

# 用 Hough 变换提高激光光斑中心 定位精度的算法

杨耀权<sup>1)</sup> 施 仁<sup>2)</sup> 于希宁<sup>1)</sup> 高镗年<sup>1)</sup>

1), 华北电力大学动力工程系, 保定 071003

2), 西安交通大学自动控制系, 西安 710049

**摘 要** 在激光扫描大型三维曲面测量中, 激光光斑中心的准确定位是提高测量分辨力的关键。当测距范围较大时, 受多种因素的影响, 激光光强分布严重不均致使其几何中心与强度中心发生了偏离。此时, 传统的光斑中心提取方法不能适用。为此, 根据光斑图像仍能给出圆形光斑的大部分轮廓这一特点, 提出了基于 Hough 变换的激光光斑中心读取方法。实验结果表明该方法对提高大型三维曲面测量精度是有效的。

**关键词** 激光扫描, Hough 变换, 三维形状测量。

## 1 引 言

基于光学原理的三维形状测量, 由于其具有非接触、高精度、易于自动控制等优点, 日益受到人们的重视。光学三维测量方法的本质是通过分析受到三维物体面形调制的空间光场, 从而获得被测物体的三维信息。这些方法已广泛用于机器视觉、三维造型、自动加工及工业检测等领域。在工业领域, 由于基于点光源的激光扫描法的鲁棒性和数据处理的简单性而获得广泛应用。在激光扫描大型三维曲面测量中, 目标光斑对应的三维曲面上某一点的高度是由该点在 CCD 表面所成像点(光斑)的位置决定的。因此, 激光光斑位置的准确确定是决定其测量分辨力的关键因素。如果光斑图像在像面上占用多个像素区域, 在光斑图像光强分布均匀的情况下, 使用恰当的算法, 如: 质心法、中值法等, 可以使光斑中心定位精度达到亚像素级。但是, 在一些大型三维曲面测量中, 由于测距范围变化很大, 激光光斑存在散斑, 加之被测目标反射特性的变化, 造成 CCD 摄像机采集到的光斑信号强度分布极不均匀, 严重影响了深度分辨力<sup>[1, 2]</sup>。此时, 上述方法不再适用, 为此, 我们提出了基于 Hough 变换的激光光斑中心读取方法, 利用 Hough 变换检测出变形光斑图像的大部分圆弧, 从而准确提取光斑中心。该方法已应用于火电厂煤场存煤体积自动检测系统, 取得了较好效果。

## 2 影响光斑图像失真的因素分析

### 2.1 散斑的影响

在激光扫描测量过程中, 目标光斑到镜头之间的距离(物距)在不断变化, 由此将导致像

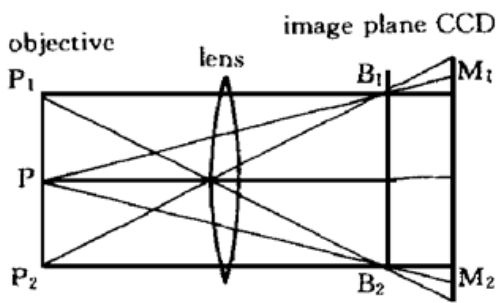


Fig. 1 Occurrence of speckle

距的变化。而 CCD 与物镜之间的距离在装调好后应保持不变, 因此, 光斑成像质量在很大程度上取决于像平面与 CCD 接受面的重合程度。在扫描过程中, 二者不可能完全重合, 因而在 CCD 接受面上出现了弥散斑。如图 1 所示, 图中  $P_1PP_2$  为物镜的出瞳,  $B_1B_2$  表示物体像的大小,  $M_1M_2$  为 CCD 接受面, 由于二者不重合, 使像点  $B_1B_2$  在  $M_1M_2$  上形成了弥散斑。

受弥散斑的影响, 光斑图像的光强分布是不稳定、不均匀的, 使光斑中心与光强中心发生了偏离。

## 2.2 被测物面反射特性不均及倾斜的影响

光辐射在介质表面的反射, 分为镜面反射和漫反射两种。不同的反射特性, 其反射辐射强度的分布也不相同。对于均匀介质, 激光扫描光斑反射到 CCD 的图像信号光强分布也是比较均匀的。而对于散状物料, 如煤, 煤块的反射特性与煤粉的反射特性存在较大差异, 并且即便是煤块其反射面也不统一, 故其反射特性极不均匀。因此, 也就造成了 CCD 采集的光斑信号的不均匀, 从而使光斑中心与光强中心发生偏离。

当被测物面上入射光点处的法线与入射方向不重合时, 称被测物面发生了倾斜。随着倾斜角的不同, 散射光场的空间分布也将发生变化, 从而使成像物镜接收到的光功率发生变化, 影响光斑的光强分布。

## 2.3 光学系统的影响

目标光斑首先要经光学系统, 然后进入 CCD 摄像机至图像采集系统。而一般光学系统也存在畸变误差, 如入射光线与原入射方向发生偏离, 光轴与像面存在垂直度误差等。并且在整个大范围的测距过程中, 由于镜头参数只是按档调节, 造成成像质量也不完全一致。这些因素也会导致采集到的光斑信号发生变形, 而不是一个规则的圆形光斑。

另外, 在激光扫描三角法大型曲面测量中, 尽管 CCD 摄像机与激光器之间安装的基线距离远小于测量距离, 但它在某种程度上也会使采集到的光斑图像形状发生微小变化, 使其更接近于椭圆。固体激光器光源本身的不稳定、较远测量距离传输的影响及 CCD 器件光敏特性的不完全一致也会给光斑图像强度的分布带来影响。

## 3 基于 Hough 变换的激光光斑中心读取方法

对于大型曲面的测量, 由于测距范围变化较大(从几十米到数百米), 受光学系统和激光束发散角的影响, 使得在整个测量范围内, 采集到的光斑图像大小在不断变化。在本文设计的系统中, 光斑图像是一半径为 4~10 个像素的圆。尽管在实际测试中受各种因素的影响, 光斑图像光强分布极不均匀, 且圆的形状也存在畸变。但是, 我们发现光斑图像仍能给出圆形光斑的大部分轮廓。因此, 为了准确读取光斑几何中心, 首先根据图像灰度值读取光斑中心的大致位置, 然后采用 Hough 变换的思想, 在一  $30 \times 30$  像素的邻域内提取光斑图像边缘, 并实施 Hough 变换, 寻找半径为 4~10 个像素的圆。经 Hough 变换后, 可以得到多个满足给定条件的圆, 选取圆上满足条件边缘像素数最多(对应 Hough 变换参数矩阵的最大值)的圆, 以该圆的圆心作为光斑几何中心, 求取被测物点的三维信息。该方法有效地提高了测量的重复性能, 基本克服了由于被测物体表面光学性能的差异、物面倾斜、弥散斑等因素对测量结

果的影响。

### 3.1 Hough 变换原理

采用 Hough 变换检测任意曲线的原理如下<sup>[3]</sup>:

假设

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

为需检测曲线的参数方程。式中  $a_1, \dots, a_n$  为形状参数,  $x, y$  为空间域的图像点坐标。对于图像空间的任一点  $(x_0, y_0)$ , 利用(1)式可将其变换为参数空间  $(a_1, \dots, a_n)$  中的一条曲线。对空间域中位于同一曲线上的  $n$  个点逐一进行上述变换, 则在参数空间  $(a_1, \dots, a_n)$  中对应地得到  $n$  条曲线, 由(1)式可知, 这  $n$  条曲线必定经过同一点  $(a_{10}, \dots, a_{n0})$ , 找到参数空间中的这个点就决定了空间域中的曲线  $l$ 。常用的检测直线、圆的参数方程分别为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (3)$$

传统的 Hough 变换将空间域中的每一个轮廓点代入参数方程(1), 其计算结果对参数空间  $(a_1, \dots, a_n)$  中的量化点进行投票, 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。如对由(3)式表示的圆的检测, 参数空间为一三维的  $(a, b, r)$ , 其中  $(a, b)$  为圆心坐标,  $r$  为圆的半径。由于传统的 Hough 变换需逐点投票、记录, 故花费时间较长, 占用计算机存储量也较大。为克服这一缺点, 人们在应用中提出了许多改进算法。

### 3.2 改进算法

本文采用一种改进的 Hough 变换算法, 变换过程分两步。首先由光斑图像面积估算出其半径  $r$ , 然后对空间域的边缘点在参数空间  $(a, b)$  上实施 Hough 变换, 检测出半径为  $r$  且其上边缘点最多的圆。其原理如下:

1) 考虑到本问题中图像空间中只有一个光斑图像, 其余处均为灰度值接近于零的背景。因此, 为了降低参数空间的维数, 可先根据灰度图像计算出光斑所占面积, 并由此估算出光斑图像的半径  $r$ 。

2) 圆的参数方程  $(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2$  可改写为:

$$a = x - r \cos \theta, \quad b = y - r \sin \theta \quad (4)$$

将图像空间中的边缘点逐一代入(4)式中, 求出参数  $(a, b)$  之值, 并将相应的累加阵  $\mathbf{H}(a, b)$  中的元素加 1。

3) 找出  $\mathbf{H}(a, b)$  中元素的最大值, 其既为对应半径为  $r$ , 圆心为  $(a, b)$ 、且圆周上边缘点最多的圆。

4) 为使检测结果具有一定的鲁棒性, 以使在激光光斑变形较为严重时也能得到正确的结果, 需对求出的圆上的边缘点的个数与给定阈值  $T$  进行比较。若得到的圆上边缘点的数目大于给定阈值  $T$ , 则求解结束; 否则, 令  $r = r - 1$ , 然后重新返回第二步计算。

### 3.3 光斑中心读取方法

#### 3.3.1 光斑半径的估算

为减小计算量, 首先读取光斑中心的大致位置。由于激光扫描三角法测量中, 激光光束与镜头光轴要始终保持共面, 因此激光光斑在图像空间中只沿着水平方向移动。这样, 可以直接读取该行的亮度最大值的中心作为光斑中心的初始位置, 以下的计算在该中心的  $30 \times 30$  像素范围  $U$  内进行。

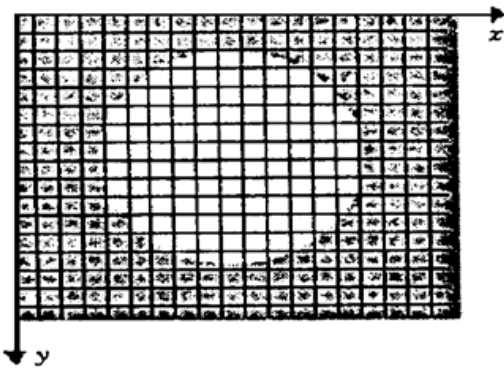


Fig. 2 The image of laser spot

不失一般性, 假设 CCD 摄像机产生的图像由正方形像素组成<sup>[4]</sup>。选择直角坐标系的  $x$  轴和  $y$  轴分别与像素的水平 and 垂直方向一致。这样, 激光光斑将在 CCD 光敏面上形成一个亮的光斑图像, 如图 2 所示。由于在测量中滤掉了自然光, 摄像机采集到的主要是激光波段光斑信号。因此, 在光斑图像中的像素灰度值  $P(i, j)$  最大; 边缘上的像素一部分在光斑图像, 另一部分在背景中, 具有中等的灰度值; 而背景的灰度值接近于零。

由前面的讨论, 考虑到光斑图像的光强分布并不均匀, 且背景灰度值也不完全为零, 选择适当的阈值  $B_{\min}$  和  $B_{\max}$ , 令

$$f(i, j) = \begin{cases} 1 & P(i, j) > \beta_{\max} \\ \alpha & B_{\max} > P(i, j) > B_{\min} \\ 0 & P(i, j) < B_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $0 < \alpha < 1$ 。于是, 便可求出该光斑图像的面积:

$$S = \sum_{(i, j) \in U} f(i, j) \quad (6)$$

由此, 其等效半径为:

$$r_e = \sqrt{S/\pi} \quad (7)$$

### 3.3.2 边缘提取

如果直接按  $B_{\min} < P(i, j) < B_{\max}$  条件提取边缘, 显然其抗干扰性能较差。应用中我们仍采用灰度值突变这一条件来检测边缘。目前已提出了多种不同的边缘检测算法。对于具有复杂背景或含噪声干扰的图像, 采用多尺度边缘检测可以获得较好的结果。对于如图 3(a) 中所示的光斑图像, 采用 Sobel 算子就能取得令人满意的效果。并且 Sobel 算子检测出的边缘受噪声的影响也较小。

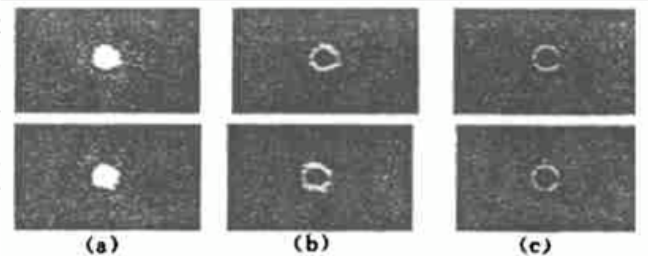


Fig. 3 (a) The original image of spot, (b) The edge image of spot, (c) The result of HT

边缘检测器的输出经过阈值处理后, 得到一幅二值图像, 其中值为 1 的点表示边缘上的点。与图对应的边缘检测结果如图 3(b) 所示。

### 3.3.3 光斑中心提取

由于圆的半径  $r$  为已知, 故 Hough 变换的参数空间降为二维  $(a, b)$ 。首先将参数  $a$ 、 $b$  离散化, 对应于(4)式也就是将参数  $\theta$  离散化; 构造离散矩阵  $\mathbf{H}(a, b)$ , 每个元素的下标对应于参数空间中各点的位置。对二值图像内的每个边缘点  $(x_i, y_i)$  进行以下变换:

$$a = x_i - r \cos \theta,$$

$$b = y_i - r \sin \theta$$

对所有符合变换方程的在  $\mathbf{H}(a, b)$  之内的点  $(a, b)$ , 令其:

$$\mathbf{H}(a, b) = \mathbf{H}(a, b) + 1$$

变换完成后, 找出累加阵  $\mathbf{H}(a, b)$  中的最大值  $H_{\max}$ 。若  $H_{\max}$  大于给定阈值  $T$  ( $T$  与半径  $r$  有关), 则整个变换结束, 与  $H_{\max}$  对应的参数  $(a, b)$  即为光斑几何中心。若  $H_{\max} < T$ , 说明光斑

变形较为严重, 令  $r = r - 1$ , 再进行一次 Hough 变换。

由于在该测量方案中光斑只沿水平方向移动, 垂直方向变动很小, 所以在实际的参数空间中,  $b$  的变化范围很小。在编程时增加这样一个约束条件, 可以使 Hough 变换的参数空间更小, 从而加快运行速度, 减小存储量。图 3(c) 为采用上述算法进行 Hough 变换检测的结果。

应该指出的是, 不同的光斑中心定位方法适用于不同的场合, 如面积中心法、Hough 变换法及基于几何对称或旋转性检测的方法, 各有不同的适用范围和检测性能。传统的面积中心法(如链码方法)对被测目标的形状没有严格要求, 但对边界的局部连接信息要求较高, 一般只能在较理想的条件下工作, 其鲁棒性较差; 而文献[5]提出的基于旋转对称性的检测方法在算法及时间复杂度均不变的情况下可以检测所有满足二重旋转对称目标的中心, 且由于该方法是通过表决来对中心进行定位的, 因而具有一定的鲁棒性; 本文介绍的基于改进 Hough 变换的光斑中心检测方法是针对在激光扫描大型曲面测量中的应用而提出的, 该算法对圆形光斑的中心检测具有很强的鲁棒性, 只要光斑图像能给出光斑的大部分真实边缘, 该算法便能克服各种干扰(如散斑、部分遮挡、物面反射特性变化等)对光斑中心定位结果的影响。

对于光斑中心本身的偏移, 如光源本身的不稳定性导致光束方向的漂移及成像系统对光斑中心的影响, 无论那一种算法均不能解决其光斑中心的不确定性问题。但是, 激光方向的不稳定性及成像系统畸变对光斑中心的影响, 在激光器、镜头及摄像机选定后也是一定的, 因此可以在视觉系统标定时将它们的影响降低到允许范围内。再有如果光斑本身畸变非常严重, 如光斑的轮廓只有少部分是圆形光斑的真实边缘, 其几何中心与圆形光斑中心发生了严重偏离, 此时用本文提出的算法进行检测找不到半径为 4~10 个像素、且边缘像素数目大于给定阈值  $T$  的圆, 因此不能给出中心定位结果。在实际应用中, 由于采用的是准直扩束后的激光光束作为光源, 因此, 激光器发出的光斑信号形状比较规则, 从而保证了测量过程中光斑中心的准确定位。

## 4 实验与结论

实验是针对火电厂煤场存煤量测量的测距范围进行的, 物距变化范围从 30 米到 200 余米。表 1、表 2 分别给出了采用中值法和基于 Hough 变换方法读取光斑中心的测距结果。由此可以看出, 采用 Hough 变换方法明显提高了测距精度, 基本消除了物面反射特性不均、弥散斑及物面倾斜对测量结果的影响。体积测量实验也表明了该方法对提高测量重复性能的有效性。该方法已成功用于火电厂煤场存煤量自动检测系统。

Table 1. Test results of distance (method of centriod of area)

precise distance/m	measured distance/m					maximum difference/m	error
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5		
30.0	29.98	30.04	30.01	29.98	29.96	0.04	0.13%
90.0	89.98	89.98	90.12	89.98	90.05	0.12	0.13%
180.0	180.23	179.97	179.70	179.70	179.97	0.30	0.17%



Table 2. Test results of distance (method of hough transform)

precise distance/m	measured distance/m					maximum difference/m	error
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5		
30.0	29.98	29.98	29.98	30.01	30.01	0.02	0.07%
90.0	90.05	89.98	90.05	90.05	90.05	0.05	0.05%
180.0	179.97	179.97	180.23	180.23	179.97	0.23	0.13%

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Baribeau R, Rioux M. Influence of speckle on laser range finders. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(20) : 2873~2878
- [ 2 ] 李万松, 苏显渝, 李继陶. 一种激光三维传感中提高深度分辨率的方法. *中国激光*, 1996, **23**(12) : 1081~ 1085
- [ 3 ] Yuen S Y, Ma C H. An investigation of the nature of parameterization for the Hough transform. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(6) : 1009~ 1040
- [ 4 ] 候成刚, 杨文献, 屈梁生. 一种快速检测圆心的抗噪声亚像素算法. *光学学报*, 1998, **18**(4) : 481~485
- [ 5 ] Li Yunming, Wong W C K. An efficient and robust method to detect objectcentre. *Pattern Recognition*, 1997, **30**(5) : 659~ 671

## An Algorithm To Raise the Locating Precision of Laser Spot Center Based on Hough Transform

Yang Yaoquan<sup>1)</sup>      Shi Ren<sup>2)</sup>      Yu Xining<sup>1)</sup>      Gao Tangnian<sup>1)</sup>

[ 1), *Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding 071003*  
2), *Department of Automatic Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049* ]

(Received 13 July 1998; revised 14 September 1998)

**Abstract** The precise location of the laser spot center is an important step to raise the measurement resolution in large 3-D surface profile measuring system of laser scanning. While measured distance is large, laser spot intensity distributes non-uniformly so that the deviation between the geometric center and the intensive center of the spot emerges because of the influence of various factors. The conventional methods of locating center of spot is unsuitable to the condition. According to the feature that the better part of circle spot can be obtained by the image of spot, a new method for locating the center of spot based on Hough transform (HT) is presented. The experimental results show that the method can effectively increase the measuring precision of large scale 3-D surface profile.

**Key words** laser scanning, Hough transform, 3-D profile measurement.