

文章编号: 2095-4980(2020)06-1122-06

## 基于随机抽样与投票策略的缺陷圆检测方法

孔 竣<sup>1</sup>, 郭秀珍<sup>\*2</sup>, 白福忠<sup>1</sup>, 徐永祥<sup>1</sup>

(1.内蒙古工业大学 机械工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2.内蒙古机电职业技术学院 机电工程系, 内蒙古 呼和浩特 010070)

**摘要:** 为了实现缺陷圆圆心与半径参数的检测, 本文提出一种基于随机抽样与投票策略的检测方法。通过在目标轮廓上随机提取三点并由此获得任意两条弦, 计算它们各自对应的垂直平分线的交点。重复上述过程可得到若干候选圆心坐标, 应用投票策略检测出频数最高的坐标值, 得到理想圆心。在此基础上再根据投票策略获取半径参数。仿真和实验结果表明, 本文方法适应性强, 鲁棒性好, 可应用于不同类型缺陷圆检测; 其检测结果准确可靠, 易于实现, 可以满足工程应用需求。

**关键词:** 缺陷圆检测; 随机抽样; 投票策略; 圆形参数

**中图分类号:** TN911.73; TP391.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2019298

## Defect circle detection method based on random sampling and voting strategy

KONG Jun<sup>1</sup>, GUO Xiuzhen<sup>\*2</sup>, BAI Fuzhong<sup>1</sup>, XU Yongxiang<sup>1</sup>

(1.College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia 010051, China;

2.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Technical College of Mechanics & Electrics, Hohhot Inner Mongolia 010070, China)

**Abstract:** To detect the center and radius parameters of defect circle, the paper proposes a detection method based on random sampling and voting strategy. Through randomly selecting three points from the target edge, two arbitrary chords are obtained, and the intersection points of two vertical bisectors are calculated. Several candidate center coordinates are obtained by repeating the above process. By using voting strategy, one can extract the coordinate value holding the highest frequency and so the ideal circle's center is detected. Then the radius parameter is obtained by using the voting strategy again. The results of simulation and experiment show that the proposed method has strong adaptability and robustness and may be applied to different types of defect circle. In addition, it is accurate and reliable, easy to realize, and can meet the requirement of engineering application.

**Keywords:** defect circle detection; random sampling; voting strategy; circle parameters

视觉测量技术是将计算机视觉引入到工业检测, 实现对物体几何尺寸、位置或形貌的精确测量, 是精密测试领域最具有发展潜力的技术。在工业生产中, 工件磨损和产品缺陷也都可以通过视觉测量技术来检测<sup>[1]</sup>。在工业产品中圆形类物体广泛存在; 在摄像机参数标定中, 圆形标志相对其他形状, 以噪声抑制性强、便于识别和提取而被广泛使用<sup>[2-4]</sup>。成像过程中, 因为位姿、遮挡等问题, 圆形目标在图像中会呈现缺陷圆的形状<sup>[5]</sup>。此外, 有些产品也会设计成缺陷圆或非完整圆的形状。因此, 准确检测与缺陷圆最为相似的理想圆的参数有着重要意义。常见的圆检测方法有形心法<sup>[6-7]</sup>、重心法<sup>[8-10]</sup>、拟合法<sup>[11-13]</sup>和 Hough 变换法<sup>[14-18]</sup>。其中, 形心法对轮廓的规则度或平滑程度要求较高。重心法对轮廓区域内噪声非常敏感。拟合法是将轮廓像素坐标带入参数方程, 通过最小化目标函数来找到一组最佳匹配参数, 同样当圆轮廓存在一定的噪声信号时, 严重影响检测精确度。总之, 这三类圆检测方法均对轮廓的完整性和噪声有严格要求, 当圆轮廓存在残缺, 包含一些凹凸区域时, 将产生错误的检测结果, 导致上述方法不再适用。Hough 变换法是一种常用的几何图形检测技术, 是将目标图像转化到变换域进行检测, 图像空间的一个圆对应着参数空间的一簇圆锥相交的一个点, 通过判断交点的

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51765054); 内蒙古自然科学基金资助项目(2016MS0620); 内蒙古工业大学科研项目资助(X201703)

作者简介: 孔 竣(1993-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉。email:jk-junkong@outlook.com

\*通信作者: 郭秀珍 email:guoxiuz@163.com

累积程度完成圆检测。Hough 变换法对噪声不敏感，可用于边缘不连续或缺陷轮廓中，比其他方法的鲁棒性更好。但是 Hough 变换需要三维累积空间，若当轮廓上像素数较多，图像较大时，其计算量和存储量显著增加，因此其实时性较差。根据圆的垂径定理可知，垂直于圆上任意一条弦并且平分弦的直线经过圆心。本文基于这一原理，引入随机抽样<sup>[19]</sup>与投票策略<sup>[20]</sup>的思想，解决缺陷圆检测的问题。由于随机抽样强的鲁棒性，可以有效避免缺陷与噪声的干扰；采用投票策略检测到出现频率最大的候选参数，从而可以保证结果的可靠性。

## 1 缺陷圆参数检测原理与实现算法

### 1.1 圆心检测原理

圆是一种圆对称图形，它的对称中心即圆心。根据圆的垂径定理可知，垂直于弦(圆上任意两点间的线段)并且平分弦的一条直线经过圆心，如图 1 所示。若在圆上选择 3 点  $P_1, P_2$  和  $P_3$ ，连接其中两点产生两条弦  $P_1P_2$  和  $P_2P_3$ ；再经过每一条弦的中点作垂直于自身的直线  $m$  和  $n$ ，则  $m$  和  $n$  交于一点  $C$ ， $C$  即为弧  $P_1P_2P_3$  所在圆的圆心。圆上三点  $P_1, P_2$  和  $P_3$  的坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  和  $(x_3, y_3)$ ，则弦  $P_1P_2$  的垂直平分线的方程为

$$A_1^T X = 0, A_1 = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) \\ 2(y_2 - y_1) \\ (x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

同理，弦  $P_1P_2$  的垂直平分线的方程表示为

$$A_2^T X = 0, A_2 = \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(x_3 - x_2) \\ 2(y_3 - y_2) \\ (x_2^2 - x_3^2) + (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

解上述两直线的齐次方程组

$$A_{1,2}^T X = 0, A_{1,2} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

可得两条直线的交点  $C$  的坐标  $(x_c, y_c)$  为

$$X = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_2 b_1 - c_1 b_2) / (a_1 b_2 - a_2 b_1) \\ (c_1 a_2 - c_2 a_1) / (a_1 b_2 - a_2 b_1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

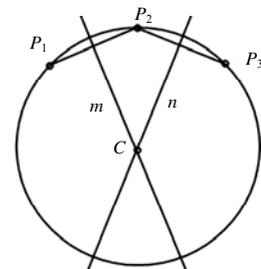


Fig.1 Diagram of center detection principle  
图 1 圆心检测原理示意图

### 1.2 缺陷圆圆心检测原理

对于缺陷圆来讲，从轮廓上提取三点也可根据式(4)计算出一个交点坐标。但由于参与计算的轮廓点可能出现在缺陷部位，这时计算出的交点将与理论圆心存在偏离。为此，提出利用随机抽样来解决缺陷圆检测问题。

通过在目标轮廓上随机提取三点并计算交点坐标。当抽样  $M$  次后可获得多个候选圆心的坐标，记为  $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ 。当缺陷圆的缺陷区域占据圆轮廓较少部分时，采用投票策略统计出现频率最高的候选圆心，即可获得理论圆心  $C_0(x_0, y_0)$ 。

### 1.3 缺陷圆半径检测原理

轮廓上任意一点  $P_i(x_i, y_i)$  与理论圆心  $C_0(x_0, y_0)$  之间的距离为

$$r_i = \|P_i C_0\| = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (5)$$

根据上式计算目标轮廓上所有点与理论圆心之间的距离，同样采用投票策略统计出现频率最高数值，即为缺陷圆的理论半径  $r_0$ 。

### 1.4 缺陷圆参数检测算法

本文根据随机抽样与投票策略实现上述检测过程，算法步骤描述如下：

- 1) 对目标图像进行预处理获取轮廓图像。
- 2) 利用边缘跟踪算法提取轮廓上所有像素的坐标，记为  $P_i(x_i, y_i)$ 。并将它们记录为  $N \times 2$  的二维列数组 POINT，其中  $N$  为轮廓上像素个数。
- 3) 创建二维数组  $C\_all(s_1, s_2)$  并初始化，其中  $s_1$  和  $s_2$  表示图像的长和宽。这里  $C\_all$  也称投票器，用来记录

候选圆心的出现次数。

4) 在 POINT 中随机提取 3 组样本数据, 表示为  $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$  和  $P_3(x_3, y_3)$ 。具体过程为: 随机产生 1 到  $N$  之间的 3 个随机数, 以此为行号在 POINT 中检索对应位置的元素值。由于采用随机抽样, POINT 中的每个元素均有机会被提取。

5) 根据式(4)计算候选圆心坐标  $C_i(x_{ci}, y_{ci})$ , 并进行四舍五入取整(即选票规范化)。

6) 选票统计。首先判断计算的交点坐标是否超出  $C\_all$  的范围, 若超出, 则为无效票, 该坐标值不统计。否则, 根据计算结果让  $C\_all(x_i, y_i)$  的元素值加 1。

7) 重复上述步骤 4)~6)  $K$  次。  $C\_all$  中所有元素投票完毕, 结束投票。

8) 唱票。找出  $C\_all$  中最大元素对应的位置, 记为  $C_0(x_0, y_0)$ , 得到理想圆心坐标。

9) 创建一维数组  $R\_all(r\_num)$  并初始化, 数组大小  $r\_num = \max(s_1, s_2)$ , 用于记录候选半径出现的次数。

10) 根据式(5)计算  $P_i(x_i, y_i)$  与  $C_0(x_0, y_0)$  之间的距离并四舍五入取整, 记为  $r_i$ 。让  $R\_all(r_i)$  元素值加 1。与圆心坐标投票不同, 半径投票无需剔除无效票。

11) 重复步骤 10)  $N$  次, 轮廓上所有像素与圆心之间的距离计算完毕, 结束投票。

12) 找出  $R\_all$  中最大元素对应的位置, 将其记为  $r_0$ , 得到理论半径。

需要指出的是, 上述圆心与半径的投票过程以整像素为单位, 若按照 0.5 像素(或更小)的单位进行投票, 可得到亚像素的检测精确度。

## 2 方法的数值仿真

### 2.1 本文方法有效性验证

在 Matlab 环境下通过数值仿真设计了 8 种缺陷圆轮廓, 其中第一个为标准圆, 其余的缺陷圆是在标准圆的基础上添加了轮廓缺失、轮廓突出或凹陷、边缘不平整、多种轮廓缺陷等情况。图像大小为  $256 \times 256$  像素, 理论圆心为(128,128)像素, 理论半径为 100 像素。应用本文算法对 8 种缺陷圆轮廓进行圆心与半径检测, 检测出的理论圆(虚线表示)及圆心(中央十字线)如图 2 所示, 图 2 中小正方形表示候选圆心位置。图 3 显示了两个目标轮廓(图 2(a)和(g))的圆心投票结果, 也就是投票器  $C\_all$  记录结果的三维显示。由图 3 可见, 投票结果峰值明显, 说明圆心检测结果具有唯一性。图 4 显示了这两个目标轮廓的半径投票结果, 在理论半径 100 像素位置处出现明显的峰值。由此说明, 8 个轮廓图像的圆心与半径的检测方法与理论值完全吻合。

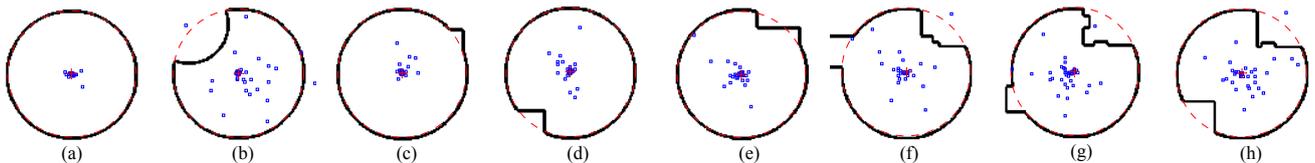


Fig.2 Detection results of ideal and defect circles (the thick solid line represents the outline of a defect circle, the dashed line is a round detection result)  
图 2 模拟缺陷圆轮廓的检测结果(图中粗实线表示缺陷圆轮廓, 虚线为圆检测结果)

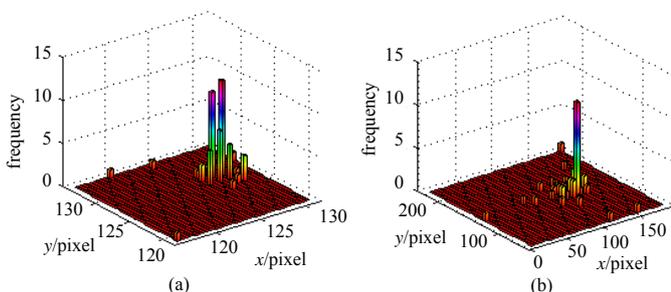


Fig.3 Voting results of centers for two edges as shown in Fig.2(a) and (g)  
图 3 两个目标轮廓(图 2(a)和(g))的圆心投票结果

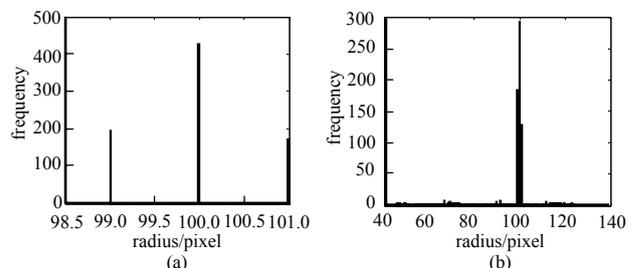


Fig.4 Voting results of radius for two edges as shown in Fig.2(a) and (g)  
图 4 两个目标轮廓(图 2(a)和(g))的半径投票结果

### 2.2 抽样次数分析

本文方法每次抽样时需在目标轮廓上任意提取三点, 基于此, 当缺陷圆轮廓上标准圆弧轮廓上的像素数多于两倍的缺陷部分像素数时, 根据 1.2 节圆心检测原理, 本文方法在一定抽样次数下能够实现缺陷圆检测。图 5 所示缺陷圆的缺陷程度占理想圆的 30%, 该缺陷圆的理论圆心为(128,128)像素。

针对图 5 所示的缺陷圆，分析圆心检测的准确率与抽样次数的关系，结果如图 6 所示。考虑到目前算法使用的投票器为整像素，投票中可能会出现两个或以上相同得票数，故这里定义检测圆心与理论圆心距离小于  $\sqrt{2}$  像素时即认为圆心检测结果正确。此外，若圆心检测结果正确，对于分析的缺陷圆轮廓，必定可以准确可靠地检测出半径，因此这里只需分析圆心检测精确度与抽样次数的关系。图 6 结果显示，随着抽样次数的增加，检测正确率逐渐提高，当达到 25 次时检测准确率达 100%。这一结果说明，在实际操作中所需的抽样次数应大于 25 次。

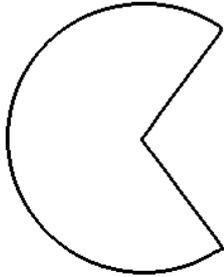


Fig.5 Edge of defect circle with the defect degree of 30%  
图 5 缺陷程度为 30%的缺陷圆轮廓

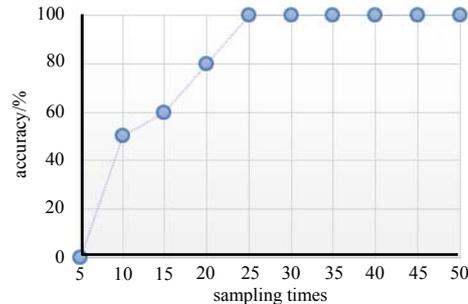


Fig.6 Relationship between detecting accuracy ratio and sampling times  
图 6 圆心检测准确率与抽样次数的关系

### 2.3 三种方法的结果对比

针对图 2(b)所示缺陷圆轮廓，将本文方法与 Hough 圆检测法<sup>[20]</sup>、最小二乘圆拟合法<sup>[11-13,20]</sup>进行比较。模拟计算中所用电脑内存 4 GB，CPU 为 Intel core i5-2450M 2.50 GHz，Window 10 64 bit 操作系统，R2014a 版本 Matlab。三种方法得到的圆心、半径和所用时间显示于表 1，其中本文方法在圆心检测时设定的抽样次数为 30 次。结果显示，对于给定缺陷圆本文方法和 Hough 圆检测法均能实现准确检测，但本文方法在计算效率上明显优于 Hough 圆检测法，因而能很好地用于实时检测。然而，最小二乘圆拟合法因为受缺陷部分数据的影响，出现较大检测误差，不适用于缺陷圆检测。

表 1 三种方法检测结果及所用时间

Table1 Detecting results and time-consuming of three methods

detecting parameters	circle's center/pixel	radius/pixel	time-consuming/s
theoretical values	(128.0,128.0)	100.0	—
proposed method	(128.0,128.0)	100.0	0.917
Hough circle detection method	(128.0,128.0)	100.0	4.453
least square circle fitting method	(133.5,133.5)	94.2	0.358

### 3 工程测量实验

利用视觉测量系统在背光照明条件下分别获得两个环形物体的图像，如图 7 所示，图像大小 770×770 像素。利用 Canny 算子进行边缘检测，得到轮廓图像。由于实验图像对比度高，图像轮廓处灰度具有明显差异，利用 Canny 算子能够准确得到目标轮廓且检测结果不存在断点或不连续。然后使用本文方法对每一个物体的两个轮廓分别进行圆检测。检测结果显示于原图像中，如图 8 所示。结果显示，对于完整圆和缺陷圆的检测结果均与原始轮廓高度吻合。

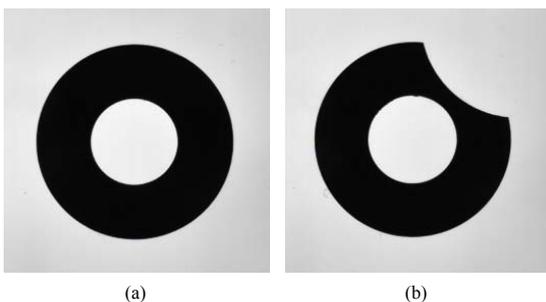


Fig.7 Annular objects images under backlighting illumination  
图 7 背光照明下的环形物体图像

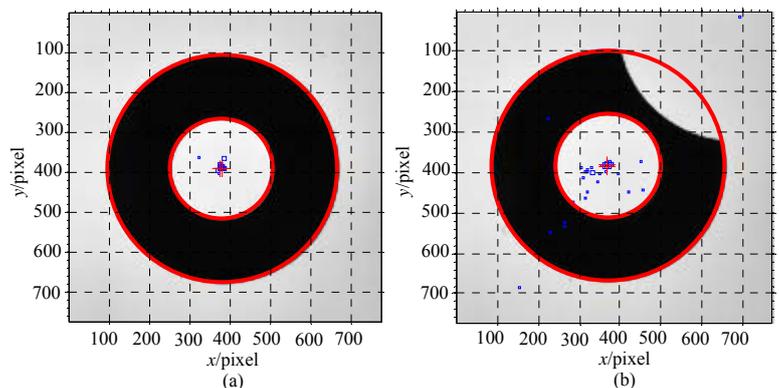


Fig.8 Detection results of experimental images  
图 8 实验图像的检测结果

实验所用视觉测量系统经标定后,从而可获得两个物体内外轮廓的物理尺寸,结果显示于表 2。此外用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺对物体进行多次测量并取平均值,测量得到两个物体的外轮廓半径为 9.06 mm;图 8(a)所示物体的内轮廓半径为 4.00 mm,图 8(b)的内轮廓半径为 4.09 mm。游标卡尺的测量结果与本文方法非常接近,这进一步说明本文方法能够用于实际缺陷圆检测。

表 2 本文方法对两个环形物体的检测结果  
Table 2 Detecting results of two annular objects

experimental images	circle's center/pixel		radius/pixel		radius/mm	
	outer contour	inner contour	outer contour	inner contour	outer contour	inner contour
Fig.8(a)	(379,389)	(378,389)	284	125	9.088	4.000
Fig.8(b)	(369,383)	(369,382)	284	128	9.088	4.096

## 4 结论

本文提出一种基于随机抽样与投票策略的缺陷圆检测方法。通过随机抽样不仅能够避免非圆轮廓(缺陷)部分的干扰,而且能够保证样本数据的抽取不受任何主观因素及其他系统性因素的影响,每个元素都有一定的机会被选中,保证了投票结果的唯一性。仿真与实验结果显示,本文方法可以用于不同类型缺陷圆的检测,检测准确性与理想圆检测结果相同,说明本文方法具有很好的鲁棒性,并且算法简单易行,可以满足工程环境下视觉检测的需求,测量结果稳定可靠且精确度较高。

### 参考文献:

- [1] 尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018,38(8):11-22. (YIN Shibin,REN Yongjie,LIU Tao,et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018,38(8):11-22.)
- [2] 梁春疆,段发阶,杨毅,等. 车辆外廓尺寸计算机视觉动态测量[J]. 光电工程, 2016,43(1):42-48. (LIANG Chunjiang, DUAN Fajie,YANG Yi,et al. A vehicle outer contour dimension measuring method based on computer vision technology[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016,43(1):42-48.)
- [3] 徐芳,刘晶红,曾冬冬,等. 基于视觉显著性的无监督海面舰船检测与识别[J]. 光学精密工程, 2017,25(5):1300-1311. (XU Fang, LIU Jinghong,ZENG Dongdong,et al. Detection and identification of unsupervised ships and warships on sea surface based on visual saliency[J]. Optics and Precision Engineering, 2017,25 (5):1300-1311.)
- [4] 罗海波,许凌云,惠斌,等. 基于深度学习的目标跟踪方法研究现状与展望[J]. 红外与激光工程, 2017,46(5):6-12. (LUO Haibo,XU Lingyun,HUI Bin,et al. Status and prospect of target tracking based on deep learning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,46(5):6-12.)
- [5] 王天宇,董文博,王震宇. 基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J]. 红外与激光工程, 2017,46(4):146-153. (WANG Tianyu, DONG Wenbo,WANG Zhenyu. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017,46(4):146-153.)
- [6] 李晓斌,崔清亮,郭玉明,等. 基于形心法的荞麦籽粒三轴尺寸亚像素测量方法研究[J]. 中国农机化学报, 2017(10):54-60. (LI Xiaobin,CUI Qingliang,GUO Yuming,et al. Study on three axis size sub-pixel measurement of buckwheat kernel based on centroid method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017(10):54-60.)
- [7] 何志强,曹彪,张立新. 基于改进最小二乘的缺陷椭圆定位方法[J]. 计算机与数字工程, 2017,45(11):35-39. (HE Zhiqiang,CAO Biao,ZHANG Lixin. A defect ellipse locating method based on least squares[J]. Computer & Digital Engineering, 2017,45 (11):35-39.)
- [8] 孙兴伟,于欣玉,董祉序,等. 激光三角法高精度测量模型[J]. 红外与激光工程, 2018,47(9):154-159. (SUN Xingwei, YU Xinyu,DONG Zhixu,et al. High accuracy measurement model of laser triangulation method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018,47(9):154-159.)
- [9] 王宇. 激光制导武器目标光斑检测系统设计与实现[J]. 电子器件, 2017,40(4):978-982. (WANG Yu. Design and implementation of laser guided weapon target spot detection system[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2017,40(4): 978-982.)
- [10] 范涛,朱青,王耀南,等. 空瓶检测机器人瓶底缺陷检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(9):1394-1401. (FAN Tao,ZHU Qing,WANG Yaonan,et al. Research on detection method of bottle bottom defects based on empty bottle detection robot system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(9):1394-1401.)
- [11] GUO J,YANG J. An iterative procedure for robust circle fitting[J]. Communication in Statistics—Simulation and Computation, 2018,47(11):1-8.

- [12] 刘秉琦,陈一超,黄富瑜. 基于高阶奇次多项式模型的红外超广角图像中心标定[J]. 光子学报, 2018,47(7):61-67. (LIU Bingqi,CHEN Yichao,HUANG Fuyu. Infrared ultra-wide angle image distortion centre calibration method based on high odd-order polynomial model[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(7):61-67.)
- [13] 李晓捷,王佳,耿磊,等. 边缘恢复的大尺寸平面零件测量方法[J]. 红外与激光工程, 2018,6(4):47-55. (LI Xiaojie, WANG Jia,GENG Lei,et al. Measuring method for large size planar parts based on edge restoration[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018,6(4):47-55.)
- [14] 郭延杰,白福忠,刘珍,等. 基于降维 Hough 变换算法的零件同心度误差测量[J]. 激光杂志, 2015,36(7): 27-30. (GUO Yanjie,BAI Fuzhong,LIU Zhen,et al. Part concentricity error measurement based on dimension-reducing Hough transformation algorithm[J]. Laser Journal, 2015, 36(7): 27-30.)
- [15] JIANG L,WANG Z,YE Y,et al. Fast circle detection algorithm based on sampling from difference area[J]. Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 2018(158):424-433.
- [16] BING Z,YANG H. Fast circle detection using spatial decomposition of Hough transform[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2017,31(3):1755006-1-22.
- [17] 陈树越,李建森,黄萍,等. 基于采样约束的随机 Hough 变换圆检测算法[J]. 计算机工程, 2017,43(10):259-263,267. (CHEN Shuyue,LI Jiansen,HUANG Ping,et al. Randomized Hough transform circle detection algorithm based on sampling constraint[J]. Computer Engineering, 2017,43(10):259-263,267.
- [18] 张玲,张永军,何伟,等. 鉴印系统中印章几何参数的计算[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2006,4(3):196-200. (ZHANG Ling,ZHANG Yongjun,HE Wei,et al. Geometry calculation of seal image in the seal verification system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2006,4(3):196-200.
- [19] 陈红,吴成东,陈东岳,等. 基于投票策略的特征点提取[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016,37(2):157-161. (CHEN Hong,WU Chengdong,CHEN Dongyue,et al. Key point extraction based on voting strategy[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2016,37(2):157-161.)
- [20] CHENG Y C. A new method for quadratic curve detection using K-RANSAC with acceleration techniques[J]. Pattern Recognition, 1995,28(5):515-518.

-----  
(上接第 1097 页)

- [10] 许力,李光辉. 基于信任机制的无线传感器网络多协议层入侵检测方法[J]. 传感技术学报, 2019,32(5):739-748. (XU Li,LI Guanghui. Multi-protocol layer intrusion detection method for wireless sensor networks based on trust mechanism[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019,32(5):739-748.)
- [11] 翟继强,马文亭,肖亚军. Apriori-KNN 算法的警报过滤机制的入侵检测系统[J]. 小型微型计算机系统, 2018,39(12): 2632-2635. (ZHAI Jiqiang,MA Wenting,XIAO Yajun. Intrusion detection system based on Apriori-KNN algorithm for alarm filtering mechanism[J]. Journal of Chinese Systems, 2018,39(12):2632-2635.)
- [12] 曹科研,栾方军,孙焕良,等. 不确定数据基于密度的局部异常点检测[J]. 计算机学报, 2017,40(10):2231-2244. (CAO Keyan,LUAN Fangjun,SUN Huanliang,et al. Density-based local outlier detection on uncertain data[J]. Chinese Journal of Computers, 2017,40(10):2231-2244.)
- [13] 熊自立,韩兰胜,徐行波,等. 基于博弈的无线传感器网络入侵检测模型[J]. 计算机科学, 2017,44(z1):326-332. (XIONG Zili,HAN Lansheng,XU Xingbo,et al. Research on intrusion detection of wireless sensor networks based on game theory[J]. Computer Science, 2017,44(z1):326-332.)