

文章编号: 2095-2163(2020)02-0111-05

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

# 基于视觉的核电蒸汽发生器水室堵口圆心定位研究

熊雪琴, 王湘江

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘要:** 在核电蒸汽发生器的大修期间,使用可视机器人代替手动完成蒸汽发生器堵板工作,其中,堵口和螺钉孔圆心定位尤为关键。为了缩短机器人辐照时间和因空间狭小导致视觉相机无法获取全局堵口图片问题,将两者圆心定位转化为先检测局部螺钉孔圆心坐标,再对坐标做圆拟合的方法求出堵口圆心位置,并提出一种基于点坐标的半径法对圆心快速求解。定位过程首先是对相机得到堵口的局部图像进行预处理,经 Hough 变换检测螺钉孔圆心,求螺钉孔圆心构成的三角形边长,依据边长快速求出堵口圆半径,取两点建立圆方程求解堵口圆心坐标,堵口圆心的唯一位置由第三点约束确定。实验表明:该方法在保证精度前提下,有效地检测到水室堵口圆心,对比最小二乘法和弦中点法,检测速度提高 33% 且计算速度稳定。

**关键词:** 快速圆心定位; Hough 变换; 机器视觉; 图像处理

## Vision-based location of water chamber closure center of nuclear power steam generator

XIONG Xueqin, WANG Xiangjiang

(School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang Hunan 421001, China)

**[Abstract]** During the overhaul of nuclear power steam generator, visual robot is used instead of manual to complete the blocking plate work of steam generator, among which the sealing and the center positioning of screw hole are particularly critical. In order to shorten the irradiation time and solve the problem that the visual camera cannot get global taphole image due to the small space, the method is used to find the taphole center position in which the local screw hole center coordinates is detected, subsequently the circle fitting to coordinates is calculated. After that, a kind of the method of the radius based on point coordinates is put forward to solve quickly the circle center, Process is that, first and foremost, the local image obtained by the camera is preprocessed. In order to shorten the irradiation time and solve the problem that the visual camera cannot get global taphole image due to the small space, the method is used to find the taphole center position in which the local screw hole center coordinates is detected, subsequently the circle fitting to coordinates is calculated. After that, a kind of the method of the radius based on point coordinates is put forward to solve quickly the circle center, Process is that, first and foremost, the local image obtained by the camera is preprocessed. Then, use the Hough transform to detect the circle center of screw hole, compute the length of the triangle side formed by the center of the screw hole, quickly solve the taphole circle radius according to side length, take two center circle to construct equation solving the taphole. Finally, the only taphole circle position is determined by the third constraint. The experimental results show that this method can effectively detect the center of water chamber closure under the premise of ensuring accuracy. Compared with the least square method and chord midpoint method, the detection speed increases by 33% and the calculation speed is stable.

**[Key words]** fast center positioning; Hough transform; machine vision; image processing

## 0 引言

为了保证核电站反应堆安全运行,运营商会将蒸汽发生器进行检修工作,安装堵板是蒸发器水室内检修作业的前提条件,要顺利完成检修工作需先确定堵口位置<sup>[1]</sup>。根据核电工业发展趋势,未来,视觉机器人将会取代人工完成堵板安装工作。视觉机器人代替人工作业同样面临高辐射问题,因此需要一套满足定位精度又快速的堵口及螺钉孔圆心的定位算法。根据课题研发小组需求,要想实现机械化自动安装堵板,需要先解决堵口和螺钉孔的视觉定位问题。

核电蒸汽发生器水室内堵口端面的形状信息如图 1 所示,主要由堵口圆孔和紧固用的螺钉孔组成,且堵口圆与螺钉孔圆心所在圆同心。由于实物成像大小与物体距离相机的距离成反比,在空间足够宽敞的情况下,相机感光芯片可以直接获取堵口全局视野图像,对堵口图像做 Hough 圆检测即可得到圆心坐标,但蒸汽发生器水室外形如图 2 所示,上部封闭,内部空间狭小,且堵口圆与螺钉孔圆尺寸差距大,即使能够获取到堵口全局图像,却难以检测到清晰的螺钉孔圆特征,因此采用基于螺钉孔圆心的辅助法定位堵

**作者简介:** 熊雪琴(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向:核电机器人视觉定位研究;王湘江(1972-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:智能材料微位移驱动器的设计与非线性补偿研究、微机电系统非线性系统运动控制、核设施退役工程装备。

**通讯作者:** 王湘江 Email: 1044260021@qq.com

收稿日期: 2019-12-06

口圆心,可以同时得到堵口与螺钉孔坐标。

检测圆形物体位置的常用方法如下:霍夫变换、模板匹配、小波变换方法、梯度矢量流(GVF)模型及最小二乘法,Hough变换圆检测是最常用的圆特征检测方法<sup>[2]</sup>。经典的霍夫变换圆检测算法很容易检测到圆心,何立新等人<sup>[3]</sup>利用经典的Hough变换检测分别对圆形阀门把手的直线段特征和圆形特征进行检测,实验结果表明该方法检测与定位精度达90.7%;许益成等人<sup>[2]</sup>对圆形车灯进行检测,通过对预处理后的图像进行Hough圆识别,该方法对夜间车辆的位置检测效果很好;孙晓敏等人<sup>[4]</sup>首先采用Canny边缘检测检测圆,做非圆筛选后用,用改进的Hough变换检测求取特征圆的半径参数和圆心参数,该方法精度高、实时性好且抗噪性能好。



图1 核电蒸汽发生器水室内部堵口

Fig. 1 Plug in water chamber of nuclear power steam generator

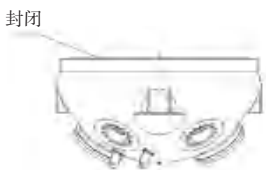


图2 核电蒸汽发生器水室外观

Fig. 2 Appearance of water chamber of nuclear power steam generator

基于多点坐标求圆心的方法中,常用的有最小二乘圆求解法、弦中点法。朱正伟等人<sup>[5]</sup>对Hough圆检测算法进行改进,将图像预处理得到的轮廓点随机抽样,对抽样点的领域内做最小二乘圆拟合,该方法减少了计算量,实现快速检测圆;朱嘉等人<sup>[6]</sup>利用圆心约束对最小二乘拟合法改进,使得短圆弧测量精度高,速度快;王磊等人<sup>[7]</sup>提出的基于弦中点Hough变换的同心圆检测方法,对像素点进行弦中点和半径参量累加统计,得到最终检测圆的圆心和半径,使计算过程简化。谭永<sup>[8]</sup>改进了基于最小二乘圆拟合的圆提取方法,缩短对特征目标的提取时间。

高精度的最小二乘拟合法,是对一些列点的误差和的偏导求极值,计算量庞大;弦中点法计算方法复杂,为了减少机器人辐照时间和提高系统实时性,

本文直接采用Hough圆检测螺钉孔位置,利用检测到的螺钉孔坐标先快速求出螺钉孔位置圆半径 $R$ ,再取两点解方程得到2个圆心 $(m_1, n_1)$ 、 $(m_2, n_2)$ ,经第三点坐标约束,确定唯一圆心坐标,与其他圆求解方法相比,在保证精度的前提下大幅减少圆心检测时间。

## 1 检测与定位方法处理流程

本文提出的核电厂蒸汽发生器水室堵口圆心定位的详细流程如图3所示。其中, $i$ 表示检测到的螺钉孔的数量, $(u_i, v_i)$ 表示螺钉孔端面圆心像素坐标, $(x, y)$ 表示蒸发器水室堵口端面圆心的像素坐标, $R$ 表示螺钉孔位置圆圆心所在圆的像素半径。蒸发器水室内环境恶劣、复杂,在直接进行圆特征检测前一般会先对图像进行预处理,其主要处理步骤如下:

(1)非线性双边滤波:对干扰噪声的去除,同时较好地保持轮廓边缘;

(2)形态学开运算处理:消除细微噪声、在纤小点处分开目标信息、模糊大物体边界、降低分辨率,且较好保留原区域。

(3)自适应阈值化:针对同幅图像上不同部位亮度不一致问题,自动计算每个小区域的最佳阈值。

(4)Hough变换圆检测:直接检测到圆形目标的圆心与半径值。

(5)快速圆心定位:对检测到的螺钉孔坐标计算,快速求解堵口圆心坐标。

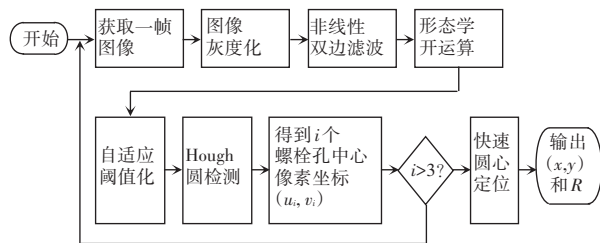


图3 核电蒸汽发生器水室堵口圆心定位流程图

Fig. 3 Flow chart of locating center of sealing circle

## 2 Hough变换圆检测

霍夫变换鲁棒性强,不仅对噪声不敏感,而且还能够检测部分缺失或略微变形的形状。在利用机械视觉对堵口和螺钉孔端面圆心定位的方法中,对螺钉孔端面圆心检测是难点、也重点之一。由于蒸发器水室内环境限制,通过获取堵口局部图像,对其进行Hough变换圆检测,求解其圆心坐标和半径。

Hough变换检测方法中,常用到参数空间与图像空间,在参数空间里,任意一条解析曲线的表达式如下所示:

$$f[(a_1, a_2, \dots, a_n), (x, y)] = 0, \quad (1)$$

其中,  $a_1, a_x, \dots, a_n$  是曲线的特征参数, 将式(1)中特征参数与变量  $x, y$  对换, 则式(1)转化成:

$$g[(x, y), (a_1, a_x, \dots, a_n)] = 0, \quad (2)$$

可以用公式(2)解释图像空间中相同分析曲线上的点由(2)变换, 映射成参数空间的一点, 该点由特征参数  $a_1, a_x, \dots, a_n$  确定。因此, 对参数空间中各参数点的累积值的判断, 可以实现在图像空间中对分析曲线的描述。

假设, 在像空间中, 满足圆性质的点集合  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 可以用其一般式(3)表示:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2, \quad (3)$$

所以, 在参数空间中, 图像空间中的点集的表达式为:

$$(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 = r^2. \quad (4)$$

公式(4)可以解释为, 图像空间中二维点  $x, y$  转换成的立体参数空间圆心点  $(a, b)$  和半径  $r$ , 并且图像空间上的点  $(x_i, y_i)$  与三维空间圆锥面相对应; 满足圆周条件的图像空间中的点在三维参数空间为一个锥面, 因此, 则有如图4所示圆锥表面簇在三维空间形成。

对圆心  $(a, b)$  和半径  $r$  的识别, 需要先创建  $r$  阈值  $(r_{\min}, r_{\max})$ , 在图像空间中, 形成圆的多个点经过等式(4)变换, 以得到参数空间参数  $(a, b, r)$ , 这些圆必定相交于一个点, 即圆心  $(a, b)$ ; 设置变量, 对局部交点处圆的个数统计, 设置三维累加器  $A(a, b, r)$ , 取各个局部最大值  $A_{\max}(a, b, r)$ , 计算得到的  $(a, b)$  为圆心,  $r$  为半径。

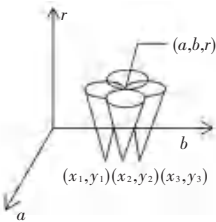


图4 Hough变换参数空间示意

Fig. 4 Hough transform parameter space representation

### 3 基于螺钉孔坐标的堵口圆心快速定位

堵口圆心不能直接检测定位, 以周围螺钉孔中心位置圆与堵口圆同心这一特性为辅助, 对堵口圆心坐标进行计算。如图5所示, 假设 Hough 圆检测到螺钉孔圆心有  $A, B, C$  三点, 坐标分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ , 点  $M(m_1, n_1)$ 、 $N(m_2, n_2)$  为以  $A, B$  点计算得到的圆心,  $C$  为圆心最终定位的约束点。

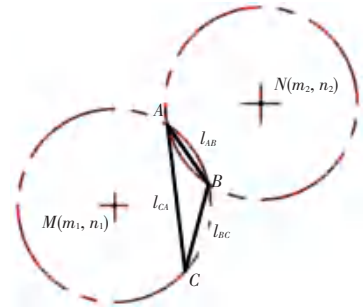


图5 圆心求解示意图

Fig. 5 Schematic diagram for solving the center of a circle

首先, 计算  $AB, BC, CA$  的距离  $l_{AB}, l_{BC}$  和  $l_{CA}$ , 令  $\Delta ABC$  半周长为:  $L = \frac{l_{AB} + l_{BC} + l_{CA}}{2}$ , 由三角形特性运算得到半径  $R$  与半周长关系如式(5)所示:

$$R = \frac{abc}{4\sqrt{L(L - l_{AB})(L - l_{BC})(L - l_{CA})}}, \quad (5)$$

得到螺钉孔中心位置圆半径后, 取其中两点  $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$  坐标, 根据一般情况下圆的数学公式  $(x - m)^2 + (y - n)^2 = R^2$  有:

$$\begin{cases} A \text{ 点圆方程: } (x_1 - m)^2 + (y_1 - n)^2 = R^2, \\ \dots \\ B \text{ 点圆方程: } (x_2 - m)^2 + (y_2 - n)^2 = R^2. \end{cases} \quad (6)$$

这里, 令:

$$C_1 = \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2(x_2 - x_1)}, \quad C_2 = \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}, \quad (7)$$

两式相减得到  $m, n$  的关系式如式(8)所示:

$$m = \frac{x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2}{2(x_2 - x_1)} - \frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}n, \quad (8)$$

$m, n$  关系可用式(9)表达, 继而把式(9)代入  $A$  点圆方程得到以  $n$  为未知量的一元二次方程式(10)。详见如下:

$$m = C_1 - nC_2, \quad (9)$$

$$(C_2^2 + 1)n^2 + (2x_1C_2 - 2C_1C_2 - 2y_1)n + (x_1^2 - 2x_1C_1 + C_1^2 + y_1^2 - R^2) = 0, \quad (10)$$

此处令  $a = C_2^2 + 1, b = 2x_1C_2 - 2C_1C_2 - 2y_1, c = x_1^2 - 2x_1C_1 + y_1^2 - R^2$  根据标准的二次方程求解得到式(11), 代入式(9)得到式(12):

$$n_1 = \frac{-b^2 + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad n_2 = \frac{-b^2 - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (11)$$

$$m_1 = C_1 - C_2 \frac{-b^2 + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

$$m_2 = C_1 - C_2 \frac{-b^2 - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (12)$$

以  $C(x_3, y_3)$  为约束点,判断  $C$  点到圆心  $M(m_1, n_1)$  和  $N(m_2, n_2)$  距离与半径  $R$  的差的绝对值大小,即当  $t > 0$  时取点  $N$  为圆心,否则取点  $M$ 。此时需用到如下数学公式:

$$t = \left\| \sqrt{(x_3 - m_1)^2 + (y_3 - n_1)^2} - R \right\| - \left\| \sqrt{(x_3 - m_2)^2 + (y_3 - n_2)^2} - R \right\|. \quad (13)$$

#### 4 实验结果对比和分析

实验平台搭建如图 6 所示,主要由相机、堵口简化模型及图片数据处理系统组成。相机采用的是魔客仕 UC30,照片取样图像分辨率  $640 \times 480$ ,帧率 60 fps;由于真实的核电蒸汽发生器水室内部图片难以获得,采用图 6 中的特制圆环模拟堵口端面形状;图片数据处理系统是基于 Windows7 的 Visual Studio2015 及 OpenCV3.0。



图 6 实验平台

Fig. 6 The experiment platform

如图 7 所示,随机采取 11 张不同位姿的堵口局部图片进行试验。把这 11 张图片进行 Hough 变换圆识别,对检测到的螺钉孔圆心坐标进行圆心求解,随机选取一张本文提出的半径法识别圆心的快速定位方法检测效果图,如图 8 所示。该方法能够有效拟合出螺钉孔中心位置圆,输出堵口圆心坐标。最

后,将最小二乘圆求解算法和基于弦中点圆求解法与本文提出的快速圆心定位算法进行对比,3 种方法检测的数据结果见表 1。表 1 中,坐标和  $R$  均为像素值。研究中,比较检测到的圆心坐标和运算时间,可推得先半径法具有可行性和耗时少两个优点,对此可做分析阐述如下。

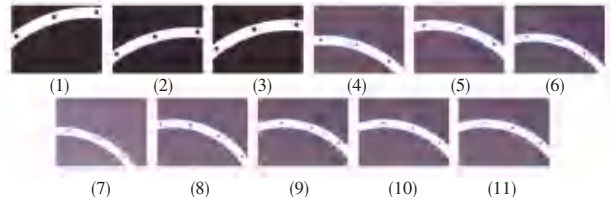
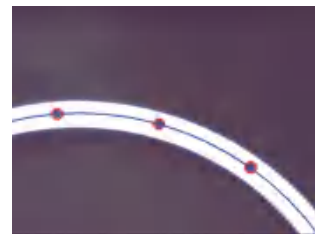


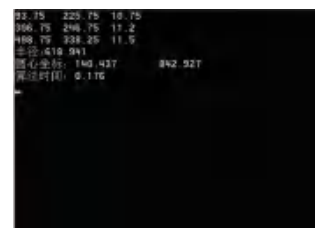
图 7 堵口模型局部随机图像

Fig. 7 Local random image of the plugging model



(a) 检测效果

(a) Detection effect



(b) 计算结果图

(b) Calculation result diagram

图 8 检测效果和计算结果图

Fig. 8 Detection effect and calculation result diagram

表 1 3 种方法检测结果数据

Tab. 1 Test results of three methods

图号	最小二乘法			弦中点法			先半径法		
	堵口圆心坐标	半径 $R$	时间/ms	堵口圆心坐标	半径 $R$	时间/ms	堵口圆心坐标	半径 $R$	时间/ms
1	(185.695 0,791.648)	614.057	170	(185.695 0,791.648)	614.121	197	(185.695 0,791.649)	614.109	174
2	(181.142 0,791.537)	616.858	218	(181.142 0,791.537)	616.109	328	(181.142 0,791.537)	616.858	164
3	(171.470 0,824.531)	649.784	180	(171.470 0,824.534)	648.537	218	(171.470 0,824.533)	649.783	191
4	(116.661 0,788.832)	613.034	215	(113.196 0,794.100)	619.102	229	(113.197 0,794.100)	619.101	169
5	(31.496 5,840.407)	611.251	210	(31.496 5,840.407)	611.251	282	(31.496 5,840.407)	611.251	166
6	(140.437 0,842.928)	618.941	206	(140.437 0,842.928)	618.941	219	(140.437 0,842.927)	618.941	167
7	(139.193 0,864.343)	727.273	194	(139.139 0,864.343)	727.273	179	(139.193 0,864.341)	727.272	177
8	(83.416 9,977.596)	734.665	212	(83.416 9,977.596)	734.665	220	(83.417 0,977.596)	734.664	161
9	(539.272 0,990.288)	856.148	228	(539.272 0,990.288)	856.148	300	(539.272 0,990.287)	856.147	161
10	(552.164 0,1 129.480)	943.827	337	(552.164 0,1 129.480)	943.827	324	(552.164 0,1 129.480)	943.827	172
11	(541.385 0,889.206)	842.550	204	(541.385 0,889.206)	842.55	331	(541.385 0,889.206)	842.550	165
平均耗时/ms	215.818			254.500			169.727		



(1)可行性。假设 $ABC$ 分别表示最小二乘法、弦中点法、先半径法; $j = 1, 2, \dots, 11$ 表示图号,  $(x_{Aj}, y_{Aj}), (x_{Bj}, y_{Bj}), (x_{Cj}, y_{Cj})$ 为第 $j$ 张图用 $A, B, C$ 法检测到的圆心坐标。由于最小二乘法圆拟合算法是一种经典的高精度拟合算法,现已广泛应用在各种场合,以其检测到的圆心坐标为参照,分别计算弦中点法和先半径法检测到的11组圆心距离的和,比较其大小,来分析先半径法的可行性。如式(14)所示:

$$d_1 = \sum_{j=1}^{11} \sqrt{(x_{Aj} - x_{Bj})^2 + (y_{Aj} - y_{Bj})^2},$$

$$d_2 = \sum_{j=1}^{11} \sqrt{(x_{Aj} - x_{Cj})^2 + (y_{Aj} - y_{Cj})^2}, \quad (14)$$

其中,  $d_1$ 为弦中点法与最小二乘法的计算值,  $d_2$ 为先半径法与最小二乘法的计算值。

经计算知  $d_1 \approx d_2 \approx 6.3053$ , 相当于6.3个像素值, 观察数据分布知偏差主要来自图7(4), 去除图7(4)后的数据得  $d_1 \approx d_2 \approx 0.0033$ , 接近于0, 可以认为图7(4)的最小二乘法计算上出现错误, 排除错误后先半径法与最小二乘法检测到的圆心坐标非常接近, 说明数据达到精度要求, 算法可行。

(2)耗时少。如图9所示, 用3种方法对每张图计算时间进行对比, 本文提出的先半径法检测耗时稳定, 除了图7(3), 其余图计算都比最小二乘法和弦中点法耗时短, 对其平均值进行比较, 本文提出的先半径法相对于最小二乘法, 单帧图像在处理速度上提升21.4%, 相对于弦中点法提升了33.3%, 能够在蒸发器堵口定位过程中有效减少机器人受辐照时间。

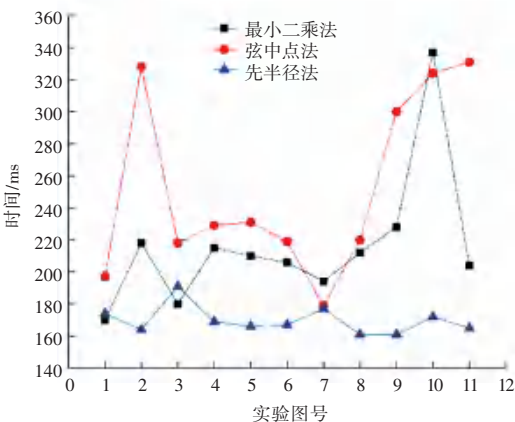


图9 3种方法耗时对比

Fig. 9 Time-consuming comparison of three methods

## 5 结束语

本文提出的快速圆心定位算法, 是基于 Hough 变换检测的圆心坐标基础上求解堵口圆心坐标, 充分利用了三点快速求半径  $R$  的作用, 已知半径  $R$  后只需联立方程求解, 以第三个点做约束, 通过判断圆

心与第三点距离大小确定最终圆心, 而最小二乘圆拟合算法着重于误差较小的高精度拟合, 其对和的偏导计算内容庞大; 基于弦中点的圆心求解需要取 2 个以上的直线方程再联立求解交点, 计算过程复杂。实验证明, 与最小二乘法和弦中点法相比, 证明了本文提出的堵口圆心定位方法可行, 对比前者, 计算速度分别提升 21.4% 和 33.3%, 且单张图像计算耗时稳定, 能够在实际应用中大大减少机器人在核电蒸汽发生器内受辐照时间。

## 参考文献

- [1] 张志强, 谢世宇. CPR1000 型核电机组蒸汽发生器承压堵板拆卸与辐射防护[J]. 辐射防护通讯, 2018, 38(2): 6.
- [2] 许益成, 谭文安, 陈丽婷. 基于 Hough 变换检测前大灯的夜间车辆检测[J]. 控制工程, 2018, 25(8): 1360.
- [3] 何立新, 孔斌, 杨静, 等. 基于特征分解与组合的圆形阀门把手的检测与定位[J]. 计算机科学, 2016, 43(4): 284.
- [4] 孙晓敏, 朱晓春, 周雯超, 等. 基于 Hough 变换实现圆的快速检测方法[J]. 制造业自动化, 2018, 40(5): 115.
- [5] 朱正伟, 宋文浩, 焦竹青, 等. 基于随机 Hough 变换改进的快速圆检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(7): 1978.
- [6] 朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于圆心约束最小二乘圆拟合的短圆弧测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2486.
- [7] 王磊, 陈临强. 基于弦中点 Hough 变换的同圆心检测方法[J]. 计算机应用, 2009, 29(7): 1937.
- [8] 谭永. 双目视觉水下目标物定位与跟踪技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [9] 宦海, 张震. 基于 Hough 圆卷积分变换的孔组检测[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(9): 3301.
- [10] 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): 593.
- [11] 焦圣喜, 肖德军, 阚一凡. 霍夫变换算法在圆心视觉定位中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(14): 4089.
- [12] QIAO Naosheng, XIAO Kang, WEI Chao. PCB photoelectric image circle detection based on improved Hough transform[J]. Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering, 2018, 11(4): 457.
- [13] YAO Zhenjie, YI Weidong. Curvature aided Hough transform for circle detection[J]. Expert Systems With Applications, 2016, 51: 26.
- [14] 李伟峰. 成捆圆钢端面视觉定位系统研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017.
- [15] ZHANG Yu, TIAN Xiaobo, LIANG Rongguang. Random two-step phase shifting interferometry based on Lissajous ellipse fitting and least squares technologies[J]. Optics express, 2018, 26(12): 15059.
- [16] YANG Dingli, BAI Qiuchan, ZHANG Yulin, et al. Eye location based on Hough transform and direct least square ellipse fitting[J]. Journal of Software, 2014, 9(2): 319.
- [17] 谈继勇, 洪洪, 赵涛, 等. 基于改进 Camshift 的蒸汽发生器堵板螺栓视觉定位研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(21): 62.
- [18] 张静, 何明一, 戴玉超, 等. 多特征融合的圆形交通标志检测[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(2): 226.
- [19] 桑孟雷. 基于机器视觉的圆形工件位姿估计[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.