

基于圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法

王拯洲^{1,2}, 许瑞华^{1,2}, 胡炳樑¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了确定非均匀、非完整圆小孔激光光斑的精确中心, 提出一种基于圆拟合的非完整圆小孔激光光斑中心检测新方法。该方法通过灰度形态学算法对激光光斑进行阈值分割, 从水平和垂直两个方向检测粗略的激光光斑边缘, 利用边界生长法消除比较短的圆弧和孤立的边缘点, 通过反复迭代拟合获得最佳的圆轮廓并拟合出最终的标准圆。实验结果表明本方法精度明显优于传统的大型激光装置自动准直系统中的重心法, 完全满足了该系统中对于非均匀、非完整圆小孔激光光斑中心求取的精度要求。

关键词: 小孔激光光斑; 边界生长; 圆拟合; 图像处理

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.06.024

Algorithm of semicircular laser spot detection based on circle fitting

WANG Zheng-zhou^{1,2}, XU Rui-hua^{1,2}, HU Bing-liang¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710068, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to obtain precise center of asymmetrical and semicircular laser spot, a new method for semicircular laser spot center detection based on circle fitting was proposed. Threshold of laser spot image was segmented by morphology algorithm. Rough laser spot edge was detected in horizontal and vertical direction. Short arcs and isolated edges were deleted by contour growing. The best circle edge was acquired by iterative fitting and the final standard circle was fitted by the best circle edge. The result shows that the method is more accuracy and more automatic than method of gravity model being used in traditional large-scale laser facility of automatic alignment system. The accuracy of method to achieve asymmetrical and semicircular laser spot center meets the requirements of the system.

Key words: laser spot; contour growing; circle fitting; image processing

1 引言

在传统的大型激光装置自动准直系统中, 通过求取小孔激光光斑中心记录小孔基准是其中关键的一步^[1]。一般采用的方法是在阈值分割后使用重心法求取光斑中心, 该方法对于对比度比较均匀且居中的小孔光斑中心计算比较准确, 但是对于能量很不均匀或者非完整圆的小孔光斑(如图1所示)中心计算误差特别大。针对这一情况, 提出一种通过灰度形态学算法对激光光斑进行阈值分割, 从水平和垂直两个方向检测粗略的激光光斑边缘, 利用边界生长法消除掉比较短的圆弧和孤立的边缘点,

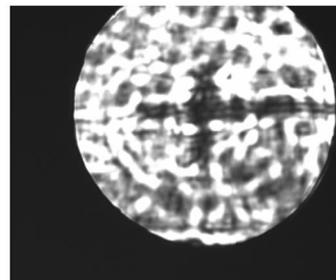


图1 原始小孔光斑图像

Fig.1 the original laser spot image

作者简介: 王拯洲(1976-), 男, 在读博士, 主要从事信号与信息处理的研究。E-mail: azhou_china@126.com

收稿日期: 2012-12-04; **修订日期:** 2012-12-18

通过反复迭代拟合获得最佳的圆轮廓并拟合出最终的标准圆的新方法。

2 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法

基于圆拟合的激光光斑中心检测算法,根据最小二乘原理(残差平方和最小)用圆来逼近激光光斑轮廓。圆的方程为:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \tag{1}$$

在这里,取残差为:

$$\varepsilon_i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \tag{2}$$

式中, $i \in E$, E 表示所有边界的集合; (x_i, y_i) 为图像的边界坐标。

残差平方和函数为:

$$Q = \sum_{i \in E} \varepsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \tag{3}$$

根据最小二乘原理^[2],应有:

$$\begin{cases} a = \frac{(\overline{x^2x + xy^2 - x^3 - xy^3})(\overline{(y)^2 - y^2}) - (\overline{x^2y + yy^2 - x^2y - y^3})(\overline{xy - xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{(y)^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ b = \frac{(\overline{x^2y + yy^2 - x^2y - y^3})(\overline{(x)^2 - x^2}) - (\overline{x^2x + xy^2 - x^3 - xy^3})(\overline{xy - xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{(y)^2 - y^2}) - 2(\overline{xy - xy})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2\overline{xa} + b^2 - 2\overline{yb} + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \tag{7}$$

由公式(7)可以看出,根据最小二乘原理的圆拟合推导出的光斑中心及半径检测算法虽然复杂,但仅仅对边界点循环一次就可以计算出各参数,时间复杂度为 $O(n)$,圆半径只是在计算出中心参数 a, b 后计算一次,因此整个算法的计算速度比较快。

3 灰度形态学处理和检测激光光斑边缘

由于原图的对比度非常差又有噪声,因此先用中值滤波^[4]来消除一部分噪声,再使用直方图均衡化^[4]来提高对比度。接下来用形态为 3×3 的十字,阈值为 10 进行灰度形态学处理^[5],结果如图 2 所示。

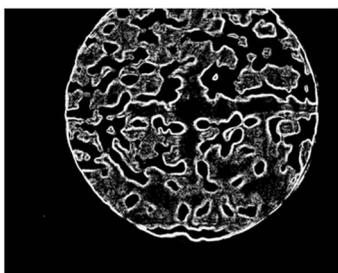


图 2 灰度形态学算法处理后的图像

Fig. 2 the image processed by gray morphology algorithm

从处理结果可以看出激光光斑有完整和清楚的轮廓,分别从水平方向和垂直方向检测激光光斑的轮廓,要求检测到的轮廓为单像素。因为水平方向检测的轮廓在最上面和最下面出现很多离散点,同

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \tag{4}$$

即:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 (-2)(x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 (-2)(y_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 (-2)r = 0 \end{cases} \tag{5}$$

假设所有边界的点个数为 N :

$$\text{即 } N = \sum_{i \in E} 1, \text{ 令 } \overline{x^m y^n} = \frac{1}{N} \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n \tag{6}$$

根据文献[3]结论,拟合出的圆心坐标 a, b 和半径 r 的表达式为:

样,垂直方向检测的轮廓在最左边和最右边出现很多离散点。所以,将水平和垂直方向检测到的激光光斑边缘通过或运算进行合并,保证最终检测到的激光光斑轮廓尽可能连续,最终检测的边缘,如图 3 所示。

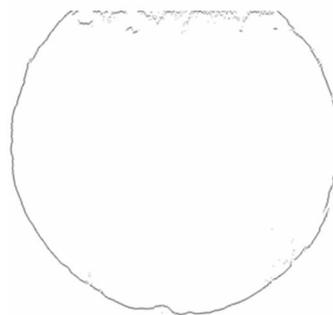


图 3 检测到的粗略的光斑边缘

Fig. 3 the rough laser spot edge detected in horizontal and vertical direction

4 用边界生长法消除比较短的圆弧和孤立的边缘点

由于激光光斑的上半部分有缺失,所以通过合并的边界在最上面有很多离散点。从图 3 可以看出,边界是由一些连续的圆弧和离散的点组成,连续且比较长的圆弧为圆拟合所需要的边界。一些远离圆弧的边界点和圆弧上不连续的孤立点要从边界集

合中去除掉,只保留比较长的圆弧。

但是传统的区域生长法要对整个区域的每一个像素点进行处理,因此在效率上相对偏低,而该算法只是在选定的边界轮廓上查找比较长的圆弧,大大提高了处理效率,因为长的圆弧保证消除了孤立和远离圆弧的边界点,完全可以满足二次拟合对光斑边缘的要求。因此,本文提出一种基于边界生长的新方法,实现的步骤如下^[6]:

(1)对图像顺序描述,找到第1个还没有归属的指定灰度的边界像素点,设该像素为 (x_0, y_0) ;

(2)以 (x_0, y_0) 为中心,考虑 (x_0, y_0) 的8邻域像素 (x, y) ,如果 (x, y) 没有归属且为指定灰度,则将 (x, y) 与 (x_0, y_0) 合并到同一个边界,同时将 (x, y) 压入堆栈,保存 (x, y) 坐标;

(3)从堆栈中取出一个像素,把它当作 (x_0, y_0) ,返回到步骤(2);

(4)当堆栈为空时,返回到步骤(1),并将步骤(1)~(4)中遍历过的点保存在链表中,保存遍历过的点的个数;

(5)重复步骤(1)~(4),直到图像中的每个指定灰度的点都有归属时,生长结束,这时所有指定灰度的边界像素点都有分别归属于不同的圆弧和孤立点及小段曲线。

5 反复迭代拟合获得最佳的圆轮廓并拟合出标准圆

通过边界生长法将所有边缘点分成不同的圆弧和孤立点及小段曲线。从图3可以看出,一部分孤立点及小段曲线分布在图像的圆轮廓附近,另一部分分布在图像的上边缘。图像上边缘的孤立点及小段曲线主要是激光光斑上面部分缺失引起的。对于非完整圆拟合的主要目标就是完全消除掉图像上边缘的孤立点及小段曲线,分两个步骤完成:第一,根据圆弧长度消除孤立点及比较短的小段曲线,第二,通过反复迭代拟合完全消除图像上边缘的小段曲线。

5.1 根据圆弧长度消除孤立点及比较短的小段曲线

一般情况下,光斑的边缘长度总是远大于孤立点及小段曲线的长度,将使用边界生长法得到的边缘按照圆弧长度从大到小顺序排列,实验结果显示,取圆弧中80%长度的圆弧为边缘点,这样就可以消

除大部分圆轮廓附近孤立点及小段曲线和图像上边缘的孤立点及小段曲线,处理结果如图4所示。

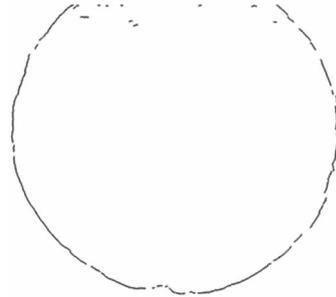


图4 边界生长法消除掉20%最短圆弧后的图像
Fig.4 the image eliminated 20% shortest arcs by boundary growing method

5.2 通过反复迭代拟合完全消除图像上边缘的小段曲线

从图4可以看出,以上方法获得的边缘图像在图像上边缘还包含一些小段曲线,这些小段曲线很明显不是最终拟合所需要的圆弧,所以只有去除掉这些小段曲线,才能保证最终拟合的准确度。通过反复迭代拟合完全消除图像上边缘小段曲线步骤如下:

(1)读取消除掉20%最短圆弧后的边缘(如图4所示);

(2)利用公式(7)进行圆拟合,得到一个拟合的圆心和半径;

(3)计算每段圆弧和每一个小段曲线距离拟合圆心的平均距离与拟合圆半径之间误差;

(4)如果有误差大于10%的小段曲线存在,消除掉这些小段曲线并保存剩余的圆弧,转到步骤(2),否则,得到最佳的圆轮廓图像(如图5所示)。

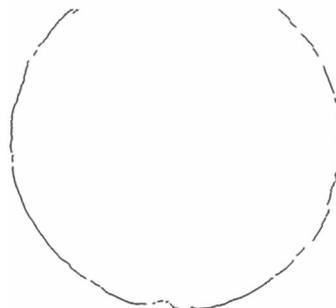


图5 反复迭代拟合获得最佳的圆轮廓
Fig.5 the best round contour obtained by iterative fitting

5.3 拟合标准圆

对最佳的圆轮廓利用公式(7)进行圆拟合,得到最终标准圆,并计算出圆心和半径(如图6所示)。

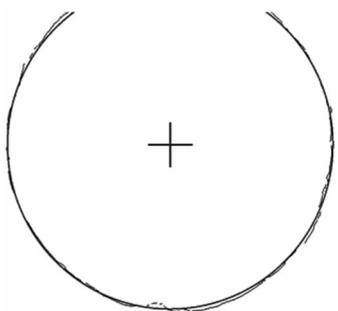


图6 拟合后的标准圆和圆心十字

Fig.6 the final standard circle and cross fitted by the best round contour

6 实验结果分析

传统的大型激光装置自动准直系统对于小孔光斑中心求取的误差要求比较小(6个像素以内)^[7], 本文方法完全达到了系统的精度要求。重心法与本文方法的比较,如表1和图7所示,两种光斑检测算法的性能比较,如表2所示。

表1 重心法与本文方法比较(单位:像素)

Tab.1 the comparison between gravity model and circle fitting(unit:pixel)

方法名称	圆心 X 坐标	圆心 Y 坐标	半径	与真值差
理论真值	538	289	367	
重心法	536.18	309.54	不能计算	20.62
本文方法	539.20	294.12	366.89	5.26

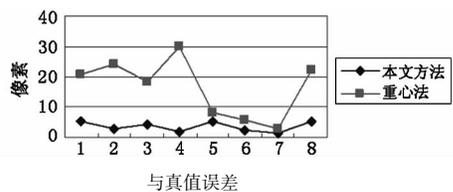


图7 重心法与本文方法的比较

Fig.7 the comparison between gravity model and circle fitting

表2 激光光斑检测算法的性能

Tab.2 performance of the algorithm of laser spot detection

算法名称	是否检测半径	精度	时间复杂度
重心法	否	高(需要规则圆)	$O(n^2)$
本文方法	是	高	$O(n)$

7 结论

相对于重心法,本文提出的基于圆拟合的激

光光斑检测算法,不但可以获得完整圆的小孔激光光斑中心和半径,而且还可准确获得非均匀、非完整圆的小孔激光光斑中心和半径,并具有较快的计算速度和检测精度,可以用于实时的光学测量和检测。

参考文献:

[1] Chen Qinghao, Xu Renfang, Peng Zengyun, et al. The automatic optical alignment method used in laser nuclear fusion device[J]. Optical Transaction, 1995, 15(5): 531 - 533. (in Chinese)
陈庆灏, 徐仁芳, 彭增云, 等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. 光学学报, 1995, 15(5): 531 - 533.

[2] Chen Mingkui, Ling Yongxiang. Calculation method of Engineering[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992. (in Chinese)
陈明逵, 凌永祥. 计算方法(工程类)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.

[3] Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. Infrared and Laser Engineering, 2001, 31(3): 275 - 279. (in Chinese)
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, 2001, 31(3): 275 - 279.

[4] Zhang Yujin. Image project(media), image analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 222 - 223. (in Chinese)
章毓晋. 图像工程图像分析(中册)[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005: 222 - 223.

[5] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. CVGIP, 1985, 29: 273 - 285.

[6] Jia Wen, Tang Huijun, et al. A new method to locate low contrast center of laser spot [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(10): 1056 - 1058. (in Chinese)
贾文, 唐慧君, 等. 一种低对比度激光光斑中心定位新方法[J]. 激光与红外, 2008, 38(10): 1056 - 1058.

[7] Lv Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, et al. The application of image processing used in laser automatic alignment system[J]. Optical Technology, 2005, 5(31): 3. (in Chinese)
吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 光学技术, 2005, 5(31): 3.