

视觉测量中基元特征亚像素提取方法的研究

李保章, 崔彦平, 李荣廷

(河北科技大学机械电子工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要:建立了基于空间矩的三级灰度图像边缘模型, 首先由传统 LOG(Laplacian of Gaussian) 算子确定图像的像素级边缘, 再由灰度空间矩对像素级边缘进行亚像素定位, 并用 Hough 变换提取基元的亚像素边缘像素点, 最后通过最小二乘法曲线拟合得到亚像素级的基元特征。实验结果表明, 基于空间矩亚像素边缘定位算法, 以及像面直线和椭圆亚像素提取算法具有较高的精度和稳定性。

关键词:边缘检测; 直线提取; 椭圆提取; 空间灰度矩; Hough 变换; 最小二乘法

中图分类号: TP242.6 文献标志码: A

Extraction of feature primitives of computer vision

LI Bao-zhang, CUI Yan-ping, LI Rong-ting

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050018, China)

Abstract: Beeline and ellipse are the important elements in computer vision measurement. A spatial moment operator with three gray model is proposed. Firstly, the edge at the level of pixel is located by the Laplacian of gaussian operator, and subpixel location of the edge is obtained by the spatial moment. Then, the beeline and ellipse edge pixel points are extracted by the Hough transform at the level of subpixel. Finally, the subpixel beeline and ellipse edge is extracted by the least square curve fitting method. The experimental results show that spatial moment subpixel edge location and the extraction of beeline and ellipse on image plane possess high precision and high stability.

Key words: edge detection; beeline extraction; ellipse extraction; spatial moment; Hough transform; least square fitting

视觉测量技术具有非接触、高精度等优点, 得到了越来越广泛的应用。直线和圆是机械零件基本的图像基元特征。在视觉透视成像中, 一般情况下, 圆在摄像机图像平面上所成的像为椭圆。因此, 如何高精度提取直线与椭圆图像的轮廓边缘是视觉测量中图像处理的关键。

常用的经典边缘检测算子有 Roberts, Sobel, Prewitt, Krisch 和 Gauss-Laplace 算子, 以上经典边缘检测算法的精度为像素级, 即能判断出边缘在哪一个像素内, 至于更准确的位置就需要更高精度的提取算法, 即亚像素算法。目前常用的亚像素算法有形心法、灰度重心法、拟合法和空间矩法等。针对中心对称目标, 形心法和灰度重心法定位精度可达 $0.2 \sim 0.5$ 个像素; 拟合法精度虽高, 但需要已知目标特性的函数形式; 空间矩法的缺点是运算速度要比传统边缘检测算子慢^[1-3]。

笔者首先利用经典像素级算子检测速度快的优点, 由传统 LOG(Laplacian of Gaussian) 算子确定图像

收稿日期: 2011-06-29; 修回日期: 2011-12-26; 责任编辑: 张 军

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075119, 11002046); 河北省自然科学基金资助项目(E2010000868); 河北省科学技术研究与
发展计划项目(10212111D)

作者简介: 李保章(1962-), 男, 河北大城人, 副教授, 硕士, 主要从事先进制造技术方面的研究。

的像素级边缘,再利用亚像素级算子精度高的特点,由空间灰度矩法对像素级边缘进行亚像素定位,并用 Hough 变换提取基元的亚像素边缘像素点^[4],最后通过最小二乘法曲线拟合得到亚像素级的基元特征。

1 基于空间矩的图像边缘亚像素定位

在所有的经典边缘检测算子中,LOG 算子同时具有滤波和检测边缘功能^[5],因此采用 LOG 算子先对原始图像进行像素级边缘检测,在此基础上再利用空间矩算子对像素级边缘进行亚像素定位。

1.1 像素级边缘定位

LOG 算子的输出 $h(x, y)$ 是通过卷积运算得到的:

$$h(x, y) = \nabla^2 [g(x, y) \times f(x, y)]. \tag{1}$$

根据卷积求导法有

$$h(x, y) = [\nabla^2 g(x, y)] \times f(x, y), \tag{2}$$

其中:

$$\nabla^2 g(x, y) = \left(\frac{x^2 + y^2 - 2\sigma^2}{\sigma^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \tag{3}$$

1.2 空间灰度矩边缘检测法

图 1 所示为一个理想的单位圆图像二维边缘^[6-7],该边缘将图像采集区分为灰度值为 h 和 $(h+k)$ 的 2 块区域,设该单位圆边缘连续函数为 $f(x, y)$,其矩可定义为

$$M_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy, \tag{4}$$

其中, p, q 为正整数。

M'_{pq} 为矩 M_{pq} 旋转 φ 角度后的复合矩,则有

$$M'_{pq} = \sum_{r=0}^p \sum_{s=0}^q \binom{p}{r} \binom{q}{s} (-1)^{q-s} (\cos \varphi)^{p-r+s} (\sin \varphi)^{q+r-s} M_{p+q-r-s, r+s}. \tag{5}$$

将边缘绕单位圆圆心 O 点旋转角度 φ ,使单位圆中的边缘与水平方向垂直,此时 $M'_{01} = 0$,由式(5)可得

$$\begin{aligned} M_{00} &= M'_{00}, \\ M'_{10} &= \cos \varphi M_{10} + \sin \varphi M_{01}, \\ M'_{01} &= -\sin \varphi M_{10} + \cos \varphi M_{01}, \\ M'_{20} &= \cos^2 \varphi M_{20} + 2\cos \varphi \sin \varphi M_{11} + \sin^2 \varphi M_{02}. \end{aligned} \tag{6}$$

由 $M'_{01} = 0$ 得

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{M_{01}}{M_{10}}. \tag{7}$$

由图 1 所示理想的单位圆二维边缘,可得

$$\begin{aligned} M'_{00} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} h dy dx + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} k dy dx = h\pi + \frac{k}{2}\pi - k\sin^{-1}l - kl\sqrt{1-l^2}, \\ M'_{10} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} hx dy dx + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} kx dy dx = \frac{2}{3}k\sqrt{(1-l^2)^3}, \\ M'_{20} &= 2 \int_{-1}^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} hx^2 dy dx + 2 \int_l^1 \int_0^{\sqrt{1-x^2}} kx^2 dy dx = \\ &= \frac{\pi}{4}h + \frac{\pi}{8}k + \frac{l}{2}k\sqrt{(1-l^2)^3} - \frac{l}{4}k\sqrt{1-l^2} - \frac{k}{4}\sin^{-1}l. \end{aligned} \tag{8}$$

由式(8)可得

$$l = \frac{4M'_{20} - M'_{00}}{3M'_{10}}. \tag{9}$$

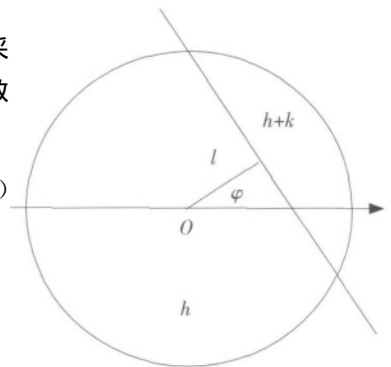


图 1 理想二维边缘模型
Fig.1 Ideal 2-D edge model

1.3 三灰度空间矩模型

上述理论的推导是基于理想的二维边缘模型,但实际上,应该采用三灰度边缘模型来代替二维边缘模型(如图2所示)。因为在背景图像的灰度与目标图像的灰度之间存在过渡区域灰度。即1个背景灰度,1个目标灰度,1个过渡灰度。所以由式(9)得到的亚像素边缘位置会存在一个原理误差。

三灰度模型的亚像素位置可由式(10)确定:

$$l_c = \frac{(l-l_1)l_2 \sqrt{(1-l_2^2)^3} + l_1(l_2-l) \sqrt{(1-l_1^2)^3}}{(l-l_1) \sqrt{(1-l_2^2)^3} + (l_2-l) \sqrt{(1-l_1^2)^3}} \quad (10)$$

利用式(9)所计算出的亚像素位置的原理误差 E 为

$$E = l_c - l = \frac{(l_2-l)(l_1-l) [\sqrt{(1-l_1^2)^3} - \sqrt{(1-l_2^2)^3}]}{(l-l_1) \sqrt{(1-l_2^2)^3} + (l_2-l) \sqrt{(1-l_1^2)^3}} \quad (11)$$

由式(11)可知,当 $l=l_1$ 或 $l=l_2$ 时,原理误差不存在,这时边缘恰好处在图像像素的边界处。若不进行误差补偿,即使被检测边缘为标准的直线,由式(9)所确定的边缘将不是直线。所以需对计算出的值进行补偿。

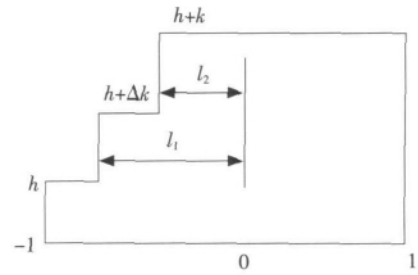


图2 实际二维边缘模型

Fig.2 Actual 2-D edge model

2 基元特征的高精度提取

2.1 Hough 变换

Hough 变换是用图像边缘信息得到图像检测参数曲线的方法,以解决参数空间中的聚类检测问题^[8]。

2.1.1 直线 Hough 变换

图像空间的直线上任意一点 $A(x_0, y_0)$, 在参数空间中对应着一条正弦曲线:

$$\rho = x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta \quad (12)$$

式中: ρ 为直线到坐标原点的垂直距离; θ 为原点到该直线的垂线与轴正方向的夹角。

对于图像空间中直线的 n 个点, 它们所对应的参数空间中 n 条正弦曲线在 $0 \leq \theta \leq \pi$ 时必相交于一点。

2.1.2 基于随机 Hough 变换的椭圆检测

椭圆方程可以表示为

$$x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F = 0 \quad (13)$$

式中: (x, y) 为图像空间坐标; B, C, D, E, F 是椭圆方程的参数。

在参数空间维数不超过二维的情况下, Hough 变换的检测效果较好, 但对椭圆而言, Hough 变换需要 5 个参数表示, 因此用 Hough 变换方法检测椭圆, 须在五维参数空间进行聚类检测, 这使得计算量过大且难以实现。而随机 Hough 变换可以有效地降低计算量^[7], 本文采用随机 Hough 变换对椭圆类边缘进行检测。

2.2 基于 Hough 变换的最小二乘法曲线拟合像面基元提取方法

Hough 变换计算量的大小与参数空间量化粗细存在直接联系。为了提高图像边缘检测速度, 首先利用 Hough 变换检测出图像边缘像素点, 再对这些边缘像素点进行最小二乘法曲线拟合, 得到亚像素级的基元特征。由于最终提取基元的精度不是由 Hough 变换决定的, 而是由最小二乘法曲线拟合决定的, 所以笔者提出的基于 Hough 变换的最小二乘法曲线拟合基元方法, 可对多维参数空间进行聚类检测, 速度快, 精度高。

2.2.1 最小二乘法直线拟合

设 Hough 变换提取的像面点坐标为 $(x_i, y_i) (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 。由最小二乘法可得

$$L_y = \sum_{i=1}^N [y_i - (ax_i + b)]^2 \rightarrow \min, \quad (14)$$

其中:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) y'_i}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) x'_i} = \frac{\sum_{i=1}^N x'_i y'_i}{\sum_{i=1}^N x'^2_i} \quad (15)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (16)$$

$$\text{式中: } \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i; \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i; x'_i = x_i - \bar{x}; y'_i = y_i - \bar{y}.$$

2.2.2 最小二乘法椭圆拟合

对 Hough 变换提取的椭圆亚像素边缘数据 $M_c = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)]$, 由最小二乘法进行椭圆拟合。

椭圆方程如式(13)所示, 建立目标函数:

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^N (x^2 + 2Bxy + Cy^2 + 2Dx + 2Ey + F)^2 \rightarrow \min. \quad (17)$$

由 Levenberg-Marquardt 非线性优化方法, 可求得椭圆方程 B, C, D, E, F 共 5 个参数, 即可得到亚像素的椭圆方程。其中椭圆中心坐标计算公式如下:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - CD}{C - B^2}, \\ y_0 = \frac{BD - E}{C - B^2}, \end{cases} \quad (18)$$

该算法对迭代初值要求不高, 对边缘数据具有较好的适应能力。

3 实验研究

为验证提出的算法, 笔者建立了双目视觉测量实验系统, 实验系统由 2 台 CCD 摄像机、精密一维导轨、靶标、装有图像采集卡和检测软件的计算机、游标卡尺和块规等测量附件组成。

3.1 直线的亚像素基元提取实验

把块规 2 个工作面间的距离作为真值验证本文算法。利用提出的像面直线基元特征亚像素算法, 提取块规工作面在左右摄像机像面上的直线基元(如图 3 所示), 再对直线边缘像素点进行空间直线重建, 获得 2 个工作面边缘在世界坐标系中的直线方程^[8], 进而计算出块规 2 个工作面间的实际距离, 测量结果见表 1。

由表 1 中测量结果可知, 该实验系统的测量误差小于 0.02 mm; 本实验所采用的 CCD 分辨率为 576 mm×768 mm, 而且块规与 2 个摄像机的距离均在 1 m 左右, 说明本文提出的直线边缘亚像素提取算法具有较高精度。

3.2 椭圆边缘亚像素提取实验

所用的圆平面靶标如图 4 所示。靶标圆心坐标已知, 靶标固定在精密一维导轨上, 可以沿世界坐标系的 Z_w 正方向移动, 在不同的 Z_w 坐标处采集靶标图像, 通过图像处理和坐标变换, 获得靶标上各圆孔中心在世界坐标系中的实际坐标值。

图 5 为采用本文前述方法提取的靶标图像的椭圆亚像素边缘。

由亚像素椭圆的中心坐标, 重建出圆形靶标中心的空间三维坐标, 求取用该计算得到的圆心三维坐标与圆心实际世界坐标的均方根误差, 计算公式如式(19)所示:

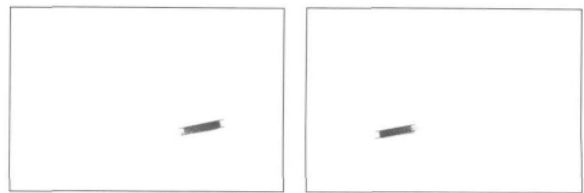


图 3 块规工作面在左右摄像机像面成像直线边缘提取

Fig. 3 Extracting the parallel line edges of working faces on the block gauge

表 1 块规两工作面距离测量结果

Tab. 1 Measuring result of working faces on the block gauge

	mm					
测量次数	1	2	3	4	5	6
块规尺寸	10	20	30	40	50	80
测量结果	9.982	19.977	30.017	39.985	50.018	80.016

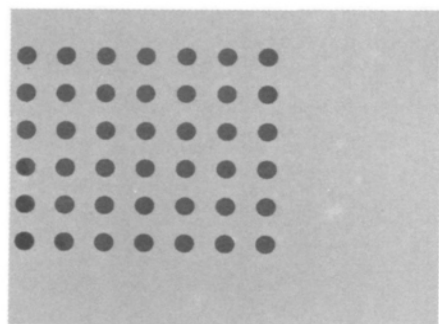


图 4 摄像机采集靶标原始图像

Fig. 4 Original figure of planar target sampled by camera

(下转第 189 页)

- [5] LIN Y F, JING S R, WANG T W, et al. Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands[J]. Environmental Pollution, 2002, 119(3): 413-420.
- [6] HOA T T H, KHANH L N, LIU Z J, et al. Nitrogen removal by immobilized anammox sludge using PVA gel as biocarrier[J]. Japanese Journal of Water Treatment Biology, 2006, 42: 139-149.
- [7] 赵 昕, 夏文香, 陈丽丽, 等. 海水反硝化细菌富集培养及性能研究[J]. 生物技术(Biotechnology), 2010, 20(4): 75-77.
- [9] 蔡昌凤, 梁 磊. 高效好氧反硝化细菌的筛选及脱氮特性的研究[J]. 环境科学与技术(Environmental Science & Technology), 2011, 34(1): 41-44.
- [10] 胡朝松, 李春强, 刘志昕, 等. 海洋沉积物中反硝化细菌的分离鉴定及反硝化性能研究[J]. 环境科学研究(Research of Environmental Sciences), 2009, 22(1): 114-118.
- [11] TAKAYA N, CATALAN-SAKAIRI M A B, SAKAGUCHI Y, et al. Aerobic denitrification bacteria that produce low levels of nitrous oxide[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(6): 3 152-3 157.
- [12] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

(上接第 149 页)

$$e = \sqrt{\frac{(X_m - X_w)^2 + (Y_m - Y_w)^2 + (Z_m - Z_w)^2}{3}} \quad (19)$$

计算结果作图如图 6 所示。由图 6 可知靶标上圆孔中心坐标的实际测量误差小于 0.015 mm, 测量结果的标准差为 0.008 5 mm。说明本文提出的基于空间矩的最小二乘法曲线拟合椭圆边缘亚像素提取算法具有较高的测量精度。

4 结 语

提出了基于空间矩的最小二乘法曲线拟合亚像素基元特征提取的新方法, 并进行了相关的实验研究, 实验结果说明, 提出的基元特征提取方法具有较高的精度。

参考文献:

- [1] 张洪涛, 段发阶, 叶声华. 一种快速亚像素边缘检测方法研究[J]. 计量学报(Acta Metrologica Sinica), 2002, 23(4): 263-266.
- [2] 佟庆彬, 丁振良, 王 艳, 等. 基于视觉图像的石英摆片参数精密测量方法[J]. 光电子·激光(Journal of Optoelectronics · Laser), 2008, 19(4): 521-524.
- [3] LIU Xiang-dong, EHRICH R W. Subpixel edge location in binary images using dithering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1995, 17(6): 629-634.
- [4] 张永宏, 胡德金, 徐俊杰. 基于视觉图像的机加工零部件亚像素边缘定位[J]. 机械工程学报(Chinese Journal of Mechanical Engineering), 2004, 40(6): 179-182.
- [5] SHEN Li-qin, SHEN Ding-gang, QI Fei-hu. Edge detection on real time using LOG filter[A]. 1994 International Symposium on, Image Processing and Neural Network[C]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 1994, 1: 37-40.
- [6] EDWARD P L, MITCHELL O R, MARK L A. Subpixel measurements using a moment-based edge operator[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(12): 1 293-1 309.
- [7] 曲迎东, 李荣德, 袁晓光, 等. 两级 Zernike 矩算子在喷射沉积坯尺寸检测中的应用[J]. 光电子·激光(Journal of Optoelectronics · Laser), 2006, 17(5): 600-603.
- [8] 岁 波, 都 东, 陈 强, 等. 基于双目视觉的工业机器人运动轨迹准确度检测[J]. 机械工程学报(Chinese Journal of Mechanical Engineering), 2003, 39(5): 88-91.

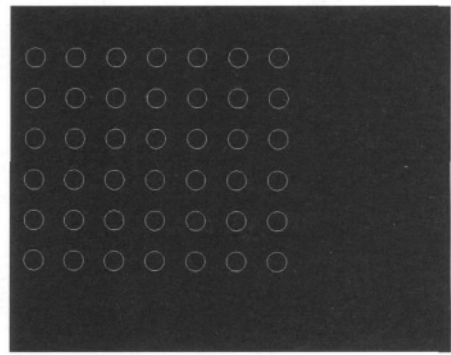


图 5 椭圆边缘亚像素提取后的结果
Fig. 5 Subpixel edge extraction of ellipse

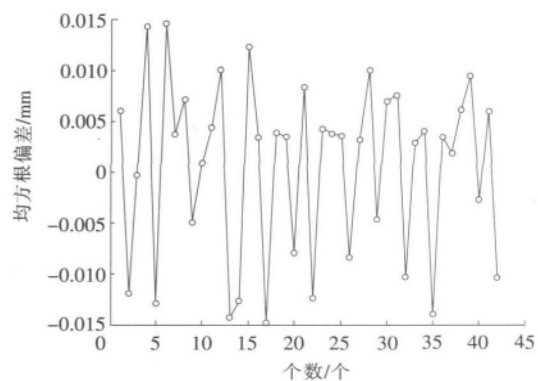


图 6 椭圆中心坐标偏差

Fig. 6 Deviation of the ellipse center coordinates