

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1804586

基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法*

吴一全, 邹宇, 刘忠林

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

摘要:为了满足计算机视觉标定与精密测量对图像边缘定位的精确度高和抗噪性强的要求,提出一种基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法。首先,建立亚像素边缘模型,利用各级 Franklin 矩的卷积来提取图像边缘点的细节特征;然后,依据 Franklin 矩的旋转不变性原理,分析图像边缘旋转至垂直方向后各级 Franklin 矩之间的关系,从而确定图像中亚像素边缘的关键参数;最后,根据改进的边缘判断条件,确定图像中的实际亚像素边缘点。大量实验结果表明,与基于 Zernike 矩的亚像素级算法、基于小波变换与 Zernike 矩结合的亚像素级算法、基于 Roberts 算子与 Zernike 矩结合的亚像素级算法相比,本文提出的基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法速度更快,精度更高且抗噪性强,更好地满足了对于图像边缘定位稳定可靠及高精度测量的要求。

关键词: 边缘检测; Franklin 矩; 旋转不变性; 亚像素

中图分类号: TP391 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Sub-pixel level image edge detection algorithm based on Franklin moments

Wu Yiquan, Zou Yu, Liu Zhonglin

(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to meet the requirement of high accuracy and strong anti-noise performance of image edge localization in computer vision calibration and precision measurement, a sub-pixel level image edge detection algorithm based on Franklin moments is proposed. Firstly, a sub-pixel edge model is established to extract the detailed features of image edge points with the convolution of Franklin moments at all levels. Then, according to the rotation invariance principle of Franklin moments, the relationship among different levels of Franklin moments after image edge rotating to the vertical direction is analyzed, and the key parameters of the sub-pixel image edge are determined. Finally, the actual sub-pixel edge points in the image are located based on the improved edge judgment condition. A large number of experimental results show that compared with Zernike moment sub-pixel level image edge detection algorithm, the sub-pixel level image edge detection algorithm combining wavelet transform with Zernike moment, and the sub-pixel level image edge detection algorithm combining Roberts operator with Zernike moment, the proposed sub-pixel level image edge detection algorithm based on Franklin moments possesses higher speed and accuracy and stronger anti-noise performance, which better meets the measurement requirements of stability and reliability and high precision in image edge localization.

Keywords: edge detection; Franklin moment; rotation invariance; sub-pixel

0 引言

边缘检测是图像处理和计算机视觉中的基本问题,其目的是标识数字图像中灰度变化明显的点。常用的图像边缘检测微分算子,如 Roberts 算子、Prewitt 算子、Sobel

算子以及 Canny 算子等,都是在像素级别上对图像进行边缘的检测与提取,而随着目标边缘精度要求的不断提高,普通像素级别的边缘已经无法满足计算机视觉标定与精密测量的要求。因此,对于亚像素级边缘检测的研究就显得十分重要。目前常用的亚像素级边缘检测算法可以归纳为矩算法、插值法和拟合法等 3 类。其中,矩算

收稿日期:2018-12-27 Received Date:2018-12-27

* 基金项目:国家自然科学基金(61573183)项目资助

法检测精确度高,且对噪声不敏感,是一种有效的亚像素级边缘检测算法。

文献[1]提出的利用正交矩来进行亚像素边缘检测的算法,首先通过计算图像3个不同阶次的 Zernike 正交矩,把理想阶跃灰度模型的4个参数映射到3个 Zernike 正交矩中;然后计算边缘所在直线的参数,确定边缘的亚像素级坐标。但该算法有以下两点不足:1)由于选择模板大小的不同,使得边缘亚像素坐标的计算产生误差;2)将理想阶跃模型作为边缘模型来推导边缘亚像素坐标公式,但实际边缘并非如此。针对这两个问题,文献[2]提出了一种改进的 Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法,考虑了模板放大效应,使得边缘的亚像素坐标计算更加准确,此外,采用边缘梯度方向一阶导数模型,使算法能更好地检测亚像素级边缘。文献[3]在考虑模板放大效应的基础上,进一步改进了图像边缘判决条件;文献[4]则将原先的模板换成9×9模板,使得到的边缘效果更好,但随着模板尺寸增大,检测结果对噪声变得敏感。因此,为了增强边缘检测算法的抗噪性,文献[5]将形态学梯度算子与 Zernike 矩结合来检测图像的亚像素边缘。实验结果表明,该算法在精确定位亚像素边缘的同时具备良好的抗噪性,且其计算量相对较少,可快速实现。然而,该算法会受到结构元素的影响,对于一些细小边缘的提取效果欠佳。为此,文献[6]提出一种阈值分割与 Zernike 矩相结合的快速算法,得到最优的阶跃灰度阈值,优化了边缘判别条件,也弥补了上述细小边缘提取上的不足。为了对弱小目标进行亚像素定位,文献[7]提出一种基于小波变换与 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法。该算法在弱噪声条件下的定位精度较高,而在强噪声条件下的检测效率则需进一步提高。为了解决单一矩算法所得图像边缘精度不够高的问题,一些将微分算子与矩结合的算法相继提出。如 Roberts 算子与 Zernike 矩结合^[8]、Sobel 算子与 Zernike 矩结合^[9]、拉普拉斯高斯(Laplacian of Gaussian, LoG)算子与 Zernike 矩结合^[10]等算法。这些算法都是先利用微分算子对图像进行边缘的粗提取,再用 Zernike 矩实现边缘的精确定位,虽然可以获得更高的精度,但所提取的边缘仍然较粗且结果受噪声影响较大。

上述亚像素边缘检测算法的核心都是基于 Zernike 矩,而近年来提出的 Franklin 矩所依据的 Franklin 函数仅由一次分段多项式组成,避免了高次多项式的计算,具有复杂度低、数值稳定的优点,而且 Franklin 函数也是正交的,相应的 Franklin 矩可以使得图像分解后的信息具有独立性,没有冗余。本文提出一种基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测算法,给出了所提亚像素边缘检测算法的实验结果,并与基于 Zernike 矩的算法、基于小波变换与 Zernike 矩结合的算法以及基于 Roberts 算子与 Zernike 矩结合的算法进行了比较。

1 Franklin 函数及 Franklin 矩

1.1 Franklin 函数

Franklin 函数是定义在 $L^2[0,1]$ 上的连续正交函数系^[11]。它是一类相对新的一次正交样条函数,由一组线性无关的截断幂基经过正交化过程得到。首先,考虑如下线性无关组 $\{\alpha_j(x), 0 \leq x \leq 1\}$:

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

式中: $\alpha_i = \frac{(2i-1-2^t)}{2^t}$, i 为正整数, t 为所有满足 $2^t \leq 2i-1$ 的最大值。截断单项式记号 u_+^k 定义为:

$$u_+^k = \begin{cases} u^k, & u > 0 \\ 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

将上述线性无关组 $\{\alpha_j(x), 0 \leq x \leq 1\}$ 经过 Gram-Schmidt 正交化之后,便得到 Franklin 函数系 $\{\phi_n(x)\}$, 其前5项基函数的表达式如下^[12]:

$$\phi_0(x) = 1, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

$$\phi_1(x) = \sqrt{3}(2x-1), \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (4)$$

$$\phi_2(x) = \begin{cases} \sqrt{3}(1-4x), & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ \sqrt{3}(4x-3), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\phi_3(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{33}(5-38x)}{11}, & 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ \frac{\sqrt{33}(26x-11)}{11}, & \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{33}(5-6x)}{11}, & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi_4(x) = \begin{cases} \frac{\sqrt{231}(1-12x)}{77}, & 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ \frac{\sqrt{231}(36x-11)}{77}, & \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{231}(45-76x)}{77}, & \frac{1}{2} \leq x < \frac{3}{4} \\ \frac{\sqrt{231}(100x-87)}{77}, & \frac{3}{4} \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

1.2 Franklin 矩

根据上述 Franklin 函数的定义,可以给出图像函数 $f(x,y), 0 \leq x, y \leq 1$ 的 n 阶 m 次 Franklin 矩:

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

在极坐标中可以更清楚地看出 Franklin 矩的正交性以及旋转不变性,于是给出在极坐标系 (r, θ) 下,图像 $f(r, \theta)$ 的 n 阶 m 次 Franklin 矩的定义式:

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

由于 Franklin 矩是一种正交矩,它实现了对图像的无冗余分解,即图像的各阶次 Franklin 矩之间是相互独立的,这就保证了能够利用最少的 Franklin 矩描述图像更多的特征,从而达到降低特征维数的目的;而且 Franklin 矩只涉及一次多项式的计算,大大降低了计算复杂度,提高了方法运算速度。

2 基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测原理

2.1 亚像素边缘点的确定

根据 Franklin 矩的极坐标定义式,可以看出 Franklin 矩除了正交性之外,还有一个重要性质:旋转不变性。因为当图像旋转了角度 φ 之后的 Franklin 矩 F'_{nm} 和旋转前的 Franklin 矩 F_{nm} 之间的关系为:

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

从式(10)可以看出,一幅图像旋转之后,其 Franklin 矩的幅值没有变化,变化的只是相角。于是,利用图像的矩特性包含了边缘模型的参数这一特点^[13],可以根据 Franklin 矩的特征信息,估计出边缘的参数,进而实现对边缘的精确定位。

假设单位圆的圆心在某一个像素点上,并且单位圆正好压在图像的某条边缘上,则建立图 1 所示的亚像素边缘检测模型^[14]。

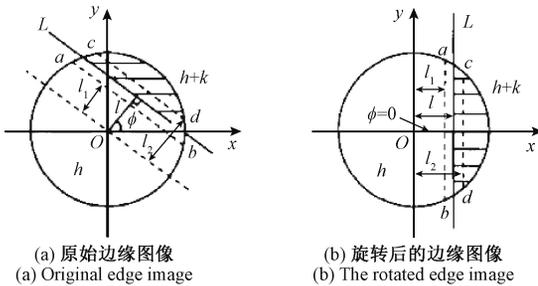


图 1 亚像素边缘检测模型

Fig.1 Sub-pixel edge detection model

图 1 中,直线 L 代表理想边缘,单位圆被直线 L 分为两个灰度区域, h 为背景灰度, k 为阶跃高度(灰度差), l 为圆心到边缘的垂直距离,两条虚线 ab 和 cd 对应于在不同阶次的 Franklin 矩条件下的图像边缘^[15], l_1 和 l_2 分别为圆心到 ab 和 cd 的距离,具体数值由式(21)和(22)给出, φ 为圆心到边缘的垂直线段与 x 轴的夹角。将图 1(a) 顺时针旋转角度 φ 至图 1(b),则边缘 L 平行于 y 轴。

由式(10)可以看出,当 $m = 0$ 时, $F'_{n0} = F_{n0}$; 当 $n = 1, m = 1$ 时,有:

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

令 $\text{Re}[F_{11}]$ 和 $\text{Im}[F_{11}]$ 分别代表 F_{11} 的实部和虚部,则从式(11)可以得到:

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

从图 1(b) 可以看出,旋转之后的图像 $f'(x, y)$ 是关于 x 轴对称的^[16], 因此可以得到:

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

由式(13)可知 $\text{Im}[F'_{11}] = 0$, 代入式(12)可得:

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

那么,便可以求得旋转角度 φ :

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

根据图 1(a) 的模板,得到旋转后图像的各阶 Franklin 矩:

$$F'_{00} = 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h dx dy + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} (h+k) dx dy = h\pi + \frac{k\pi}{2} - kl\sqrt{1-l^2} - k \arcsin l \quad (16)$$

$$F'_{11} = \frac{2k(1-l^2)^{3/2}}{3} \quad (17)$$

$$F'_{20} = \frac{2kl(1-l^2)^{3/2}}{3} \quad (18)$$

$$F'_{31} = \frac{4kl^2(1-l^2)^{3/2}}{5} - \frac{2k(1-l^2)^{3/2}}{15} \quad (19)$$

$$F'_{40} = \frac{16kl^3(1-l^2)^{3/2}}{15} - \frac{2kl(1-l^2)^{3/2}}{5} \quad (20)$$

由式(18)与(20)解得:

$$l_1 = \sqrt{\frac{5F'_{40} + 3F'_{20}}{8F'_{20}}} \quad (21)$$

由式(17)与(19)解得:

$$l_2 = \sqrt{\frac{5F'_{31} + F'_{11}}{6F'_{11}}} \quad (22)$$

$$k = \frac{3F'_{11}}{2(1-l_2^2)^{3/2}} \quad (23)$$

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2} \quad (24)$$

得到关键参数 φ, l, k 之后,根据图 1 推导出亚像素边缘检测公式^[17]:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + l \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中: (x_s, y_s) 是图像边缘的亚像素坐标; (x, y) 是图 1(a) 中原点的坐标。再考虑到模板的放大效应^[18], 若 Franklin 矩的模板大小为 $N \times N$, 则修改过后图像边缘的亚像素坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \cos\varphi \\ \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (26)$$

由于模板过小会使得模板系数的数据不全面, 而模板过大会导致边缘检测的结果对噪声过于敏感^[19], 本文选择构建 Franklin 矩的 7×7 的模板。

2.2 边缘判定依据及检测算法流程

基于矩来检测亚像素边缘的常规算法仅利用了低阶矩, 即通过式(21)和(22)得到距离 l , 采用式(23) 确定阶跃高度 k , 并依据 $l > l_i$ 且 $k > k_i$ 对亚像素边缘进行判定, 其中 l_i 和 k_i 为判断阈值, 是针对 l 和 k 矩阵取均值得到的^[20]。由于常规算法未考虑高阶矩, 因而检测出的边缘线条较粗。为此给出一种改进的边缘判定条件:

$$\begin{cases} k > k_i \\ l > l_i, |l_1 - l_2| < l_i \end{cases} \quad (27)$$

由于 l_1 和 l_2 分别代表了 Franklin 矩的低阶和高阶, 因此该判据结合了 Franklin 低阶矩的抗噪声特性和高阶矩的细节描述能力, 因而其边缘定位更加精确。

基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测算法步骤如下:

- 1) 利用 Franklin 矩 7×7 的模板, 与图像中各像素点进行卷积运算, 得到该点的各阶次 Franklin 矩;
- 2) 由旋转不变性原理, 依据式(15), 得到该像素点的边缘旋转角度 φ ;
- 3) 依据式(21)~(23), 分别确定该像素点中心到边缘的垂直距离 l , 以及灰度阶跃高度 k ;

4) 依据式(27)进行判断, 若该点的参数满足此判据, 则说明该像素点附近存在亚像素边缘点, 由式(26) 计算得到亚像素边缘点坐标, 否则, 计算下一个像素点的各阶次 Franklin 矩, 并重复 2)~3)。

本文算法流程如图 2 所示。

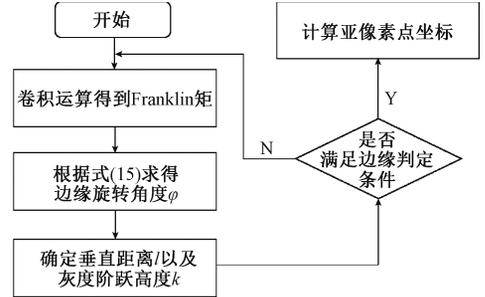


图 2 边缘检测流程

Fig.2 The edge detection flow chart

3 实验结果与分析

为了验证本文提出的基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测算法的有效性和优越性, 进行了大量实验。由于篇幅有限, 现选取其中的 6 组实验图像加以说明。本文的实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-8250U、8G RAM、MATLAB R2015b。

第 1 组实验选用具有丰富纹理特征的 Lena 图像, 如图 3(a) 所示。图 3(b) 所示为添加高斯噪声后的图像。分别采用基于 Zernike 矩的算法、基于小波变换与 Zernike 矩结合的算法、基于 Roberts 算子与 Zernike 矩结合的算法以及本文提出的基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测算法对图 3(b) 进行边缘检测, 相应的结果分别如图 3(c)~(f) 所示。



图 3 Lena 图像及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.3 Lena image and the edge detection results for 4 different algorithms

第 2 组实验选用只含高强度边缘的 Rice 图像,如图 4(a)所示。图 4(b)所示为添加高斯噪声后的图像。对

Rice 图像进行与第 1 组图像相同的边缘检测实验,得到的结果分别如图 4(c)~(f)所示。

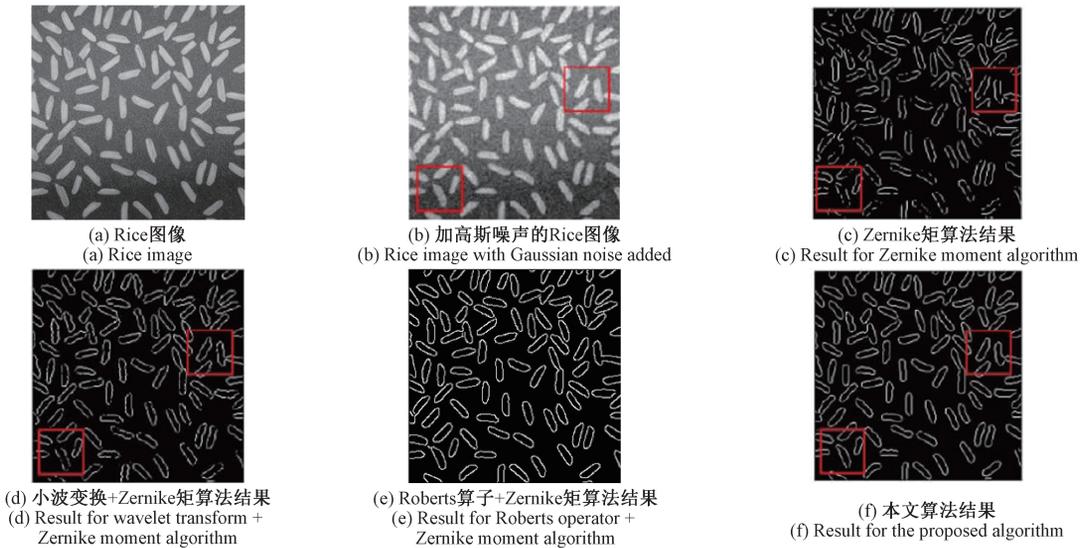


图 4 Rice 图像及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.4 Rice image and the edge detection results for 4 different algorithms

第 3 组实验选用含有一些低强度边缘的 House 图像,如图 5(a)所示。图 5(b)所示为添加高斯噪声后的

图像。对 House 图像进行与第 1 组图像相同的边缘检测实验,相应的结果分别如图 5(c)~(f)所示。

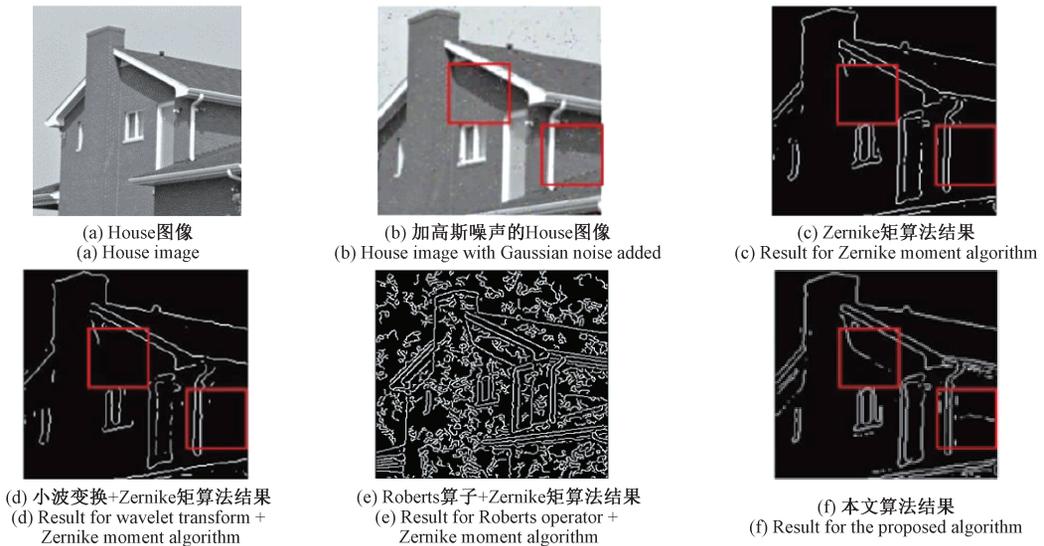


图 5 House 图像及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.5 House image and the edge detection results for 4 different algorithms

通过比较可以发现,Zernike 矩算法的结果虽然抑制了高斯噪声,但是同时也将图像的边缘弱化,造成了边缘部分的缺失;小波变换与 Zernike 矩结合算法能在平滑噪声的同时较好地提取图像边缘,但是在图 3(d)、图 4(d)和图 5(d)的方框中,仍出现一些背景中的边缘细节无法提取的情况;Roberts 算子与 Zernike 矩结合算法只能较

好地抑制具有高强度边缘 Rice 图像的噪声。本文提出的基于 Franklin 矩的亚像素边缘检测算法鲁棒性较强,对于含有噪声的图像都具有较好的检测效果,检测结果定位更加准确,边缘信息完整,且细节更加丰富,提取出的边缘线条更为细腻。

第 4 组实验图像选用需要精密测量,从而提取高精

度边缘的数控机床刀具图像,如图 6(a) 所示。图 6(b) 所示为添加高斯噪声后的图像。分别采用基于 Zernike 矩的算法、基于小波变换与 Zernike 矩结合的算法、基于

Roberts 算子与 Zernike 矩结合的算法以及本文提出的基于 Franklin 矩的图像亚像素边缘检测算法对图 6(b) 进行边缘检测,相应的结果分别如图 6(c) ~ (f) 所示。

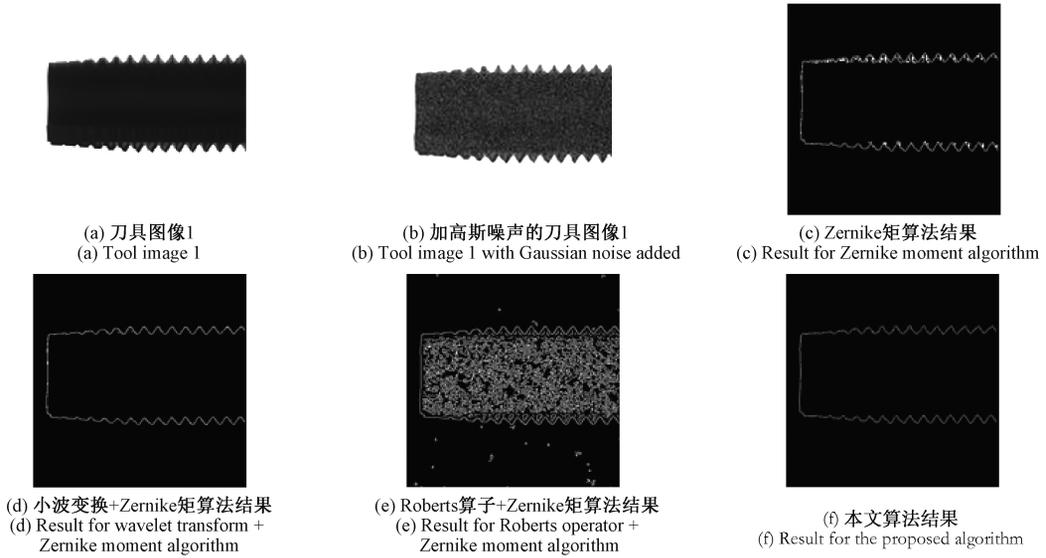


图 6 刀具图像 1 及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.6 Tool image 1 and the edge detection results for 4 different algorithms

第 5 组实验选用另一组精密测量刀具图像,如图 7(a) 所示。图 7(b) 所示为添加高斯噪声后的图像。对图

像进行与第 4 组图像相同的边缘检测实验,相应的结果分别如图 7(c) ~ (f) 所示。

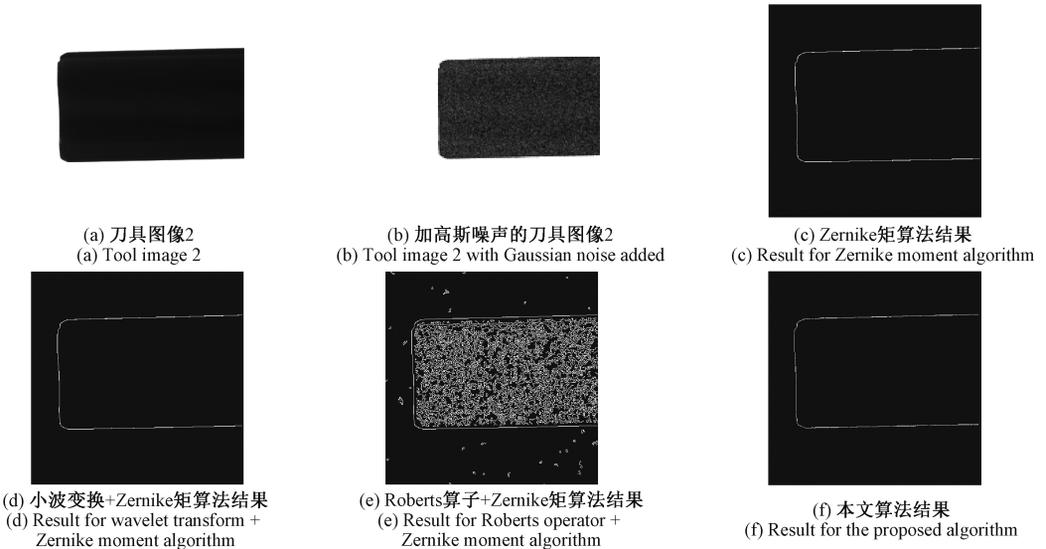


图 7 刀具图像 2 及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.7 Tool image 2 and the edge detection results for 4 different algorithms

第 6 组实验选用精密测量丝锥图像,如图 8(a) 所示。图 8(b) 所示为添加高斯噪声后的图像。对图像进行与第四组图像相同的边缘检测实验,相应的结果分别如图 8(c) ~ (f) 所示。

像,前 3 种算法均产生了较多的伪边缘或者边缘不连续存在断开的情况,而本文提出的基于 Franklin 矩的亚像素边缘检测算法受噪声影响小,可以获得较好的边缘提取结果,因此本文所提算法性能更优,满足了精密测量的要求。

由图 6~8 可知,对于边缘比较复杂的精密测量图

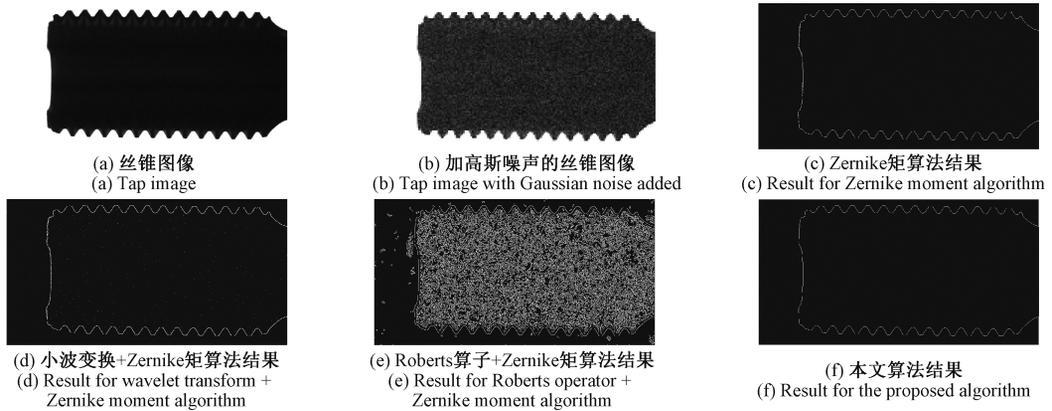


图 8 丝锥图像及 4 种算法的边缘检测结果

Fig.8 Tap image and the edge detection results for 4 different algorithms

为了从具体数据的角度验证本文提出的算法能正确检测出实际边缘并将其定位在亚像素级别,制作一幅 90×90 的灰度图像^[21],如图 9 所示,在图像第 30~60 行和第 30~60 列区域内灰度值为 1,背景灰度值为 0。

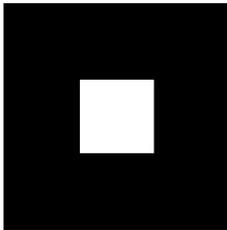


图 9 灰度图像
Fig.9 Gray image

提取第 30 行中任意 10 个点的像素坐标,并采用本文算法得到这 10 个点的亚像素坐标,计算其误差,如表 1 所示。

表 1 检测的亚像素坐标

Table 1 The detected sub-pixel coordinates

实际像素坐标	本文算法坐标	Zernike 矩算法坐标
(30.5,41)	(30.516 85,41.5)	(30.151 03,41.5)
(30.5,42)	(30.516 85,42.5)	(30.151 03,42.5)
(30.5,43)	(30.516 86,43.5)	(30.151 04,43.5)
(30.5,44)	(30.516 85,44.5)	(30.150 13,44.5)
(30.5,45)	(30.516 86,45.5)	(30.151 04,45.5)
(30.5,46)	(30.516 85,46.5)	(30.151 03,46.5)
(30.5,47)	(30.516 85,47.5)	(30.151 03,47.5)
(30.5,48)	(30.516 84,48.5)	(30.151 02,48.5)
(30.5,49)	(30.516 85,49.5)	(30.151 03,49.5)
(30.5,50)	(30.516 86,50.5)	(30.151 04,50.5)

从表 1 可以看出,采用本文提出的基于 Franklin 矩的亚像素边缘检测算法,可以精确地定位边缘的亚像素

坐标,将误差控制在很小的范围之内,是一种有效的提取图像亚像素边缘的算法。

对图 6 中 4 种算法的运行时间进行比较,结果如表 2 所示。实验表明,本文算法耗时最短,实时性最好。同时,对图 6 中 4 种算法采用峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 作为评价其抗噪性的指标^[22],结果如表 3 所示。结果表明,本文算法抗噪性能最佳。

表 2 4 种算法运行时间

Table 2 The running time for four algorithms

算法	Zernike 矩	小波变换+ Zernike 矩	Robert 算子+ Zernike 矩	本文算法
运行时间/s	0.237 3	10.217 7	0.455 6	0.164 6

表 3 4 种算法峰值信噪比

Table 3 PSNR for four algorithms

算法	Zernike 矩	小波变换+ Zernike 矩	Robert 算子+ Zernike 矩	本文算法
PSNR	31.794 9	35.954 7	37.256 3	40.053 1

4 结 论

本文提出了一种基于 Franklin 矩的亚像素级图像边缘检测算法。首先,建立亚像素边缘模型,利用各级 Franklin 矩的卷积来提取图像边缘点细节特征;然后,根据 Franklin 矩的旋转不变性原理,分析各级 Franklin 矩之间的关系,从而得到图像边缘坐标的相关参数;最后,根据改进的边缘判定条件,确定图像中实际亚像素边缘点。实验结果表明,与基于 Zernike 矩的算法、基于小波变换与 Zernike 矩结合的算法和基于 Robert 算子与 Zernike 矩结合的算法相比,本文提出的基于 Franklin 矩的亚像素

级图像边缘检测算法检测速度快,具有更高的检测精度和更强的抗噪性;而且通过对比图像边缘的实际像素坐标和本文算法得到的边缘亚像素坐标可以看出,本文算法整体上误差较小,能实现对图像边缘稳定可靠的定位,具有优良的应用前景。

参考文献

- [1] GHOSAL S, MEHROTRA R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. Pattern Recognition, 1993, 26(2): 295-306.
- [2] 李金泉,王建伟,陈善本,等.一种改进的 Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法[J].光学技术,2003,29(4):500-503.
LI J Q, WANG J W, CHEN SH B, et al. An improved Zernike orthogonal moment sub-pixel edge detection algorithm [J]. Optical Technology, 2003, 29 (4): 500-503.
- [3] 高世一,赵明扬,张雷,等.基于 Zernike 正交矩的图像亚像素边缘检测算法改进[J].自动化学报,2008,34(9):1163-1168.
GAO SH Y, ZHAO M Y, ZHANG L, et al. Improvement of image sub-pixel edge detection algorithm based on Zernike orthogonal moments[J]. Journal of Automation, 2008, 34(9): 1163-1168.
- [4] 吴一全,龙云淋,周杨.基于 Arimoto 熵和 Zernike 矩的刀具图像亚像素边缘检测[J].华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(12):50-56.
WU Y Q, LONG Y L, ZHOU Y. Sub-pixel edge detection of tool image based on Arimoto entropy and Zernike moment[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(12): 50-56.
- [5] 魏本征,赵志敏,华晋.基于改进形态学梯度和 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法[J].仪器仪表学报,2010,31(4):838-844.
WEI B ZH, ZHAO ZH M, HUA J. Subpixel edge detection based on improved morphological gradient and Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 838-844.
- [6] WANG J Z, HUANG X T. Visual positioning of rectangular lead components based on Harris corners and Zernike moments [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(7): 2586-2595.
- [7] 文涛,左东广,李站良,等.基于改进小波变换和 Zernike 矩的亚像素边缘检测算法[J].光电与控制,2015,22(9):50-54.
WEN T, ZUO D G, LI ZH L, et al. Subpixel edge detection based on modified wavelet transform and Zernike moment [J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(9): 50-54.
- [8] 王珏,伍立芬,邹永宁,等. Zernike 矩边缘检测与多项式拟合的 CT 图像三维测量算法[J].仪器仪表学报,2012,33(2):442-449.
WANG Y, WU L F, ZOU Y N, et al. Zernike moment edge detection and polynomial fitting for 3d measurement of CT images [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 442-449.
- [9] 徐胜华,刘纪平,王勇,等.基于主轴分析和 EDISON-Zernike 矩的彩色图像亚像素边缘检测[J].仪器仪表学报,2008,29(11):2272-2277.
XU SH H, LIU J P, WANG Y. Subpixel edge detection of color image based on spindle analysis and EDISON-Zernike moment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2272-2277.
- [10] 屈玉福,浦昭邦,王亚爱.视觉检测系统中亚像素边缘检测技术的对比研究[J].仪器仪表学报,2003,24(S1):460-462.
QU Y F, PU ZH B, WANG Y A. A comparative study of sub-pixel edge detection techniques in vision detection system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(S1): 460-462.
- [11] 蔡占川,陈伟,齐东旭,等.一类新的正交样条函数-Franklin 函数的推广及其应用[J].计算机学报,2009,32(10):2004-2013.
CAI ZH CH, CHEN W, QI D X, et al. Extension and application of a new orthogonal spline function-Franklin function [J]. Journal of Computer Science, 2009, 32(10): 2004-2013.
- [12] 陈伟,蔡占川,齐东旭.一类新的正交矩-Franklin 矩及其图像表达[J].计算机学报,2015,38(6):1140-1147.
CHEN W, CAI ZH CH, QI D X. A new class of orthogonal moments-Franklin moments and their image representation [J]. Journal of Computer Science, 2015, 38(6): 1140-1147.
- [13] DA F, ZHANG H. Sub-pixel edge detection based on an improved moment[J]. Image & Vision Computing, 2010, 28(12):1645-1658.
- [14] 张坤,陈海清,梁庆文,等.基于 Fourier-Mellin 矩边缘检测的改进算法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(5):53-56.
ZHANG K, CHEN H Q, LIANG Q W, et al. An improved edge detection algorithm based on Fourier-Mellin moment [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(5): 53-56.
- [15] WEN L, YU Z, WANG L, et al. High-precision line detection of optical waveguide devices edge[J]. Journal

- of Central South University, 2017, 48(7): 1734-1740.
- [16] 丁兴号. 基于小波变换的亚像素边缘检测[J]. 应用科学学报, 2005, 26(8): 801-804.
DING X H. Subpixel edge detection based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Applied Science, 2005, 26(8): 801-804.
- [17] CHEN J, SHANG Y C, TIAN J W. Fast polynomial fits sub-pixel edge detection algorithms [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(1): 91-95
- [18] BALASUNDARAM M K, RATNAM M M. In-process measurement of surface roughness using machine vision with sub-pixel edge detection in finish turning [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(11): 2239-2249.
- [19] LI S, LU R, SHI Y, et al. Sub-pixel edge detection algorithm based on Gauss surface fitting [J]. Tool Engineering, 2011, 2(58): 86-90.
- [20] 崔彦平, 葛杏卫. 基于空间矩的视觉图像基元特征提取方法研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(10): 1565-1569.
CUI Y P, GE X W. Research on visual image primitive feature extraction method based on spatial moments [J]. Photoelectronics and Laser, 2010, 21(10): 1565-1569.
- [21] 沈晶晶, 金文标, 张智丰. 基于三次Bezier曲线模型的空间矩亚像素边缘定位算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(10): 1985-1991.
SHEN J J, JIN W B, ZHANG ZH F. Spatial moment subpixel edge location based on cubic Bezier curve model [J]. Chinese Journal of Image and Graphics, 2009, 14(10): 1985-1991.

- [22] 陈炎华, 赵美蓉, 林玉池, 等. 用于红外双目视觉的边缘增强算法研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(5): 526-529.

CHEN Y H, ZHAO M R, LIN Y CH, et al. Research on edge enhancement algorithms for infrared binocular vision [J]. Laser and Infrared, 2012, 42(5): 526-529.

作者简介



分析等。

E-mail: nuaaimage@163.com

Wu Yiquan (Corresponding author) received Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1998. He is a professor and Ph. D. supervisor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics now. His main research interests include remote sensing image processing and understanding, infrared target detection and recognition, visual detection and image measurement, video processing and intelligent analysis, et al.



邹宇, 2016年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与机器视觉。

E-mail: zouyudkian@163.com

Zou Yu received B. S. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2016. He is a M. Sc. candidate in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics now. His main research interests include image processing and machine vision.