

文章编号:1000-582X(2008)05-0549-04

# 一种改进的灰度矩亚像素边缘检测算法

罗 钧,侯 艳,付 丽

(重庆大学 光电工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**在分析 Tabatabai 提出的灰度矩亚像素边缘检测算法的基础上,指出灰度矩算法存在边缘判断条件不够完善和未能考虑模板效应的问题,提出了改进方法,考虑 Tabatabai 的灰度矩算法产生很多虚假边缘,改进算法分析了各参数对结果的影响,对边缘判断条件进行完善。实验结果表明,所改进算法具有抗干扰性、边缘细化能力强,定位准确的特点,分辨精度可达 0.06~0.08 个像素。

**关键词:**灰度矩;边缘检测;亚像素

中图分类号:TP391

文献标志码:A

## An improved algorithm for subpixel edge detection using gray moment

LUO Jun, HOU Yan, FU Li

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University 400030, P. R. China)

**Abstract:** Subpixel edge detection is an important research issues in image measurement. By analyzing the algorithm for subpixel edge detection presented by Tabatabai, two shortcomings of gray moment algorithm were revealed: difficulties in judging edges, and no consideration of the model effect. An improved algorithm was presented aiming at remedying the shortcomings. Considering there were many false edges in the image processed by Tabatabai's algorithm, we improved the edge judging rules of the algorithm by analyzing the influence of parameters on the result. The experimental results show that the improved algorithm has good anti-jamming and edge thinning abilities, and high locating accuracy with an error of 0.06 to 0.08 pixels.

**Key words:** gray moment; edge detection; subpixel

运用图像测量技术实现非接触精密尺寸测量,在工程应用中占有很重要的位置。图像测量以其非接触、全视场、高精度的特点逐渐成为机械加工领域中新的测量技术,其原理就是通过处理被测物体图像的边缘而获得图像的几何参数<sup>[1]</sup>。因而,边缘检测<sup>[2-3]</sup>是图像处理的基础和关键。随着人们对检测精度要求的不断提高,soble<sup>[4]</sup>,canny 等像素级的检测精度已经不能满足实际测量的要求,因此需要有

更高精度的边缘检测算法<sup>[5]</sup>。为了解决该问题,Tabatabai 等提出了灰度矩亚像素边缘定位法<sup>[6]</sup>。灰度矩边缘定位法的基本原理是假设实际图像中的实际边缘分布与理想阶跃边缘模型的灰度矩保持一致,通过此关系来确定实际边缘的位置。通过试验分析,该方法得到的边缘较粗,抗干扰能力不强,边缘定位不准确。笔者针对 Tabatabai 算法的不足,提出了改进方法。改进算法对提高边缘检测的精度

收稿日期:2008-01-05

基金项目:国防科工委国防军工计量“十一五”计划重点项目(J102006B104)

作者简介:罗钧(1963-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事测试计量仪器及系统的开发与研究,(Tel)023-65111472;  
(E-mail)luojun@cqu.edu.cn。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

在非接触精密尺寸测量的工程应用中有一定的实用价值。

## 1 灰度矩边缘检测算法

灰度矩边缘检测算法<sup>[6]</sup>是由 Tabatabai 首先提出的一种利用前三阶灰度矩来对边缘进行亚像素定位的算法。

该算子采用 45 个像素的序列,按照图 1 所示的排序顺序,由阴影部分近似构成一个单位圆作为算子的输入。算子的输出则为二维理想阶跃模型,可以认为是有一系列具有灰度  $h_1$  与一系列具有灰度  $h_2$  的像素相接而成的,如图 2 所示。其规一化模型可由 4 个参数决定:边缘位置  $\rho$ 、边缘方向  $\theta$ 、边缘两侧的灰度值  $h_1$  和  $h_2$ ,即

$$E(x, y, \rho, \theta) = \begin{cases} h_1, x \cos \theta + y \sin \theta \leq \rho; \\ h_2, x \cos \theta + y \sin \theta > \rho. \end{cases} \quad (1)$$

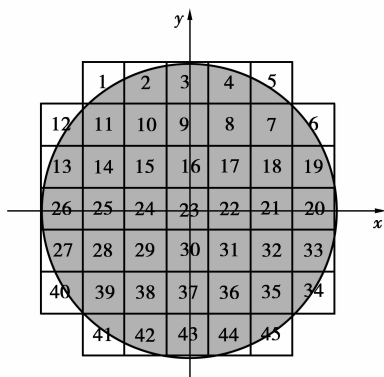


图 1 算子输入近似边缘模型

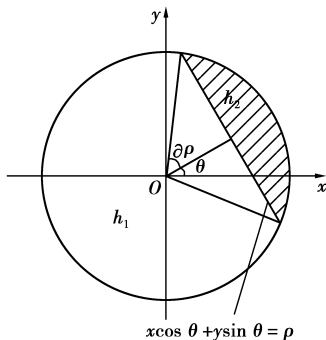


图 2 二维理想边缘模型

理想边缘模型中,  $p_1$  和  $p_2$  表示灰度值为  $h_1$  和  $h_2$  在单位圆内所占比例,则前三阶灰度矩  $m_k$  ( $k=1, 2, 3$ ) 满足:

$$\begin{cases} p_1 + p_2 = 1, \\ m_k = h_1^k p_1 + h_2^k p_2. \end{cases} \quad (2)$$

那么,可以得解

$$\begin{cases} p_1 = \frac{1}{2} \left( 1 + s \sqrt{\frac{1}{4 + s^2}} \right); \\ p_2 = \frac{1}{2} \left( 1 - s \sqrt{\frac{1}{4 + s^2}} \right); \\ h_1 = m_1 - \sigma \sqrt{\frac{p_2}{p_1}}; \\ h_2 = m_1 + \sigma \sqrt{\frac{p_1}{p_2}}. \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$\sigma = \sqrt{m_2 - m_1^2}; \quad (4)$$

$$s = \frac{(m_3 + 2m_1^3 - 3m_1 \cdot m_2)}{\sigma^3}. \quad (5)$$

要确定参数  $h_1, h_2, p_1, p_2$  就必须求出原单位圆内的前三阶灰度矩。由于在每个像素点上的灰度值都近似恒定,则前三阶灰度矩的求解就转化为单位圆覆盖的每个像素点灰度值的加权和

$$m_k = \sum_{i=1}^{45} \omega_i I_i^k, \quad (6)$$

式中:  $I_i$  代表单位圆中第  $i$  个像素点的灰度值;  $\omega_i$  代表第  $i$  个像素点对应的权值。

对于边缘位置  $\rho$ 、边缘方向  $\theta$  的求解详见文献[7]

$$\rho = \cos \alpha; \quad (7)$$

$$\sin \theta = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}; \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}. \quad (9)$$

其中  $x_0, y_0$  是单位圆的灰度重心坐标。

在得到规一化模型的 4 个参数以后,得到的亚像素坐标  $(x_s, y_s)$  的计算公式为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (10)$$

## 2 灰度矩算法的不足之处和改进方法

在分析灰度矩算法的过程中,发现了该算法存在边缘判断条件不够完善和未能考虑模板效应的问题,并进行了相应的改进。

### 2.1 边缘的判断条件改进

由式(3)可得

$$h_2 - h_1 = \sigma \left( \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} + \sqrt{\frac{p_1}{p_2}} \right). \quad (11)$$

由文献[7]的推导知:

$$|h_2 - h_1| \geq 2\sigma. \quad (12)$$

如果以此作为是否存在边缘的判定条件是不完善的,会产生很多虚假边缘,不利于边缘定位<sup>[8]</sup>。

1)判断条件式(12)等号不成立。因为该式只在  $p_1、p_2$  都等于  $1/2$  时才取等号,而将  $p_1、p_2$  代入式(3)得出  $s$  等于 0,又由式(5)知  $s$  不可能等于 0,所以式(12)等号不成立。判断条件应改为

$$|h_2 - h_1| > 2\sigma. \quad (13)$$

2)该式是建立在  $h_1$  和  $h_2$  存在的条件下的。当单位圆内每个像素点的灰度值都相等的时候,求解下列方程组

$$\begin{cases} \sigma^2 = \sum_{i=1}^{45} \omega_i I_i^2 - (\sum_{i=1}^{45} \omega_i I_i) \cdot (\sum_{i=1}^{45} \omega_i I_i), \\ \sum_{i=1}^{45} \omega_i = 1; \\ I_i = I(\text{常数}). \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{得 } \sigma = 0. \quad (15)$$

由式(3)可知,当  $\sigma$  等于 0 时  $h_1、h_2、p_1、p_2$  是不存在的。

由此可见,  $\sigma$  值反映了单位圆内各个像素点灰度值的相似度,当  $\sigma$  为 0 时,单位圆内各个像素点灰度值相等,当然不可能存在边缘点。所以,在用式(13)进行判断之前应该先判断  $\sigma$  值

$$\sigma > \tau (\tau \text{ 为大于 } 0 \text{ 的常数}), \quad (16)$$

对于不同的图像  $\tau$  值也不相同。

3)  $\rho$  值对边缘提取的影响由图 2 和式(7)知,  $\rho$  值是边缘的中点到圆心的距离,当  $\rho$  越大,  $\alpha$  越小,则灰度值为  $h_2$  的像素点在单位圆所占的比例也就越少,则很可能是噪声点,并不存在实际的边缘,所以  $\rho$  也应该作为判断的条件,即  $\rho < \delta$  ( $\delta$  为大于 0 的常数)。

### 2.2 模板效应

在灰度矩边缘检测算法中未能考虑模板效应,这就使式(10)计算不准确。所谓模板效应是指由于选择模板大小的不同而使边缘亚像素坐标的计算产生偏差<sup>[9]</sup>。该算法的模板是指权值  $\omega_i$  模板(算子的输入序列的大小不同权值模板大小也不同)。假设模板为  $N \times N$ ,由于上述亚像素坐标公式的推导和模板系数的计算都是在单位圆内进行的,但在实际应用中模板是在图像上移动,并与像素进行卷积,这时模板覆盖的是模板中心周围  $N^2$  个像素,单位圆的半径变为  $N/2$ ,因此需要把在单位圆的距离  $\rho$  放大  $N/2$  倍。因此边缘的亚像素坐标公式应为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + N \cdot \rho \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} / 2, \quad (17)$$

同时距离阈值应修改为

$$\rho \leq 2\delta / N. \quad (18)$$

## 3 算法实现

为了便于实际检测,可以将权值以  $7 \times 7$  模板(如图 3 所示)的形式表示,利用模板与图像卷积的方法来计算前三阶灰度矩。

$\omega_0$	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$
$\omega_{13}$	$\omega_{12}$	$\omega_{11}$	$\omega_{10}$	$\omega_9$	$\omega_8$	$\omega_7$
$\omega_{14}$	$\omega_{15}$	$\omega_{16}$	$\omega_{17}$	$\omega_{18}$	$\omega_{19}$	$\omega_{20}$
$\omega_{27}$	$\omega_{26}$	$\omega_{25}$	$\omega_{24}$	$\omega_{23}$	$\omega_{22}$	$\omega_{21}$
$\omega_{28}$	$\omega_{29}$	$\omega_{30}$	$\omega_{31}$	$\omega_{32}$	$\omega_{33}$	$\omega_{34}$
$\omega_{41}$	$\omega_{40}$	$\omega_{39}$	$\omega_{38}$	$\omega_{37}$	$\omega_{36}$	$\omega_{35}$
$\omega_{42}$	$\omega_{43}$	$\omega_{44}$	$\omega_{45}$	$\omega_{46}$	$\omega_{47}$	$\omega_{48}$

图 3  $7 \times 7$  模板

$$\omega_0 = \omega_6 = \omega_{42} = \omega_{48} = 0;$$

$$\omega_1 = \omega_5 = \omega_7 = \omega_{13} = \omega_{35} = \omega_{41} = \omega_{43} = \omega_{47} = 0.009\ 137\ 672\ 35;$$

$$\omega_2 = \omega_4 = \omega_{14} = \omega_{20} = \omega_{28} = \omega_{34} = \omega_{44} = \omega_{46} = 0.021\ 840\ 193;$$

$$\omega_3 = \omega_{21} = \omega_{27} = \omega_{45} = 0.025\ 674\ 188;$$

$$\omega_8 = \omega_{12} = \omega_{36} = \omega_{40} = 0.025\ 951\ 560;$$

其余的权值为 0.025 984 481。

该算法是通过模板在图像上依次移动,与图像求卷积来寻找边缘,模板每移动一次,在式(16)满足时就计算一次归一化参数,再判断式(13)和式(18)是否成立,如果成立利用式(17)计算亚像素坐标。

在式(17)中,  $(x_s, y_s)$  是边缘中点的亚像素坐标,  $(x, y)$  是模板中心对应的像素点的中心坐标。因为模板是逐个像素移动的,每移动一次,就计算边缘中点的亚像素坐标,故当模板在整个图像移动完以后,就得到了整个图像的边缘。

## 4 试验结果

通过几组对比试验来验证所改进的算法。第一个试验是验证  $\sigma$  值对边缘提取的影响。所用的图像是一幅  $256 \times 192$  的灰度图像,如图 4 所示。

由处理的结果可看出,在进行亚像素边缘提取时,对  $\sigma$  加以限制,减少了许多虚假边缘的产生。

第二个试验是为了验证距离阈值。用人工做了一幅  $128 \times 128$  的二值图像<sup>[10]</sup>,如图 5 所示。因为该试验是为了验证距离阈值对边缘提取的影响,故该实验是在其他条件完全一致的情况下进行的,之

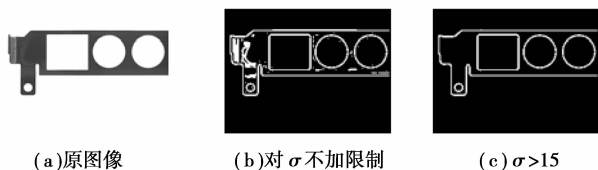


图4 图像边缘检测

所以采用标准的二值图像是为了更好的验证距离阈值对边缘粗细的影响。

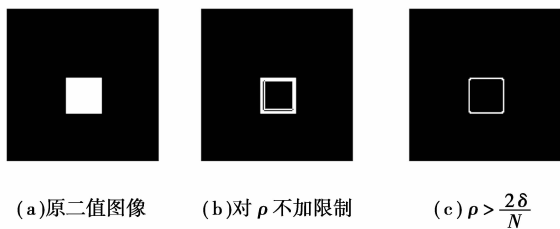


图5 二值图像边缘提取

试验结果表明,未对  $\rho$  加以限制检测出的图像边缘很粗,而改进后的算法细化了边缘。

第三个试验是为了验证算法的抗干扰性,先对图4(a)分别添加椒盐噪声和随机噪声,然后用本算法进行处理,结果如图6所示。

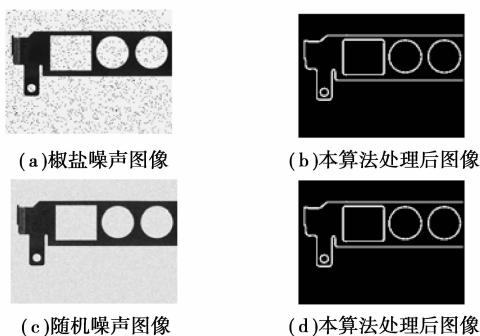


图6 抗干扰性验证

由实验结果可知改进算法的抗干扰性能力较强。

第四个试验是为了验证提出的亚像素坐标公式。同样取人工制作的一幅  $128 \times 128$  的二值图像,在图像第31行至第70行和第51列至90列区域内为1,背景为0,如图5(a)。在式(13)、(16)、(18)作为判断条件下,通过式(17)计算亚像素坐标。区域下方边缘的行坐标应在30行和31行中间,列坐标应在50列和51列中间,即亚像素坐标为(30.5, 50.5),取第35行至第44行,算法的检测结果如表1所示。计算的亚像素坐标的分辨精度可以达到0.06~0.08个像素。

表1 算法求出的亚像素坐标

实际的亚像素坐标 (行,列)	检测出来的亚像素坐标 (行,列)
35.5,50.5	35.569 182, 50.576 551
36.5,50.5	36.569 182, 50.576 551
37.5,50.5	37.569 182, 50.576 551
38.5,50.5	38.569 182, 50.576 551
39.5,50.5	39.569 182, 50.576 551
40.5,50.5	40.569 182, 50.576 551
41.5,50.5	41.569 182, 50.576 551
42.5,50.5	42.569 182, 50.576 551
43.5,50.5	43.569 182, 50.576 551
44.5,50.5	44.569 182, 50.576 551

## 5 结论

改进的算法在分析各参数对结果影响的基础上,对边缘判断条件进行了加强,使其边缘细化,并减少了很多虚假边缘。同时考虑了模板效应,优化了边缘的亚像素坐标计算公式,使其定位更加准确。

实验证明改进算法是行之有效的,可以应用于图像测量、摄像机标定等其他机器视觉中。

(下转第586页)

- overhang at replicative senescence [J]. *NatureGenet*, 2003,10:1038-1127.
- [6] HIYAMA K, HIRAI Y K, YOIZUMI S, AKIYAMA M, et al. Activation of telomerase in human lymphocytes and hematopoietic progenitor cells [J]. *J Immunol*, 1995, 155(8):3711-3715.
- [7] 赵朝晖,陈晓春,朱元贵. 人参皂苷 Rg1 延缓细胞衰老过程中端粒长度和端粒酶活性的变化[J]. *中国药理学通报*, 2005, 21(1):61-65.  
ZHAO CHAO-HUI, CHEN XIAO-CHUN, ZHU YUNAN-GUI, et al. Roles of telomere and telomerase in the process of ginseno- side Rg1 protection against tert-butyl h • roperoxide-induced senescence in WI-38 cells [J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2005, 21(1):61-65.
- [8] ANISIMOV S V. Epithalon decelerates aging and suppresses development of breast adenocarcinomas in transgenic HER-2/neu mice [J]. *Bulletin Experimental Biological Medicine*, 2002, 134(2):187-190.
- [9] BATLIWALLA F M, DAMLE R N, METZ C, CHIORAZZI N, GREGERSEN P K. Simultaneous flow cytometric analysis of cell surface markers and telomere length: Analysis of human tonsillar B cells [J]. *J Immunol Methods*, 2001, 247(1):103-109.
- [10] RUFER N, DRAGOWSKA W, THORNBURY G, ROOSNEK E, LANSDORP P M. Telomere length dynamics in human lymphocyte subpopulations measured by flow cytometry [J]. *NotBiotechnol*, 1998, 16(8):743-747.
- [11] BATIHWALLA F M, RUFER N, LANSDORP P M, GREGERSEN P I C. Oligoclonal expansions in CD8<sup>+</sup> CD28<sup>-</sup> Tcell largely explain the shorter telomeres dated in this subset: analysis by flowFISH [J]. *Hum Immunol*, 2000,61(10): 951-958.

(编辑 侯 湘)

(上接第 552 页)

#### 参考文献:

- [1] 于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [2] 刘桂雄,申柏华,冯云庆,等. 基于改进的 Hough 变换图像分割方法[J]. *光学精密工程*,2002,6(3):257-260.  
LIU GUI-XIONG, SHEN BO-HUA, FENG YUN-QING, et al. Method of image segmentation based on improved hough transform [J]. *Optics Precision Engineering*,2002,6(3):257-260.
- [3] 张强劲,杨丹,张小洪,等. 基于多尺度模糊逻辑的小波边缘检测方法[J]. *重庆大学学报*,2005,28(10):62-65.  
ZHANG QIANG-JIN, YANG DAN, ZHANG XIAO-HONG, et al. Wavelet edge detection method based on multi-scale fuzzy logic [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2005, 28(10): 62-65.
- [4] 朱颖,江泽涛. 基于 Sobel 算子的亚像素边缘检测方法[J]. *南昌航空工业学院学报(自然科学版)*,2005,19(2):100-102.  
ZHU YING, JIANG ZE-TAO. A Sub-pixel edge detection method based on Sobel operator[J]. *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology (Natural Science)*,2005,19(2):100-102.
- [5] LYVERS EDWARD P, MITCHELL OWEN ROBERT. Subpixel measurements using a moment-based edge operator [J]. *IEEE Transactionson Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12):1293-1307.
- [6] TABATABAI A J, MITCHELL O R. Edge location subpixel values in digital imagery[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,1984,6(2): 188-201.
- [7] 张永宏,胡德金,张凯,等. 基于灰度矩的 CCD 图像亚像素边缘检测算法研究[J]. *光学技术*,2004,30(6): 693-695.  
ZHANG YONG-HONG, HU DE-JIN, ZHANG KAI. Gray moment operators for subpixel edge detection on CCD images [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(6): 693-695.
- [8] 曲迎东,崔成松,陈善本,等. 利用 Sobel-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.  
QU YING-DONG, CUI CHENG-SONG, CHEN SHAN-BEN, et al. A fast subpixel edge measurement method based on sobel-zernike moment operator [J]. *Opto-electronic Engineering*,2003,30(5):59-61.
- [9] 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 JIN-QUAN, WANG JIAN-WEI, CHEN SHAN-BEN, et al. Improved algorithm of subpixel edge detection using Zernike orthogonal moments [J]. *Optical Technique*,2003,29(4):500-503.
- [10] LIU XIANG-DONG, ERICH R W. Subpixel edge location in binary images using dithering [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995,17(6):629-634.

(编辑 侯 湘)