

基于边缘检测和 Hough 变换的圆定位算法

安培源¹, 张 华^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学能源工程学院, 杭州 310007)

摘 要: 为了解决机器视觉系统对具有小直径特征的多圆进行定位时计算量过大、效率低下和检测精度过低的问题,提出一种基于边缘检测和 Hough 变换的圆定位改进方法。首先,针对 Canny 算法进行边缘检测时对图像平滑处理过度,且对无关瑕疵点削弱能力差的缺点,采用改进的中值滤波代替高斯滤波,增加 45°和 135°方向来计算梯度幅值,通过最大类间方差法自动选取阈值。改进的 Canny 算法能有效去除细小瑕疵并完整保存孔位边缘。其次,在边缘检测的基础上用 Hough 变换对圆进行定位,对像素点采取 75% 的抽样,同时限定检测圆的直径范围,减少累积次数。实验结果表明,检测精度可达 0.06 mm,能够满足工业现场检测要求。

关键词: 机器视觉; 中值滤波; 改进 Canny 算法; Hough 变换

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2018)09-0593-06

0 引 言

图形识别是图像处理和模式识别领域的一个重要问题,圆形的识别和位置检测是机器视觉常见的问题之一,广泛应用于工业测量。目前机器视觉中检测圆形算法主要有标准 Hough 变换算法及其优化算法。但是由于标准 Hough 算法使用三维空间参数累积的方法,数据量大,大量占用计算内存,运算速度较慢。针对这一缺陷 Xu 等^[1]提出了随机 Hough 变换算法,通过随机采样三个非共线的边缘点进行累积得出圆的位置参数,对复杂图像进行处理时,由于该方法大量引入无关样本点,造成计算量过大。目前一些改进算法^[2-7]主要对 Hough 变换进行降维处理,以减少计算量。陈珂等^[6]提出了以线段为投票主体的一维概率 Hough 变换,对标准 Hough 变换进行了降维处理,但是其对于半径小于 8 像素的圆较难捕获。Manznaera 等^[7]通过估计灰度图像中的曲率导数,对所有像素进行投票,通过 Hough 变换直接计算相关参数,不需要计算轮廓即

可得出圆孔相关位置参数。但当圆孔有瑕疵时,该算法也会对瑕疵点进行投票,得到无关参数,影响检测结果的准确性。相关文献^[8-10]对预处理阶段的边缘检测算法进行了优化,减少干扰噪声提升检测精度。陈小艳等^[8]提出在 Canny 边缘检测后过滤图像边界的方法来提升 Hough 变换的检测效率,但并没考虑 Canny 算法自身的缺点。刘可平等^[9]针对传统 Canny 算法的缺点,提出了用双边滤波代替算法中的高斯滤波,该方法能够有效去除干扰并保留边缘信息,但当边缘有瑕疵时,该方法也会提取瑕疵边缘,对检测结果造成影响。以上文献多是对大直径少量圆进行研究,在对小直径多圆进行检测时,由于圆直径小数量多,这些基于提取圆特征的改进算法并不适合,且计算量大。

本文主要对机器视觉系统中圆检测算法进行研究和改进,提出了基于边缘检测和 Hough 变换的圆定位算法,该算法可运用于小直径多圆的检测场合。首先对传统 Canny 边缘检测算法相关步骤进行改进,削弱无关瑕疵点对检测结果的影响,并完整提取

收稿日期: 2018-03-14 网络出版日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1609205,51675488,51307151);浙江省自然科学基金项目(LY18E070006,LY18E050016);浙江省公益技术研究项目(2017C31036)

作者简介: 安培源(1990-),男,河南许昌人,硕士研究生,主要从事机电控制及其自动化方面的研究。

通信作者: 张 华, E-mail: zhanghua@zstu.edu.cn

出孔位边缘;在此基础上,对边缘像素点采取 75% 的抽样并限定检测圆直径,以提升 Hough 变换圆检测的效率。将算法应用在具有多圆小直径特征的牙刷头上,以验证其有效性。

1 Canny 算法的改进

传统 Canny 算法能较好地去除图像噪声并提取出图像边缘,但在相机采集图像的过程中,由于受到各方面的影响,传统 Canny 算法存在以下缺陷: a) 高斯滤波对图像平滑处理过度,丢失部分边缘信息。b) 采用 2×2 邻域求解梯度容易将噪声提取为边缘。c) 人为设定高、低阈值具有较大的随机性,自适应能力较差。这些缺陷影响了 Canny 算法边缘提取的效果,进而影响圆检测结果的准确性。本文从滤波方法、梯度计算和阈值选取三方面对传统 Canny 算法进行改进。

1.1 采用中值滤波替换高斯滤波

传统 Canny 算法采用高斯滤波对图像进行滤波处理,难以在去噪和保边取得好的平衡,这个缺点普遍存在于线性滤波器中。故本文采用非线性滤波器中的中值滤波^[11]对图像进行滤波处理。

中值滤波采用像素点领域灰度值中的中值替代该像素的灰度值,在去除噪声的同时又能保留图像边缘细节。但是传统中值滤波会对每个像素点进行滤波处理,造成边缘像素点在滤波后变得模糊。故本文引进边缘点判断机制解决该问题,以像素点 $A(x, y)$ 为中心选取十字领域的 4 个像素,设 T 为阈值, $f(x_i, y_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 为邻近 4 像素灰度值, $f(x, y)$ 为中心像素灰度值, s 为中心像素与边缘像素灰度值相似个数。具体实现步骤如下:

- 计算 $d = |f(x_i, y_i) - f(x, y)|$, 若 $d < T$, 转 b);
- s 加 1, 若 $a < s < b$ ($a=1, b=4$), 转 c); 否则转 d);
- 判定该点为边缘像素点, 输出像素值 $f(x, y)$;
- 判定该点为噪声点或不是边缘像素点, 进行中值滤波, 输出滤波后的像素值 $f'(x, y)$ 。

1.2 改进的梯度计算方法

传统 Canny 算法采用 2×2 的邻域对含有较强噪声的图片进行梯度计算时,检测时会引入无关边缘并丢失边缘细节,所以本文采用 3×3 邻域求解梯度幅值。为了使边缘能够进行多方向的检测,在原算法的基础上增加了 45° 方向和 135° 方向进行梯度

幅值计算。首先计算图像 $G(x, y)$ 各个方向的一阶偏导数:

$$\begin{cases} M_x(x, y) = G(x+1, y) - G(x-1, y) \\ M_y(x, y) = G(x, y+1) - G(x, y-1) \\ M_i(x, y) = G(x-1, y+1) - G(x+1, y-1) \\ M_j(x, y) = G(x+1, y+1) - G(x-1, y-1) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $M_x(x, y)$ 为 x 方向偏导数, $M_y(x, y)$ 为 y 方向偏导数, $M_i(x, y)$ 为 45° 方向偏导数, $M_j(x, y)$ 为 135° 方向偏导数。然后,分别求出水平方向和垂直方向的差分:

$$\begin{cases} M_H(x, y) = M_x + \frac{M_i + M_j}{2} \\ M_V(x, y) = M_y + \frac{M_i + M_j}{2} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $M_H(x, y)$ 为水平方向差分, $M_V(x, y)$ 为垂直方向差分。最后分别求得梯度幅值 g 和梯度方向 θ :

$$g = \sqrt{M_H(x, y)^2 + M_V(x, y)^2}, \theta = \arctan \frac{M_H(x, y)}{M_V(x, y)}.$$

对梯度幅值在梯度方向上进行非极大值抑制,将局部最大值之外的所有梯度值抑制为 0,保留所有可能是边缘的像素点。

1.3 阈值的改进算法

传统 Canny 算法阈值由人工设定,难以获得良好的边缘效果,采用最大类间方差法^[12]进行改进,使其能够自主选取最高阈值。设图像 $G(x, y)$ 总像素为 N ,灰度等级为 $[0, L-1]$,灰度等级 i 对应的像素数为 N_i , t 为目标与背景的分割阈值,则背景类像素灰度值在 $[0, t]$ 内,目标类像素灰度值在 $[t+1, L-1]$,设 $u_0(t)$ 为背景灰度均值, $u_1(t)$ 为目标灰度均值,则

$$\begin{cases} u_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t (i \cdot P_i)}{w_0(t)} \\ u_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} (i \cdot P_i)}{w_1(t)} \end{cases} \quad (3)$$

总的灰度均值定义为:

$$u(t) = w_0(t) \times u_0(t) + w_1(t) \times u_1(t) \quad (4)$$

其中: $P_i = \frac{N_i}{N}$; $w_0(t) = \sum_{i=0}^t \left(\frac{N_i}{N} \right)$ 和 $w_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} \left(\frac{N_i}{N} \right)$ 分别为背景像素点和目标像素点所占的比例,且 $w_0(t) + w_1(t) = 1$ 。

图像背景和背景两类像素的类间方差表示为:

$$\sigma^2(t) = w_0(t) \times [u_0(t) - u]^2 + w_1(t) \times [u_1(t) - u]^2 \quad (5)$$

t 在 $[0, L-1]$ 范围内依次取值,使 $\sigma^2(t)$ 取最大时的阈值,即为最优阈值,设为 T_h 。把 T_h 与一个比例因子 n 的积设为低阈值 T_l ,即 $T_l = nT_h$ ($0 < n < 1$),本文设 n 为 $\frac{1}{3}$ 。

2 改进的 Hough 变换圆检测算法

在 Canny 边缘检测的基础上,利用 Hough 变换进行圆孔的定位^[13]。Hough 变换圆检测基本原理^[14]为:把平面内以 (a, b) 为圆心, r 为半径的圆转化到以 a, b, r 为参数的三维空间中,得到如下方程: $(a - x_i)^2 + (b - y_i)^2 = r^2$, 同一圆孔边缘上的每个像素点在参数空间中都对应唯一的圆锥面,这些圆锥面相交于一点,通过累积投票可以求得该点圆参数即为圆孔的位置参数。

传统 Hough 变换检测圆时会检测圆直径从 $0 \sim \infty$ 进行累积,计算量巨大检测效率较低,本文采取限定目标圆直径并对边缘像素点采取 75% 抽样的方法来减少无关累积。设边缘上随机采样点 (x_1, y_1) , 该点为圆直径的一个端点,限定直径的取值范围 $[d_{\min}, d_{\max}]$, 则直径的另一端点 (x_2, y_2) 在以 (x_1, y_1) 为圆心,以 d_{\min} 为小径, d_{\max} 为大径的圆环内,如图 1 所示。

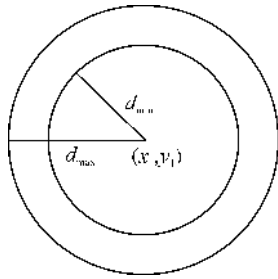


图 1 点 (x_2, y_2) 的范围

通过 Hough 变换进行累加,若 (x_2, y_2) 点在图 2 所在的圆环内,则可确定该点为圆直径的另一端点,可得到圆的参数为:

$$\begin{cases} a = \frac{|x_1 - x_2|}{2} \\ b = \frac{|y_1 - y_2|}{2} \\ r = \frac{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

计算所有抽样像素点可得到数组 $A(a, b, r)$, 对数组进行累加,累加结果中的峰值 (a_0, b_0, r_0) 即为圆孔的圆心坐标和半径。

3 算法流程与实验分析

采用本文算法对植毛孔进行检测的算法流程如图 2 所示,主要步骤为:

- 原图灰度化后进行边缘点判断,对非边缘点进行均值滤波处理;
- 在 3×3 邻域求解滤波后图像的梯度幅值和方向;
- 对梯度幅值进行非极大值抑制,将局部极大值之外的所有梯度幅值抑制为 0,剔除非边缘像素点;
- 最大类间方差法求出的高低阈值对边缘像素点进行检测和连接,将阈值之外的像素点剔除;
- 对抽样像素点在限定检测圆直径范围内进行 Hough 变换圆检测并输出参数。

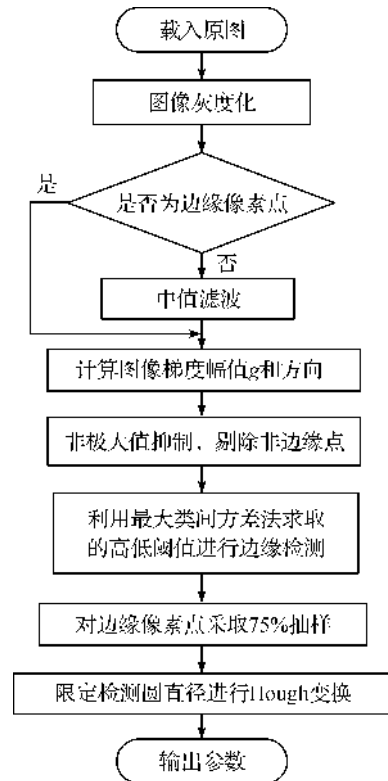


图 2 改进算法流程

为了验证本文改进边缘检测算法的效果,以 VS2010 为实验平台进行模拟仿真,实验用图为 200 万像素的 CMOS 相机在背光源的情况下拍摄的牙刷头图像,图 3(a)和(b)示出两种牙刷头图像,图 3(c)示出瑕疵圆孔。将本文算法与文献[9]的改进算法和传统 Canny 算法进行对比,对比结果如图 3 所示,为突出对圆孔瑕疵的处理,仅示出瑕疵圆的处理结果。可见,图 3(d)中传统 Canny 算法边缘检测引入较多伪边缘,并存在较多噪声;图 3(e)中文献[9]用

双边滤波替代高斯滤波,一定程度上减少了伪边缘,但削弱细小瑕疵的能力较差;图3(f)中本文算法通过对Canny算法进行改进,很好地消除了图像噪声

和圆孔内细小瑕疵,边缘检测清晰,保留了真实边缘。可见本文检测算法检测效果优于传统Canny算法和文献[9]的算法。

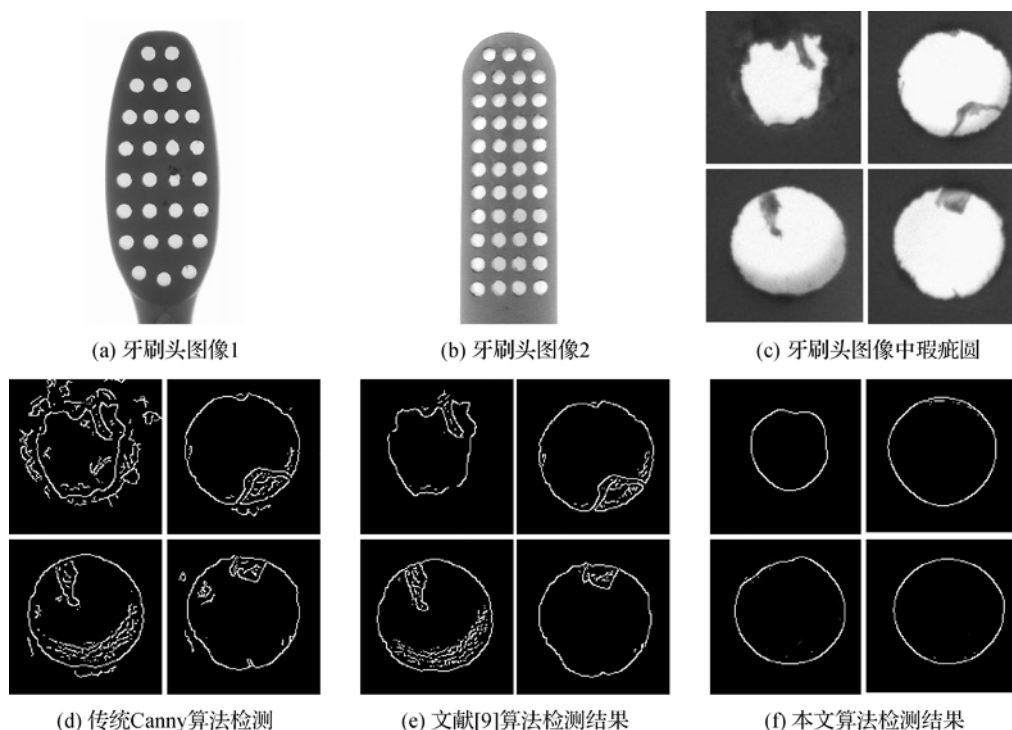
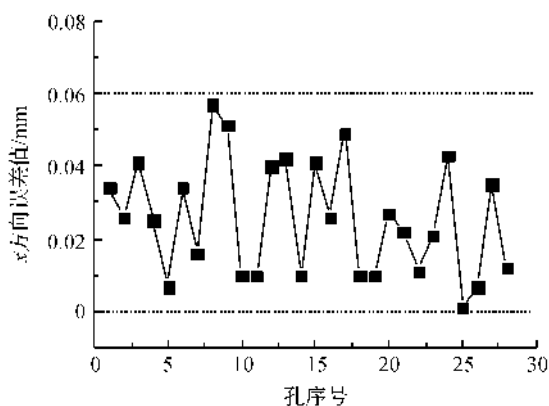


图3 瑕疵圆边缘检测效果图

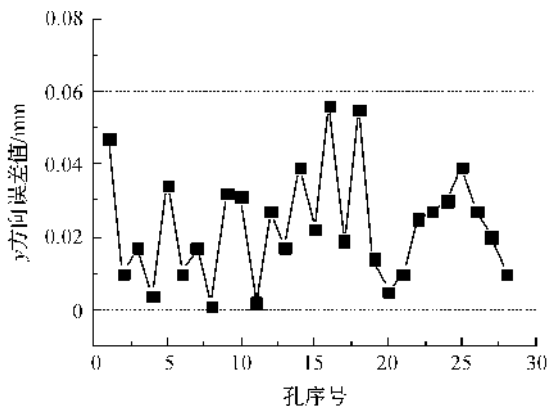
圆孔边缘的提取直接关系到Hough变换圆检测的准确性,为了验证本文改进的边缘检测算法和Hough变换圆检测算法的效果,将本文算法检测结果应用在数控牙刷植毛机系统中。对植毛孔进行识别和定位时,通过图像处理得到的结果是基于像素的,为了得到实际几何尺寸,需要找到两者的对应关系。在标准状态下,取 $d=10\text{ mm}$ 的卡尺作为系统的标定工件,经过图像采集,图像处理获取出标定工件的像素长度为 $d_{\text{pixel}}=160.1690$,即标定系数 $k=d/d_{\text{pixel}}=0.0624$ 。利用求出的标定系数 k 将像素尺寸转化为实际物理尺寸,同时利用人工测量的方式

用三坐标测量仪对图3(a)和图3(b)圆孔进行位置检测。

将Hough变换得到的检测误差与允许误差对比分析如图4所示。图4分别示出两种牙刷头在Hough变换圆检测后植毛孔圆心坐标在 x 方向和 y 方向的误差,图4(c)和(f)示出Hough变换测得圆心位置与真实圆心位置的偏移,从图中可以看出本文算法的检测误差在允许误差范围 $0\sim 0.06\text{ mm}$ 之间,检测精度为 0.06 mm ,可见算法检测结果是合理的,且所用相机的分辨率越高,圆心位置的检测结果越准确。



(a) 图3(a)圆心 x 方向检测误差



(b) 图3(a)圆心 y 方向检测误差

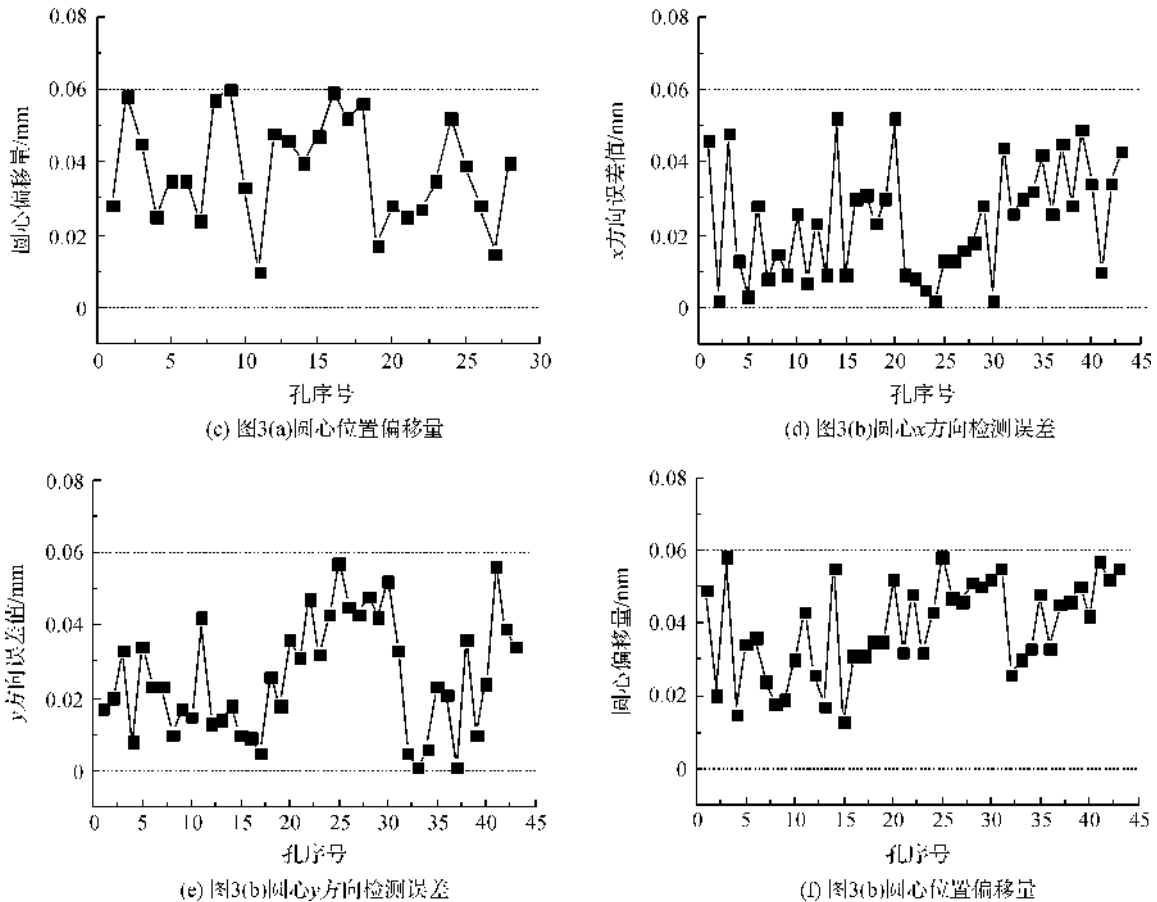


图4 误差对比

4 结 论

本文提出了一种改进的小直径多圆检测算法。通过对传统 Canny 边缘检测算法进行改进提升边缘检测效果;在此基础上利用 Hough 变换寻找抽样像素点在限定直径范围内的最佳累积圆,实现圆孔定位。该方法具有如下特点:a) 适合小直径多圆的检测场合;b) 当圆孔中有细小瑕疵时也能进行圆检测。对两种具有多圆小直径特征的牙刷植毛孔进行检测,结果表明在圆孔内有瑕疵的情况下也能较精确得出圆位置参数,实验结果表明检测精度可达 0.06 mm。

参考文献:

- [1] Xu L, Oja E. Randomized Hough transform (RHT): basic mechanisms, algorithms and computational complexities[J]. Computer Vision Graphic Image Process: Image Understanding, 1993, 57(2): 131-154.
- [2] 叶峰, 陈灿杰, 赖乙宗, 等. 基于有序 Hough 变换的快速圆检测算法[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1105-1111.
- [3] 王宪, 赵前程, 谭建平. 应用区域估计的复杂背景多圆快速定位方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2266-2272.
- [4] 周勇亮, 金燕, 何萍, 等. 随机 Hough 变换圆检测累计加速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4): 574-580.
- [5] 蔡佳, 黄攀峰, 张彬. 基于梯度的区域生长和距离直方图的快速圆检测方法[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 193-202.
- [6] 陈珂, 吴建平, 李金祥, 等. 一维概率 Hough 变换的实时鲁棒多圆检测方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(10): 1832-1841.
- [7] Manznaera A, Nguyen T P, Xu X L. Line and circle detection using dense one-to-one Hough transforms on greyscale images[J/OL]. Eurasip Journal on Image and Video Processing, 2016, 46: 1-18[2016-12-12]. <https://doi.org/10.1186/s13640-016-0149-y>.
- [8] 陈小艳, 王强, 李柏林. 改进的 Hough 变换检测圆方法[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(8): 197-201.
- [9] 刘克平, 李西卫, 隋吉雷, 等. 基于改进 Canny 算法的工件边缘检测方法[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(6): 2022-2029.
- [10] 郑子华, 陈家祯, 叶锋. 基于曲率估计的 Canny 边缘检测算法[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(12): 148-154.
- [11] 宗永胜, 胡晓辉, 张荣光. 一种自适应双阈值中值滤波方法[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(7): 1642-1647.

- [12] 李擎,唐欢,迟健男,等. 基于改进最大类间方差法的手势分割方法研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(4): 528-537. 47(7): 2266-2272.
- [13] 王宪,赵前程,谭建平. 应用区域估计的复杂背景多圆快速定位方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2266-2272.
- [14] Mukhopadhyay P, Chaudhuri B B. A survey of Hough transform[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(3): 993-1010.

Algorithm for circle location based on edge detection and Hough transform

AN Peiyuan¹, ZHANG Hua^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: When machine vision system is used to locate the multiple circles with small diameter, there are some problems such as too large calculation amount, low efficiency and too low detection accuracy. To solve these problems, a circle location improvement method based on edge detection and Hough transform is proposed in this paper. Firstly, to solve the shortcomings such as excessive image smoothing and weak elimination of irrelevant defects by Canny algorithm during edge detection, the improved median filter is used to replace Gauss filter, and the directions of 45 degree and 135 degree are added to calculate the gradient amplitude. The threshold value is automatically selected through OTSU. The improved Canny algorithm can effectively remove small defects and preserve hole edge completely. Secondly, based on edge detection, the circle is located by Hough transform, and the edge pixels are sampled by 75%. At the same time, the diameter range of the circle to be tested is restricted to reduce accumulation times. The experimental results indicate that the detection accuracy could reach 0.06 mm, which can meet the requirements of industrial field detection.

Key words: machine vision; median filter; improved Canny algorithm; Hough transform

(责任编辑: 康 锋)