

基于改进 Hough 变换算法的圆形零件检测

Circular parts detection based on improved Hough transform algorithm

熊保玉

XIONG Bao-yu

(成都工业职业技术学院, 四川 成都 610218)

(Chengdu Vocational Technical College of Industry, Chengdu, Sichuan 610218, China)

摘要:采用改进 Hough 变换算法对圆形零件进行检测研究。通过基于最小误差对圆形零件图像边缘像素点 70%~80% 随机抽样,减少无关的数据累加性,通过聚类算法避免虚假圆心的出现,利用圆形度判断圆形零件是否合格,给出了算法流程。试验结果表明:改进 Hough 变换算法检测圆形零件的参数值最接近标准值,圆形零件圆形度的不确定度均值为 0.053 3,相比 CNN、HT、RHT、PHT、SHT 分别减少了 35.55%, 32.10%, 26.48%, 18.63%, 8.26%, 测量精度较高。

关键词: Hough 变换; 随机; 聚类; 圆形零件

Abstract: Detection of circular parts is proposed based on improved Hough transform algorithm. 70%~80% of the edge pixels of the circular parts image are randomly sampled based on the minimum error, which reduced the accumulation of irrelevant data. The clustering algorithm is avoided the appearance of false center, and the roundness is judged by the eligibility of actual circular parts, which give the process. The experimental results show that the parameter value of the improved Hough transform algorithm is closest to the standard value, and the average uncertainty of the circular parts were 0.053 3, which is 35.55%, 32.10%, 26.48%, 18.63%, 8.26% lower than CNN, HT, RHT, PHT and SHT, the measurement accuracy is higher than other algorithms.

Keywords: Hough transform; random; clustering; circular parts

圆形是零件最基本的特征之一,如果圆形零件检测效果较差,将影响设备的使用。如面包、沙琪玛等加工使用的圆形刀片精度决定了切割食品的质量,因此提高圆形零件检测精度具有重要意义^[1]。

人工检测效率比较低,而且检测过程中不可靠因素较多,会影响产品质量与成本。接触式传感器检测一般是通过压电、电阻式传感器检测待加工圆形零件上的坐

标实现,需要传感器与圆形零件接触,对圆形零件摆放位置具有严格的要求,灵活性差。非接触式传感器检测一般是通过电容传感器检测待加工圆形零件上的坐标实现,但是检测效果受传感器自身精度影响较大。随着现代信息技术的发展,视觉检测逐渐成为圆形零件检测中应用比较广泛的方法,卷积神经网络(Convolution neural network, CNN)用于零件检测^[2],通过神经网络训练和卷积运算,能够降低运算的复杂度,但对小目标零件检测准确率并不是很高。Hough 变换(Hough transform, HT)检测圆形零件时^[3],通过机器视觉将圆上的点投影到参数空间,通过参数空间即可获得圆形零件特征,但是当参数空间为多维时,计算时间和空间将指数增加。随机 Hough 变换(Random hough transform, RHT),对圆形零件图像边缘点随机采样能够实现多对一变换^[4],减少运行时间,但是如果圆形零件轮廓比较多,随机选取点的概率会降低。点 Hough 变换(Point hough transform, PHT)根据任意两条弦的中线在圆心处相交的理论^[5],将计算空间降维,从而减少了计算复杂度,但检测精度不高。对称 Hough 变换(Symmetry hough transform, SHT)圆检测^[6],利用圆的对称性以及累加半径投票得到圆的参数值,但是选取的半圆非常关键。

为了提高圆形零件检测的效果,试验拟采用改进 Hough 变换(Improved hough transform, IHT)算法,力图快速、准确检测圆形零件,为产品质量深入研究提供理论依据。

1 改进 Hough 变换圆形零件检测

1.1 基本 Hough 变换检测圆心与半径

将圆形零件图像空间的像素用解析形式联系起来,形成参数空间累积对应点^[7-8]。假设圆形零件的方程表示为

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r_0^2, \quad (1)$$

式中:

x_0, y_0 ——圆心坐标;

r_0 ——圆半径, cm。

基金项目:四川省教育厅科研项目(编号:18ZB0046)

作者简介:熊保玉(1980—),男,成都工业职业技术学院高级工程师,硕士。E-mail:xywrr@163.com

收稿日期:2020-07-08

圆形零件图像中任意像素点 (x_i, y_i) 都会在参数空间存在唯一的三维直立圆锥, 计算为:

$$(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 = r^2, \quad (2)$$

式中:

a, b ——参数空间变量。

通过累积投票可以求得该点参数即为圆形零件的位置参数, 圆形零件图像像素点集在参数空间形成三维圆锥面并且交于一点 (a_0, b_0, r_0) , 该点即为圆心位置。但是基本 Hough 变换存在如下缺陷: 如果图像边缘点不清晰, 将错误地找到圆形零件的圆心坐标和半径, 导致检测误差较大; 当圆形零件图像的边缘点较多时, 使用基本 Hough 变换检测圆形零件的圆心坐标和半径计算量指数级增加, 需要大量的处理时间。

1.2 改进 Hough 变换

1.2.1 基于最小误差的随机采样点计算 为了减少计算量, 对圆形零件图像边缘像素点 70%~80% 抽样, 减少无关的数据累加性^[9-10]。设圆形零件图像直径端点边缘随机采样点为 (x_1, y_1) , 同时限定直径取值范围为 $[D_{\min}, D_{\max}]$, 圆形零件图像上直径相对于 (x_1, y_1) 的另外一个端点 (x_2, y_2) , 在以点 (x_1, y_1) 为圆心, 半径为 $[D_{\min}, D_{\max}]$ 的圆环上:

$$D_{\min} \leq \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \leq D_{\max}. \quad (3)$$

从而获得圆形零件参数为:

$$\begin{cases} a_{1,2} = \frac{|x_1 - x_2|}{2} \\ b_{1,2} = \frac{|y_1 - y_2|}{2} \\ r_{1,2} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

对获得的圆形零件参数距离的平方和与半径的平方差计算为:

$$\delta_{i,j} = \left| \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}{2} - r^2 \right|. \quad (5)$$

总随机采样点为 n , 则平均误差计算为:

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum \delta_{i,j}. \quad (6)$$

标准误差计算为:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\delta_{i,j} - \mu_i)^2}. \quad (7)$$

设置一个阈值:

$$\begin{cases} G = \mu_{\min} + k \times \sigma_{\min} \\ \mu_{\min} = \min(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \\ \sigma_{\min} = \min(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \end{cases}, \quad (8)$$

式中:

k ——系数。

对边缘随机采样点进行 σ_i 累计计算得到圆形零件参数数组, 当结果中出现 $\sigma_i < G$ 时, 数组中的最小值即为圆

形零件参数 x_0, y_0, r_0 值, 则认为该圆形零件为候选圆, 由于参与的样本点均为检测出的有效点, 降低了计算复杂度, 提高了计算速度。

1.2.2 虚假圆心排除 通过聚类算法避免虚假圆心的出现^[11-12], 如果存在两个候选圆 X_1 和 X_2 , 圆心分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 半径分别为 r_1 和 r_2 , 假设有边缘点 (x', y') 满足:

$$\begin{cases} x_i - r_i < x' < x_i + \frac{\sqrt{2}}{2} r_i \\ y_i - \frac{\sqrt{2}}{2} r_i < y' < y_i + \frac{\sqrt{2}}{2} r_i \end{cases} \quad i = 1, 2. \quad (9)$$

则视点 (x', y') 为候选圆上的点, 统计候选圆上的边缘点的数量 M , 候选真圆阈值:

$$M_{\min} = \lambda \times 2\pi r, \quad (10)$$

式中:

λ ——比例系数;

r ——候选圆半径, cm。

若 $M > M_{\min}$ 则当前候选圆为真圆, 否则为假圆。 λ 可根据计算精度设定, λ 越小, 计算速度快但精度低, λ 越大, 计算速度慢但精度高, 综合考虑, 选取 λ 区间为 $[0.95, 1.05]$ 。

对候选圆的周围像素数量候选^[13], 并从中获得候选圆圆心及半径参数 (x_0, y_0, r_0) , 找出所有与该圆近似的候选圆形参数, 将其放在同一类别中, 以获得的各个圆的中心半径的平均值作为最终参数, 公式如下:

$$\begin{cases} a = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \\ b = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} \\ r = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{n} \end{cases}, \quad (11)$$

式中:

x_i, y_i ——圆心的横坐标、纵坐标;

r_i ——半径, cm;

n ——划分类别中圆形参数的个数。

1.3 圆形度计算

圆形度是限制实际圆对理想圆变动量的一项指标^[14-15], 属于圆形零件重要参数, 实际圆形零件的圆形度计算为:

$$e = \frac{4\pi S}{C^2}, \quad (12)$$

式中:

S ——实际圆形零件像素区域面积, cm^2 ;

C ——实际圆形零件像素区域周长, cm。

$e \in [0, 1]$ 值越大实际圆形零件越接近于理想圆。

圆形度属于形状公差, 圆形度误差值不大于相应的公差值, 则认为合格, 即 e 与理想圆的圆形度标准值满

足 e_s :

$|e - e_s| < 0.1e_s$ 。(13)

通过 MATLAB 仿真实现不同圆形的圆形度如图 1 所示。

从图 1 可知,圆形度与圆的大小无关,只与接近理想圆的程度有关,比如 $e_1 = 0.96$,虽然半径比较小,但是相比半径比较大的($e_3 = 0.80$),其产品的圆形度质量较高。

算法流程:① 输入圆形零件图像;② 对圆形零件图像边缘像素点 70%~80%抽样;③ 按式(7)和式(8)获得候选圆形零件;④ 按式(10)和式(11)计算候选圆形零件参数;⑤ 计算圆形度 e ,满足式(13),进行步骤⑥,否则按次品处理;⑥ 输出检测结果。

2 试验仿真

试验计算机配置为 Intel Core i7-7700, 3.6 GHz, 16 GB 内存,通过 Matlab 软件编程实现圆形零件的处理和分析,获得圆心坐标和半径参数。

2.1 性能测试

对圆形零件性能测试涉及到的算法有CNN、HT、

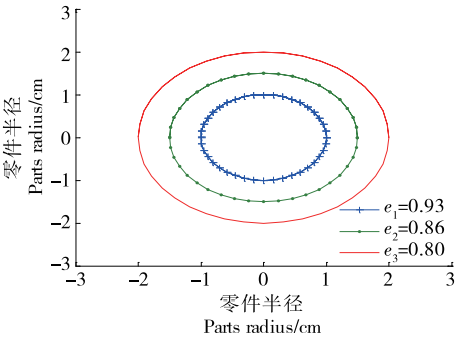


图 1 不同的圆形度
Figure 1 Different roundness

RHT、PHT、SHT、IHT,这些算法与三坐标测量机测量的标准圆形零件数据($a = 60, b = 80, r = 20$ mm)对比分析,10 次测量获得数据如表 1 所示。

从表 1 可以看出,6 种算法中 IHT 的 a 、 b 、 r 平均值与标准值最为接近,测量效果较好。

图 2 给出了不同算法 10 次测量数据与标准数据的

表 1 测量数据
Table 1 Measurement data

来源	CNN			PHT			HT		
	a	b	r/mm	a	b	r/mm	a	b	r/mm
1	59.916	80.111	19.728	59.825	79.605	20.317	60.115	79.575	20.004
2	59.631	79.751	19.631	59.936	80.428	20.488	59.691	80.406	19.805
3	59.619	80.151	19.807	59.933	79.969	20.387	60.255	80.266	20.199
4	59.819	79.721	20.116	59.906	79.905	20.429	60.066	79.827	19.708
5	59.609	79.744	19.503	59.846	80.254	20.308	59.162	79.697	19.092
6	59.869	79.925	19.199	60.003	80.207	19.862	59.686	79.916	19.774
7	60.078	79.652	20.003	60.001	80.063	19.867	60.046	79.488	20.011
8	59.665	80.018	20.103	60.018	79.463	19.592	60.067	79.943	20.077
9	59.625	79.734	20.026	59.944	79.479	19.317	59.833	79.989	19.804
10	60.029	80.254	20.117	59.825	80.099	19.789	60.018	79.963	19.964
均值	59.786	79.906	19.8233	59.924	79.947	20.036	59.894	79.907	19.944

来源	SHT			RHT			IHT		
	a	b	r/mm	a	b	r/mm	a	b	r/mm
1	59.635	80.289	20.136	59.814	79.854	19.894	60.090	79.816	20.012
2	60.128	79.885	20.228	59.696	79.931	19.855	59.946	80.022	19.915
3	59.752	80.138	20.277	60.437	80.115	20.034	60.021	79.991	19.913
4	60.456	79.563	20.234	59.302	79.805	20.043	59.997	80.079	19.916
5	60.199	79.517	19.725	60.298	80.055	20.017	60.078	79.938	19.924
6	59.853	79.957	20.285	60.562	79.737	19.814	60.052	79.954	19.949
7	60.219	80.282	20.229	60.587	80.075	19.984	59.991	79.927	20.058
8	59.695	80.219	19.621	60.326	79.934	19.801	59.904	79.925	19.957
9	59.884	80.219	19.797	59.807	80.172	19.975	60.064	79.916	20.057
10	60.427	79.677	19.732	59.948	79.707	20.074	59.989	80.057	20.085
均值	60.025	79.963	19.979	60.078	79.939	19.959	60.013	79.975	19.988

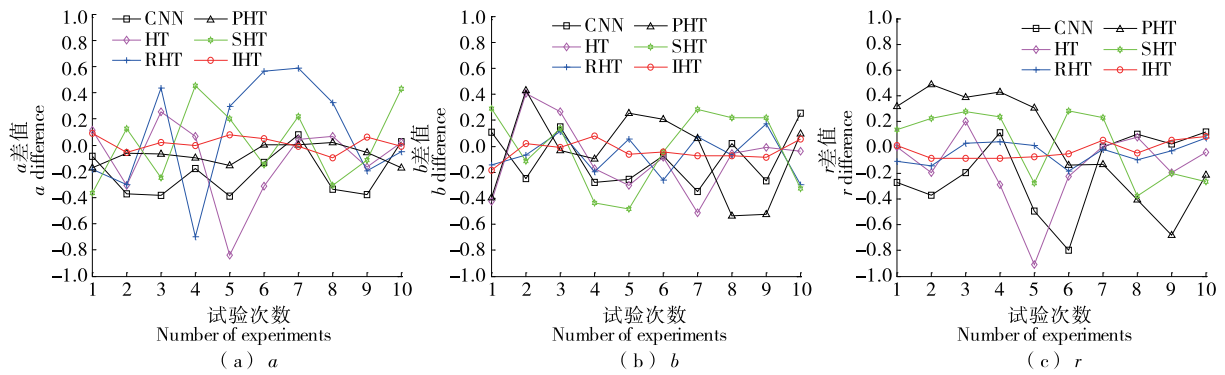


图2 测量差值

Figure 2 Measurement difference

从图2可以看出,IHT算法可以获得比较精确的测量数值,其对 a 、 b 、 r 测量的最大差值分别为0.078,0.057,0.076,相比其他算法最大值都较小,同时差值波动比较平稳,证明了该算法的稳定性较好。

2.2 圆形度的不确定度计算

通过20次蒙特卡罗试验评价IHT、CNN、HT、RHT、PHT、SHT 6种算法的测量精度及有效性,并对圆形零件的圆形度的不确定度进行计算。圆形零件的圆形度通过一次累加生成序列和理想累加序列得到其最大差值 $e_{\Delta\max}$,那么圆形度测量的不确定度 s 为:

$$s = 2.5 \times \frac{e_{\Delta\max}}{\tau\omega}, \quad (14)$$

式中:

$\tau\omega$ —— 测试次数。

s 越小越好,表示测量结果与实际值较接近。不同算法的测量圆形度的不确定度如图3所示。

从图3可知,IHT、CNN、HT、RHT、PHT、SHT 6种算法对圆形零件的圆形度的不确定度均值分别为0.053 3,0.082 7,0.078 5,0.072 5,0.065 5,0.058 1,相比CNN、HT、RHT、PHT、SHT算法,IHT算法分别减少了35.55%,32.10%,26.48%,18.63%,8.26%,测量精度较高。

2.3 消耗时间

完成20次圆形零件的圆形度的不确定度计算,每次消耗的时间如图4所示。

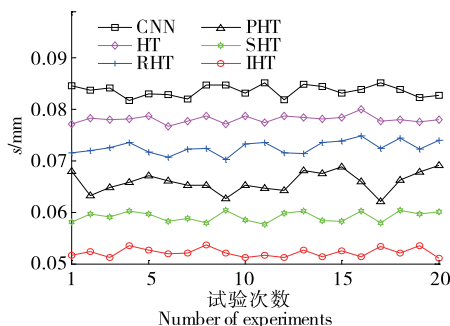


图3 圆形度的不确定度

Figure 3 Uncertainty of roundness

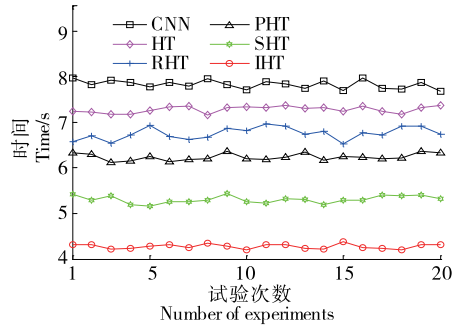


图4 消耗时间

Figure 4 Time consume

从图4可以看出,CNN、HT、RHT、PHT、SHT、IHT算法20次检测所需时间平均值分别为7.795,7.204,6.671,6.262,5.361,4.282 s,IHT算法耗时最少,相比CNN、HT、RHT、PHT、SHT算法的分别减少了45.07%,40.56%,35.81%,35.81%,20.13%,因此采用IHT算法对圆形零件检测具有较好的时效性。

3 结论

(1) 针对圆形零件检测过程中存在的问题,试验提出了一种改进Hough算法的圆形零件检测方法。通过最小误差抽样,聚类算法避免了虚假圆心出现,圆形参数测量数据差值波动比较平稳,说明该方法在圆形零件检测中算法的稳定性较好。

(2) 在圆形零件检测中,存在圆形度偏低情况的出现,建立圆形度判定指标,大大地提高了检测精度。

(3) 研究中如何使得Hough变换与检测正确率建立自适应关系有待进一步改进,这将是今后研究的一个方向。

参考文献

- [1] 王玉源,徐杰,吉卫喜,等. 从特征识别到局部拼接的零件轴承孔在线检测[J]. 食品与机械,2019,35(2): 123-128.
- [2] 王婷,何小海,孙伟恒,等. 结合卷积神经网络的 HEVC 帧内编码压缩改进算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(2): 291-297.

(下转第143页)

- [13] NELLY B, GUSTAV A H. New method for quantitative determination of uronic acids[J]. Analytical Biochemistry, 1973, 54(2): 484-489.
- [14] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [15] 谢静静, 付文鹏, 赵艳雯, 等. 美洲大蠊脱脂膏中总糖和还原糖含量的测定[J]. 食品工业科技, 2019, 40(3): 199-206.
- [16] 黄小兰, 何旭峰, 杨勤, 等. PMP 柱前衍生化 HPLC 法测定地参多糖的单糖组成[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 250-256.
- [17] TRUC C H, ANLEY T K, SARAVANA P S, et al. Green extraction of polyphenolic-polysaccharide conjugates from *Pseuderanthemum palatiferum* (Nees) Radlk: Chemical profile and anticoagulant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 484-493.
- [18] CHEN Chun, ZHANG Bin, HUANG Qiang, et al. Microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Moringa oleifera* Lam. leaves: Characterization and hypoglycemic activity[J]. Industrial Crops & Products, 2017, 100: 1-11.
- [19] XIAO Heng, FU Xiong, CAO Chang-liang, et al. Sulfated modification, characterization, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Sargassum pallidum*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 121: 407-414.
- [20] 孔艳, 棚日翔, 戴梓茹, 等. 近江牡蛎糖胺聚糖降血糖及凝血活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(10): 289-293.
- [21] GAO Han, ZHANG Wen-cheng, WU Ze-yu, et al. Preparation, characterization and improvement in intestinal function of oligosaccharide fractions from okra[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 50: 147-157.
- [22] 郭金英, 朱蓓茹, 任国艳, 等. 发菜胞外多糖硫酸化条件的优化及红外光谱分析[J]. 食品科学, 2016, 37(24): 61-67.
- [23] 王莹, 申秀娟, 张磊, 等. 火炬树芽多糖提取工艺的响应面优化及红外光谱分析[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(9): 96-100.
- [24] 刁毅, 刘涛, 韩洪波. 不同地区地木耳多糖红外光谱与抗氧化活性研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(4): 984-987, 996.
- [25] 马天晓, 尹震花, 张翠利, 等. 流苏子多糖的提取分离、理化性质及体外 α -葡萄糖苷酶抑制活性[J]. 食品工业科技, 2020, 41(24): 64-68, 80.
- [26] IZABELA P, LESZEK C, WITOLD P, et al. Polyphenolic-polysaccharide compounds from selected medicinal plants of *Asteraceae* and *Rosaceae* families: Chemical characterization and blood anticoagulant activity [J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77(3): 568-575.
- [27] LI Shi-jie, XIONG Qing-ping, LAI Xiao-ping, et al. Molecular modification of polysaccharides and resulting bioactivities[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Science and Food Safety, 2016, 15(2): 237-250.
- [28] 卞春, 王振宇, JOHN S, 等. 非肝素类天然抗凝血多糖的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 300-308.
- [29] LI Hong-yan, MAO Wen-juan, ZHANG Xiu-li, et al. Structural characterization of an anticoagulant-active sulfated polysaccharide isolated from green alga *Monostroma latissimum* [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(2): 394-400.
- [30] 崔莹莹, 张剑韵, 张容鹄, 等. 大蒜多糖的体外抗凝血作用及结构分析[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(4): 24-27.
- (上接第 115 页)
- [3] 蒋峰, 罗黎明, 陈建军, 等. 基于改进的 Hough 算法的细胞破碎智能监测计数系统[J]. 计量学报, 2018, 39(6): 902-907.
- [4] 张汝祥, 陈德林, 季江伟, 等. 基于圆对称性和随机选点改进霍夫变换圆检测算法[J]. 科技创新与应用, 2019(14): 47-49.
- [5] 林金龙, 石青云. 用点 Hough 变换实现圆检测的方法[J]. 计算机工程, 2003, 29(11): 17-18.
- [6] 王红茹, 丁文. 一种改进的基于对称性的 Hough 变换圆检测算法[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(6): 121-124.
- [7] 武洪恩, 倪良月, 王凯, 等. 基于 Hu 矩和递进 Hough 变换的 SOT 元件识别定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(8): 4-7.
- [8] 范松, 陈坤, 马文庆, 等. 基于多层图像分割 hough 变换的零件定位模型[J]. 中国设备工程, 2019(7): 126-128.
- [9] 安培源, 张华. 基于边缘检测和 Hough 变换的圆定位算法[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 76-81.
- [10] ADEM Kemal. Exudate detection for diabetic retinopathy with circular Hough transformation and convolutional neural networks[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 114(30): 289-295.
- [11] 薛怡宁, 何明棚, 徐川晴, 等. 基于梯度 Hough 变换和 K-medoids 聚类的年轮髓心定位[J]. 电子技术与软件工程, 2019(8): 70-72.
- [12] 苗丹, 卢伟, 高娇娇, 等. 基于聚类与 Hough 变换的交通标志检测方法[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(11): 213-217.
- [13] 龚昕, 张楠. 基于 Hough 变换的圆检测算法的改进[J]. 信息技术, 2020, 44(6): 89-93.
- [14] 申翠香, 张晓宇. 基于量子遗传算法的圆度误差测量研究[J]. 计量学报, 2018, 39(2): 242-245.
- [15] 李刚, 邓岩, 姚禹, 等. 基于改进果蝇优化的机械圆度误差评定研究[J]. 机电技术, 2020(1): 28-32.