

基于圆拟合的激光光斑中心检测算法 *

孔 兵,王 昭,谭玉山

(西安交通大学激光与红外应用研究所,陕西 西安 710049)

摘要:激光光斑中心检测是光学测量中常用的关键技术。检测算法的精度和速度直接影响了测量的精度及速度,传统的检测算法如重心法、Hough 变换法等,在检测精度或速度上存在不足。基于圆拟合的激光光斑中心检测算法是根据最小二乘原理用圆来逼近激光光斑轮廓,该算法除了可以检测光斑中心外,还可以检测光斑半径,达到亚像素级的定位精度,具有很快的计算速度,可适用于实时的光学测量。

关键词: 激光光斑; 最小二乘算法; 图像处理; 圆拟合

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2002)03-0275-05

Algorithm of laser spot detection based on circle fitting *

KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yr-shan

(Institute of Laser & Infrared Technology Application, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Laser spot detection is the key technique used in optical measurement. The precision and speed of the detection algorithm affect those of the optical measurement system directly. The traditional algorithms such as gravity model, Hough transform are unsatisfactory under some conditions. The laser spot detection algorithm referred in this paper is based on the LSM (least square method), and a circle is adopted to approximate the edge of the laser spot. Not only the center and radius can be detected simultaneously, but also the orientation precision is in the order of sub-pixels, and the speed is fast. The algorithm is suitable for real-time optical measurement.

Key words: Laser spot; Least square method (LSM); Image processing; Circle fitting

收稿日期:2001-08-02; 修订日期:2001-12-04

基金项目:自然科学基金资助项目(60077031)

作者简介:孔兵(1975-),男,山东省曲阜市人,在读博士,主要研究方向为光电式三维轮廓检测技术、数字图像处理、计算机视觉等。

1 引言

激光光斑中心检测在激光扫描三角法、激光准直仪、激光光斑分析仪等光学测量、检测手段中是一项关键技术^[1,2],检测算法的精度、速度直接影响了光学测量的精度及速度。传统的光斑中心检测算法有重心法、中值法及 Hough 变换法^[1]。前两种算法要求光斑图像分布比较均匀,否则将会产生较大误差。后一种算法需逐点投票、记录,所用时间较多,而且精度也不够高。然而在实际光学测量中,由于存在的散斑、被测物面反射特性不均匀以及光学系统的影响,导致光斑信号强度分布极不均匀,而且测量中一般对实时性要求较高,采用上述算法均有其不足之处。

2 传统激光光斑中心检测算法

仅以重心法及 Hough 变换法为例作介绍。

2.1 重心法

在图 1 中,假设光斑图像处于二维平面坐标系中,大小为 $M \times N$,光斑图像是经过预处理后得到的二值图像(下同),图中较亮的区域代表了激光光斑,可表示为:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{(光斑)} \\ 0 & \text{(背景)} \end{cases} \quad (1)$$

重心法计算的光斑中心 (x_0, y_0) 为:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N jg(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)} \\ y_0 = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N ig(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i, j)} \end{cases} \quad (2)$$

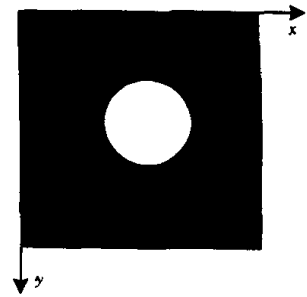


图 1 激光光斑图像

Fig. 1 Image of laser spot

以时间复杂度来考虑算法的速度,假设光斑直径为 n ,以下均作相同的假设,公式(2)是在光斑区域内求和,因此时间复杂度为 $O(n^2)$ ^[3]。该算法简单明了,计算速度较快,在光斑光强比较均匀的情况下(对应的图 1 中光斑形状比较规则)不失为一种好的算法。但是该算法受光斑形状影响比较大,而且只能获取光斑的中心不能检测半径,在某些需要计算光斑半径的测量中不能适用。

2.2 Hough 变换法

采用 Hough 变换检测任意曲线的原理如下^[4]:

检测曲线的参数方程记为:

$$a_n = f(a_1, a_2, \dots, a_{n-1}; x, y) \quad (3)$$

式中 a_1, a_2, \dots, a_n ——方程参数; x, y ——空间图像点坐标。

对于图像中任一空间点 (x_0, y_0) ,可由公式(3)变换为参数空间 (a_1, a_2, \dots, a_n) 中的一条曲线。对图像曲线上 n 个点进行上述变换,在参数空间得到 n 条曲线,由公式(3)可知该曲线必定经过同一点 $(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$,根据参数空间的此点坐标便可确定图像空间域中的曲线 l 。直线、圆的参数方程分别为:

$$= x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

$$r = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (5)$$

Hough 变换是将空间域内每个轮廓点代入参数方程(3),根据计算结果对参数空间 (a_1, a_2, \dots, a_n) 中的量化点按就近原则进行投票,得票最多的点即为所求图像空间域中曲线对应的参数空间点。

由公式(5),圆的参数空间为 (a, b, r) ,其中 (a, b) 表示圆心, r 表示半径,因此采用 Hough 变换可以检测出激光光斑的中心及半径。

Hough 变换需要对参数空间离散化,限制了检测精度,另外参数空间得票最多的点未必唯一,选择不同的点得到的图像空间曲线差异比较大。圆的 Hough 变换由于对每一个边界点都需要在三维参数空间内逐点投票、记录,时间复杂度为 $O(n^4)$,计算时间比较长,而且占用计算机内存比较大,因此在实用中受到了限制。

3 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:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (6)$$

在此,取残差为:

$$i = (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2 \quad (7)$$

式中 $i \in E$, E 表示所有边界的集合; (x_i, y_i) —— 图像边界点坐标。

残差平方和函数为:

$$Q = \sum_{i \in E} i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (8)$$

根据最小二乘原理^[5],应有:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{\partial Q}{\partial b} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0 \quad (9)$$

即:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(x_i - a) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)(y_i - b) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial r} = 2 \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2](-2)r = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将公式(10)简化整理得:

$$\begin{cases} a^2 - 2x a + b^2 - 2y b - r^2 + \overline{x^2} + \overline{y^2} = 0 \\ x a^2 - 2\overline{x^2} a + x b^2 - 2\overline{xy} b - x r^2 + \overline{x^3} + \overline{xy^2} = 0 \\ y a^2 - 2\overline{xy} a + y b^2 - 2\overline{y^2} b - y r^2 + \overline{x^2 y} + \overline{y^3} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中各参数可用下式表示:

$$\overline{x^m y^n} = \frac{x_i^m y_i^n}{i \in E} \quad 1 \quad (12)$$

对公式(11)消掉二次项后整理为:

$$\begin{cases} (\overline{x^2} - \overline{x^2}) a + (\overline{x y} - \overline{xy}) b = \frac{1}{2} (\overline{x^2} \overline{x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2}) \\ (\overline{x y} - \overline{xy}) a + (\overline{y^2} - \overline{y^2}) b = \frac{1}{2} (\overline{x^2} \overline{y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3}) \end{cases} \quad (13)$$

由上式便可推出参数 a, b 的表达式,结合公式(11)得圆参数为:

$$\begin{cases} a = \frac{(\overline{x^2} \overline{x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2} \overline{y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{x y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x y} - \overline{xy})^2} \\ b = \frac{(\overline{x^2} \overline{y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2} \overline{x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{x y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{x y} - \overline{xy})^2} \\ r = \sqrt{a^2 - 2x a + b^2 - 2y b + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \quad (14)$$

由公式(14)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)检测算法虽然形式复杂,但仅对边界点循环一次就可计算出各参数,时间复杂度为 $O(n)$,较为复杂的根方运算只是在计算出中心参数 a, b 后求半径时计算一次,因此整个算法的计算速度将会很快。

4 实验及总结

由公式(14)获得光斑参数后,代入公式(7)、(8)便可得到各边界点残差及残差平方和,也可计算出平均残差平方和,记为:

$$\overline{Q} = \frac{Q}{i \in E} \quad 1 \quad (15)$$

进而可滤掉一些残差较大的点,然后再利用公式(14)获取光斑参数,经多次迭代可进一步提高检测精度。

为了验证算法的精度及速度,生成一人工图像,图中的圆边界加入了干扰,原始中心为(344,288),如图2中小十字A所示,半径 r 为199。在 Pentium II266MHz 计算机上分别对重心法及本方法进行了比较,重心法获取的中心坐标位置为(336.7,289.6),如图2中小十字线B所示,不能检测半径,所用计算时间为11ms。基

于圆拟合的方法采用上述思想进行了两次迭代,检测的中心坐标为(341.0, 287.9),如图2中灰十字线C所示,半径 r 为195.2,用灰色标记出检测出的圆,计算时间为3.3ms。

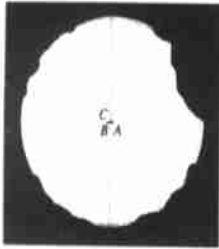


图2 人工光斑图像

Fig. 2 Manual image with a disturbed circle

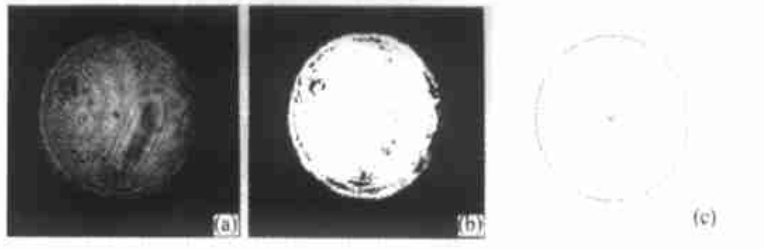


图3 激光光斑分析

Fig. 3 Analysis of laser spot

最后对激光光斑图像图3(a)进行分析,首先对其二值化得到如图3(b)所示的结果,然后按照四邻域^[4]的方式求取圆边界点,如图3(c)中的灰色曲线所示,最后按照上述基于圆拟合的方法检测出光斑中心及半径,如图3(a)、(c)中的黑色十字线及圆所示,由图3(c)可以看出,拟合出的圆非常逼近光斑的边界曲线。另外,光斑的直径受二值化阈值的影响比较大,阈值越大,检测出的直径越小,而光斑中心受影响则较小。

表1总结了这几种光斑检测算法的性能。

表1 激光光斑检测算法的性能

Tab. 1 Performance of the algorithm of laser spot detection

Spot detection algorithm	Radius detection	Precision	Asymptotic time complexity
Gravity model	No	High (when spot is regular)	$O(n^2)$
Hough transform	Yes	Normal	$O(n^4)$
Circle fitting	Yes	High	$O(n)$

5 结论

相对于重心法、Hough变换法,提出的基于圆拟合的光斑检测算法除了可同时检测光斑中心和半径外,还具有更快的计算速度及检测精度,可用于实时的光学测量及检测。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Paul J, Frederick W, David L. Nova laser alignment control system[A]. SPIE[C]. 1984, 483: 54-64.
- [3] 严蔚敏,吴伟民.数据结构[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [4] Kenneth R. Castleman. Digital image processing(数字图像处理)[M].北京:清华大学出版社,1998.
- [5] 陈明达,凌永祥.计算方法(工程类)[M].西安:西安交通大学出版社,1992.