

# 一种成像测量靶面同心圆的自适应检测算法\*

王会峰, 牛建军, 刘上乾, 汪大宝

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

**摘要:**针对特殊环境下基于 CCD 成像的高准确度测量系统中, 由于摄像机沿轴运动和绕轴旋转过程中其光学中心和靶面同心圆圆心不同心及同心圆图像的圆心在一定范围内随机变化而影响测量结果问题, 提出了一套基于小范围内改进的 Hough 变换的共点直线检测快速算法、基于统计采样的同心圆分割区域自动划分算法、基于最小二乘拟合的同心圆参量高准确度检测算法. 实现了对同心圆的自适应区域划分和高准确度检测. 仿真和试验证明了该算法的有效性.

**关键词:**图像处理; 成像测量; Hough 变换; 区域划分; 最小二乘; 同心圆检测

**中图分类号:** TN911.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2008)10-2094-5

## 0 引言

基于 CCD 成像的高准确度身管空间轴线弯曲度测量系统中, 需要对一系列的同心圆进行检测. 基于距离空间聚类和基于随机采样的两种同心圆区域划分算法<sup>[1-2]</sup>对圆心位置的估计不具有自适应性, 且随机采样算法无法避免随机噪音的干扰. 特别是同心圆的圆心和光学系统的光轴偏离较大时便无法实现对同心圆的准确检测. 为此, 本文针对成像测量系统中图像的特征设计了一套能够在一定范围内满足圆心随机变化的自适应同心圆检测算法. 运用基于局部改进的 Hough 变换<sup>[3]</sup>共点直线快速检测算法, 求出直线的交点(即同心圆的大致圆心), 然后根据灰度统计结果划分各个同心圆的分割区域; 最后对各个同心圆分割区域进行阈值分割, 并借助最小二乘法, 实现同心圆的参量亚像素级的精确检测<sup>[4-8]</sup>. 仿真和试验证明, 该算法具有准确度高、速度快、自适应性强等优点.

## 1 CCD 成像空间轴线弯曲度测量的图像特征

图 1 为实际测量中的一幅靶面图像. 由于成像环境的特殊性, 靶面图像的照度均匀性和成像质量很难保证. 同时由于测量装置在沿轴行走过程中无法避免像机自身旋转及其光学中心与靶面不同轴, 使得靶面的中心在像平面上一定范围内随机变动, 因此必须采取相应的措施对图像进行处理, 以保证对同心圆的准确检测.



图 1 实际测量中的靶面图像

Fig. 1 The target image in practical measurement

## 2 基于局部图像改进的 Hough 变换共点直线检测快速算法

Hough 变换由 Paul Hough 在 1962 年提出<sup>[3]</sup>, 它建立了一种从图像空间到参量空间的映射关系, hough 变换<sup>[7]</sup>对噪音具有较强的鲁棒性, 而且能有效地解决被检测物体的“遮挡”问题<sup>[4]</sup>.

### 2.1 传统 hough 变换算法复杂度分析和改进途径

标准 Hough 变换采用投票表决的方式实现直线检测, 以一幅  $N \times N$  的图像为例,  $\rho$  的取值范围为  $[-N, \sqrt{2}N]$ ,  $\theta$  的取值范围为  $[0, \pi]$ . 首先将  $\theta$  空间离散为  $M$  个参量区间, 并认为图像空间中的一个非零点  $(x, y)$  可能属于每一个  $\theta$  的参量区间, 即可能属于任何一条直线. 在每个  $\theta$  参量区间根据式(1)计算  $\rho$  的值

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

记入相应的  $\rho$  参量区间, 最后检查每个  $\rho$  参量区间的投票数(即直线的长度), 若大于设定的阈值则可认为是一条直线. 可以看出, 标准 Hough 变换对每一个非零点都要进行  $M$  次运算, 其时间复杂度为  $O(N^2 \times M)$ , 所占存储空间为  $(\sqrt{2} + 1) \times M \times N$ . 因此, 标准 Hough 变换对时间和空间的消耗都非常大<sup>[5]</sup>.

\* 国家自然科学基金(60377034)资助

Tel: 029-88202573 Email: conquest8888@126.com

收稿日期: 2007-09-12

通过上面的分析可知,标准的 Hough 变换没考虑应用场合,而是对整幅图像的逐点运算,且没有结合图形的几何特征. 因此,对其改进应从以下两方面着手:首先,结合实际应用选取含有感兴趣图形的区域进行局部 Hough 变换,可使运算复杂度和内存消耗都大大降低. 其次,结合图形的几何特征对算法进行约束性改造以减少计算的冗余性. 本文就从这两方面出发改进标准 hough 变换,且达到了良好的效果.

## 2.2 局部感兴趣区域改进的 Hough 变换快速算法

考虑到实际应用中圆心在一定范围(约  $40 \times 40$  像素)内随机变化,以像机的光学中心为中心,从靶面图像中截取  $128 \times 128$  的区域作为子图像,该区域包含了靶心随机变化的全部范围和局部的相交直线,如图 2(a)和图 3(a). 与全图标准 Hough 变换相比,子图像计算的时间复杂度和存储空间占用率分别减为原图像的 6.1%、3.7%,计算速度明显提高.

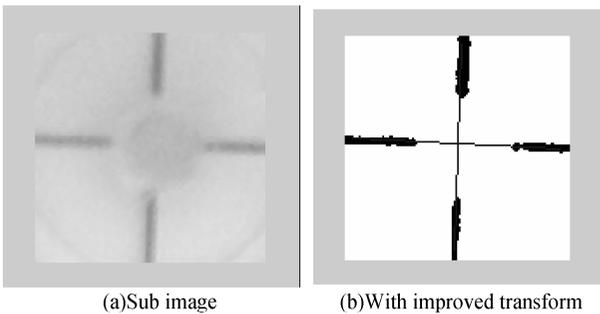


图 2 截取的子图像和改进的 Hough 变换检测结果  
Fig. 2 The sub image and line detect with improved hough transform

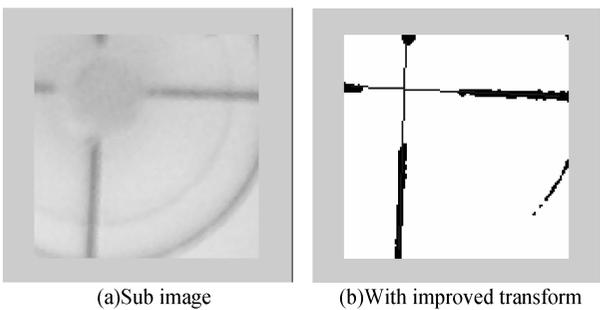


图 3 中心变化  $40 \times 40$  像素后截取的子图像和改进的 Hough 变换检测结果  
Fig. 3 The sub image and line detect with improved hough transform after center moving  $40 \times 40$  pixels

图像中直线具有以下几点特征<sup>[5]</sup>:1)若图像中的某一非零点属于一条直线,则该点仅属于此直线.虽然直线的交点可以属于不同的直线,但并不影响直线的检测;2)直线上特征点的邻接性特征:若一个特征点属于某条直线,则在其某个较小的邻域内必有属于该直线的其它特征点;3)在任意包含直线的不太小的区域内,直线上绝大多数点将会落入同一个  $\rho-\theta$  参量区间,则该参量可以近似作为直线的参

量,这一点符合直线的统计特征. 根据以上特征进行算法设计,步骤为:

- 1)在靶面图像中以像空间的光学中心为中心选择  $M \times N$  的区域作为要检测的区域子图像;
- 2)对该区域子图像进行分割;
- 3)检测所有非零点作为特征点,确定共计  $m$  个特征点所组成的图形空间  $P = \{p_i = (x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, m\}$ ;
- 4)依次从  $P$  中取出一个点  $p_j$  作为种子点;
- 5)以  $p_j$  为中心,在一定范围的邻域内从剩余特征点组成的点集  $P_1$  中选择出特征点  $p_k$  用于第 6)和第 7)步的运算,直至已选取的特征点数量达  $P_1$  特征点的一定比例,则转第 8)步;

6)按照式(2)计算;

$$\theta_{jk} = \arctan \frac{x_j - x_k}{y_k - y_j} \quad (2)$$

7)考虑一条直线上的任意两个点按照式(1)计算的结果一定相等,且一条直线至少需通过两个点,进行如下累积计算:如果  $\theta_{jk}$  与已存在的所有  $\theta_{jl}$  都不相等,即  $\theta_{jk}$  与所有的  $\theta_{jl}$  关系都满足  $|\theta_{jk} - \theta_{jl}| \geq \delta_1$ ,则新开一个累积存储单元  $H(\theta_{jk}) \leftarrow 1$ ,否则如果  $\theta_{jk}$  与已存在的某一  $\theta_{jl}$  的差距很小,即满足  $|\theta_{jk} - \theta_{jl}| < \delta_1$ ,则  $H(\theta_{jk}) \leftarrow H(\theta_{jl}) + 1$ . 回到第 5)步;

8)获得具有最大累积存储单元,如果该  $H(\theta)$  大于阈值  $T_1$ ,则认为可能存在一条过点  $p_j$  的直线  $(\rho, \theta)$ ,按式(3)计算直线参量

$$\rho = x_j \cos \theta + y_j \sin \theta \quad (3)$$

9)依次选取  $P$  中所有的特征点  $p = (x, y)$ ,将在可能的直线  $(\rho, \theta)$  上,即满足  $|x \cos \theta + y \sin \theta - \rho| < \delta_2$  的点从  $P$  中删除,如果被删除的数目超过阈值  $T_2$ ,则确认该可能直线为图像上存在的直线. 如果  $P$  中剩余特征点数目大于  $T_3$ ,则初始化累积存储空间回到第 2)步;

10)算法结束.

图 2(b)为应用改进的 Hough 变换检测到的共点直线. 图 3(b)为中心变化时共点直线检测结果.

## 3 基于统计采样的同心圆分割区域自动划分算法

由于图像的特殊性,很难找到一个全局的灰度阈值对图像进行准确的分割,所以有必要在靶面图像中对各个同心圆所在区域进行自动划分,以便采用不同阈值分割各圆所在区域并检测各圆.

在圆心(共点直线交点)确定以后,选取某个象限(不含光斑)沿着半径方向对灰度进行统计并求其均值.

设图像中同心圆的半径分别为  $r_i (i=1, 2 \dots, k)$ , 宽度均为  $d_i$ , 建立极坐标系如下

$$\rho=r(\theta)$$

式中

$$a_1 < r < a_2 \quad \alpha < \theta < \beta \tag{4}$$

显然有

$$\begin{cases} x=r\cos\theta \\ y=r\sin\theta \end{cases} \tag{5}$$

半径为  $r$  处的灰度平均值为

$$\text{aver\_gray}(r) = \frac{\int_{\theta_1}^{\theta_2} I(r\cos\theta, r\sin\theta) d\theta}{\int_{\theta_1}^{\theta_2} r(\theta) d\theta} \tag{6}$$

图 4 为灰度统计曲线和区域划分结果.

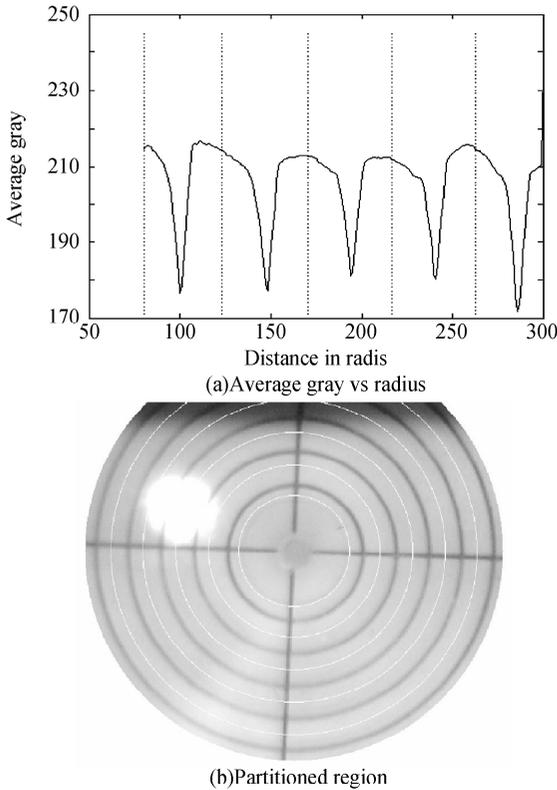


图 4 灰度统计曲线和区域划分结果  
Fig. 4 Average gray stat and the region of partitioned

由图 4(a)可以看出, 沿半径方向的灰度均值出现明显的几个谷(同心圆位置), 利用最优化方法中的一维搜索法可以求得图中的五个极小值, 过程如下:

求局部极小值点, 即  $\min_{r \in R} \text{aver\_gray}(r)$ , 由定义可知: 若  $r^{(0)} = (r_1^0, r_2^0, \dots, r_n^0)^T$  为  $\text{aver\_gray}(r)$  的局部极小值点, 即存在一邻域  $\delta(r^{(0)})$  使对  $\forall r \in \delta(r^{(0)})$ , 均有  $\text{aver\_gray}(r^{(0)}) \leq \text{aver\_gray}(r)$ . 从半径  $r_k = r_1$  开始以一定的步长  $\Delta r$  进行搜索, 搜索过程如下:

1) 计算  $\text{aver\_gray}(r_k)$ ,  $\text{aver\_gray}(r_{k+1})$ ,  $\text{aver\_gray}(r_{k+2})$ , 其中  $r_{k+1} = r_1 + \Delta r$ ,  $r_{k+2} = r_1 + 2\Delta r$ ;

2) 如果  $\text{aver\_gray}(r_k) > \text{aver\_gray}(r_{k+1})$ , 且  $\text{aver\_gray}(r_{k+1}) > \text{aver\_gray}(r_{k+2})$ , 则记录  $r_{k+1}$ , 否则继续向下搜索;

3) 如果  $\text{aver\_gray}(r_{k+2}) \leq \text{aver\_gray}(r_{k+1})$  则  $r_{k+1} = r_{k+2}$  返回(2)否则执行下步;

4) 记录极小值空间点  $R = \{r_i | i=1, 2, 3 \dots\}$ , 给定约束条件:  $\text{aver\_gray}(r) \leq \text{GRAY}_0$ , 求取满足条件的  $r_i$ ;

5) 剔除小邻域极值点: 以所得各点为中心计算  $\text{aver\_gray}(r_{k-2})$ ,  $\text{aver\_gray}(r_{k+2})$ ;  $\text{aver\_gray}(r_{k-3})$ ,  $\text{aver\_gray}(r_{k+3})$ ;  $\dots$   $\text{aver\_gray}(r_{k-n})$ ,  $\text{aver\_gray}(r_{k+n})$ .

选择满足:  $\text{aver\_gray}(r_{k-i}) > \text{aver\_gray}(r_k)$  且  $\text{aver\_gray}(r_k) > \text{aver\_gray}(r_{k+i})$  的  $r_i$  即为所求.

根据求得的局部极小点对靶面的同心圆区域进行划分, 含各圆区域的划分半径按式(7)计算.

$$R_i = (r_i + r_{i+1}) / 2 \tag{7}$$

利用上述的区域自动划分算法对靶面进行含各个圆区域划分, 划分位置如图 4(a)中虚线和图 4(b)中的白色圆环所示, 试验表明, 该算法能准确快速地对同心圆区域实施划分.

### 4 基于最小二乘拟合的同心圆参量高准确度检测法

为了满足高精度测量的要求, 需对同心圆各圆的参量进行高准确度的参量检测, 通过对划分出的各圆的分割区域用适当方法<sup>[6]</sup>进行分割, 得到各圆上点的相应集合, 再用最小二乘拟合, 确定出圆的亚像素参量<sup>[8]</sup>.

图 5(a)为全图像单阈值分割结果, 图 5(b)为区域划分后多阈值分割结果. 可见, 区域划分后的分割效果较好.

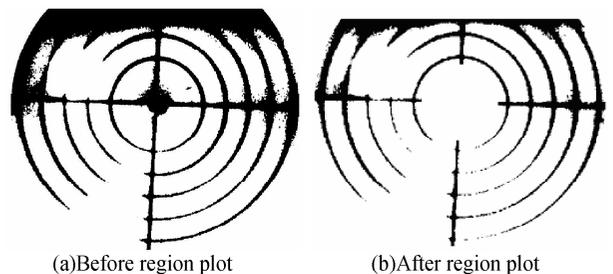


图 5 区域划分前后多阈值图像分割结果  
Fig. 5 The segment result with multi-threshold before and after region plot

对区域分割结果用最小二乘法拟合, 可以得到同心圆各圆的圆心和半径的参量<sup>[2]</sup>.

实际中可对各个圆进行多次拟合, 在第一次拟合后, 计算每个点的残差, 将残差较大的点去除掉,

再对剩余点进行第二次拟合,直到准确度满足要求为止. 试验表明,图像质量不太好时,每次可以去掉5%的点. 靶面最终的圆心坐标和半径值为各个圆心坐标和半径值的加权平均,这样可以进一步提高检测准确度.

## 5 仿真试验和结论

采用本文提出的方法在 CPU 主频为 1.7G 的 PC 上用 VC++ 对如图 1 大小为  $768 \times 576$  的图像进行了仿真实验. 结果发现系统能够适应像机自身旋转及其光学中心与靶面不同轴现象、测量的准确性得到明显提高.

针对特殊环境下高准确度成像测量系统中同心圆检测这一实际问题,提出了基于局部图像改进的 Hough 变换的共点直线检测快速算法(圆心检测方法)、基于统计采样的同心圆分割区域自动划分算法、基于最小二乘拟合的同心圆参量高准确度检测算法等一系列的图像处理方法,从而克服了靶面沿轴行走过程中,圆心在一定范围内变化对检测准确度的影响,实现了在同心圆圆心随机变动和像机旋转的情况下对同心圆的自适应高精度检测;仿真和试验结果证明该算法是有效可行的,可以作为同类问题的一种解决方案.

### 参考文献

- [1] ZHENG Nan-ning. Computer vision and pattern recognition [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 154-159.  
郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 154-159.
- [2] NIU Jian-jun, LIU Shang-qian, HAN Bao-jun, *et al.* Algorithm for region partition in concentric circles detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1945-1949.  
牛建军, 刘上乾, 韩宝军, 等. 同心圆检测中的区域划分算法 [J]. 光子学报, 2006, **35**(12): 1945-1949.
- [3] HOUGH P V C. A method and means for recognizing complex patterns [P]. U S P, 3069654, 1962.
- [4] LIU Bo. Recognition of two dimensional image using hough transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1992, **22**(2): 32-38.  
刘波. 用 Hough 变换识别二维图像 [J]. 光子学报, 1992, **22**(2): 32-38.
- [5] WANG Jian-yong, ZHOU Xiao-guang, LIAO Qi-zheng, *et al.* An improved algorithm for line detection [J]. *Computer Engineering*, 2006, **32**(16): 172-174.  
王建勇, 周晓光, 廖迄证, 等. 一种改进的直线检测算法 [J]. 计算机工程, 2006, **32**(16): 172-174.
- [6] WU Wen-ming, GAO Li-min, WU Yi-ming, *et al.* Improving precision of autocollimation with cubic spline interpolation functions [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(8): 1561-1564.  
吴文明, 高立民, 吴易明, 等. 利用三次样条插值提高自准直仪的准确度 [J]. 光子学报, 2007, **36**(8): 1561-1564.
- [7] YANG Zhi-wei, LIAO Gui-sheng. Improving spatial wvd and hough transform based algorithm for near-field sources parameter estimation and performance analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 937-940.  
杨志伟, 廖桂生. 改进的基于 Spatial WVD 和 Hough 变换的近场信源参量估计及性能分析 [J]. 光子学报, 2007, **36**(5): 937-940.
- [8] HUANG Gui-ping. Center subpixel localization of circular retro-reflective targets [J]. *Center Subpixel Localization of Circular Retro-Reflective Targets*, 2005, **30**(5): 388-391.  
黄桂平. 圆形标志中心子像素定位方法的研究与实现 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, **30**(5): 388-391.

## A New Concentric Circles Adaptive High Accuracy Detection Algorithms in Measurement Based on Image

WANG Hui-feng, NIU Jian-jun, LIU Shang-qian, WANG Da-bao

(*Institute of Technology Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Received date: 2007-09-12

**Abstract:** In order to high accuracy measurement based on CCD image in special environment, a suit of algorithms such as local image improve fast hough transform with common point diameter detection, concentric region area auto partition base on statistical sampling, high accuracy detect of concentric parameters base on least squares fitting are proposed. With these approaches the concentric segmentation region area adaptive partition and parameters high precision detecting are realized, and a difficult problem that the alteration center of the concentric in target image are resolved. Experimentation and simulation shows the algorithms are high practical, and can be used in the other situation as the same type.

**Key words:** Image processing; Measurement base on image; Hough transform; Region partition; Least-squares; Concentric circles detection



**WANG Hui-feng** was born in 1976. He is working towards the Ph. D in photoelectricity at Xidian university in 2005. He interest focuses on imaging optics, realtime image processing and intelligentized photo electronic measure and control. He is now researching on a system of high speed and high accuracy measurement base on image processing.