

# 基于 Radon 变换与灰度重心法的环形目标直径测量方法

郭延杰 白福忠 张铁英 武建新 徐刚

内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051

**摘要** 为了提高传统接触式测量方法的测量效率并避免人为误差的影响,同时克服机器视觉中常用的 Hough 变换圆检测算法计算量大以及不适用于同心圆检测的情况,提出一种新的视觉测量方法用于实现环形目标直径测量。该方法通过阈值分割与边缘检测得到物体的轮廓图像,进行轮廓 Radon 变换,得到包含四条光带的处理结果并反映了所有方向角上环形目标直径的测量数据,利用灰度重心法提取光带中心线,进而根据中心线之间的距离计算出环形目标直径。仿真与实验表明,所提方法测量结果科学可靠,拥有较高的测量精度,能够实现同心与偏心目标直径的自动非接触测量,将具有很好的工程应用价值。

**关键词** 机器视觉;直径测量;Radon 变换;灰度重心法

中图分类号 TP391.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081501

## Ring Object Diameter Measuring Method Based on Radon Transform and Gray Gravity Algorithm

Guo Yanjie Bai Fuzhong Zhang Tieying Wu Jianxin Xu Gang

College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, Inner Mongolia 010051, China

**Abstract** To improve the measuring efficiency and avoid the influence from artificial error in the traditional contact method, and to overcome some limits presented in the Hough transform circle detection algorithm that often uses to machine vision, such as heavy calculation amount and inapplicable to the concentric circles detection, a new vision measurement method to measure the ring object diameter is proposed. The proposed method obtains the contour image of object through threshold segmentation and edge detection. Then the Radon transform to the contour image is executed, and the pretreatment result that includes in four light stripes reflects the measuring data of the ring diameter in the all direction angle. Finally, the central lines are extracted from the light strips with the gray gravity algorithm, furthermore the ring diameters are calculated according the distances between central lines. The simulation and experiment indicate that the proposed method holds scientific and reliable measurement result with higher measuring accuracy. Also, it can realize the automatic and non-contact measurement of concentric and eccentric object diameter and hence will hold good engineering application prospect.

**Key words** machine vision; diameter measurement; Radon transform; gray gravity algorithm

**OCIS codes** 150.3040; 150.1135; 120.1880; 110.2960

## 1 引言

在工程实际中,存在着大量环形零件,其中一部分零件是同心圆环,例如缸体、轴承套、联轴器、长跨度孔类、封隔器、保持架、垫片等,另一部分零件为偏心圆环,例如偏心轮、偏心槽等。对于此类环形零件,内外轮廓直径的测量是一个重要研究内容,并且其精度要求也是零件在装配过程中的一个重要公差参数。

目前环形目标直径测量主要使用接触式测量方法<sup>[1]</sup>,其测量过程繁琐,测量结果受人为因素影响较大,当测量精密零件或柔软材质零件时,测量设备与被测零件直接接触,易造成零件表面磨损。另外,接触式测

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-11; 网络出版日期: 2015-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(61108038)、教育部“春晖计划”(Z2011069)

作者简介: 郭延杰(1989—),男,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail: 562688756@qq.com

导师简介: 白福忠(1979—),男,博士,教授,主要从事光学测试方面的研究。E-mail: fzbaiim@163.com(通信联系人)

量不易应用于大尺寸和微小尺寸零件的测量。随着工业自动化程度要求的提高,接触式测量越来越不能满足工业现场的需求。

近年来,机器视觉以其非接触、测量范围大等特点在无损检测领域发展迅速,并应用于传统方法难以应用的场合。视觉测量圆检测<sup>[2-3]</sup>经常采用 Hough 变换来实现,但是该方法存在的最大问题是计算量大、所需的存储空间大,因而检测效率极低、实时性与便捷性差,有时需要人工设置参数,例如在环形目标直径测量中,需根据先验知识来区分环形目标内外轮廓<sup>[4]</sup>;这种情况下,如果环形目标直径相差较小,Hough 变换算法的计算结果则将存在很大的不确定性。通常,为了得到高精度的结果,需给出较大的直径搜索范围,这样便产生了冗余数据量,从而增加了计算量及存储空间。

本文提出一种基于 Radon 变换与灰度重心法相结合的环形目标直径测量方法,该方法应用轮廓 Radon 变换实现内外轮廓特征点的分离;进一步利用灰度重心法精确提取 Radon 变换结果中光带中心线,最后通过计算中心线之间的距离得到内外轮廓的直径。详细讨论了方法的理论算法步骤,并且对方法的可行性与实际效果进行了仿真分析和实验测试。

## 2 方法原理

### 2.1 利用阈值分割进行目标检测

测量系统所采集到的目标图像只包含目标与背景两个区域,且各自区域内灰度起伏较小;因此使用阈值分割技术便可实现目标检测。利用自适应阈值法计算得到的阈值  $T$ ,然后根据下面公式将采集到的原始图像  $f(x,y)$  转化为二值图像  $B(x,y)$ :

$$B(x,y) = \begin{cases} 1, & f(x,y) < T \\ 0, & f(x,y) \geq T \end{cases} \quad (1)$$

为了进一步消除图像噪声,可依次使用消除粒子和去除空洞算法对二值图像进行形态学滤波处理。

### 2.2 目标图像边缘检测

为了利用 Radon 变换计算环形目标直径,需要进行图像边缘检测。图像边缘是图像中局部强度变化最为显著的位置<sup>[5-6]</sup>,可以使用梯度运算进行提取。梯度幅值按照棋盘距离来计算:

$$|G(x,y)| = \text{Max}(|G_x|, |G_y|), \quad (2)$$

式中  $G_x = B(x,y) - B(x+1,y)$ ,  $G_y = B(x,y+1) - B(x,y)$ 。计算结果中,值为 1 的位置表示轮廓像素。

### 2.3 基于边缘的 Radon 变换

Radon 变换是将图像转换为某个指定角度射线方向上的投影。对于二维图像  $G(x,y)$ ,它在某一个方向上的投影就是该方向上的线性积分<sup>[7-8]</sup>,它沿任意方向角  $\theta$  上的 Radon 变换表示为

$$R_\theta(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} G(u \cos \theta - v \sin \theta, u \sin \theta + v \cos \theta) dv, \quad (3)$$

式中  $\theta$  表示投影方向  $u$  与  $x$  轴之间的夹角,  $\theta \in [0^\circ, 179^\circ]$ ;并且在投影之前需要根据(4)式进行坐标变换:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (4)$$

### 2.4 灰度重心法提取中心线

环形目标边缘的 Radon 变换处理结果为四条光带,为了进一步提高其定位精度,需要精确提取其光带中心线。可以采用的传统方法有细化处理,它是一个剥离像素外层的迭代过程,其处理结果可能会导致光带部分信息的丢失。

光带垂直截面的强度分布一般为高斯型函数,而灰度重心<sup>[9-11]</sup>可以看成是以灰度平方为权值的加权重心,所以本文使用灰度重心法提取光带中心线,以获得更高的定位精度。图像  $R(u,v)$  中目标  $S$  的灰度重心为

$$u_0 = \frac{\sum_{(u,v) \in S} u \times W(u,v)}{\sum_{(u,v) \in S} W(u,v)}, \quad v_0 = \frac{\sum_{(u,v) \in S} v \times W(u,v)}{\sum_{(u,v) \in S} W(u,v)}, \quad (5)$$

式中  $W(u,v)$  为权值。

## 2.5 算法实现

环形目标直径测量算法包括下面五个步骤:

1) 根据(1)式对原始图像  $f(x,y)$  进行阈值分割,得到二值图像  $B(x,y)$ 。

2) 根据(2)式对二值图像  $B(x,y)$  进行梯度运算,得到轮廓图像  $G(x,y)$ 。

3) 针对轮廓  $G(x,y)$  进行 Radon 变换,投影方向  $\theta$  的范围为  $[0^\circ, 179^\circ]$ ,步长为  $1^\circ$ 。每变化一次角度,根据(3)式完成一次投影运算得到  $R_\theta(u,v)$ 。

4) 按列扫描 Radon 变换的处理结果,找到每一列中 4 个极大值的所在位置。将每个极大值所在位置  $\pm 5$  pixel 范围作为灰度重心法计算区域。根据灰度重心公式(5)式分别对这 4 个区域进行计算,逐列扫描完成后得到光带的中心线。

5) 根据中心线提取结果确定环形目标直径。对于任意方向角  $\theta$ ,外面两条中心线之间的距离为外轮廓直径  $D_\theta$ ,里面两条中心线之间的距离为内轮廓直径  $d_\theta$ 。在不考虑粗大误差的情况下,测量结果用均值来计算,即  $D = \sum_{\theta=0}^{179} D_\theta / 180$ ,  $d = \sum_{\theta=0}^{179} d_\theta / 180$ 。

## 3 仿真分析

利用 CAD 软件设计一幅如图 1(a)所示的目标图像,图像大小 512 pixel $\times$ 512 pixel,内外圆直径分别为 300 pixel 和 150 pixel;在水平方向上对称位置  $\pm 5^\circ$  范围内分别设计一个 10 pixel 深的凹槽;并且凹槽边缘  $aehd$  的连线以及  $bfgc$  的连线与目标直径重合。应用所提算法对图 1(a)所示图像进行直径测量,结果如图 1(b)所示。

由图 1(b)可见,在  $[85^\circ, 95^\circ]$  角度范围内,直径测量结果为 280 pixel,其他方向上均为 300 pixel,这与目标图像凹槽位置与大小完全相符。上述数值仿真说明,本文方法应用于环形目标直径测量是可行的,并且具有较高测量精度。

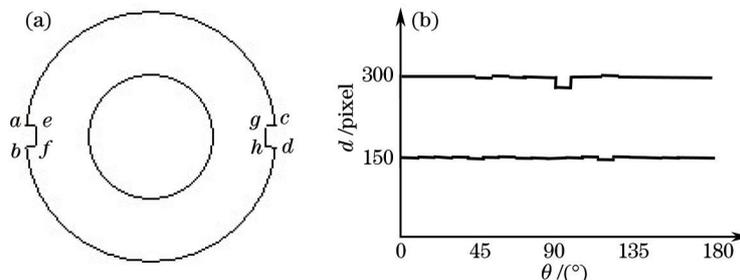


图 1 仿真结果。(a) 目标图像; (b) 直径测量结果

Fig.1 Simulated results. (a) Object image; (b) diameter measuring result

## 4 环形目标直径测量实验

实验使用工业摄像机为空间分辨率 1280 pixel $\times$ 1024 pixel、像元尺寸  $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$  的黑白数字摄像机,标定试样为宽度 100 mm 的矩形物体。根据文献[12]所提方法计算出标定试样图像的宽度为 640 pixel。由此得到测量系统标定参数  $k=0.156 \text{ mm/pixel}$ 。

### 4.1 同心圆环直径测量

同心圆环实验结果如图 2 所示,其中图 2(a)为实验系统拍摄图像的目标检测结果;图 2(b)为边缘检测结果;图 2(c)为图 2(b)的 Radon 变换结果;图 2(d)为基于灰度重心法的光带中心线提取结果。

由图 2(d)中心线提取结果,计算出外轮廓直径  $D=218$  pixel,内轮廓直径  $d=122$  pixel;进一步利用系统标定结果得到轮廓直径分别为 34.008 mm 和 19.032 mm。

实验中使用测量精度高于  $1 \mu\text{m}$  的东京精密公司 Rondcom Touch 圆度测量仪对目标进行测量,结果分别为 35.108 mm 和 17.773 mm;该测量结果与本文结果高度吻合。但是 Rondcom Touch 圆度测量仪为接触式测量,在测量过程中需要准确进行中心对准和倾斜校正,价格昂贵且测量范围有限。而本文方法在能够保证较高精度的基础上,并具有广泛的实际工程应用价值。

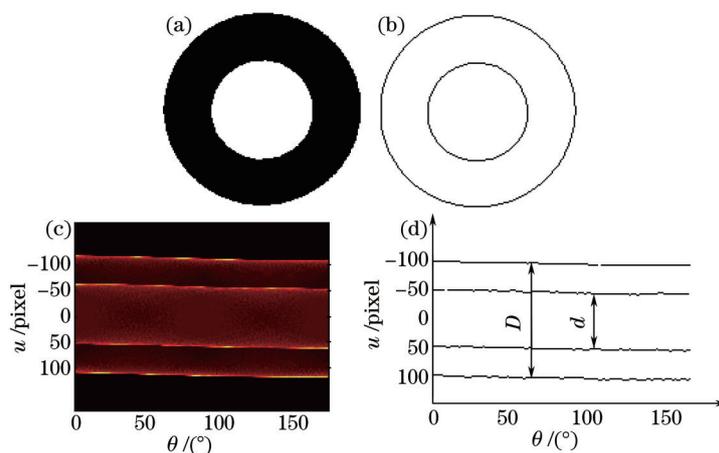


图2 同心圆环实验结果。(a) 目标检测结果; (b) 边缘检测结果; (c) 轮廓(b)的Radon变换结果; (d) 图(c)的中心线提取结果  
Fig.2 Experimental results of concentric ring. (a) Object detected result; (b) edge detected result; (c) Radon transform result of Fig.(b); (d) extracted centerline from Fig.(c)

#### 4.2 偏心圆环直径测量

此外,实验对偏心圆环目标的直径进行了测量。偏心圆环边缘提取图像和中心线提取结果分别如图3(a)和图3(b)所示。所测内外轮廓直径分别为98 pixel和51 pixel。由系统标定结果得到偏心轮内外轮廓直径为15.288 mm和7.956 mm。由实验结果可知,本文方法同样能够应用于非同心的环形目标直径测量场合。

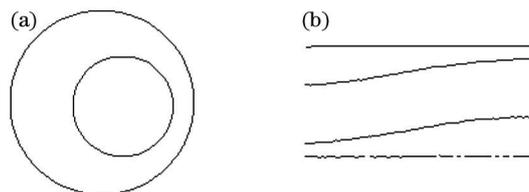


图3 偏心圆环实验结果。(a) 边缘检测结果; (b) 轮廓(a)Radon变换的中心线提取结果  
Fig.3 Experimental results of eccentric ring. (a) Edge detected result; (b) extracted centerline from the Radon transform result of Fig.(a)

## 5 结 论

本文根据轮廓投影的思想提出一种新的环形目标直径的视觉测量方法,该方法将Radon变换与灰度重心法相结合,可以获得环形目标所有方向角上的直径数据,进一步通过数据处理得到科学准确的内外轮廓直径。仿真与实验对所提方法的可行性与性能进行了验证与探讨,结果表明,所提方法能够应用于同心与偏心目标直径测量,并且拥有较高的测量精度。与圆度测量仪的对比实验也说明,所提方法是一种便捷性好、工程实用性强的自动非接触测量方法。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng Haobo. Touch trigger probe measurement accuracy of aspherical mirror during fine lapping process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(8): 228-232.  
程灏波. 精研磨阶段非球面形接触式测量误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(8): 228-232.
- 2 Dimitrios Ioannou, Walter Huda, Andrew Laine. Circle recognition through a 2D Hough transform and radius histogramming [J]. Image and Vision Computing, 1999, 17(1): 15-26.
- 3 Jiang Lian-yuan. Fast detection of multi-circle with randomized Hough transform[J]. Optoelectron Lett, 2009, 5(5): 397-400.
- 4 Hou Junjie, Wei Xinguo, Sun Junhua. Calibration method for binocular vision based on matching synthetic images of concentric circles[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315003.  
侯俊捷, 魏新国, 孙军华. 基于同心圆合成图像匹配的双目视觉标定[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315003.
- 5 Diao Luhong, Yu Bin, Li Hua. A new edge detector based on Fresnel diffraction[J]. Pattern Recognition Letters, 2007 (28): 859-864.

- 6 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao, *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0315001.  
王文峰, 朱书华, 冯以浩, 等. 基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0315001.
- 7 Li Maokuan, Guan Jian. Circle detection algorithm based on conformal geometric algebra and Radon transform[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4): 72-76.  
李茂宽, 关 键. 基于共形几何代数与Radon变换的圆检测方法[J]. *光电工程*, 2010, 37(4): 72-76.
- 8 Kong Huafeng, Lu Hongwei, Hu Donghong. Geometry reature detection of chip based on improved Radon transform [J]. *Computer Engineering*, 2010, 37(4): 210-212.  
孔华锋, 鲁宏伟, 胡东红. 基于改进Radon变换的芯片几何特征检测[J]. *计算机工程*, 2010, 37(4): 210-212.
- 9 Hu Shuling, Wang Xinlong, Sun Yu, *et al.*. Algorithm analysis on extracting the information of central fringe of low-coherence interference image of CMOS camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111002.  
胡姝玲, 王鑫龙, 孙 昱, 等. 基于CMOS相机的低相干图像中心条纹提取的算法分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111002.
- 10 Zhao Bohua, Wang Boxiong, Zhang Jin, *et al.*. Extraction of laser stripe center on rough metal surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2138-2144.  
赵博华, 王伯雄, 张 金, 等. 粗糙金属表面光条中心提取方法[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(9): 2138-2144.
- 11 Wu Jiayong, Wang Pingjiang, Chen Jihong. Method of linear structured light sub-pixel center position extracting based on gradient barycenter[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(7): 1354-1360.  
吴家勇, 王平江, 陈吉红. 基于梯度重心法的线结构光中心亚像素提取方法[J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(7): 1354-1360.
- 12 Zhu Haijiang, Wu Fuchao, Hu Zhanyi. Camera calibration based on two parallel line segments[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, 31(6): 853-864.  
祝海江, 吴福朝, 胡占义. 基于两条平行线段的摄像机标定[J]. *自动化学报*, 2005, 31(6): 853-864.

栏目编辑: 何卓铭