.1 像素;利用一维高精度电动平移台、CCD 相机、激光器等搭建测试系统,由计算机自动采集激光光斑图像并对其进行分析,实验结果表明该算法与理论分析结果的均方根误差仅为 0.1 像素。

关键词:光学测量;高斯拟合;光斑中心;不饱和点
中图分类号:TN24;TN911.73　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.5768/JAO201233.0507003

Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting

WANG Li-li[1,2], HU Zhong-wen[1], JI Hang-xin[1,2]
(1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology National Astronomical Observatories, CAS, Nanjing 210042, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Laser spot center location is a key technique in the field of optical measurement. Based on the analysis of algorithms commonly used, a Gaussian fitting based laser spot center location method was presented. The unsaturated part of laser spot image was used to fit the Gaussian surface, based on which the amplitude of the fitting function could be looked upon as the laser spot center. In order to verify this algorithm, an artificial light spot was used firstly, experimental results showed that the error of this algorithm was much less than 0.1 pixels; and then a measuring system which mainly consisted of high precision motorized translation stage of one dimension, CCD camera and laser was constructed, the acquisition and analysis of laser spot image were accomplished by computer automatically, experimental results showed that the root mean square error between the algorithm and theoretical analysis was only 0.1 pixels, which had high accuracy.

Key words: optical measurement; Gaussian fitting; laser spot center; unsaturated point

引言

由于激光具有方向性好、发散度小等特性[1],因此被广泛应用于航空航天、武器系统以及光学测量和检测仪器中,激光光斑中心的准确定位直接决定了测量精度的高低[1-3]。目前,比较常用的光斑中心定位算法有重心法、圆拟合法[2]、Hough 变换法[3]、空间矩法[4]等,但这些算法在检测精度、速度和抗干扰性上各自都存在一定的不足。重心法要求光斑形状比较规则、灰度比较均匀,否则会产生较大的误差;Hough 变换法需要对参数空间离散化,限制了测量精度,在实用中受到了限制;圆拟合法容易受二值化阈值的影响,选择不同的阈值时得到的中心偏差比较大;空间矩法虽然运算精度较高,但要求光斑边缘为理想二级边缘,在实际光线

收稿日期:2012-03-22;　**修回日期**:2012-04-01
基金项目:国家自然科学基金(10873023);国家自然科学青年基金(11103053)
作者简介:王丽丽(1987—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事精密测量和控制技术工作。
E-mail:llwang@niaot.ac.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

复杂变化的情况下难以实现。本文通过对常用定位算法的分析,利用光斑图像中的不饱和点对激光光斑进行高斯拟合,进而得到光斑的中心位置,并构建测试系统对采集到的光斑进行分析。实验证明,该算法能够有效地检测光斑中心位置。

1 常用算法介绍

1.1 重心法

重心法可以看作是以灰度为权值的加权型方法,该算法首先将激光光斑图像处理为具有256级的灰度图像,然后求出光斑重心。假设图像尺寸为 $M\times N$ 像素,则光斑中心计算公式为

$$\begin{aligned} x_0 &= \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} i * I(i,j) / \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} I(i,j) \\ y_0 &= \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} j * I(i,j) / \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N} I(i,j) \end{aligned} \tag{1}$$

式中 $I(i,j)$ 代表位于灰度图中第 i 行第 j 列像素点的灰度值。该算法简单明了,计算速度快,但抗干扰能力差。在光斑分布不均匀的情况下容易造成较大的误差,特别是在传输距离比较远时,由于存在一定强度从侧面入射的光线,测量结果经常不可用[5]。

1.2 Hough 变换法

Hough 变换是图像空间和参数空间之间的一种变换[3]。采用 Hough 变换检测任意曲线的原理如下。假设待检测曲线的参数方程为

$$a_n = f(a_1, \cdots, a_{n-1}, x, y) \tag{2}$$

式中:$a_1, \cdots, a_n$ 为形状参数;x, y 为图像点坐标。Hough 变换将图像空间中的每一个轮廓点代入参数方程(2),其计算结果对参数空间 $(a_1, \cdots, a_n)$ 中的量化点按就近原则进行投票,若票数超过某一门限值,则认为有足够多的图像点位于该参数点所决定的曲线上。对于圆 $r=\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}$,其参数空间为 (x_0, y_0, r),其中 (x_0, y_0) 为圆心坐标,r 为半径。利用 Hough 变换检测圆时需要对参数空间离散化,进而对每一个轮廓点在三维参数空间内逐点投票、记录,故花费时间较长,占用计算机存储量也较大,测量精度也因参数空间离散化而受到影响,因此在实用中受到了限制。

2 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法

对于大多数需要分析的激光光束而言,其理想的光斑光强分布应该满足高斯分布[6-7],即在任意一个垂直于光束的截面 (x, y) 上,光强分布是符合高斯型的。取其高斯函数为

$$I(x,y) = H \cdot \exp\left\{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_2^2}\right]\right\} \tag{3}$$

式中:$I(x,y)$ 为激光光束在该截面 (x,y) 处的光强;H 为该截面的光斑光强幅值;(x_0, y_0) 为光斑中心位置;σ_1, σ_2 为2个方向上的标准差。由上式可以看出,光强幅值位置即为光斑中心位置,因而在本文中采用光强幅值所在的位置作为光斑中心位置。对(3)式两边取对数并将其简化为多项式可得:

$$z = ax^2 + by^2 + cx + dy + f \tag{4}$$

其参数对应关系为

$$\begin{cases} a = -1/\sigma_1^2 \\ b = -1/\sigma_2^2 \\ c = 2x_0/\sigma_1^2 \\ d = 2y_0/\sigma_2^2 \\ f = \ln H - x_0^2/\sigma_1^2 - y_0^2/\sigma_2^2 \\ z = \ln I(x,y) \end{cases} \tag{5}$$

取残差:$\varepsilon_i = (a x_i'^2 + b y_i'^2 + c x_i' + d y_i' + f) - z_i'$ (6)

式中:$(x_i', y_i') \in E$ 表示图像中所有适用于高斯拟合的点,(x_i', y_i') 为图像点的坐标;z_i' 为该点灰度值的自然对数。则根据最小二乘原理(残差平方和最小),a、b、c、d、f 可由下式确定:

$$\begin{bmatrix} x_1'^2 & y_1'^2 & x_1' & y_1' & 1 \\ x_2'^2 & y_2'^2 & x_2' & y_2' & 1 \\ x_3'^2 & y_3'^2 & x_3' & y_3' & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n'^2 & y_n'^2 & x_n' & y_n' & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1' \\ z_2' \\ z_3' \\ \vdots \\ z_n' \end{bmatrix} \tag{7}$$

利用 CCD 采集激光光斑时,由于图像采集卡的有效位数通常为8位,当光强比较大或者 CCD 曝光时间过长时,容易导致数据饱和(灰度值超过255),不能够反映出光斑的真实光强,如果把这些点也用于高斯拟合,则容易产生较大的误差,因此要去掉这些饱和点。E 的取值范围应该为 $I_{th} < I(x_i', y_i') < 255$,其中 I_{th} 为图像中光斑与背景的分割阈值,将图像中所有满足此条件的点代入(7)式即可求得参数 a、b、c、d、f,进而根据(8)式得到光斑中心位置 (x_0, y_0) 及光强幅值 H:

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{cases} x_0 = -c/2a \\ y_0 = -d/2b \\ H = \exp(f - c^2/4a - d^2/4b) \end{cases} \tag{8}$$

3　高斯拟合算法与其他算法比较分析

3.1　人工光斑分析

为了验证本文算法的精度,生成一幅人工光斑图像(光斑中心区饱和),并在图中加入一些噪声及边界干扰,理想中心坐标为(256,296),分别利用重心法、Hough 变换法及本文算法计算其中心位置,结果如图 1 所示。图 1 中 A 点为本文算法的检测结果,其光斑中心位置为(256.006,295.998),B 点为 Hough 变换法检测结果,中心点坐标为(258.4,298.9),C 点为重心法检测结果,为(259.6,307.3)。由检测结果不难看出,利用本文算法得到的光斑中心与理想中心的误差远小于0.1像素,明显高于其他两种算法,具有较高的精度。

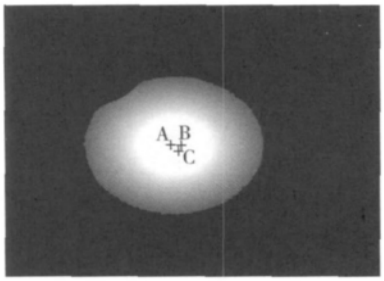

图 1　人工光斑检测结果

Fig. 1　Detected simulated spot center

3.2　实测实验结果分析

为了验证本文算法的精度和抗干扰性,搭建图 2 所示实验系统,对其进行测量分析。实验系统主要由激光器、转台、一维高精度电动平移台(精度优于 0.1 μm,分辨率达到 0.001 μm)及 CCD 相机组成,其中激光器采用 JDW3-250 氦氖激光器,采集到的图像大小为 494×656 像素。在实验中,光斑图像的采集及电动平移台的移动由 PC 机控制自动完成,以尽量减少环境因素引入的误差。实验过程如下:

1) 将 CCD 固定在电动平移台上,调整 CCD 高度使其与激光光源、球面镜等高;

2) 通过 XPS 控制器驱动转台和平移台以调节球面镜位置,调节 CCD 与球面镜距离,使光斑位于图像中心,同时调整 CCD 曝光时间,使采集到的光斑中心区饱和(灰度值超过 255),在此位置等时间间隔采集 10 幅图像,分别利用本文算法、重心法、Hough 变换法计算这 10 幅图像的光斑中心位置并对其进行分析;

3) 控制电动平移台以一定的步长在水平方向平移,则 CCD 也随之移动,每平移一次拍摄 1 幅图像,同时记录电动平移台的位置,连续平移 5 次,分别利用本文算法、重心法及 Hough 变换法计算这 5 个位置所采集光斑的中心并对其进行分析;

4) 将 CCD 反行程平移,在与 3)步骤中对应的位置再次采集光斑并对图像进行与 3)步骤中同样的处理;

5) 为了保证实验结果的可靠性,将 3)、4)步骤重复进行 3 次,即正反行程各测量 3 次,共 6 组图像。

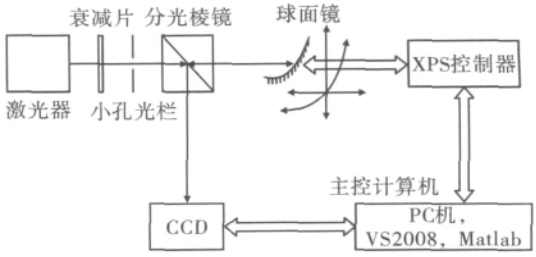

图 2　实验系统框图

Fig. 2　Block diagram of experimental system

实验中采集到的激光光斑图像(图 3)由于受到空气中杂质、CCD 暗电流散粒噪声、光子散粒噪声、反射面不均匀等的影响,并不直接适用于提取光斑中心,在求取光斑中心之前,必须要对图像进行预处理以消除光斑外的小亮点、小暗点和其他杂散光的影响。首先利用形态学操作[8-10](包括一次开启操作、一次闭合操作)消除图像中光斑外的小亮(暗)点;再利用最大类间方差法[9,11]确定图像的分割阈值,将图像中小于阈值的点全部置为 0,其他点作为光斑的组成部分,保留原灰度值,最后用本文算法和重心法、Hough 变换法计算光斑中心位置。

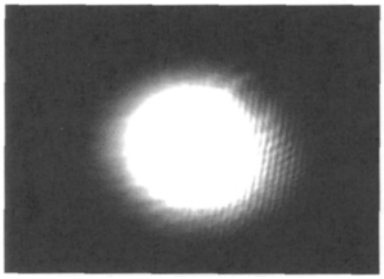

图 3　实验中采集到的激光光斑图像

Fig. 3　Laser spot image gathered in experiment

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实验中第 2)步所采集的 10 幅图像为短时间内快速采集,因此,从理论上来讲,这 10 幅图像的光斑中心位置应该相等,标准差应该为 0,其实际处理结果表所示:其中表 1 为本文算法处理结果,表 2 为 Hough 变换法处理结果,表 3 为重心法处理结果。分析表中数据可知,本文算法处理得到的 10 组数据相对比较稳定,而重心法和 Hough 变换检测到的光斑中心坐标变化比较大。利用贝塞尔公式[12]:

$$\left.\begin{aligned}\sigma_x&=\sqrt{(n-1)^{-1}\sum(x_i-\bar{x})^2},\\ \sigma_y&=\sqrt{(n-1)^{-1}\sum(y_i-\bar{y})^2}\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

计算这 3 组检测结果的标准差:重心法 $\sigma_x=1.26$,$\sigma_y=0.56$;Hough 变换法 $\sigma_x=1.35$,$\sigma_y=3.97$;本文算法 $\sigma_x=0.29$,$\sigma_y=0.29$,由此可以看出:本文算法检测结果的标准差较小,与理论分析相对较为接近,具有较好的稳定性,可用于光斑中心的检测。

表 1 高斯拟合法检测结果

Table1 Result of Gaussian fitting

图像		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标/像素	x	264.3	264.8	264.7	264.9	264.9	264.9	264.9	264.9	264.2	264.3
	y	331.9	331.7	331.6	331.8	331.3	331.1	331.6	332.0	331.8	331.9

表 2 Hough 变换检测结果

Table2 Result of Hough transform

图像		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标/像素	x	265.9	265.4	267.3	267.7	266.9	266.7	265.8	270.0	270.0	265.9
	y	369.8	365.5	.63.4	372.9	365.5	362.3	365.6	372.7	372.5	366.4

表 3 重心法检测结果

Table 3 Result of gravity method

图像		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坐标/像素	x	263.0	265.5	263.1	263.5	265.6	264.1	265.4	263.9	262.0	262.6
	y	335.4	334.5	335.7	335.1	334.1	334.7	334.6	335.1	335.6	335.6

图 4 为第 3)步中 CCD 在 5 个位置所采集图像的光斑中心检测结果及拟合曲线(第 2 次正行程测量)。实验中 CCD 固定在电动平移台上以固定步长在水平方向移动,因此从理论上来讲,光斑中心(y 方向)与水平位移之间的关系应该为线性关系。从图 4 中可以看出:本文算法、重心法及 Hough 变换法检测结果拟合曲线都趋向于直线,从直观上无法准确判断哪种算法更好,因此需要对这 3 种算法的检测结果进行定量分析,取残差:

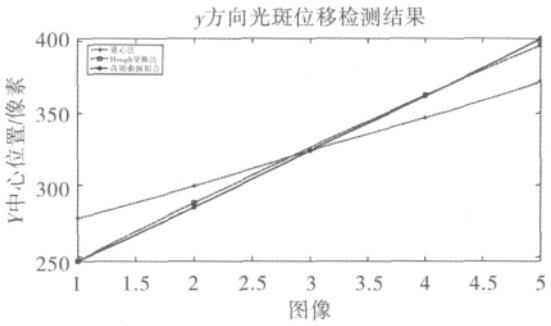

图 4 光斑中心检测结果及拟合曲线

Fig. 4 Test results of spot center and fitting curve

$$v_k=(a_1k+a_2)-y_k\tag{10}$$

式中:a_1k+a_2 为拟合直线方程;y_k 为各算法在 y 方向的光斑中心检测结果;$k=1,2,3,4,5$ 代表采集到的 5 个光斑,根据最小二乘原理对每个行程中各种算法的检测结果进行拟合。由于实验中采用高精度电动平移台且每次分析中所用图像为同一组,因此检测结果的误差主要由算法引入,可取(11)式来衡量各拟合直线的可信赖程度(精度)[12]:

$$\sigma=\sqrt{\sum_{i=1}^{k}v_i^2/(n-t)}\tag{11}$$

式中:σ 为测量数据标准差的估计值(均方根误差);t 为拟合曲线方程中的未知数个数;n 为一个行程中的测量次数。在本文中,$t=2$,$n=5$,计算结果如表 4 所示。从表中可以看出:本文算法 3 次正行程的计算结果都小于 0.1 像素;反行程测量的计算结果也约为 0.3 像素。在此处反行程计算结果较正行程大是因为在反行程测量中,图像的采集位置是根据正行程中所记录的位置来确定的,两次定位之间难免会有少许误差,在光程比较

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大时,由此产生的误差便会反应在光斑中心位置上,只要加入对正反行程同一位置的校正,本文算法在反行程的计算结果也能够达到0.1像素。因此,相对于其他两种算法,本文算法具有较高的精度(正行程测量结果更为可靠)。

表4 3种算法σ计算结果

Table 4 σ of three algorithms

算法	σ					
	$1_{正}$	$1_{正}$	$2_{正}$	$2_{正}$	$3_{正}$	$3_{正}$
高斯拟合法	0.06	0.31	0.07	0.33	0.07	0.34
重心法	0.70	0.54	0.60	0.53	0.59	0.50
Hough变换法	1.39	1.99	2.21	1.73	1.30	1.90

4 结论

本文推导利用光斑图像的不饱和点对光斑进行高斯拟合进而得到光斑中心的方法,并通过人工光斑和实测激光光斑进行了验证分析。该方法与常用定位算法相比,主要的特点是利用光斑图像中的所有不饱和点对光斑进行分析,避免了光斑中心区饱和引入的误差,充分利用了光斑的有效部分,人工光斑和实测激光光斑的分析结果均表明该算法的精度能够达到0.1像素,是一种可行的光斑中心定位算法。

参考文献:

[1] 王春阳,李金石. 激光光斑漂移的检测[J]. 应用光学,2007,28(2):205-208.
WANG Chun-yang, LI Jin-shi. Detection of laser spot drift[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2):205-208. (in Chinese with an English abstract)

[2] 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.
KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese with an English abstract)

[3] 杨耀权,施仁,于希宁,等. 用Hough变换提高激光光斑中心定位精度的算法[J]. 光学学报,1999,19(12):1655-1660.
YANG Yao-quan, SHI Ren, YU Xi-ning, et al. An algorithmto raise the locating precision of laser spot center based on Hough transform[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19(12): 1655-1660. (in Chinese with an English abstract)

[4] 郑毅. 基于空间矩的激光光斑中心亚像素定位[J]. 激光与红外,2005,35(7):521-523.
ZHENG Yi. Subpixellocation of the center of laser spot based on spatial moments[J]. Laser & Infrared, 2005, 35(7): 521-523. (in Chinese with an English abstract)

[5] 尚学军,何明一,王军良. 基于线阵CCD的光斑定位算法研究[J]. 激光与红外,2008,38(7):730-731,740.
SHANG Xue-jun, HE Ming-yi, WANG Jun-liang. Research of method in light-spot location based on linear CCD[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7):730-731, 740. (in Chinese with an English abstract)

[6] 李伦,巩马理,刘兴占,等. MATLAB用于激光光束质量分析[J]. 激光技术,2000,24(6):405-408.
LI Lun, GONG Ma-li, LIU Xing-zhan, et al. A software for laser beam analysis[J]. Laser Technology, 2000, 24(6): 405-408. (in Chinese with an English abstract)

[7] 富容国,常本康,刘淑荣. 1.06um激光光斑中心的计算机分析[J]. 光电子技术与信息,2004,17(2):26-29.
FU Rong-guo, CHANG Ben-kang, LIU Shu-rong. Analysis of the facula center of the 1.06um laser with computer[J]. Optoelectronic Technology & Information, 2004, 17(2): 26-29. (in Chinese with an English abstract)

[8] GONZALEZ R C, WOODS R E. 数字图像处理[M]. 第2版. 阮秋琦,阮宇智,译. 北京,电子工业出版社,2007.
GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. Translated by RUAN Qiu-qi, RUAN Yu-zhi. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007. (in Chinese)

[9] 章毓晋. 图像工程-图像分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
ZHANG Yu-jin. Image engineering(1)-Image analysis(second edition)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)

[10] 唐树刚,党丽萍,白波. 提高多光源汇聚光斑中心定位精度的形态学滤波方法[J]. 应用光学,2008,29(5):693-696.
TANG Shu-gang, DANG Li-ping, BAI Bo. Morphological filter algorithm to improve positioning accuracy of multi-laser convergent spot center[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(5): 693-696. (in Chinese with an English abstract)

[11] 齐丽娜,张博,王战凯. 最大类间方差法在图像处

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理中的应用[J]. 无线电工程, 2006, 36(7): 25-26,44.
QI Li-na, ZHANG Bo, WANG Zhan-kai. Application of the OTSU method in image processing [J]. Radio Engineering, 2006, 36(7): 25-26,44. (in Chinese with an English abstract)

[12] 陶云刚, 高诚镜, 刘文波. 误差理论与数据分析[M]. 北京:航空工业出版社, 1997.
TAO Yun-gang, GAO Cheng-jing, LIU Wen-bo. Error theory and data analysis[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1997. (in Chinese)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net