

小尺寸光斑中心的高精度定位算法

赵婧鑫,周富强

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘要:光斑中心定位是光学测量中的关键技术之一,针对小尺寸光斑中心定位算法精度低等问题,提出了一种具有高精度的小尺寸光斑中心两步定位算法。通过寻找一阶导数零交叉点的方法确定光斑中心所在的像素级坐标,然后利用该中心邻域内不饱和点的灰度信息进行高斯拟合计算光斑中心亚像素级坐标。实验结果表明:在无噪声污染光斑图像中,与其他经典算法相比,两步定位算法误差远小于 0.05 像素,保证了光斑中心的高精度定位,且光斑成像越接近理想高斯分布,精度越高。

关键词:小尺寸光斑; 中心定位; 零交叉; 高斯拟合

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2690-04

High-precision center location algorithm of small-scale focal spot

Zhao Jingxin, Zhou Fuqiang

(Institute of Instrument and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Spot center location is a key technique in the field of optical measurement. A Two-step method for center location of small-scale focal spot with high precision was proposed to solve the problem as the low precision when using classic center location algorithms. First, the pixel-level center could be located through zero crossing of the first derivative in the focal spot image. And then, the unsaturated part of the focal spot beside the pixel-level center was used to fit the Gaussian surface to calculate the sub-pixel center. Experimental results show that, when comparing with other classic center location algorithms, the error of the two-step method is much less than 0.05 pixels in the spot image without background noise. The two-step method can keep high-precision center location of the focal spot. If the imaging model of the focal spot is much more similar with the ideal Gaussian spread function, the precision is higher.

Key words: small-scale focal spot; center location; zero-crossing; Gaussian fitting method

收稿日期:2013-12-10; 修订日期:2014-01-25

基金项目:国家自然科学基金(61372177)

作者简介:赵婧鑫(1987-),女,硕士生,主要从事图像处理与识别方面的研究工作。Email:jingxinde@gmail.com

导师简介:周富强(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事计算机视觉、图像处理与识别、三维数字化技术和激光及光电测试技术方面的研究工作。Email:zfq@buaa.edu.cn

0 引 言

光斑图像^[1]是现有图像处理中较为常见的图像,光斑质心是光斑图像的重要特征之一。快速精确定位成像光斑的中心,是卫星导航、视觉测量等领域诸多应用的基础,对系统整体性能有着重要的影响。

点状光斑的中心定位方法可分为基于灰度和基于边缘的两大类^[2]。基于灰度的方法一般利用目标的灰度分布信息,适用于半径较小且灰度分布均匀的光斑;基于边缘的方法一般利用目标的边缘形状信息,适用于半径较大的光斑。因此,小尺寸光斑通常采用基于灰度的方法进行中心定位。目前常用的基于灰度的中心定位方法包括三种:即质心法、Hessian 矩阵法和高斯拟合法。质心法^[3]是用的最多的一种细分定位方法,它实现比较简单,运算速度快,而且有一定的定位精度,但抗噪声能力弱,在实际应用中,通常对其进行改进,采用带阈值的质心法,可以获得更高的精度,抗噪声能力稍强于质心法。Hessian 矩阵可以用于判断曲线或曲面的局部极小值或极大值。Steger^[4]利用 Hessian 矩阵得到图像中光条纹的法线方向,然后求法线方向上的极值点得到光条纹中心线的亚像素位置;魏振忠^[5]在此基础上推导出光斑图像像素中心的 Hessian 矩阵判定条件,再利用二阶泰勒展开式推出亚像素中心的计算公式,该方法精度高,鲁棒性好,但要对整个图像做大规模高斯卷积,运算量较大,且抗噪声能力不强。高斯拟合法精度较高,传统做法是利用质心法或二值化方法确定光斑区域,再根据高斯分布函数结合最小二乘法或插值法计算出光斑的中心坐标,方法复杂,速度慢,不适用于实时性较高的系统^[6-8]。

针对上述方法的优势和不足,提出了一种高精度的小尺寸光斑中心两步定位算法。首先,通过寻找一阶导数零交叉点的方式准确定位小尺寸光斑像素级中心,再利用像素中心邻域内不饱和点的灰度信息进行高斯拟合计算小尺寸光斑的亚像素级中心坐标。实验结果表明,两步定位算法具有较高的精度。

1 像素级光斑中心定位

理论上,小尺寸光斑成像应聚集在一个像元内,但是单个像素的定位精度无法满足测量的要求,因

此常采用散焦的方法,使光斑成像扩散到多个像素,再利用中心定位算法得到亚像素级的定位精度。小尺寸光斑目标图像的灰度分布为光学系统的点扩展函数,可以用二维高斯分布函数来近似表示:

$$g(x,y) = \frac{A}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-X)^2 + (y-Y)^2}{2\sigma^2}\right) = B \times g(x) \times g(y) \quad (1)$$

式中: A 为小尺寸光斑像点的总能量; (X,Y) 为函数中心点位置坐标; σ 是高斯函数的方差,对应光斑弥散半径的大小; $g(x)$ 和 $g(y)$ 分别为 x 和 y 方向的一维高斯分布函数。提取光斑中心实质上是求解公式(1)所示的二元函数的极大值点坐标。由公式(1)可看出高斯函数具有可分离性,因此对二元函数极大值点 (X,Y) 的求解可转化为,求解二维高斯函数每一行 x 方向一元函数像素极值点集合 $U(x_i,y_j)$ 和光斑图像每一列 y 方向一元函数像素极值点集合 $U(x_m,y_n)$,二者的交集即为二维高斯函数极值点 (X,Y) ,即 $(X,Y) = U(x_i,y_j) \cap U(x_m,y_n)$ 。图 1(a)所示为理想光斑的能量分布图,以 x 方向为例,图 1(b)所示为理想光斑 x 方向的能量分布函数曲线,其一阶导数分布曲线如图 1(c)所示,可以看出,若点 X 为极大值点,则点 X 处的一阶导数为 0,且一阶导数在该点 X 邻域内递减。

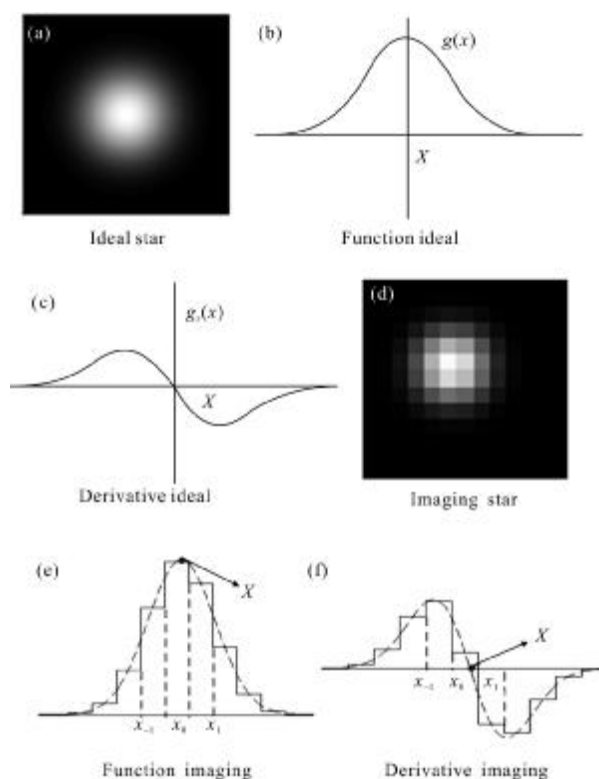


图 1 光斑成像模型

Fig.1 Imaging model of the spot

图 1(d)所示为实际获得的光斑图像,其灰度值分布是离散的,由此求出的图像一阶导数也是离散的,如图 1(e)所示,而图 1(f)所示的点 x_0 处一阶导数不为零,故无法简单地通过寻找一阶导数为零点来准确定位光斑的极大值点坐标。因此算法将光斑中心定位分为两个过程:(1) 首先定位小尺寸光斑的像素级中心点坐标 (X_0, Y_0) 。(2) 在点 (X_0, Y_0) 邻域内确定光斑的亚像素级中心坐标 (X, Y) 。

如图 1(e)和(f)所示,对三个连续的像素点 x_{-1} 、 x_0 和 x_1 进行分析,可看出若光斑中心 X 落在点 x_0 坐标内,则点 x_0 为光斑像素级中心点坐标,其一阶导数值 $g_x(x_0)$ 的绝对值在三点中最小,即 $|g_x(x_0)| < |g_x(x_{-1})|$, 且 $|g_x(x_0)| < |g_x(x_1)|$, 又由于点 x_0 为一阶导数过零点,即 $g_x(x_{-1}) > 0$, 且 $g_x(x_1) < 0$ 。同理若 y 方向上的像素点 y_0 为像素级中心点,则点 y_0 处的一阶导数值 $g_y(y_0)$ 的绝对值在其邻域内最小,且 $g_y(y_{-1}) > 0$, $g_y(y_1) < 0$, 则可推导出像素级光斑中心判定公式,即若在点 (x_0, y_0) 处,在 x 方向上, $|g_x(x_0)| < |g_x(x_{-1})|$, $|g_x(x_0)| < |g_x(x_1)|$, 且 $g_x(x_{-1}) > 0$, $g_x(x_1) < 0$, 在 y 方向上, $|g_y(y_0)| < |g_y(y_{-1})|$, $|g_y(y_0)| < |g_y(y_1)|$, 且 $g_y(y_{-1}) > 0$, $g_y(y_1) < 0$, 则点 (x_0, y_0) 即为光斑的像素级中心点坐标,记为 (X_0, Y_0) 。

2 亚像素级光斑中心计算

由第一节一阶导数零交叉法准确定位光斑图像像素级中心位置 (X_0, Y_0) 后,即可在该像素邻域内确定光斑亚像素中心坐标 (X, Y) 。

由于光斑能量分布满足高斯分布函数,对公式(1)等式两边求对数,可得到:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{2} \cdot \frac{(x_3^2 - x_2^2) \ln(g(x_1)) + (x_1^2 - x_3^2) \ln(g(x_2)) + (x_2^2 - x_1^2) \ln(g(x_3))}{(x_3 - x_2) \ln(g(x_1)) + (x_1 - x_3) \ln(g(x_2)) + (x_2 - x_1) \ln(g(x_3))} \\ Y = \frac{1}{2} \cdot \frac{(y_3^2 - y_2^2) \ln(g(y_1)) + (y_1^2 - y_3^2) \ln(g(y_2)) + (y_2^2 - y_1^2) \ln(g(y_3))}{(y_3 - y_2) \ln(g(y_1)) + (y_1 - y_3) \ln(g(y_2)) + (y_2 - y_1) \ln(g(y_3))} \end{cases} \quad (5)$$

3 实验结果分析

为了验证提出的光斑图像中心两步定位算法精度,笔者进行了一系列的仿真测试实验,实验硬件环境为 Core2 处理器,2 GB 内存。

利用 Matlab 分别随机产生 30 幅正常和过度曝光光斑,光斑半径不大于 5,图像大小为 1024×1024

$$\ln(g(x,y)) = \ln(B) - \frac{(x-X)^2}{2\sigma^2} - \frac{(y-Y)^2}{2\sigma^2} \quad (2)$$

由于高斯函数具有可分离性,可在点 (X_0, Y_0) 处分别在 x 和 y 方向对光斑图像进行高斯拟合处理。以 x 方向为例,令 $\ln(C) = \ln(B) - (y - Y)^2 / 2\sigma^2$, 将公式(2)转化为公式(3),则等式中包含 C 、 X 和 σ 三个未知数。

$$\ln(g(x,y)) = \ln(C) - \frac{(x-X)^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

由公式(3)可知,光斑图像 x 方向上纵坐标相同的点所对应的 C 值是相同的。利用 CCD 采集光斑图像时,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,因此在进行高斯拟合的时候需要剔除这些饱和点^[9]。而光斑半径较小,有效点也较少,因此可利用 x 方向上从属于同一光斑的三个像素点的灰度值构成方程组求解 X 。假设三个点的横坐标为 x_1 、 x_2 和 x_3 ,对应的灰度值为 $g(x_1)$ 、 $g(x_2)$ 和 $g(x_3)$,则可得到:

$$\begin{cases} \ln(g(x_1)) = \ln(C) - \frac{(x_1 - X)^2}{2\sigma^2} \\ \ln(g(x_2)) = \ln(C) - \frac{(x_2 - X)^2}{2\sigma^2} \\ \ln(g(x_3)) = \ln(C) - \frac{(x_3 - X)^2}{2\sigma^2} \end{cases} \quad (4)$$

同理,在点 (X_0, Y_0) 的 y 方向上取从属于同一光斑的三个像素点 3 个点 y_1 、 y_2 和 y_3 也可构成与公式(4)相似的方程组,则 X 和 Y 的求解公式为:

且无背景噪声的光斑图像,分别用带阈值的质心法、Hessian 矩阵法和两步定位算法对图像进行处理,计算每幅图像的 RMS 误差,实验结果如图 2 和 3 所示。

由图 2 和图 3 可知,两步定位算法的精度要高于带阈值的质心法和 Hessian 矩阵法。由于正常光斑图像中心不饱和,满足理想高斯分布函数,利用两步定位算法的误差远小于 0.01 像素,而过度曝

光由于中心饱和,其成像模型与理想高斯分布函数有一定的不同,故使用两步定位算法提取和光斑图像中心时的误差有所增加,但仍远小于 0.05 像素。上述实验结果表明,小尺寸光斑中心的两步定位算法满足了高精度的要求,当光斑图像能量分布越接近理想高斯分布时,两步定位算法的精度越高。

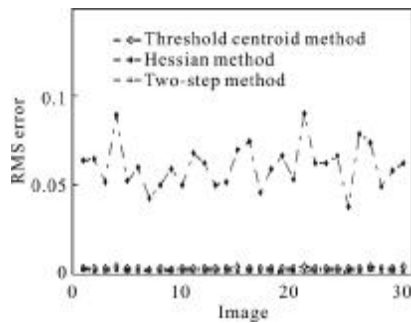


图 2 三种方法对正常光斑图像中心定位的均方根误差
Fig.2 RMS error in center location of normal spot images using three methods

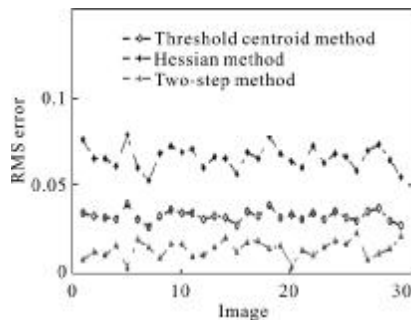


图 3 三种方法对过度曝光光斑图像中心定位的均方根误差
Fig.3 RMS error in center location of over-exposed spot images using three methods

4 结 论

文中提出了一种高精度的小尺寸光斑中心两步定位算法。通过对光斑图像成像模型的分析,通过寻找一阶导数零交叉点的方法准确定位光斑图像像素

级中心,再利用高斯拟合方法计算光斑的亚像素级中心点坐标。结果表明,在无噪声情况下,两步定位算法的定位误差在 0.05 像素内,保证了光斑中心的高精度定位,且光斑能量分布越接近理想高斯分布,精度越高。

参考文献:

- [1] Lu Z, Liu X, Wang X, et al. High-precision small-scale laser focal spot measurements [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 31(1): 177-183. (in Chinese)
- [2] Zhang Guangjun. Star Identification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [3] Shortis M, Clarke T, Short T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [C]//Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE, 1994, 2287: 239-250.
- [4] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [5] Wei Zhenzhong, Gao Ming, Zhang Guangjun, et al. Sub-pixel extraction method for the center of light-spot image [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(7): 7-12.
- [6] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Gaussian fitting technique of laser spot [J]. Laser Technology, 2002, 26(4): 277-278. (in Chinese)
- [7] Wang Lili, Hu Zhongwen, Ji Hangxin. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 985-990. (in Chinese)
- [8] Lu Bin, Guo Shaojun, Wang Duo. Centroid Detection of targets on near infrared stellar map based on c spline method and Gauss method comprision [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(5): 59-63. (in Chinese)
- [9] Liu Taiyang, Wang Shicheng, Liu Zhiguo, et al. Centroiding algorithm for over-exposed stars based on edge Gaussian interpolation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(5): 11-15. (in Chinese)