

基于 Prewitt-Franklin 矩的亚像素边缘检测方法^{*}

丁海涛 杨 帅 孟凡军

(长春理工大学机电工程学院 长春 130022)

摘 要: 针对传统亚像素边缘检测方法中存在效率低、定位精度不足等问题,提出了一种基于 Prewitt 算子与 Franklin 矩融合的亚像素边缘检测算法。所提方法首先通过 Prewitt 算子实现边缘的像素级初定位,继而构建基于 Franklin 矩的亚像素边缘分析模型,利用多阶矩卷积提取边缘特征,结合矩函数的正交性与旋转不变性,建立图像旋转前后矩值关联关系,从而精确计算边缘点的亚像素坐标,并通过改进的判别条件完成边缘点的有效筛选。最后,采用最小二乘法对边缘进行拟合。实验结果表明,喷射口检测的平均误差为 0.002 6 mm,平均检测时间为 0.805 s,并且定位精度更高、抗噪性更强、具有普适性,能够更好地解决图像边缘检测定位精度低及效率慢等问题。

关键词: 亚像素;Franklin 矩;边缘检测;机器视觉

中图分类号: TN29;TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Sub-pixel edge detection method based on Prewitt-Franklin moment

Ding Haitao Yang Shuai Meng Fanjun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and insufficient positioning accuracy in traditional sub-pixel edge detection methods, this paper proposes a sub-pixel edge detection algorithm based on Prewitt operator and Franklin moment fusion. Firstly, the Prewitt operator is used to realize the pixel-level initial positioning of the edge, and then the sub-pixel edge analysis model based on Franklin moment is constructed. The multi-order moment convolution is used to extract the edge features. Combined with the orthogonality and rotation invariance of the moment function, the relationship between the moment values before and after the image rotation is established, so as to accurately calculate the sub-pixel coordinates of the edge points, and the effective screening of the edge points is completed by the improved discriminant conditions. Finally, the least square method is used to fit the edge. The experimental results show that the average error of the jet port detection is 0.002 6 mm, the average detection time is 0.805 s, and the positioning accuracy is higher, the noise resistance is stronger, and the universality is better. It can better solve the problems of low positioning accuracy and slow efficiency of image edge detection.

Keywords: sub-pixel;Franklin moment;edge detection;machine vision

0 引 言

近年来,随着我国制造业迅速发展,基于机器视觉的测量系统应用越来越广泛,并且被测零件检测精度的需求也越来越高^[1-3],在视觉测量系统中,边缘检测的定位精度直接影响零件尺寸的测量准确性。现有常用算法多基于一阶或二阶微分算子,虽广泛应用,但其定位能力受限于像素级分辨率,难以满足高精度测量需求。为此,本文开展亚像素边缘检测方法研究,旨在提升边缘定位精度,进而保障零件尺寸的测量可靠性。

目前亚像素边缘检测方法主要包括插值法、拟合法和矩方法这 3 类。插值法抗噪性差,易影响边缘定位精度;拟合法通过在局部边缘区域构建灰度拟合函数计算亚像素坐标,但函数形式依赖边缘特征,且抗干扰能力有限。而刘利平等^[4]发现矩方法因其抗噪性强、边缘定位精度高而优于插值法与拟合法。基于此认识,构建了三灰度理想阶跃模型,借助矩的旋转不变特性,通过积分运算求解并推导亚像素边缘。而文献[5-8]采用 Zernike 矩解析图像边缘系数来提升边缘定位精度,相较于传统方法,该方法在边缘坐标点定位中具有更优的精度特性。孙建^[9]通过优化模板效应改

进了传统 Zernike 算法,并在此基础上与 Canny 算子想结合,有效提升了边缘提取精度;范沁红等^[10]基于 Zernike 算法的模板结构,通过计算其 9×9 的尺寸模版系数并推导边缘参数表达式,进一步增强了检测精度。

刘月鹏等^[11]通过改进 Zernike 矩的模版参数,并通过 Otus 法改进分割阈值,实现图像边缘的高精度亚像素定位,大减少了检测时间。在 Franklin 矩的应用研究中,吴一全等^[12]虽提出新算法,但发现其对图像边缘细节的提取仍存在不足。与之相比,李锦鹏等^[13]则着重分析了 Franklin 矩因其一次分段多项式结构所带来的内在优势,指出该矩在继承 Zernike 矩高精度与强抗噪性的同时,兼具数据稳定性好、计算效率高的特点,有助于提取更具判别力的边缘特征。李思雨等^[14]针对边缘检测信息微弱,使 Canny 算法与 RCF 网络进行融合,并且采用了 3×3 的领域差分算子,使齿轮中的伪边缘点能够被筛选消除。王岩等^[15]将传统双阈值替换成了 Otus 自适应阈值,提高图像信噪比。

因此,本文提出一种基于 Prewitt 与 Franklin 矩结合的亚像素边缘检测算法。该方法首先采用 Prewitt 算子进行像素级边缘粗定位,初步提取边缘轮廓,然后,运用 Franklin 矩对边缘区域进行亚像素级精定位,并结合改进的判定条件剔除伪边缘点,提升边缘定位精度与鲁棒性。最后,通过将本文算法与其他算法进行对比,验证其优越性能。

1 Prewitt 算子边缘检测原理

Prewitt 算子作为经典的一阶微分边缘检测算子,基于相邻像素的灰度梯度极值响应实现边缘定位。该算子具备固有噪声平滑特性,能够有效抑制部分伪边缘干扰^[16]。Prewitt 算子核心是通过 G_x 和 G_y 方向的两个卷积模板,对图像进行双向空域卷积计算,通过梯度向量合成完成对图像边缘的检测。Prewitt 算子算式如式(1)所示。

$$\begin{cases} G_x = f(x+1, y-1) + f(x+1, y) + f(x+1, y+1) - \\ \quad (f(x-1, y-1) + f(x-1, y) + f(x-1, y+1)) \\ G_y = f(x-1, y+1) + f(x, y+1) + f(x+1, y+1) - \\ \quad (f(x-1, y-1) + f(x, y-1) + f(x+1, y-1)) \end{cases} \quad (1)$$

Prewitt 算子的模版如图 1 所示。Prewitt 算子采用无穷范数来定义梯度幅值,通过模板设计中的控件平均,该过程在频域中等效于对图像实施低通滤波处理,能够有效抑制噪声干扰,因此, Prewitt 算子的降噪优势会影响在边缘的定位精度。

固定阈值的 Prewitt 算子难以适应多变的成像条件,阈值过低会引入伪边缘,影响效率;阈值过高则会导致边缘漏检。因此,本文采用 Otsu 自适应阈值算法,通过分析图像梯度幅值分布动态,计算图像的最大梯度幅值 $G_{\max}$,然后将阈值设定为 $T = k \times G_{\max}$ 。经实验验证,系数 k 优化取值为 0.2,最后确定最佳阈值,适用于高对比度工业图像及纹

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

图 1 Prewitt 算子模板

Fig. 1 Prewitt operator template

理复杂场景。

2 基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测

基于矩函数的亚像素边缘定位方法,通常需先建立边缘的理想阶跃模型,再通过模型解析推导获取定位结果。本文以文献[17]所述理想阶跃模型为理论基础,通过针对性优化矩函数推导过程,进一步提升了 Franklin 矩的边缘定位精度。

2.1 Franklin 函数

Franklin 函数属于 $L2[0, 1]$ 空间,是该空间内的连续正交函数系,其构造过程为:以一组截断幂基为初始基础,通过正交化处理得到,具体形式如式(2)所示。

$$\begin{cases} a_0(x) = 1 \\ a_1(x) = x \\ a_j(x) = (x - a_i)_+, i \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_i = \frac{(2i-1-2')}{2'}$, t 为满足 $2' \leq 2i-1$ 的最大值,

Franklin 函数系 $\{\varphi_n(x)\}$ 由线性无关组 $\{a_n(x), 0 \leq x \leq 1\}$ 通过 Gram-Schmidt 正交化后导出,其前 5 项基函数表达式为:

$$\varphi_0(x) = 1, 0 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

$$\varphi_1(x) = \sqrt{3}(2x-1), 0 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

$$\varphi_2(x) = \begin{cases} \sqrt{3}(1-4x), 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ \sqrt{3}(4x-3), \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{33}(5-38x)}{11}, 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ \frac{\sqrt{33}(26x-11)}{11}, \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi_4(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{231}(5-6x)}{11}, \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \\ \frac{\sqrt{231}(1-12x)}{77}, 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ \frac{\sqrt{231}(36x-11)}{77}, \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{231}(45-76x)}{77}, \frac{1}{2} \leq x < \frac{3}{4} \\ \frac{\sqrt{231}(100x-87)}{77}, \frac{3}{4} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

对于定义在 $[0, 1] \times [0, 1]$ 上的图像 $f(x, y)$, 利用 Franklin 函数中 $\varphi_n(x)$ 和 $\varphi_m(y)$, 其 (n, m) 阶矩可表示为式(8)。

$$F_{nm}(x, y) = \int_0^1 \int_0^1 f(x, y) \varphi_n(x) \varphi_m(y) dx dy \quad (8)$$

为呈现 Franklin 矩在极坐标空间下的正交性与旋转不变性, 本文引入极坐标参数化方法, 将图像函数定义为 $f(r, \theta)$ 。据此, (n, m) 阶 Franklin 矩的表达式为式(9)。

$$F_{nm}(r, \theta) = \frac{n+1}{\pi} \int_0^{\pi} \int_0^1 f(r, \theta) \varphi_n(r, \theta) e^{-im\theta} dr d\theta \quad (9)$$

Franklin 矩基于正交函数系, 其各阶矩分量间具有内在的独立性。这一正交特性避免了信息冗余, 使得能够以更少的矩数量实现图像边缘特征的高效表征, 从而在降低特征维度的同时, 实现了计算效率的提升。

2.2 亚像素边缘坐标点的确定

根据式(9)所示, Franklin 矩具有正交性和旋转不变性。若图像旋转角度 φ 时, 旋转后的矩 F'_{nm} 与旋转前的矩 F_{nm} 之间的关系如式(10):

$$F_{nm} = F'_{nm} e^{-im\varphi} \quad (10)$$

根据式(10)所示, Franklin 矩在图像旋转后具有幅值不变性。基于理想边缘模型与 Franklin 矩参数化建模, 本文通过计算图像的 4 个边缘参数, 经 Otus 阈值筛选实现亚像素边缘坐标的精确定位。如图 2 所示, 边缘检测模型在旋转 φ 角度前后均能有效描述单位圆内的理想阶跃边缘。圆心 O 到分割线 L 的距离为 l , 到两条 Franklin 矩阶跃边缘 ab (n 次) 与 cd (m 次) 的距离分别为 l_1, l_2 。直线 L 将圆划分为背景区与边缘过渡区, 其灰度特征分别为背景灰度 h 和阶跃强度 k 。

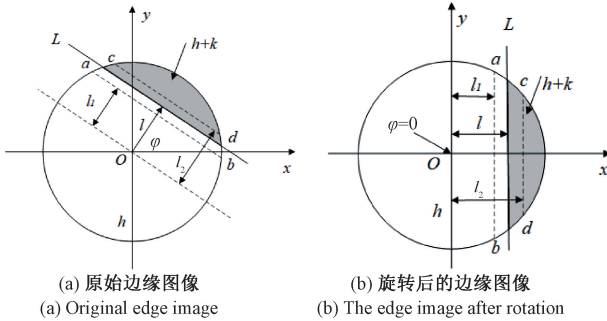


图 2 亚像素边缘检测模型

Fig. 2 Sub-pixel edge detection model

根据式(10)得出, 当 $m=0$ 时, $F'_{n0} = F_{n0}$; 当 $m=n=1$ 时, 得到:

$$F'_{11} = F_{11} e^{-i\varphi} = F_{11} (\cos\varphi - i\sin\varphi) \quad (11)$$

令 $\text{Im}[F_{11}]$ 和 $\text{Re}[F_{11}]$ 分别为 F_{11} 的虚部和实部, 根据式(11)得到:

$$F_{11} = \{\text{Re}[F_{11}] + i\text{Im}[F_{11}]\} \times (\cos\varphi - i\sin\varphi) = \text{Re}[F_{11}]\cos\varphi + \text{Im}[F_{11}]\sin\varphi + i\text{Im}[F_{11}]\cos\varphi - i\text{Re}[F_{11}]\sin\varphi \quad (12)$$

根据图 2 旋转 φ 角度后的模型, 得到 $f'(-x, y)$ 是关于 x 轴对称, 因此可以得到:

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dx dy = 0 \quad (13)$$

根据式(13)得到, $\text{Im}[F'_{11}] = 0$ 代入式(11)得到:

$$\text{Im}[F_{11}]\cos\varphi - \text{Re}[F_{11}]\sin\varphi = 0 \quad (14)$$

因此, 根据式(14)可以求出旋转角度 φ :

$$\varphi = \arctan \frac{\text{Im}[F_{11}]}{\text{Re}[F_{11}]} \quad (15)$$

根据图 2(b) 旋转后的边缘检测模型所示, 在单位圆内得到旋转后图像的各阶 Franklin 矩, 即:

$$\begin{cases} F'_{00} = 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h dx dy + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} (h+k) dx dy = \\ h\pi + \frac{k\pi}{2} - kl \sqrt{1-l^2} - k \arcsin l \\ F'_{11} = \frac{2k(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \\ F'_{20} = \frac{2kl(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{3} \\ F'_{31} = \frac{4kl^2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{5} - \frac{2k(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{15} \\ F'_{40} = \frac{16kl^3(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{15} - \frac{2kl(1-l^2)^{\frac{3}{2}}}{5} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16), 解 F'_{20} 和 F'_{40} 的方程可以得到:

$$l_1 = \sqrt{\frac{5F'_{40} + 3F'_{20}}{8F'_{20}}} \quad (17)$$

根据式(16), 解 F'_{11} 和 F'_{31} 的方程可以得到:

$$l_2 = \sqrt{\frac{5F'_{31} + 3F'_{20}}{8F'_{20}}} \quad (18)$$

根据式(17)和(18)可以得到:

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (19)$$

根据式(19), 解 F'_{00} 和 F'_{11} 的方程可以得到:

$$\begin{cases} k = \frac{3F'_{11}}{2(1-l^2)^{\frac{3}{2}}} \\ h = \frac{F'_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin l + kl \sqrt{1-l^2}}{\pi} \end{cases} \quad (20)$$

根据式(15)、(19)、(20)计算得到 φ, l, k 后, 根据图 2 推导出亚像素边缘检测公式, 即:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + l \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中: (x_s, y_s) 为边缘亚像素点坐标; (x, y) 为圆心坐标。若设定的 Franklin 矩的模版大小为 $N \times N$, 则对图像边缘的亚像素点坐标进行修改, 修改后亚像素边缘检测公式为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{lN}{2} \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (22)$$

Franklin 矩模版具有 3×3 、 5×5 、 7×7 及 9×9 等模版,其中模版过小导致定位精度较差,导致图像边缘漏检,而模版过大会导致检测时间过长。因此,本文采用 Franklin 矩模版为 7×7 ,定位精度较高,计算时间更短,保持计算精度和效率的平衡。

3 边缘检测判定及检测算法流程

针对传统矩方法因全局卷积运算而存在的计算效率瓶颈,本文提出一种改进的边缘检测流程:首先利用 Prewitt 算子对边缘区域进行快速粗定位,在此基础上应用 Franklin 矩方法实现亚像素级边缘精定位,并通过优化边缘点的判定条件,有效减少整体检测时间,在保证精度的同时显著提升运算效率。

传统亚像素边缘检测算法因未引入高阶矩判别,易导致提取的边缘较粗。为此,本文改进了边缘判定条件:首先,依据式(19)和(20)分别计算基于低阶矩的距离参数 l 与阶跃强度 k ;在现有亚像素边缘检测算法中,距离 l 通过式(19)由低阶矩求得,阶跃强度 k 则借助式(20)获取;随后通过 $l > l_i$ 与 $k > k_i$ 的判定条件筛选亚像素边缘坐标点,其中阈值 l_i 与 k_i 由 l 和 k 的矩阵均值计算确定。该算法未引入高阶矩参与判别,导致传统亚像素边缘检测结果存在边缘较粗的问题,为此本文对其边缘判定条件进行了改进。如式(23)所示。

$$\begin{cases} k_i < k \\ l_i < l \\ |l_1 - l_2| < l_i \end{cases} \quad (23)$$

式(23)中的 l_1 和 l_2 分别对应 Franklin 矩的低阶分量与高阶分量,因此改进后的判定条件融合了两特性,既保留低阶矩的抗噪能力,又纳入高阶矩的细节提取优势,最终实现更精准的边缘定位。

传统矩方法在进行亚像素边缘检测时,需遍历全图像素并计算多个参数以判断边缘点,计算负荷大、效率低。为此,本文提出一种粗提取精求解的策略:首先利用 Prewitt 算子快速定位像素级边缘区域,继而仅在该区域内进行亚像素精确定位。该方法显著缩小了计算范围,有效提升了检测效率。具体算法步骤为:

- 1) 对被测图像使用 Prewitt 算子进行像素级边缘提取;
- 2) 判断该点是否为边缘点,不是则返回步骤 1);
- 3) 计算 Franklin 矩 7×7 模版 M00、M11、M20、M31 和 M40;
- 4) 根据式(15)得到该像素点的边缘旋转角度 φ ;
- 5) 根据式(17)~(20)分别求出该像素点原点到边缘的距离 l 和灰度差 k ;
- 6) 将求出的 φ 、 l 和 k 代入式(22),计算的点亚像素边

缘坐标点;

7) 对检测到的边缘坐标点进行式(23)判定是否为亚像素边缘坐标点,不是边缘点则返回步骤 4)。

4 实验结果与分析

为了验证本文算法对图像边缘提取精度和鲁棒性,本文进行了大量实验和对比。本文采用机器视觉测量平台对喷嘴零件进行图像采集。测量平台如图 3 所示。包含 2 500 W 像素工业相机、双远心光学镜头和球积分光源等。本文实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-12490F、NVIDIA GeForce RTX4060 及 Python3.7。



图 3 检测平台

Fig. 3 Testing platform

4.1 航空喷嘴测试

本文以两类不同型号的航空喷嘴零件为例进行实验验证,如图 4 所示。喷嘴零件其喷射口直径为 1.35 mm,边长为 8 mm,误差范围为 $-0.012 \sim 0$ mm。



图 4 待检测的喷嘴零件

Fig. 4 Nozzle parts to be tested

为了验证本文算法的鲁棒性。首先,本文对图 4 所示的喷嘴零件进行采集,采集到的分辨率为 $2\,500 \times 2\,500$ 图像并对零件图像进行预处理,如图 5 所示。

使用本文算法和其他算法的检测图像进行亚像素边缘检测结果进行比较,如图 6 所示。分析图 6(a)~(f),插值法与高斯拟合法对图像边缘的检测效果较弱,检测出的边缘较粗,使后续尺寸测量精度变低。Canny、Zernike 和

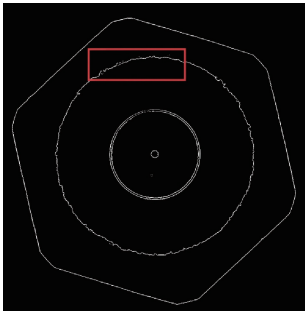


图 5 预处理后的喷嘴零件
Fig. 5 Pretreated nozzle parts

Franklin 算法局部区域噪声抑制不明显,并且将目标图像的边缘进行了弱化,无法抑制边缘细节缺陷,从而影响测量精度。本文算法对图像噪声进行抑制的同时,保留完整的边缘信息,并且去除伪边缘点。

通过最小二乘法将图 6 的检测结果采用进行拟合,求出喷嘴中心孔径,各个零件其测量后的绝对误差如图 7 所示。图 7 中横坐标零件序号 1~10 为喷嘴零件个数,纵坐标绝对误差为各个算法检测结果与实际值相减。通过对各算法在喷嘴零件检测中的绝对误差数据分析发现,本文算法在精度方面表现最优,其平均绝对误差为 0.002 67 mm,误差分布稳定且显著低于对比算法。其他算法的平均绝对

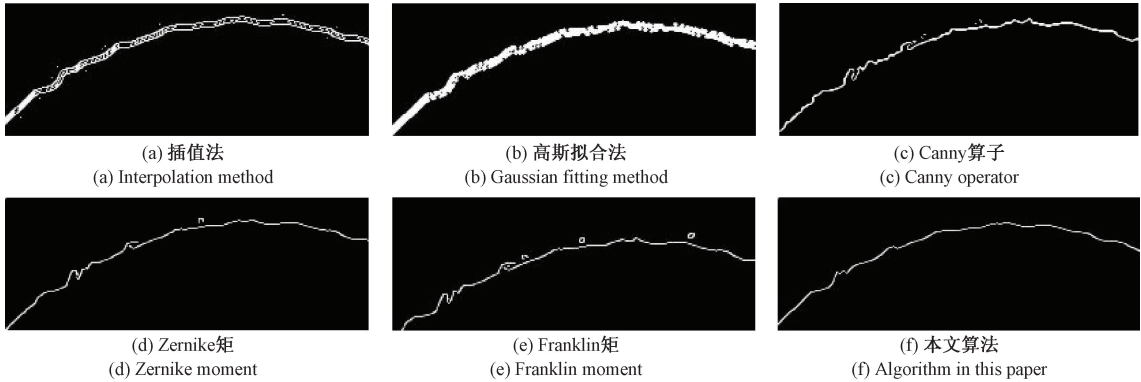


图 6 不同算法检测结果

Fig. 6 Detection results of different algorithms

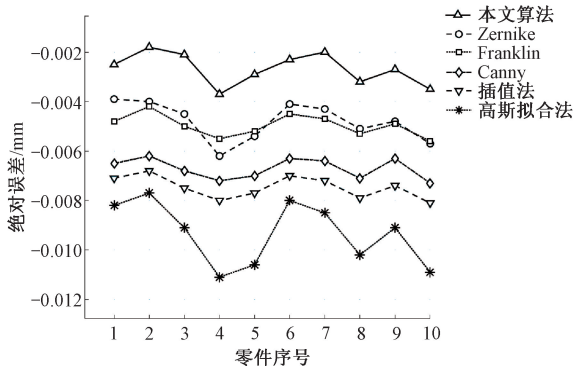


图 7 不同算法对喷嘴零件的测量误差

Fig. 7 Measurement error of nozzle parts by different algorithms

误差分别为:Franklin 算法 0.004 90 mm、Zernike 算法 0.005 06 mm、Canny 算法 0.006 79 mm、高斯拟合算法 0.007 49 mm,而插值法误差最大,达到 0.009 44 mm。

本文通过 t 检验中的配对样本 t 检验来验证各算法在尺寸测量误差上的统计显著性差异。由于本文样本量较小($n < 30$),并且数据源自同一组喷嘴图像在不同算法下的测量结果,形成天然配对,能有效控制个体差异,提高统计功效。因此,本文采用 SPSS 软件进行检验。

首先假设: $\mu d = 0$ (两组算法结果中不存在差异)。

备择假设: $\mu d \neq 0$ (两组算法结果中存在差异)。

显著水平: $\alpha = 0.05$ 。

统计量计算公式如式(24)所示。

$$t = \frac{\bar{d} - 0}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}} = \frac{\bar{d} \times \sqrt{n}}{s_d} \quad (24)$$

式中: $\bar{d}$ 为配对样本均值, s_d 为配对样本标准偏差, n 为配对样本数。

本文通过式(24)验证各算法在尺寸测量误差上的统计显著性差异如表 1 所示。分析表 1 数据可知。本文算法与各个算法计算所得到的 P 均小于 α 。因此,拒绝原假设,本文算法与不同算法在测量误差具有显著性差异。本文算法在 10 组零件检测中均保持最小误差,验证了其在精度稳定性和可靠性方面的优势。

表 1 测量误差配对样本 t 检验

Table 1 Measurement error paired sample t test

算法	$\bar{d}$	s_d	t	p
Franklin	-0.389 9	0.018 2	-67.80	1.66×10^{-13}
Zernike	-0.382 8	0.040 2	-30.14	2.37×10^{-10}
Canny	-0.609 3	0.036 9	-52.14	1.76×10^{-12}
插值	-0.687 9	0.039 2	-55.53	1.00×10^{-12}
高斯	-0.766 5	0.041 4	-58.57	6.20×10^{-13}

为评估算法的测量时效性,本文以喷嘴为研究对象,

依次进行图像预处理、边缘检测及最小二乘法尺寸拟合。结果如所示,在处理 2 500 万像素的喷嘴图像时,本文算法单次测量时间为 0.783 2~0.827 1 s,均值低至 0.805 9 s,表现出优异的稳定性。横向对比显示,如图 8 所示,本文算法平均耗时显著低于其他主流算法,较 Franklin 算法快约 31%,较插值法提升幅度达 94%,充分体现了其线性时间复杂度在高分辨率测量任务中的效率优势。

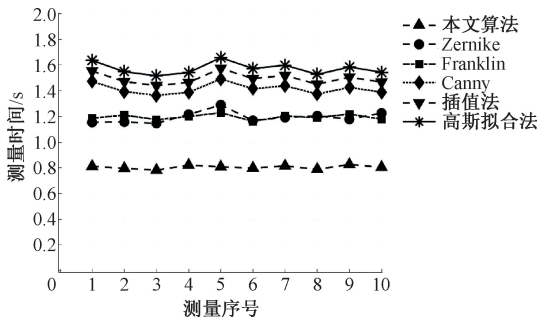


图 8 不同算法对喷嘴零件尺寸测量时间
Fig. 8 Different algorithms for nozzle parts size measurement time

本文通过进行不同算法时间复杂度对比分析,本文边缘检测算法通过集成 Prewitt 检测和 Franklin 矩计算,其时间复杂度为 $O(mn)$,即与图像总像素数($m \times n$)呈线性关系。这一特性确保了算法在处理不同尺寸图像时具备可预测的性能扩展性。相较于其他算法的 $O(mn)$ 双重循环结构,本文算法避免嵌套冗余,效率更高,通用性强,适用于各类图像。

最后,本文通过式(24)验证各算法在尺寸测量时间上

的统计显著性差异。分析表 2 数据可知。本文算法与各个算法计算所得到的 P 均小于 α ,因此,拒绝原假设,本文算法与不同算法在测量误差具有显著性差异。总体而言,本文算法在速度和精度方面均优于对比方法,验证了其实际应用的可靠性。

表 2 测量时间配对样本 t 检验

Table 2 Measurement time paired sample t test

算法	$\bar{d}$	s_d	t	P
Franklin	-0.002 1	0.000 3	-19.43	1.16×10^{-8}
Zernike	-0.002 3	0.000 3	-23.26	2.38×10^{-9}
Canny	-0.004 0	0.000 4	-34.09	7.93×10^{-11}
插值	-0.004 8	0.000 3	-47.47	4.08×10^{-12}
高斯	-0.006 7	0.000 7	-28.52	3.89×10^{-10}

4.2 仿真测试

为验证所提算法的适用性与鲁棒性,本文对含高斯噪声的 Monarch 图像进行边缘检测实验,结果如图 9 所示。实验表明,高斯拟合法与插值法在伪边缘抑制和定位精度方面均表现较差;Canny 算法在局部细节处检测不完整;Zernike 算法存在噪声抑制能力弱、边缘模糊与细节丢失等问题;Franklin 算法虽具有一定抗噪性,但易损失边缘细节。相比之下,本文提出的 Prewitt-Franklin 矩算法在有效抑制噪声的同时,能较好地保持边缘结构与细节完整性,并准确剔除伪边缘点,体现出更优的综合性能。

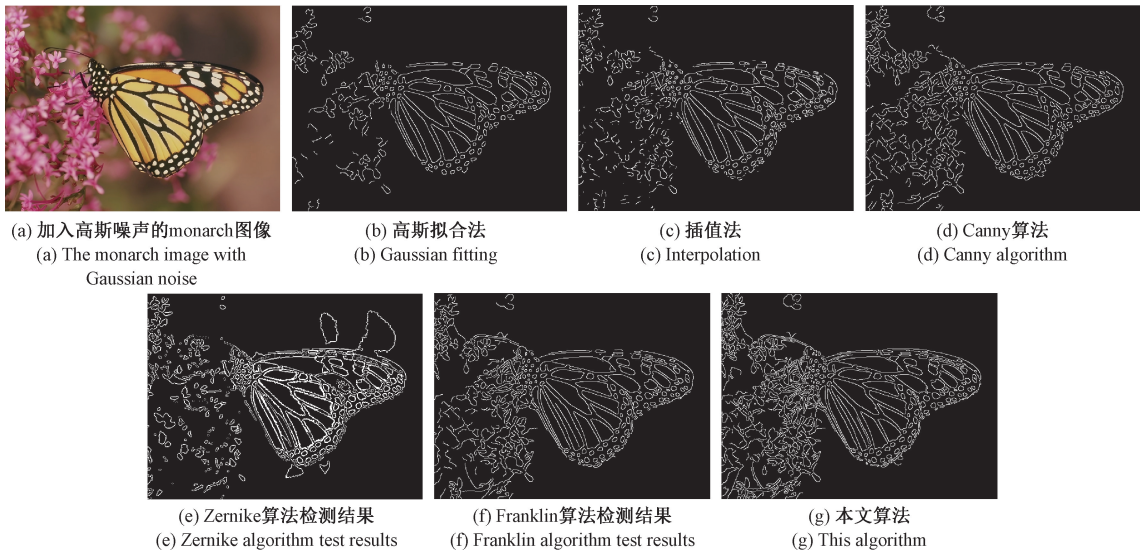


图 9 Monarch 图像及不同算法的检测结果
Fig. 9 Monarch image and detection results of different algorithms

为评估本文算法适用性,本文对比了不同算法处理多分辨率 Monarch 图像所需的时间。如表 3 所示,在低分辨

率(100 pixel×100 pixel)下,各算法耗时相近;但随着分辨率提升至 2 000 pixel×2 000 pixel,本文算法的优势逐渐显

现,耗时仅增至 0.478 2 s,显著低于 Franklin、Zernike 等对比算法(0.532 5~0.598 4 s)。结果表明,本文算法凭借优化的亚像素计算与卷积流程,时间复杂度更低,在处理高分辨率图像时具有更佳的时效性与稳健性。

表 3 不同算法对多种分辨率的检测时间
Table 3 The detection time of different algorithms for multiple resolutions

图像分辨率/pixel	本文算法	Franklin	Zernike	Canny	高斯拟合	插值法
100×100	0.023 6	0.024 2	0.019 0	0.028 6	0.030 8	0.027 9
400×400	0.055 7	0.062 9	0.070 4	0.105 0	0.075 8	0.117 9
800×800	0.138 8	0.153 2	0.184 9	0.204 5	0.181 7	0.247 3
1 200×1 200	0.233 8	0.261 0	0.284 7	0.325 6	0.311 9	0.376 4
1 600×1 600	0.368 5	0.474 9	0.448 9	0.487 2	0.549 4	0.527 6
2 000×2 000	0.478 2	0.532 5	0.597 9	0.598 4	0.649 5	0.726 9

5 结 论

本研究提出了一种融合 Prewitt 算子与 Franklin 矩的亚像素边缘检测算法。该方法首先采用 Prewitt 算子对图像进行像素级边缘粗提取,随后利用 Franklin 矩的旋转不变性分析各阶矩关联,求解亚像素边缘坐标,最终依据设定条件筛选真实边缘点。实验表明,本文算法能够实现喷嘴图像的亚像素级边缘精确定位,精度符合工程实际要求。与传统方法相比,本文算法的平均测量误差为 0.002 6 mm,并且对于不同分辨率图像检测时间有着显著缩短,展现出良好的稳定性与适用性,能够满足不同分辨率图像下高精度、高效率的检测需要。

参考文献

[1] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术,2021,44(3):22-26.
SONG SH SH, HUANG F, JIANG Y B. Analysis of the research progress of geometric measurement technology based on machine vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 22-26.

[2] 黄菁菁. 基于机器视觉的小型零件轮廓尺寸测量算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
HUANG J Q. Research on contour size measurement algorithm of small parts based on machine vision[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[3] 袁坤. 基于图像处理的圆环零件尺寸测量及精度分析[D]. 武汉:江汉大学,2022.
YUAN K. Dimension measurement and accuracy analysis of ring parts based on image processing[D]. Wuhan:Jiangnan University, 2022.

[4] 刘利平,孙建,孙文悦. 改进 Zernike 矩的亚像素圆孔类零件测量方法[J]. 电子测量技术,2023,46(4):69-77.
LIU L P, SUN J, SUN W Y. Improved Zernike moment measurement method for sub-pixel round hole

parts[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(4):69-77.

[5] 孙瑞彤,谷玉海,张英. 一种改进的 SMD 图像亚像素边缘检测算法研究[J]. 国外电子测量技术,2023, 42(9):130-136.
SUN R T, GU Y H, ZHANG Y. Research on an improved SMD image sub-pixel edge detection algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023,42(9): 130-136.

[6] 敬明洋,赵延明,王亮,等. 基于改进 Zernike 矩的海洋绞车排缆间隙亚像素检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(11):225-235.
JING M Y, ZHAO Y M, WANG L, et al. Sub-pixel detection method of marine winch cable clearance based on improved Zernike moment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(11): 225-235.

[7] 彭晶鑫. 基于机器视觉的圆孔形零件尺寸特征检测系统研究[D]. 无锡:江南大学,2021.
PENG J X. Research on size feature detection system of round hole parts based on machine vision [D]. Wuxi:Jiangnan University, 2021.

[8] 代灿威. 基于计算机视觉的 PVC 板材尺寸测量研究[D]. 黄石:湖北师范大学,2023.
DAI C W. Research on size measurement of PVC sheet based on computer vision[D]. Huangshi:Hubei Normal University, 2023.

[9] 孙建. 基于图像处理的圆环零件尺寸测量方法研究[D]. 唐山:华北理工大学,2023.
SUN J. Research on dimension measurement method of ring parts based on image processing [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2023.

[10] 范沁红,张庭瑞,马自勇,等. 一种改进的 Zernike 矩亚像素边缘检测算法[J]. 计算机仿真,2025,42(1):172-

- 177,312.
- FAN Q H, ZHANG T R, MA Z Y, et al. An improved Zernike moment sub-pixel edge detection algorithm[J]. Computer Simulation, 2025, 42(1): 172-177,312.
- [11] 刘月鹏,张新宇,乔栋,等.改进 Zernike 矩的小行星接近过程图像的亚像素边缘检测方法[J].中国科学:技术科学,2024,54(8):1473-1484.
- LIU Y P, ZHANG X Y, QIAO D, et al. Improved sub-pixel edge detection method for asteroid approach process images based on Zernike moments[J]. China Science: Technical Sciences, 2024,54(8): 1473-1484.
- [12] 吴一全,邹宇,刘忠林.基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法[J].仪器仪表学报,2019,40(5): 221-229.
- WU Y Q, ZOU Y, LIU ZH L. Sub-pixel image edge detection algorithm based on Franklin moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(5): 221-229.
- [13] 李锦鹏,熊显名,曾启林,等.基于三次 B 样条小波变换和 Franklin 矩亚像素级图像边缘检测算法[J].红外技术,2022,44(3):255-261.
- LI J P, XIONG X M, ZENG Q L, et al. Based on cubic B-spline wavelet transform and Franklin moment sub-pixel image edge detection algorithm[J]. Infrared Technology, 2022,44(3): 255-261.
- [14] 李思雨,范必双,杨涯文,等.融合改进 Canny 与 RCF 的齿轮零件边缘检测算法[J].现代计算机,2024, 30(18):34-39.
- LI S Y, FAN B SH, YANG Y W, et al. Edge detection algorithm of gear parts based on improved Canny and RCF[J]. Modern Computer, 2024,30(18): 34-39.
- [15] 王岩,胡睿甫,陈代鑫,等.基于自适应阈值分割改进 Canny 算子的管道边缘检测方法研究[J].光电子·激光,2024,35(2):164-170.
- WANG Y, HU R F, CHEN D X, et al. Research on pipeline edge detection method based on adaptive threshold segmentation improved Canny operator[J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2024,35(2): 164-170.
- [16] 许四祥,李天甲,翟健健,等.基于 Prewitt 算子的自适应弱小目标检测[J].红外技术,2019,41(2):189-193.
- XU S X, LI T J, ZHAI J J, et al. Adaptive dim target detection based on Prewitt operator [J]. Infrared Technology, 2019,41(2): 189-193.
- [17] 李锦鹏.基于亚像素的零件精密测量技术研究[D].桂林:桂林电子科技大学,2021.
- LI J P. Research on precision measurement technology of parts based on sub-pixel [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2021.

作者简介

丁海涛(通信作者),博士,教授,主要研究方向为机器视觉、计算机测控技术。

E-mail:dinghaitao@cust.edu.cn

杨帅,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉、深度学习。

E-mail:1245602304@qq.com

孟凡军,研究员,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:mengfanjun168168@126.com