

基于正交 Fourier-Mellin 矩的改进 亚像素边缘检测算法

党宏社, 胡尊凤, 方鑫

(陕西科技大学 电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 提出一种改进的亚像素级边缘检测算法, 该算法先用像素级边缘检测算子(Canny 算子)定位所有可能的边缘点位置, 再利用正交 Fourier-Mellin 矩(OFMM)算子的低径向阶与旋转不变特性在已有像素级边缘位置上进一步定位亚像素级边缘位置。实验表明, 同等条件下该算法运算效率较高, 不仅具有较高的检测精度(小于 0.2 pixel), 且算法耗时较短。

关键词: 计算机视觉; 图像处理; 亚像素边缘检测; 正交 Fourier-Mellin 矩算子

中国分类号: TP 391.41

文献标识码: A

An improved subpixel-level edge detection algorithm based on orthogonal Fourier-Mellin moment

DANG Hong She, HU Zun Feng, FANG Xin

(School of Electrical & Information, Shanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: An improved OFMM subpixel edge location algorithm is presented in the paper. This algorithm firstly makes use of Canny operator to extract all possible edge points at pixel level and then utilizes subpixel-level edge detection operator. by using orthogonal Fourier-Mellin moment operator. Experiment results show that this algorithm could achieve equative location accuracy compared with Zernike and OFMM subpixel edge location operator but consume less operating time.

Key words: computer vision; image processing; subpixel edge detection; OFMM operator

视觉测量技术是以光学为基础, 融光电子学、计算机技术、激光技术、图像处理技术等为一体, 组成光、机、电、算综合的测量系统。边缘检测在视觉测量中占有重要地位, 虽然边缘检测的发展已经有了很长一段时间, 但至今仍处于不断发展和完善中。

现有的边缘边界提取是图像分析的关键步骤, 边缘的定位精度直接影响尺寸检测的精度。从定位精度角度上, 边缘检测方法可以分为像素级和亚像素级。像素级边缘检测算法中, 传统的梯度检测算子利用图像像素间差分运算提取图像的边缘, 该方法虽能有效提取边缘, 但对图像噪声敏感, Canny 提出了一种最优边缘检测算子^[1], 并在实践中取得了良好的效果。近 20 年来, 国内外专家学者已提出了很多关于亚像素边缘定位算法, 这些方法可以突破像素的限制, 将边缘定位在亚像素级上来提高测量系统的检测精度。该技术最早由 Hueckel 提

出, 当前已有的亚像素定位算法主要有几何法、插值法^[2]、拟合法^[3]、一阶微分期望法^[4-5]、矩方法等。在各种基于矩算子的定位算法中, TABATABAI A J 提出灰度矩亚像素定位的思想^[6]; LYVERS E P 提出空间矩的思想并构造了空间矩算子^[7]; GHOSAL 和 MEHROTAL 首次提出了利用 Zernike 正交矩来检测亚像素边缘^[8]; Ao Lei 等提出的基于正交傅里叶-梅林矩(OFMM)的亚像素定位算子^[9-11], 在一定程度上改善了 Zernike 正交矩对小尺寸物体描述特性差的缺点, 但单独使用该算法定位时运算时间相对较长。

文中提出的亚像素级边缘检测算法是一种基于 Canny-OFMM 的算法, 该算法将像素级与亚像素级边缘检测算子结合起来, 目的是在保证定位精度的前提下, 提高算法的运行效率。

1 算法原理

为了提高边缘定位准确度及精度, 本文采用像素级

边缘定位与亚像素级边缘定位相结合的方式。传统的像素级边缘检测算法中, Canny 算子因其独有的最优化特性具备良好的边缘定位效果, 它的参数允许根据不同实现的要求进行调整。在亚像素定位的矩算子中, 正交傅里叶-梅林矩由于其更强的图像细节描述能力而广泛应用于旋转和尺度不变模式识别领域。

1.1 像素级边缘定位

Canny 边缘检测算子是一个多级边缘检测算法, 其目标是找到一个最优的边缘检测算子。最优边缘检测包括三层含义: 算法能够尽可能多地标识出图像的实际边缘标识出的边缘要尽可能与实际图像中的边缘接近; 图像中的边缘只能标识一次, 并且可能存在的图像噪声不应标识为边缘。在 Canny 算子中, 如使用较小尺度滤波器, 非极大值抑制梯度幅值算法可以在边缘处检测出极其细腻的细节, 但噪声和细纹理会导致过量不希望的边缘段; 若采用大尺度滤波器, 只产生少量不希望的边缘, 但边缘的大部分细节信息将丢失。

1.2 基于正交 Fourier-Mellin 矩 (OFMM) 的亚像素级边缘定位

(1) OFMM 定义^[1]

图像 $f(x,y)$ n 阶 m 次 OFMM 定义为:

$$\phi_{nm} = \frac{1}{2\pi a_n} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(x,y) \times Q_n(r) \exp(-jm\theta) r dr d\theta \quad (1)$$

式中, $a_n = 1/[2(n+1)]$ 为归一化系数, $Q_n(r) = \sum_{s=0}^n (-1)^{n+s} r^s [\frac{(n+s+1)!}{(n-s)!s!(s+1)!}]$ 为积分核, 它是多项式 $T_m(r, \theta) = Q_n(r) \exp(im\theta)$ 的核函数, 其中 n 为正整数。

正交 Fourier-Mellin 矩 (OFMM) 算子的旋转不变性可以表示为:

$$\phi'_{nm} = \phi_{nm} \exp(-j\psi) \quad (2)$$

式中, ϕ_{nm} 是初始位置 OFMM, ψ 为旋转角度, ϕ'_{nm} 是图像旋转后的 OFMM。

(2) OFMM 亚像素定位原理

根据上述定义, 求图像的 OFMM 就是用核函数对图像加权然后在单位圆上积分。假设单位圆的圆心在某个像素点上, 并且单位圆正好压在某个边缘上, 则对边缘建立理想阶跃灰度模型如图 1 所示, 其中, h 为背景灰度, k 为灰度阶跃高度, l 为圆心到边缘的距离, ψ 是边缘与 x 轴之间的夹角。

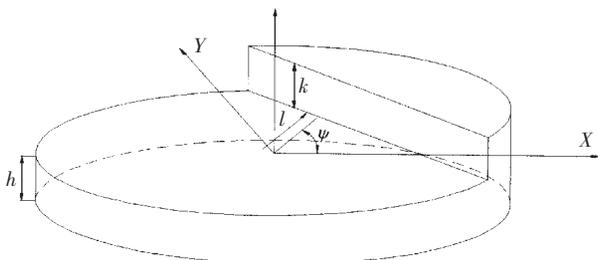


图 1 理想三维边缘模型

如果将图像旋转 $-\psi$, 边缘将与 Y 轴平行, 因而可得 $\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x,y) y dy dx = 0$ 。因此结合 OFMM 定义, 可得旋转角度 ψ :

$$\psi = \arctan \left(\frac{\text{Im}[2\phi_{01} + \phi_{11}]}{\text{Re}[2\phi_{01} + \phi_{11}]} \right) \quad (3)$$

利用矩模板可得图像的矩参数。矩参数计算如下:

$$\begin{cases} \phi_{00}' = \pi h + k [\arcsin \sqrt{1-l^2} - l\sqrt{1-l^2}] \\ \phi_{01}' = k \sqrt{1-l^2} - kl^2 \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-l^2}}{l} \right) \\ \phi_{10}' = kl \sqrt{1-l^2} - kl^2 \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-l^2}}{l} \right) \\ \phi_{11}' = 2kl^2 \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-l^2}}{l} \right) - 2kl^2 \sqrt{1-l^2} \\ \phi_{20}' = -\frac{1}{3} kl \sqrt{1-l^2} (10l^2 + 2) + 4kl^3 \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-l^2}}{l} \right) \end{cases} \quad (4)$$

根据矩参数与边缘参数之间的关系, 可以得到其他几个边缘参数表示如下:

$$\begin{cases} h = \frac{1}{\pi} \{ \phi_{00}' - k [\arcsin \sqrt{1-l^2} - l\sqrt{1-l^2}] \} \\ k = \frac{2\phi_{01}' + \phi_{11}'}{2(1-l^2)^{\frac{1}{2}}}, l = \frac{3}{5} \left(\frac{4\phi_{10}' + \phi_{20}'}{2\phi_{01}' + \phi_{11}'} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $2\phi_{01}' + \phi_{11}' = \cos\psi \text{Re}[2\phi_{01} + \phi_{11}] - \sin\psi \text{Im}[2\phi_{01} + \phi_{11}]$, 而 ψ 可由式(3)计算得到。

本文使用 5×5 矩模板来计算矩参数, 如图 2 为用于计算矩模板的 5×5 区域, 亚像素边缘位置可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{2l}{N} \begin{bmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, N 为矩计算过程中的模板大小。使用该模板与图像卷积后, 得到的矩参数是图像 N^2 区域内的矩参数, 因而采样单位圆直径扩大了 $N/2$ 倍, 因而计算得到的 l 参数应在其基础上减小 $N/2$ 。

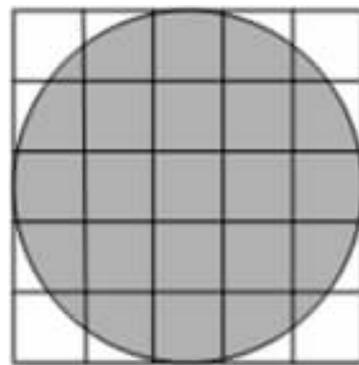


图 2 5×5 像素区域内单位圆模板

2 实验

为了验证文中算法的有效性, 进行了以下实验。实验中首先采用 CCD 摄像机将光强信号转化为电压信号后传输到图像采集卡进行处理。CCD 摄像机使用 Mini-

tron MTV-1881EX, 图像采集卡使用微视图提供的 MVPCI-V200 图像采集卡, 该采集卡支持多路视频输入, 可以真彩、伪彩、黑白方式采集图像。计算机具有 Intel Pentium CPU 2.80 GHz, 1 GB 内存, Windows XP 操作系统。采用上述实验设备分别对实际拍摄到的棒状物体侧视图和具有复杂细节的 Lena 图片进行了亚像素定位实验, 其结果分别如图 3、图 4 所示。

图 3(a)为使用图像采集系统对某棒状物体拍摄到的侧视图, 图 3(b)、(c)分别为采用 Zernike 矩算法和使用 OFMM 算法的定位效果, 图 3(d)为采用文中边缘定位算法检测出的边缘效果图。表 1 给出了采用不同亚像素定位算法的运行时间与具体的边缘亚像素位置。相对于像素级边缘定位, 亚像素级边缘位置的统计特性分析如表 2 所示, 可以看出该算法定位方差较小。采用文中算法定位精度较好, 相对耗时短, 因而算法的运算效率高。

图 4(a)为 298×300 大小的 Lena 图像, 图 4(b)、(c)分别为对该图像采用 Zernike 矩算法和使用 OFMM 算法的定位效果, 图 4(d)为采用文中算法进行亚像素定位的结果。该组检测结果中, 采用文中算法检测出的边缘较细且细节更加丰富。由于 OFMM 算子是基于积分的算子, 因此结合像素级边缘检测算子——Canny 算子, 可以提高定位准确度与运算速度。

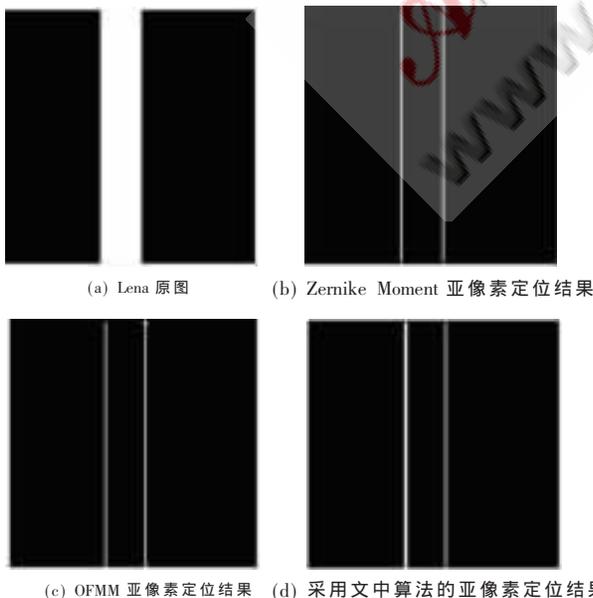


图 3 棒状物体侧视图的不同算法的亚像素定位结果

边缘检测在视觉测量技术中占有重要地位, 它是图像分析的关键步骤, 边缘检测方法的精度直接影响尺寸

表 1 不同边缘定位算法的性能比较

	算法运行时间/s	像素级边缘位置	亚像素级边缘位置	定位精度
Zernike 亚像素定位算法	0.062 000	(20,50)	(19.723 7,50.001 7)	(0.276 3,0.001 7)
		(30,50)	(29.726 9,50.002 1)	(0.273 1,0.002 1)
		(40,50)	(39.717 7,50.012 8)	(0.282 3,0.012 8)
OFMM 亚像素定位算法	0.187 000	(20,50)	(19.723 7,50.001 7)	(0.276 3,0.001 7)
		(30,50)	(29.810 5,50.009 5)	(0.189 5,0.009 5)
		(40,50)	(39.750 1,50.000 2)	(0.249 9,0.000 2)
文中算法	0.060 27	(20,50)	(19.827 6,50.001 1)	(0.172 4,0.001 1)
		(30,50)	(29.702 9,50.037 6)	(0.297 1,0.037 6)
		(40,50)	(39.859 9,50.004 5)	(0.140 1,0.004 5)

表 2 各算法定位统计性能对比

	X 方向误差的标准差	Y 方向误差的标准差
Zernike 亚像素定位算法	87.410 5	64.839 8
OFMM 亚像素定位算法	9.174 9	81.764 3
文中算法	4.924 1	20.246 8



图 4 具有复杂细节的 Lena 图片进行不同算法的亚像素定位结果

测量精度。文中提出边缘定位算法是将像素级与亚像素级边缘检测算法结合起来, 先用 Canny 算子将边缘定位在像素级上, 然后利用正交 Fourier-Mellin 矩算子寻找亚像素级边缘。实验表明, 该算法定位精度不低于 Zernike 矩算子和 OFMM 算子, 算法运算效率也较高, 在保证精度的前提下具有较短的运算时间, 适用于精度和速度要求较高的场合。

参考文献

[1] CANNY J. A computational approach to edge detection. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986,8(6):679-698.
 [2] PEDERSINI F, SARTI A, TUBARO S. Improving the

- performance of edge localization techniques through error compensation. *Signal Processing: Image Communication*, 1998(12):33-47.
- [3] 赵爱明. 基于二次曲线拟合的图像亚像素边缘定位算法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2006, 11(3):68-70.
- [4] IONESCU D, SASARMAN M. Automated optical inspection of geometrical shapes. *IEEE Instrument and Measurement Technology*, 1998, 1:14-17.
- [5] ZHANG W J, LI D, YE F, et al. Automated optical detect inspection and dimension measurement of drill bit. *Proceeding of 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2006: 95-100.
- [6] TABATABAI, A J. Edge location to subpixel values in digital imagery. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1984, 6(2):188-201.
- [7] LYVERS E P, MITCHELL O R, AKEY M L, et al. Subpixel measurement using a moment-based edge operator. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 1989, 11(12):1293-1309.
- [8] GHOSAL S, MEHROTRA R. Edge detection using orthogonal moment-based operators. *Pattern recognition*, 1992, 3:413-416.
- [9] JIUBIN T, LEI A, JIWEN C, et al. Further improvement of edge location accuracy of charge-coupled-device laser autocollimators using orthogonal Fourier-Mellin moments. *Optical Engineering*, 2007, 46(5).
- [10] JIUBIN T, LEI A, JIWEN C, et al. Further improvement of edge location accuracy of charge-coupled-device laser autocollimators using orthogonal Fourier-Mellin moments. *Optical Engineering*, 2007, 46(5).
- [11] PING Z, SHENG Y, DESCHENES S. Fourier-Mellin descriptor and interpolated feature space trajectories for three-dimensional object recognition. *Optical Engineering*, 2000, 39(5):1260-1266.
- [12] 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.
- [13] 曲迎东, 崔成松, 陈善本, 等. 利用 Zernike 矩算子的快速亚像素边缘检测方法[J]. *光电工程*, 2003, 30(5):59-61.
- (收稿日期: 2008-08-11)

电子技术应用
APPLICATION OF ELECTRONIC TECHNIQUE
www.chinaaet.com