

文章编号:1004-4213(2010)02-0335-5

# 基于模糊快速 Hough 变换的盘孔边界识别方法\*

孙慧贤,张玉华,罗飞路

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院,长沙 410073)

**摘要:**为了快速准确地识别出某型航空发动机篦齿盘均压孔的边界,提出一种新的模糊快速 Hough 变换,利用局部梯度信息将检测圆所需的 3D Hough 变换转化为一个 2D Hough 变换检测圆心位置和一个 1D Hough 变换检测圆的半径.在检测圆心位置时,对 2D 参量空间进行多分辨率分级,通过迭代计算由粗到精逐步细化参量空间.采用模糊投票的方法来处理边缘像素位置和梯度方向的不确定性.通过实验对比了模糊快速 Hough 变换与标准 Hough 变换、随机 Hough 变换进行盘孔边界识别的效果,结果表明模糊快速 Hough 变换可以快速准确地识别出盘孔的边界,性能优于另外两种算法.

**关键词:**计算机视觉;篦齿盘均压孔;边界识别;模糊快速 Hough 变换

**中图分类号:**TP391.4

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103902.0335

## 0 引言

某型航空发动机篦齿盘上的均压孔是主要受力部位,在使用过程中易产生沿孔周边分布的裂纹,从而对发动机的正常使用和飞机的安全飞行构成严重威胁.孔探检测是监测航空发动机运行状态和诊断发动机内部表面结构损伤的有效手段之一.传统的孔探技术是采用人工观察,根据个人经验进行故障判断,工作效率较低,易产生由于主观因素而造成的误差.随着内窥镜技术的不断成熟和数字图像处理技术、计算机视觉技术的推广应用,使得研究基于孔探技术的智能型发动机视觉检测成为可能.但是,通过孔探获取的均压孔图像中,孔的位置是不确定的,因此准确地识别出均压孔边界是这项视觉检测的关键.

通过检测均压孔圆形轮廓可以实现盘孔边界识别,但是由于均压孔的形态较为复杂,且受表面纹理、工作环境、光照等的多种干扰影响,因此检测的难度较大.Hough 变换是一种非常有效的从图像中提取特定几何图形(如直线、圆、椭圆等)及其特征的方法,具有对噪声不敏感、受边缘间断影响小等优点,在机器视觉领域被广泛应用<sup>[1-5]</sup>.经典的 Hough 变换用于圆检测需要在 3D 参量空间进行累积,使得该方法因计算量和内存需求量大而难以实用.利用边缘检测时获得的梯度方向信息可以适当降低 Hough 变换检测圆的计算量,这种方法已成为目前

用于圆检测的标准 Hough 变换<sup>[6]</sup>(Standard Hough Transform, SHT).但是 SHT 算法仍需在 3D 参量空间上进行投票累积,运算量较大.为了克服传统 Hough 变换运算量大、检测准确度受参量空间量化间隔影响等缺点, Xu 等<sup>[9]</sup>提出了随机 Hough 变换<sup>[7]</sup>(Randomized Hough Transform, RHT),将经典 Hough 变换中的“一对多”映射采用“多对一”映射代替,同时采用动态链表结构进行参量累积,有效降低了 Hough 变换的运算量.在处理简单图像时, RHT 算法具有出色的性能,但是在强噪音或背景复杂情况下,算法易产生不确定性和定位错误.因此,在保证算法鲁棒性同时降低算法的运算量在近年来得到了广泛重视,已提出不少改进算法<sup>[8-10]</sup>.

为了能够快速准确地识别出盘孔边界,本文提出一种模糊快速 Hough 变换算法(Fuzzy Fast Hough Transform, FFHT)对盘孔的圆形轮廓进行检测.该算法的主要思想是利用局部梯度信息将检测圆所需的 3D Hough 变换转化为一个 2D Hough 变换检测圆心位置和一个 1D Hough 变换检测圆的半径.在检测圆心位置时对 2D 参量空间进行多分辨率分级,通过迭代计算由粗到精逐步细化参量空间.采用模糊投票方法来处理边缘像素位置和梯度方向的不确定性.最后通过实验验证了 FFHT 算法在盘孔边界识别中的可行性和有效性.

## 1 均压孔图像特点

均压孔是规则的圆孔,孔径为 5 mm.为了增强均压孔抗疲劳强度,孔的边缘被处理为光滑的圆弧形,而且在孔的周围进行镀铬处理,镀铬后的均压孔

\* 国防预研重点项目(51317030106)资助

Tel:0731-2468372

Email:Saber\_sun@163.com

收稿日期:2008-10-29

修回日期:2008-12-19

周围发亮,因此,在内窥镜图像中孔的周围易出现“反光”现象.图1为两幅典型的均压孔孔探图像及其边缘图,(a)和(b)是盘孔图像,(c)和(d)为采用 Sobel 算子计算得到的相应的边缘图.

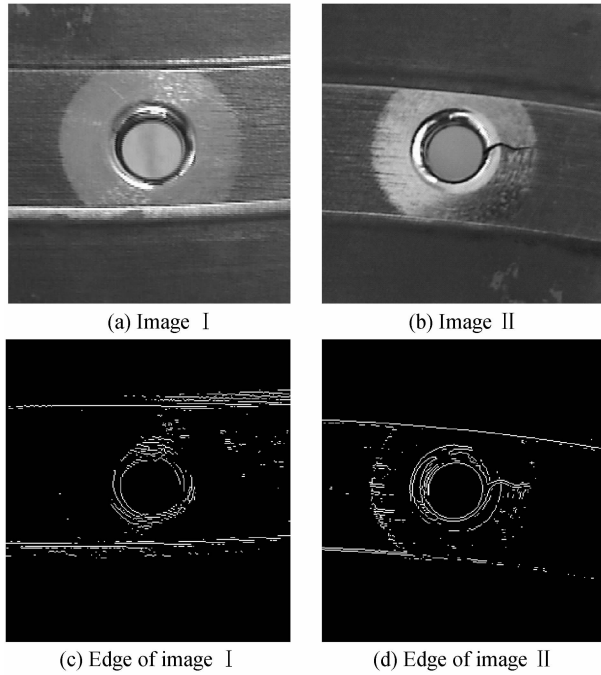


图1 典型均压孔孔探图像

Fig.1 The typical images of the disc aperture

从图中可看出,在实际操作中无法保证内窥镜与盘面完全垂直,因此内窥镜图像中的均压孔边界一般不是一个完整的规则的圆,而是一些残缺的圆弧.此外,因为盘孔形貌特征及其周围的光反现象存在,使得盘孔周围存在大量干扰,且有相当部分干扰是与盘孔边界圆弧近似同心的圆弧.盘孔边界识别的方法是采用 Hough 变换检测出盘孔内侧的圆形轮廓,而上述均压孔图像特点成为盘孔圆形轮廓检测的主要干扰.

## 2 模糊快速 Hough 变换算法

### 2.1 利用局部梯度信息检测圆

利用梯度方向信息可以降低 Hough 变换检测圆时参量空间的维数.在边缘点的方向信息已知的情况下,可将圆的检测分为两个阶段,首先利用 2D Hough 变换检测圆心位置,然后利用半径直方图确

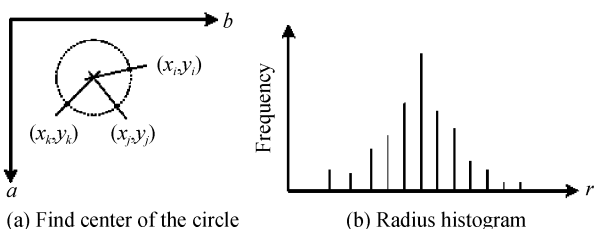


图2 利用梯度方向信息检测圆

Fig.2 The circle detect with edge direction information

定圆的半径.因为,一个圆的圆心必定位于圆周上每个边缘点的梯度方向上,那么这些点的梯度方向的交点就是圆心.图2为这种方法的原理图,其中(a)为圆心确定的原理示意图.在图像空间中,定义边缘点 $(x_p, y_p)$ 延其梯度方向的直线为该点的梯度直线,其表达式为

$$y = k(x - x_p) + y_p \quad (1)$$

式中, $k = g_y(x_p, y_p) / g_x(x_p, y_p)$ ,是该直线的斜率.

在确定圆心位置过程中,需要计算经过参量空间中某一单元的直线的数量,对投票数量大于阈值 $T_c$ 的单元进行划分,继续迭代计算.此时,阈值 $T_c$ 的确定相对于边缘点的数量 $P$ .

$$T_c = \lambda P / 2^j \quad (2)$$

式中, $\lambda$ 为投票阈值系数, $j$ 为参量空间分级级数,关于参量空间多分辨率分级介绍见 2.2 节.

通过计算单元中心到直线的距离判断其是否穿过该单元.在图像空间中,式(1)所示直线可改写为

$$M_2 y + M_1 x + M_0 = 0 \quad (3)$$

则直线到单元中心 $C = (c_x, c_y)$ 的距离为

$$d = |M_2 c_y + M_1 c_x + M_0| \quad (4)$$

式中, $M_0 = (y_p - kx_p) / \sqrt{1+k^2}$ , $M_1 = k / \sqrt{1+k^2}$ , $M_2 = -1 / \sqrt{1+k^2}$ .

图3为在一幅简单合成图像中每一边缘点梯度直线的分布情况,图像大小为 $128 \times 128$ .采用 Sobel 算子得到其图像的边缘及梯度方向,共有 91 个边缘点.如果将描述圆心位置的 2D 参量空间粗划分为四个子区域,则可以采用式(3)计算得到经过每一子区域的梯度直线数量.

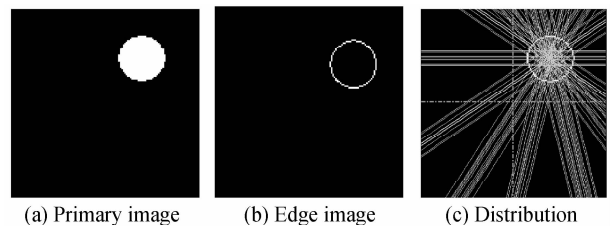


图3 梯度直线的分布情况

Fig.3 Distribution of the gradient line

如果圆心位置已知,可计算出圆心点到图像中每一边缘点的距离,将距离值采用投票方式映射到 1D 参量空间中,就可以得到半径直方图,如图 2(b).对半径直方图采用检测峰值可得到圆的半径.如果对每个圆心都计算所有的边缘点,会增加算法的运算量.本文采用对属于同一圆心位置的边缘点进行标记的方法来减少参与半径直方图计算的点数.具体做法是:在判断圆心位置参量空间分辨率达到要求后的最后一次 2D Hough 变换中,对投票属于不同单元的边缘点进行标记,这样在计算半径直

方图时,对于每个可能的圆心位置只需计算相应的标记点.半径直方图局部峰值最终确定圆的存在.同时,需要考虑半径的大小对圆存在可能性的影响.因此,通过比较投票到半径为  $r_n$  上的像素点数  $P_n$  与  $r_n$  的比值来判断圆的存在.

## 2.2 参量空间多分辨率分级

在检测圆心位置时对二维参量空间进行多分辨率分级,通过迭代计算由粗到精逐步细化参量空间.首先将参量空间进行粗略划分,在一次投票累积之后确定目标存在的子区域.对子区域进行细分之后再进行一次投票累积确定目标存在的子区域.如此类推,直至参量空间分辨率达到要求,迭代停止.本文采用塔式表达方法对参量空间进行多分辨率分级,如图 4 为二维参量空间中塔式表达的图解示意.

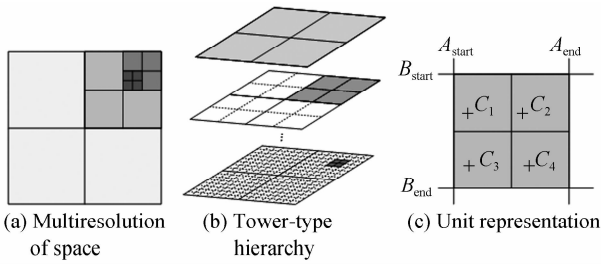


图 4 二维参量空间塔式表达

Fig. 4 Tower-type representation of 2D parameter space

采用与原图像像素位置坐标确定塔式分解中各子区域的位置,如第  $n$  级中第  $j$  个单元  $H_j^n$  可表示为

$$H_j^n = (A_{start}^{(n,j)}, A_{end}^{(n,j)}, B_{start}^{(n,j)}, B_{end}^{(n,j)}) \quad (5)$$

式中,  $A_{start}^{(n,j)}, A_{end}^{(n,j)}, B_{start}^{(n,j)}, B_{end}^{(n,j)}$  为两个坐标轴方向上的坐标,如图 4(c).

各单元中心点  $C_1, C_2, C_3, C_4$  的位置可以通过像素位置坐标计算得到.这种塔式分级表达在确定子区域的隶属关系的同时还可以确定其在参量空间的位置和分辨率.参量空间多分辨率分级的方法可以有效降低 Hough 变换的运算量,同时对参量空间采用由粗到精的证据累积,可以很好控制参量空间的准确度.

## 2.3 模糊投票

实际检测中边缘像素位置和梯度方向都可能存在误差,各种噪音的干扰也使圆周上各点的梯度直线不能精确地交于一点.本文采用模糊投票的方法来处理这种实际中存在的不确定性.

模糊点变换后的隶属度函数可以依据消解原理来重建,可以用一个以参量  $\varphi$  描述的圆来表示模糊点的  $\alpha$  截集

$$\begin{aligned} x &= x_0 + r \cos \varphi \\ y &= y_0 + r \sin \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)可得到该模糊点对应的梯度直线

表达式

$$y_0 = k(x_0 - x_p) + y_p + krcos \varphi - r \sin \varphi \quad (7)$$

由式(3)、(4)、(7)可推得参量空间点  $C = (c_x, c_y)$  到模糊梯度直线之间的距离可以计算

$$d' = |M_2 c_y + M_1 c_x + M_0 \pm \Delta d| \quad (8)$$

式中,  $\Delta d$  是为点到直线距离的模糊程度,且有  $0 \leq \Delta d \leq r$ .

根据实际应用要求和图像的特点来确定模糊分布函数,本文选用 Zadeh 提出的  $\pi$  函数<sup>[11]</sup> 计算模糊投票值  $g(d')$ . 如图 5(a)为  $\pi$  函数曲线, (b)为参量

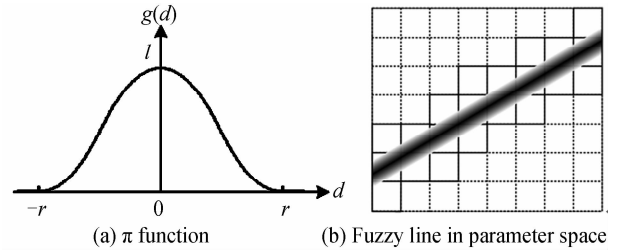


图 5 模糊投票

Fig. 5 Fuzzy vote

空间的模糊直线.

$$g(d') = \begin{cases} 1 - 2(d'/r)^2 & (0 \leq d' < r/2) \\ 2(1 - d'/r)^2 & (r/2 \leq d' < r) \\ 0 & (d' \geq r) \end{cases} \quad (9)$$

## 2.4 算法步骤

FFHT 算法具体步骤为:

1) 构造边缘点集  $D$ , 并记录各点的梯度方向, 初始化参量单元集, 设定投票阈值系数  $\lambda$  和 2D 参量空间分辨率  $R_{max}$ ;

2) 初始化检测圆心位置的 2D 参量空间  $H$ , 将其划分为四个区域 ( $H_1^0, H_2^0, H_3^0, H_4^0$ ), 并确定区域中心坐标;

3) 判断参量空间  $H$  的分辨率  $R_c$  是否达到  $R_{max}$ , 若  $R_c > R_{max}$ , 转步骤 4); 否则, 转步骤 6);

4) 对于某一级参量空间, 根据式(7)计算每个边缘点模糊梯度直线到该级空间各单元中心的距离  $d'$ , 并根据式(9)计算模糊投票值  $g(d')$ , 进行投票;

5) 根据式(2)计算该级参量空间单元投票阈值  $T_c$ , 将各单元投票值  $V_i$  与阈值  $T_c$  进行比较, 若  $V_i \geq T_c$ , 继续对该区域进行划分; 否则, 放弃该区域; 该级所有单元处理完毕转至步骤 3); 若所有单元投票值都小于阈值  $T_c$ , 则检测结束;

6) 与步骤 4) 计算基本相同, 只是在进行投票时对属于不同位置单元的边缘点进行标记;

7) 根据最后一级参量空间圆心位置检测的结果, 统计边缘点标记结果, 生成半径直方图;

8) 对半径直方图进行局部峰值检测, 通过像素点数  $P_n$  与半径  $r_n$  的比值确定圆的存在, 检测结束.

### 3 实验结果与分析

采用通过美国韦林公司的 XL PRO Plus 型工业视频内窥镜获取的均压孔图像进行盘孔边界识别实验. 为了验证 FFHT 算法在盘孔圆形轮廓检测时的性能, 将其检测结果与 SHT、RHT 算法的结果进行比较. Hough 变换所需的边缘图及梯度方向均由 Sobel 算子给出. 在 SHT 算法定位实验中, 设定圆的半径步长为 1, 角度变化步长为 0.1 (弧度), 最小圆半径为 20, 最大圆半径为 60, 以累加器阵列中投票数最多的单元作为盘孔边界参量. 在 RHT 算法中, 设定最大试验次数为 20 000 次, 采样点最小间距为 10, 以链表结构中最大值对应的圆的参量作为盘孔边界参量. 在 FFHT 算法中, 设定圆心检测参量空间分辨率为 1, 投票阈值系数  $\lambda=0.25$ .

采用三种 Hough 变换算法对图 3 中两幅典型均压孔图像进行盘孔定位的实验结果如图 6、图 7. 两幅图像的大小均为  $293 \times 312$ . 算法由 Visual C++ 6.0 编程实现, 在主频为 2.6 GHz、内存为 1 GB 的 PC 机上运行. 表 1 中给出了三种 Hough 变换算法盘孔定位参量的比较.

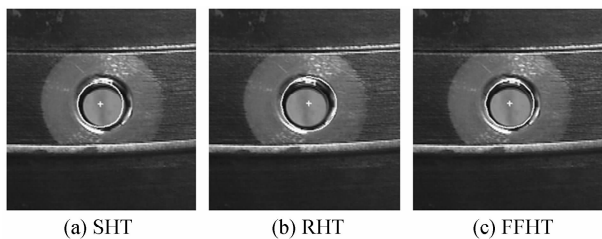


图 6 Hough 变换检测图 1(a) 的盘孔边界

Fig. 6 Detect the contour of the aperture in Fig. 1(a)

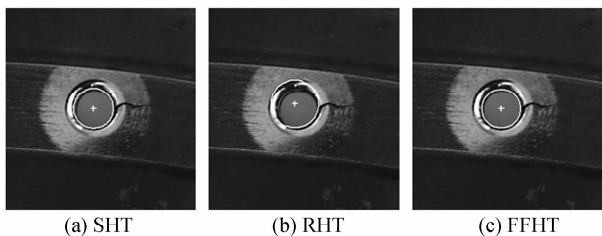


图 7 Hough 变换检测图 1(b) 的盘孔边界

Fig. 7 Detect the contour of the aperture in Fig. 1(b)

表 1 三种 Hough 变换算法比较

Table 1 Results of three Hough transform algorithm

	Fig. 1(a)			Fig. 1(b)		
	Center of circles	Radius	Time/s	Center of circles	Radius	Time/s
SHT	(149, 146)	35	2.93	(155, 137)	30	2.78
RHT	(168, 161)	51	0.96	(150, 131)	37	0.64
FFHT	(148, 147)	37	1.03	(155, 136)	30	0.84

因为实际孔探检测中, 内窥镜是人工操作的, 探头与盘面之间的距离和位置难以精确控制. 所以对均压孔的孔探图像无法给出精确的圆心位置及半径

参量. 在实验中发现, SHT 算法可以较准确地检测出均压孔的边界, 可以满足裂纹识别的需要. 因此在实验中比较不同算法对圆心位置和半径的检测结果时, 以 SHT 算法的结果作为参照. 从图 1 中的边缘图中可看出, 在孔周围存在大量的近似同心的圆弧干扰. 在这种情况下, RHT 算法难以准确定位盘孔, 而且在实验中发现, RHT 算法的随机性较大, 对同一图像的检测结果不尽相同. 这是因为 RHT 算法的参量空间稀疏, 其峰值对于噪音较为敏感, 随着图像中噪音的增强, RHT 算法检测结果的准确性降低, 不确定性增加. 从实验结果可以看出, FFHT 算法检测准确性与 SHT 的结果相近, 且性能稳定. 从计算时间上看, SHT 算法计算量最大, RHT 需要的计算时间最小, 而 FFHT 算法在计算时间比 RHT 稍长, 但相比 SHT 算法, 其计算量小很多.

### 4 结论

本文针对某型航空发动机篦齿盘上的均压孔的边界识别问题, 提出一种模糊快速 Hough 变换算法. 该算法首先采用局部梯度信息使参量空间维数减 1, 降低了计算的复杂度; 然后对 2D 参量空间进行多分辨率分级, 由粗到精逐步细化参量空间, 减少了无用的积累矩阵, 使参量空间的分辨率得到很好的控制; 最后采用模糊投票的方法减少边缘像素位置误差和梯度方向误差对检测准确性的干扰, 增强了算法的可靠性. 在实验中, 采用该算法对盘孔圆形轮廓进行检测, 结果表明 FFHT 算法可以快速准确地检测出盘孔的圆形轮廓, 可以有效地实现均压孔图像中的盘孔边界识别.

#### 参考文献

- [1] CHEN Teh-chuan, CHUNG Kuo-liang. An efficient randomized algorithm for detecting circles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, **83**(2): 172-191.
- [2] SUETAKE N, UCHINO E, HIRATA K. Generalized fuzzy Hough transform for detecting arbitrary shapes in a vague and noisy image[J]. *Soft Computing*, 2006, **10**(1): 1161-1168.
- [3] WANG Q, CHEN H, XU X. A newly modified algorithm of hough transform for line detection[J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2005, **5**(4): 715-727.
- [4] NIU Jian-jun, LIU Shang-qian. Algorithm for region partition in concentric circles detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1946-1949.  
牛建军, 刘上乾. 同心圆检测中的区域划分算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1946-1949.
- [5] LIU Yang, LI Xia, WANG Na, et al. An Improved iris location algorithm based on sampling to special regions of interesting (ROI)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1277-1280.  
刘洋, 李霞, 王娜, 等. 基于特定感兴趣区采样的虹膜定位改进

- 算法[J]. 光子学报,2008,**37**(6):1277-1280.
- [6] SNYDER W E, QI H. Machine vision[M]. London: Cambridge University Press, 2004.
- [7] KIRYATI N, KALVIAINEN H, ALAOUTINEN S. Randomized or probabilistic Hough transform: unified performance evaluation[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2000, **21**(11):1157-1164.
- [8] CAI Jin-hui, JIANG Qing, ZHOU Ze-kai, *et al.* The research of an improved algorithm for circle detection hough transforms [J]. *Pattern Recognition & AI*, 2004, **17**(1):72-76.  
蔡晋辉, 蒋庆, 周泽魁, 等. 圆检测 HOUGH 变换的改进算法研究[J]. 模式识别与人工智能, 2004, **17**(1):72-76.
- [9] CUI Ji-wen, TAN Jiu-bin. Fast circle contour detection technique based on hough transformation with sampling restraint [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, **37**(10):1394-1396.  
崔继文, 谭久彬. 基于约束抽样 Hough 变换的圆轮廓快速检测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(10):1394-1396.
- [10] SOODAMANI R, LIU Z Q. A fuzzy hough transform approach to shape description [J]. *International Journal of Image and Graphics*, 2002, **2**(4):603-616.
- [11] BASAK J, PAL S K. Theoretical quantification of shape distortion in fuzzy Hough transform [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, **154**(24):227-250.

## Boundary Recognition of an Aperture Based on Fuzzy Fast Hough Transform

SUN Hui-xian, ZHANG Yu-hua, LUO Fei-lu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract:** A new fuzzy fast Hough transform is proposed to detect the circular boundary of Labyrinth disc aperture in an aeroengine. In the new algorithm, the circle detection problem is decomposed into two stages consisting of a 2D Hough transform to find circle centre and a 1D Hough transform to determine the radius. The 2D Hough transform performs a hierarchical approximation to the solution, starting from a coarse description of the parameter space. The coarse-to-fine search technique is used to reduce the computing and storage requirements of the Hough transform. And, the fuzzy vote technique is adopted to lessen the uncertainty that arise from edge pixel position error and gradient direction error. The circular contour detection results by the proposed algorithm are compared with the results by Standard Hough Transform and Randomized Hough Transform respectively. The experimental results show that the fuzzy fast Hough transform can detect the contour quickly and accurately.

**Key words:** Computer vision; Aperture of Labyrinth disc; Boundary recognition; Fuzzy fast Hough transform



**SUN Hui-xian** was born in 1980. Now he is currently working towards the Ph. D. degree in instrumental science and technology at NUDT, and his research interests focus on computer vision and pattern recognition.



**LUO Fei-lu** was born in 1946 and received his Ph. D. degree in 1984 from Tsinghua University. Now, he is a professor in National University of Defense Technology, and his research fields focus on Non-Destructive testing and digitize measuring and testing technique.