

基于最优弧的激光光斑中心检测算法

曹世康, 李东坚, 许瑞华, 王 伟, 王拯洲

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘 要: 激光光斑中心检测是光学测量中常用的关键技术, 广泛应用于光学测量系统、光路自动准直系统、激光通信目标跟踪中。为了提高光斑中心及半径的检测精度和抗干扰性, 提出了一种基于最优弧的激光光斑中心检测算法, 该算法首先根据圆的对称性排除了受干扰边缘, 然后选取对称性好的弧线作为最优弧, 最后以最优弧的数据作为拟合数据, 利用最小二乘法计算出圆的中心及半径, 并与其他算法进行了比较。实验表明, 该算法对于中心和半径的定位精度高、计算速度快, 并有效地提高了中心检测的抗干扰性, 适用于在线实时检测。

关键词: 激光光斑; 圆拟合; 最优弧; 最小二乘法; 图像处理

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)10-3492-05

Algorithm of laser spot detection based on optimal arc

Cao Shikang, Li Dongjian, Xu Ruihua, Wang Wei, Wang Zhengzhou

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: Laser spot detection is the key technique used in optical measurement, and widely used in optical measurement system, optical automatic alignment system and laser communication target tracing. In order to improve the optical measurement and anti-interference of spot center and radius, a kind of laser spot center detecting algorithm was put forward based on the optimal arc, according to the symmetry of a circle, the algorithm overcame the interference edges, and then selected the arc with good symmetry as the optimal arc to provide the fitting data, calculated center and radius of a circle by using the least squares method. And it was compared with other commonly used algorithms. Experiments show that the proposed algorithm has high orientation precision for the center and radius, fast speed, and can improve the anti-interference of testing center. The algorithm is suitable for real-time detection.

Key words: laser spot; circle fitting; optimal arc; least square method(LSM); image processing

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(6410031564)

作者简介: 曹世康(1981-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事系统控制与信息处理方面的研究。Email: csk810123@163.com

0 引言

在光学测量系统中经常将激光作为光学基准,激光光斑的中心代表了光线在空间的位置,所以激光光斑中心的检测决定了系统测量的精度。在光路自动准直系统中,是以激光光斑中心作为基准对光路进行自动准直,光斑中心的准确度则决定了整个光路的系统状态^[1],而在卫星激光通信目标跟踪中,光斑中心的准确度则决定了定位和跟踪精度^[2]。参考文献[3-4]提出了随机 Hough 变换(RHT),该方法减少了 Hough 变换的计算量,但是抗干扰能力不强;参考文献[5]提出了一种基于残差修剪的激光光斑高精度定位方法,这两种方法抗干扰能力强,但耗时长,检测效率较低;参考文献[6]提出了一种复杂工业环境下激光束中心快速精确定位方法,提高了计算速度;参考文献[7]利用非极大值抑制法获取连续细化边缘,计算出最小二乘法获取亚像素精度的中心,但数据计算量较大。参考文献[8]是在半径约束的条件下进行圆拟合,有效地提高了中心定位精度,但由于对半径的约束,只能在特定条件下适用。上述研究虽然提高了圆形激光光斑中心的定位精度,然而在实际中这些算法对于光斑部分被遮挡、存在离群值、受到干扰较大的图像的处理精度和速度达不到在线实时监测要求,故文中提出了一种基于最优弧的最小二乘圆拟合算法,该算法减少了拟合过程的数据量,较好地消除了拟合过程中离群值及干扰对于计算结果的影响。

1 常用算法分析

在圆形激光光斑中心检测中,常用的检测方法有:Hough 变换法、重心法、空间矩定位法。下面简单介绍几种常用算法。

1.1 Hough 变换法

Hough 变换法的检测曲线原理:通过参数空间的曲线方程 $a_n=f(a_1, a_2, \dots, a_{n-1}; x, y)$,将图像中任意空间点 (x, y) 映射到参数空间 (a_1, a_2, \dots, a_n) 的曲线上,那么图像空间中有 n 个点就可以对应参数空间中的 n 条曲线,若图像中的点处于同一个圆周上,则参数空间中曲线必经过同一点 $(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$,即可确定图像空间曲线的特征参数。

Hough 变换具有能够直接得到各种复杂参数,可靠性高,在噪音、变形、甚至部分区域丢失的情况下仍能得到较理想结果等优点;但检测精度不高,需要对三维空间中所有点进行投票,计算量大,且占用较大计算机内存,时间复杂度为 $O(n^4)$,不适用于在线实时检测。

1.2 重心法

重心法先将激光图像处理为具有 256 级的灰度图像,然后求出激光光斑重心。假设采集图像的大小为 $X \times Y$ 像素,并设 $B[i, j]$ 代表第 i 行第 j 列的像素灰度值,则重心计算公式为:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y B[i, j] \times i}{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y B[i, j]} \quad (1)$$

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y B[i, j] \times j}{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y B[i, j]} \quad (2)$$

重心法计算简单快速,但鲁棒性较差,对光斑的形状要求比较严格,适应性较差,准确性不高,并且不能计算半径。

1.3 空间矩定位法

基于空间矩的激光光斑中心定位法先使用 LOG 算子把光斑边缘定位到单像素精度,然后使用二阶空间矩算子进一步细分,使边缘定位达到亚像素精度,通过拟合计算得到光斑中心。

该算法运算精度高,但要求光斑边缘为理想二级边缘,而实际上从背景到边缘存在过渡,不可能是两个简单的二级边缘,所以要得到更高的定位精度,需要通过建立误差查找表进行校正,或者使用三级模型来描述边缘等,这在实际光线复杂变化的情况下很难得到应用。

2 基于最优弧的激光光斑圆拟合算法

在实际应用中,由于光路中激光光斑可能并不完整,或者会被光路中的一些物体挡住某一部分,使得光斑边缘不规则、不完整,在计算光斑中心时,会有大的离群值,引起光斑中心计算不准确。为了使光斑中心计算准确,文中拟选取光斑的一部分最优弧线通过最小二乘法进行圆的拟合,从而计算出光斑中心。

2.1 最优弧选取算法

根据几何原理,圆是基于其任意直径对称的图像,并且对于任意弧线,都是关于过弧的中心直径对

称的,因此,要选取圆边缘的最优弧只需对圆基于任意直径或圆弧中心的对称性进行评价,选取对称性较好的圆弧即可。

如图 1 所示,点 A 为圆上任意一点,为了判断方便,通过图像几何变换公式(3)把 A 点旋转至圆的最高点 A'。

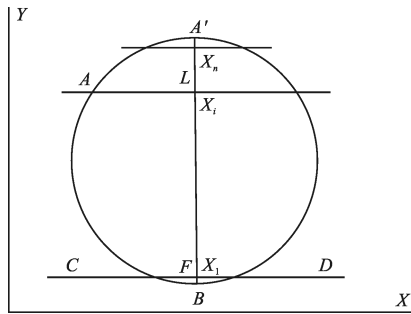


图 1 中心点集示意图

Fig.1 Map of center point set

$$\begin{pmatrix} r' \\ c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ c \end{pmatrix} \quad (3)$$

过 A' 点做平行于 Y 轴的线段,交圆的另一端于 B 点,过线段 A'B 上任意一点做 CD//X 轴,与圆交于 C、D 两点,计算线段 CD 的中心点坐标,由于是判断圆关于 A'B 的对称性,且 A'B//Y 轴,故只需记录 CD 中心点的 X 轴坐标即可,记为 X_i(i=1,2,⋯,n,n 为线段 A'B 上的点数)。如果圆关于 A'B 对称,则中心点集 X_i 会与 A'B 重合,即是一条垂直于 CD 的直线,如果有部分圆弧不对称,则中心点集 X_i 在不对称的区域会是偏离 A'B 的曲线。

由于 A 点在旋转到 A' 时,会带来一定的误差,在取点时,A、B 两点可能本身就不是拟合圆上的对称点,这样会引起 A'F 偏离中心线,但这种情况只会影响到所取中心点的数量,而不会对中心点的位置产生影响。统计 X_i 的分布情况,以分布概率最大的中心点作为基准,记为 X_{bp}。

图 2 中,曲线 EF 为图像边缘曲线,弧 E'F'、E''F'' 分别为 EF 关于直径 AC、BD 的对称区域。由于曲线 EF 不在圆的边缘,所以其对应的中心点集也会出现偏离,分别为曲线 e_{f1}、e_{f2}。由其中心点集的偏离可以判断出 EF 和 E'F' 关于 AC 不对称,又由于 EF 和 E''F'' 关于 BD 不对称,故可以确定出 EF 不是圆边缘上的曲线,可认为是干扰曲线。

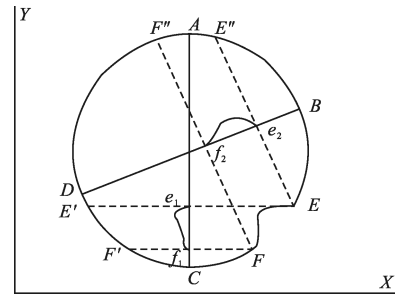


图 2 对称性判断示意图

Fig.2 Map of symmetry judgment

由上可知,只要对圆边缘上的干扰曲线进行排除后,就可以得到圆边缘上真实的弧线,这样对于拟合圆的计算精度会提高。

根据以上原理,选取最优弧的方法如下:

(1) 在边缘上,任取一点 A,计算其中心点集 X_i。若点集中有满足 |X_i-X_{bp}|>α 且连续的点数大于 β 的区域(文中 α、β 取值为 2 和 10),则标记出中心点对应的弧线位置,即不对称的两条弧线位置。然后,再取一点 B(与 A 相隔一定距离),按照上述方法,标记出不对称的弧线位置。对于两次记录的弧线位置,如有相同的弧线段,则认为该段边界区域为干扰区域。

(2) 经过去除边缘上的干扰区域,边缘会被分割成若干弧线区域。取每段弧线的中心点将其旋转至圆的定点,并计算对应的中心点集 X_i,对于每段弧根据公式(4)计算中心点集 RMS_p。

$$RMS_p = \sqrt{\sum_{m=1}^n (X_m - \bar{X})^2 / n} \quad (4)$$

式中: \bar{X} 为 X₁⋯X_n 的平均值。如图像被分为 P 个弧线段,则计算出 P 个弧线段对应 X_{bp} 和 RMS_p,根据以下判断标准进行最优弧:

(1) 对于任一选择的圆弧,满足 |X_i-X_{bp}|≤α 的点数记为 Q,若 Q/n>δ,即可认为此圆弧对称性较好。其中,δ 为圆弧对称性较好的像素点的比率。(2) 对满足条件(a)的弧线,取 Min(RMS_p) 作为最优弧。

根据参考文献[9]可知,如果圆弧的角度越小,由于噪音的存在会引起拟合不准确,精度不够,故对于这种情况,即不符合条件(1)的情况,可将 P 个弧线段一起认为是圆周上的点来进行拟合。

2.2 基于最小二乘法的圆拟合算法

设圆的方程为:

$$(x-\alpha)^2+(y-\beta)^2=r^2 \tag{5}$$

残差为:

$$\varepsilon_i=(x_i-\alpha)^2+(y_i-\beta)^2-r^2 \tag{6}$$

残差平方和为:

$$Q=\sum_{i \in E} \varepsilon_i^2=\sum_{i \in E} [(x_i-\alpha)^2+(y_i-\beta)^2-r^2]^2 \tag{7}$$

式中: (α, β) 为圆心坐标; r 为半径; $i \in E, E$ 为最优弧上所有边界点的集合。

根据最小二乘法原理有:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{(\overline{x^2 x + x y^2 - x^3 - x y^2})(\overline{y^2 - y^2}) - (\overline{x^2 y + y y^2 - y^3 - x^2 y})(\overline{xy - xy})}{2(\overline{x^2 - x^2})(\overline{y^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ \beta = \frac{(\overline{x^2 x + y y^2 - y^3 - x^2 y})(\overline{x^2 - x^2}) - (\overline{x^2 x + x y^2 - x^3 - x y^2})(\overline{xy - xy})}{2(\overline{x^2 - x^2})(\overline{y^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ r = \sqrt{\alpha^2 - 2x\alpha + \beta^2 - 2yb + x^2 + y^2} \end{cases} \tag{10}$$

式中: $\overline{x^m y^n} = \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n / \sum_{i \in E} 1$ 。

在参考文献[10]中根据以上参数公式, 把圆上所有边界点代入, 即可计算出拟合圆的参数, 并且通过多次迭代, 剔除残差较大的边缘点, 以提高拟合的精度, 但是由于多次迭代使计算时间成倍增长, 导致计算速度较慢。文中的算法只需对最优弧上所有边缘点进行一次计算, 从而使计算量减少, 由于图像中会存在噪音干扰, 而引起拟合精度不够, 故对满足公式(11)的边缘点进行剔除, 即对最优弧上偏离中心点 X_{bp} 较大的点予以剔除, 以提高拟合精度。

$$|X_m - X_{bp}| > \lambda \tag{11}$$

式中: λ 为噪音点阈值。

3 实验及总结

为了验证算法的精度与速度, 生成一幅人工图像, 如图 3 所示。在图中圆的边界加入干扰, 原始中心为(1350, 962), 半径为 100, 可以看出, 图像边缘不规则, 存在较大的离群区域, 并且光斑的右边和下边部分已经在视场以外。在计算机上分别用参考文献[10]中的最小二乘法(LSM)与文中的算法进行比较, 结果如表 1 所示。在用文中算法计算时, 是通过选择的最优弧 EF 进行圆拟合的。从表 1 中可以看出: 文中算法较 LSM 算法计算出的中心及半径的精度都要高, 并且误差很小。

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = \frac{\partial Q}{\partial \beta} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \tag{8}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial \alpha} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i-\alpha)^2+(y_i-\beta)^2-r^2](-2)(x_i-\alpha)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial \beta} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i-\alpha)^2+(y_i-\beta)^2-r^2](-2)(y_i-\beta)=0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i-\alpha)^2+(y_i-\beta)^2-r^2](-2)r=0 \end{cases} \tag{9}$$

对上式进行简化得:



图 3 人工光斑图像

Fig.3 Manual image with disturbed circle

表 1 人工光斑的检测数据

Tab.1 Data of manual image detection

Algorithm	Center	Radius	Error of center
Value of theory	1350, 962	100	-
LSM	1351.816, 963.335	98.37	2.26%
Optimal arc	1349.732, 962.357	99.23	0.45%

图 4(a)为实际小孔激光光斑图像; 图 4(b)为对光斑经图像处理后的二值图像, 其过程为首先利用自动阈值算法对原始光斑图像进行二值化, 然后对二值图像进行膨胀和腐蚀处理; 图 4(c)为在原始光斑图像中绘制出由文中算法计算出的圆心和半径, 其过程为利用四邻域的方式求出边界点, 然后按照文中算法计算出拟合圆的中心及半径。

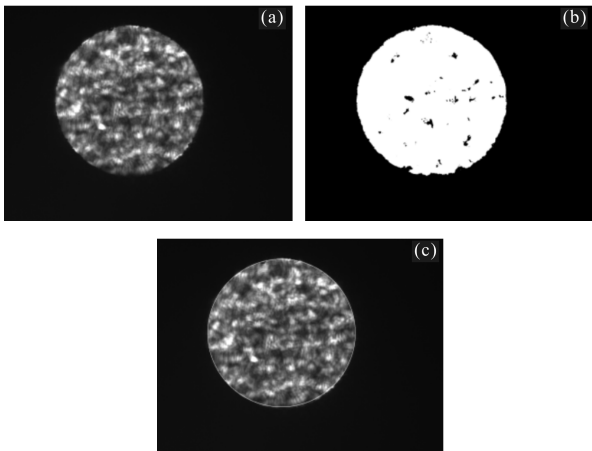


图 4 激光光斑分析

Fig.4 Analysis of laser spot

从图 4(b)中可以看出二值化后的图像,边缘不规则,从图 4(c)可看出:拟合出的圆可以较精确的描绘出激光光斑的边缘。表 2 为此激光光斑在三种算法下得到的结果。其中理论半径值是通过实际标定的小孔实际尺寸、成像系统放大倍率以及 CCD 像元尺寸计算获得。由表 2 可知,文中算法求得的激光光斑中心和半径,精确度比其他两种算法都有提高,而且时间上也优于 Hough 变化法,与最小二乘法基本一致。

表 2 激光光斑的检测数据

Tab.2 Data of laser spot detection

Algorithm	Center	Radius
Value of theory	-	359.1
Hough transform	607.287, 455.967	355.974
LSM	606.637, 456.343	357.055
Optimal arc	604.908, 458.413	358.366

4 结 论

文中提出了利用最优弧的圆拟合算法,经验证,该算法较最小二乘法、Hough 变换法在计算圆心及半径时精度更高、拟合度更好、计算速度更快,并且对于边缘不完整、不规则的光斑在计算圆心及半径

时也有较高的精度,并且满足实时检测的要求。

参 考 文 献 :

- [1] Wei Pengfei, Liu Jun, Li Xiaofang, et al. Design of laser beam real-time monitoring and adaptive collimation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(8): 1590-1595. (in Chinese)
- [2] Zhou Lin, Ai Yong, Gong Yunhua. Improved target tracking algorithm for satellite laser communication system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 185-188. (in Chinese)
- [3] Ji Ronghua, Qi Linjun. Crop-row detection algorithm based on random Hough transformation [J]. *Mathematical and Computer*, 2011, 54(3/4): 1016-1020.
- [4] Chiu Shihhsuan, Lin Kuohung, Wen Cheyen, et al. A fast randomized method for efficient circle/arc detection [J]. *International Journal of Innovative Computing*, 2012, 8(1A): 151-166.
- [5] Lu Quan, Liu Shangqian, Wang Hui Feng. Precise location of laser spot center based on residual pruning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2311-2315. (in Chinese)
- [6] Wang Xian, Tan Jianping, Quan Lingyun, et al. Fast and precise location method of the laser beam center point in complex industrial environment [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012, 39(12): 43-49. (in Chinese)
- [7] Wang Jing, Wang Hailiang, Xiang Maosheng, et al. Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1460-1468. (in Chinese)
- [8] Liu Ke, Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Radius constraint least square circle fitting method and error analysis [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, 17(5): 604-607. (in Chinese)
- [9] Joseph S H. Unbiased least squares fitting of circular arcs [J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1994, 56(5): 424-432.
- [10] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushang. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279. (in Chinese)