文章编号:1002-2082(2010)06-0956-05

CCD摄像头圆目标中心定位方法

李元锋[1]，李正生[1]，王 洋[2]
(1. 第二炮兵工程学院 101教研室，陕西 西安 710025；
2. 第二炮兵96669部队，北京 100096)

摘 要：在大型设备自动对接系统中，需要CCD摄像头对一设备截面的圆目标进行图像获取，并找出图像的中心点坐标，用于两设备的中心对准。为了满足实时性测量和高精度定位要求，提出一种CCD摄像头圆目标中心定位方法。先对图像使用中值滤波方法进行图像增强，利用广义数字形态学中的多结构抗噪膨胀腐蚀型算子提取单像素宽图像边缘，用多项式插值法对图像边缘进行亚像素定位，用半径约束最小二乘圆拟合法对圆中心进行精确定位。实验测量结果表明，该方法测量时间短、精度高、稳定性好，亚像素定位精度优于1/20像素，中心点总标准偏差小于0.01，可满足设备自动对接系统要求。

关键词：CCD摄像头；多结构抗噪膨胀腐蚀；多项式插值；半径约束最小二乘圆拟合
中图分类号：TP391 **文献标志码**：A

Center location of circle target captured by CCD camera

LI Yuan-feng[1], LI Zheng-sheng[1], WANG Yang[2]
(1. 101 Department, The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China;
2. 96669 Department, The Second Artillery Army, Beijing 100096, China)

Abstract: In the automated docking system for large-scale equipments, CCD camera is needed to get the circle target image of one equipment, then find the coordinates of the center of the image using for alignment of the two equipments. In order to meet real-time measurement and high-precision positioning requirements, the paper presents a CCD camera image center positioning method. Firstly, the image uses median filtering method for image enhancement, secondly, single-pixel-wide image edge of the image is fully extracted by generalized morphological structure of anti-noise in the multi-operator expansion and corrosion, then a polynomial interpolation method is used for sub-pixel positioning of image edge, and finally use a radius of constrained least squares circle to fit the target image center of the circle for precise positioning. The experimental results show that it is fast, accurate, stable, its sub-pixel positioning accuracy is better than 1/20 pixel, and total standard deviation of center point is smaller than 0.01, which meets the automated docking system requirements.

Key words: CCD camera; multi-operator expansion and corrosion; polynomial interpolation; radius constrained least squares circle fitting

引言

现代工业应用中，大型设备自动对接系统中需要通过CCD摄像头拍摄其中一设备截面螺孔图像，螺孔一般为一近似圆，通过对其圆目标进行中

收稿日期：2010-04-15； **修回日期**：2010-05-04
作者简介：李元锋(1983—)，男，江苏仪征人，在读硕士研究生，陕西西安第二炮兵工程学院工程师，主要从事信号与信息处理研究工作。E-mail：jonasdhb@163.com

心精确定位,达到自动中心对准的目的。在中心对准过程中,要求测量速度快,精度高,具有一定的稳定性。在传统的图像检测中,圆中心检测算法有重心定位法、中值定位法[1]、Hough 变换法[2]、矩心内插法。前两种算法要求图像分布比较均匀,否则会产生较大误差。Hough 变换需要逐点投票、记录,所用的时间比较长,而且精度不高。矩形内插法定位精度低、重复性高、计算速度慢。而半径约束最小二乘圆拟合法基于最小二乘法原理,在圆的拟合过程中,用已知的螺孔半径作为一种约束参与运算,提高了拟合精度,并且有很快的计算速度。

1　图像增强

由于获取CCD 图像数据的过程一般会受到各种影响因素所造成的噪声的干扰,因而需要图像预处理中的图像增强技术。图像增强方法中,中值滤波是一种应用比较广泛的空域增强[3]方法。中值滤波法[4]主要功能是将图像灰度相差比较大的像素值改为取邻域像素的中间值,可以滤出孤立的噪声点,使图像更加平滑。同时,由于中值滤波不是简单的取均值,故产生的模糊比较小,能在抑制噪声的同时保持边缘少受模糊。

设 $f(x,y)$ 表示原始图像在 (x,y) 处的灰度值,选用 $N\times N$ 正方形窗口(N 一般为 3 或 5),$g(x,y)$ 表示滤波后图像在 (x,y) 处的灰度值,Med{}表示对窗口求中值,中值滤波表示为

$$g(x,y)=\mathrm{Med}\{f(x+n,y+m),\quad n\geqslant(1-N)/2,\quad m\leqslant(N-1)/2\} \tag{1}$$

经图像增强后,使用广义数字形态学中的多结构抗噪膨胀腐蚀型算子提取单像素宽图像边缘,然后用多项式插值法对图像边缘进行亚像素定位,最后使用半径约束最小二乘圆拟合法对圆目标中心进行精确定位。

2　单像素宽图像边缘提取

图像边缘[5]是图像最基本的特征之一,蕴含了图像丰富的内在信息,并广泛用于目标识别、图像分割、遥感、医学图像分析等领域,存在于信号的突变点处。边缘检测的算法很多,包括经典图像边缘检测算子、小波变换法、神经网络法、模糊检测法、基于数字形态学的方法等。经典图像边缘检测算子[6]包括边缘差分检测、Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、LOG 算子、Canny 算子。其中 Robert,Sobel,Prewitt 算子由于引入了各种形式的微分运算,对噪声敏感,抗噪性能差。LOG 算子利用高斯函数对原始图像作平滑或卷积运算,计算量较大。Canny 法则是使用两种不同的阈值分别检测强边缘和弱边缘,虽然边缘提取效果好,但容易产生双像素边界,且对噪声敏感,即使采用一些辅助的方法加以去噪,也相应地会带来边缘模糊等难以克服的缺陷。小波变换法具有良好的时频局部特性,利用多尺度和多分辨率的性质,可真实有效地提取图像边缘特征,但小波尺度的选择需要经验,不好把握。神经网络法与模糊检测法定位精度比较好,但计算量较大,速度较慢。

数字形态学是一种非线性滤波法。它的基本思想是用具有一定形态的结构元素去量度、提取图像中对应的形状,其对边缘方向不敏感,并在很大程度上抑制了噪声,边缘检测效果很好。但是,数字形态学中的结构元素[7]决定了边缘检测的性能。单一结构元素只能检测出与结构元素同方向的边缘,而对结构元素不同方向的边缘不敏感。因此使用广义数字形态学中的多结构多尺度抗噪膨胀腐蚀方法来提取图像边缘。

设 $f(x,y)$ 是输入图像的灰度函数,$b(k,l)$ 是图像的子集,灰度膨胀和灰度腐蚀的运算式分别为

$$(f\oplus b)(x,y)=\max[f(x-k,y-l)+b(k,l)] \tag{2}$$

$$(f\Theta b)(x,y)=\min[f(x+k,y+l)-b(k,l)] \tag{3}$$

$b(k,l)$ 对 $f(x,y)$ 进行灰度形态开运算,闭运算,表达式分别为

$$f\cdot b=(f\Theta b)\oplus b \tag{4}$$

$$f\cdot b=(f\oplus b)\Theta b \tag{5}$$

抗噪膨胀腐蚀型边缘检测算子为

$$E=(f\cdot b)\oplus b-(f\cdot b)\Theta b \tag{6}$$

抗噪膨胀腐蚀算子对正负脉冲的响应为 0,可有效滤除噪声,同时还能消除图像毛刺及孤立斑点,填补图像漏洞和裂缝,图像边缘检测效果很好。

图像边缘计算公式为

$$\mathrm{edge}=\sum_{i}^{n}w_i(E_i) \tag{7}$$

式中:E_i 为一组多尺度多结构的抗噪膨胀腐蚀边缘检测算子;w_i 为权值。因小的形态学结构元素去噪能力较弱,但是它能够保留大多数的图像细节边缘,而大的结构元素有较强的去噪能力,小的结构元素赋予小的加权值,大的结构元素赋予大的加

权值。权值 w_i 具体计算公式如下

$$w_i=\frac{\Delta_i^2}{\sum_i^n \Delta_n^2} \tag{8}$$

式中：Δ_i 是第 i 个结构源的图像标准差值。

选取 6 个代表性的 3×3 结构元素：

$b_1=\{(0,-1),(0,1),(0,0),(-1,0),(1,0)\}$；

$b_2=\{(-1,0),(0,0),(0,1)\}$；

$b_3=\{(0,-1),(0,0),(1,0)\}$；

$b_4=\{(-1,0),(0,0),(0,-1)\}$；

$b_5=\{(0,1),(0,0),(1,0)\}$；

$b_6=\{(-1,-1),(-1,1),(0,0),(1,-1),(1,1)\}$。

其中:(0,0)表示结构元素的中心。

为了验证算法的可行性和有效性,采用加入噪声强度为 0.01 的椒盐噪声的 Lena 图像作为测试图像,如图1 所示。经中值滤波后如图2 所示。分别用Sobel,LOG,Canny 算子和抗噪膨胀腐蚀算子对该图像进行边缘提取,结果分别如图3 至图6 所示。

图1　加入椒盐噪声图像

Fig. 1　Image with salt-pepper noise

图2　中值滤波后图像

Fig. 2　Image after median filtering

图3　Sobel 算子边缘检测

Fig. 3　Edge location with Sobel method

由图 2 可以看出,经中值滤波后,图像中的椒盐噪声滤除效果很好,图像细节更加平滑。由图 3 和图 4 可以明显看出,Sobel 和LOG 算子对于噪声敏感。图5 中,Canny 算子的边缘受噪声影响较大,检测边缘不连续,出现了漏检边缘现象。图6 中,多结构抗噪膨胀腐蚀算子的边缘检测中,噪声得到了有效滤除,在头发、帽顶和眼睛等五官的细节上也获得了较为清晰的结果。

图4　LOG 算子边缘检测

Fig. 4　Edge location with LOG method

图5　Canny 算子边缘检测

Fig. 5　Edge location with Canny method

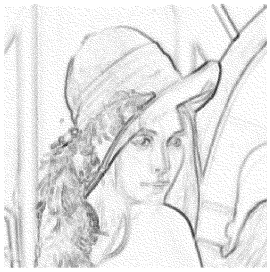

图6　抗噪膨胀腐蚀边缘检测

Fig. 6　Edge location with expansion and corrosion against noise

3　图像边缘亚像素定位

经抗噪膨胀腐蚀数字形态学算子提取图像后,得到了单像素宽的图像边缘,两个特征点间的像素个数可能存在着一个像素的误差,为了提高图像检测精度,对图像进行亚像素定位。常用的亚像素定位方法[8]可以分为拟合法、插值法、矩方法、概率论法、相关算子法等。考虑到算法的精度、抗噪声能力

及运算量,选用多项式插值法对图像进行快速亚像素定位。其主要的思想是在边缘的附近,按一个最佳匹配函数,通过插值使得低分辨率的离散数据向连续域数据逼近,从而得到更为准确的位置。用近似恢复图像边缘过渡区的一维连续光强图像,求出边缘特征点的坐标[9]。

根据多项式插值理论,插值函数有如下形式

$$f(x)=\sum_{k=0}^{n}\prod_{\substack{i=0\\ i\neq k}}^{n}\frac{(x-x_i)}{(x_k-x_i)}y_k \tag{9}$$

式中:x_k 为插值点;y_k 为离散函数值;$f(x)$为插值函数。

对抗噪膨胀腐蚀算子确定的边缘点(x_i,y_i),在梯度图像$R_{(i,j)}$的x 方向上取3 个点$R_{(i-1,j)}$,$R_{(i,j)}$,$R_{(i+1,j)}$,以这 3 个点的梯度幅值为函数值,以(x_i-w),x_i,(x_i+w)3 点为插值点,w 为像素 x 方向上的间距,代入(8)式求得边缘点像素 x 坐标

$$x=x_i+\frac{R_{(i-1,j)}-R_{(i+1,j)}}{R_{(i-1,j)}-2R_{i,j}+R_{(i+1,j)}}\times\frac{w}{2} \tag{10}$$

同理在梯度图像 $R_{(i,j)}$的 y 方向上取 3 个点 $R_{(i,j-1)}$,$R_{(i,j)}$,$R_{(i,j+1)}$,以这 3 点的梯度幅值为函数值,以(y_i-h),y_i,(y_i+h)3 点为插值点,h 为像素y 方向的间距,代入(8)式求得边缘点像素 y 坐标

$$y=y_i+\frac{R_{(i,j-1)}-R_{(i,j+1)}}{R_{(i,j-1)}-2R_{i,j}+R_{(i,j+1)}}\times\frac{w}{2} \tag{11}$$

式中:h 为像素 y 方向的间距。

4　圆中心精确定位

经多项式插值法亚像素精确定位后,得到了圆目标轮廓的边缘坐标,最常用的方法是最小二乘圆拟合法。因自动对接系统中,待测圆目标的内径同已知螺母外径相同,可用此半径作为约束条件[10]结合最小二乘圆拟合法,用来约束圆的拟合,以提高拟合精度。

最小二乘法就是利用使优化函数达到最小值而求解出一定区域位置参数的值。

设圆的方程为

$$(x_i-a)^2+(y_i-b)^2=r^2 \tag{12}$$

取残差 ε_i 为

$$\varepsilon_i=(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2 \tag{13}$$

式中:$i\in E$,E 表示所有待拟合圆的亚像素边缘点集合;$(x_i,y_i)(i=1,2,\cdots,n)$为图像亚像素边缘点坐标;$a$ 与b 为齿轮圆心;r 为齿轮中心孔半径。

残差平方和函数为

$$Q=\sum_{i\in E}[(x_i-a)^2+(y_i-b)^2-r^2]^2 \tag{14}$$

式中:(x_i,y_i) 为图像边缘上特征点坐标。

当圆半径作为约束参与拟合时,根据拉格朗日乘法,将其最小二乘优化目标函数改为

$$Q=\sum_{i\in E}(\sqrt{(x_i-a)^2+(y_i-b)^2}-r)^2+\lambda(r-r_0) \tag{15}$$

式中:r_0 为约束条件设计半径;λ 为朗格朗日乘子。

通过此式将约束最小二乘法转化为无约束最小二乘法,利用高斯-牛顿或Levenberg-Marquardt 法可以求解圆中心坐标(a,b)。

5　实验数据分析及结论

为了验证定位算法,通过CCD 摄像头对一圆目标进行测量定位。使用本文提出的方法对圆目标进行快速精确定位,软件程序采用 Microsoft Visual C++6.0 编译,运行环境为 Windows XP 系统。

首先CCD 摄像头所获得圆目标图像经中值滤波后如图7 所示。使用抗噪膨胀腐蚀算子对其边缘检测结果如图 8 所示。

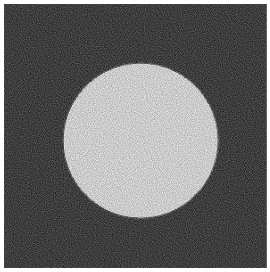

图 7　圆目标图像

Fig. 7　Image of circle target

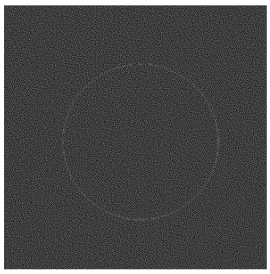

图 8　边缘检测图像

Fig. 8　Image of edge location

随后用多项式插值法对其图像边缘进行亚像素定位,对其中一边缘点测量其亚像素值,并进行多次重复测量,测量结果如表1 所示。

由表1 所示,亚像素边缘定位标准差小于0.04 像素,亚像素定位精度定义为标准差,优于1/20 像

素,另用多项式插值法定位所有亚像素边缘,总共耗时 238 ms。

表 1　对一边缘点多次测量亚像素值结果

Table 1　Results of a edge point measured iteratively

序号	亚像素值/像素	均值/像素	标准差
1	0.557	0.552	0.033
2	0.537		
3	0.528		
4	0.529		
5	0.573		
6	0.591		

最后用约束半径最小二乘圆拟合方法对其进行中心定位,提取亚像素边缘 30 个对称点位,连续提取 10 帧圆目标图像,根据先验知识标定约束半径取为 150 mm,基于半径约束最小二乘圆拟合法测量时间为 35 ms,圆心精度 x 方向的标准差为 σ_x 为0.004 9,y 方向的标准差为0.005 4,总标准偏差 σ 为

$$\sigma=\sqrt{\sigma_x^2+\sigma_y^2}=0.007\ 3 \tag{16}$$

由此可见,采用该圆心定位方法中心总标准偏差小于0.01,单次测量时间低于0.3 s,能够有效满足自动对接系统的精度速度要求。

参考文献:

[1] 孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑检测算法[J].红外与激光工程,2002,31(3):275-279.
KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Location algorithm of the laser spot based on circle fitting[J]. Infrared and Laser Engineering,2006,31(3):275-279. (in Chinese with an English abstract)

[2] 蓝章礼,闫果,杨小帆,等.基于动态梯度的激光光斑中心定位算法[J].计算机科学,2008,35(8):223-226.
LAN Zhang-li, YAN Guo, YANG Xiao-fan, et al. Locaiton algorithm of the laser spot based on dynamic gradient[J]. Computer Science, 2008,35(8):223-226. (in Chinese with an English abstract)

[3] 党宏社,胡尊风.基于灰度矩亚像素定位算子的视觉测量方法研究[J].陕西科技大学学报,2008,26(3):79-82.
DANG Hong-she, HU Zun-feng. Study on vision measuring method based on Gray-Moment Sub-Pixel edge location operator [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2008,26(3):79-82. (in Chinese with an English abstract)

[4] 赵霞,毛建东.齿轮齿形误差图像测量方法的研究[J].机床与液压,2009,37(6):124-128.
ZHAO Xia, MAO Jian-dong. Measurement of the gear involute-error based on image processing method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009. 37(6):124-128. (in Chinese with an English abstract)

[5] 黄剑玲,邹辉.一种基于形态学的多结构元素多尺度图像边缘检测算法[J].微电子学与计算机,2009,26(8):76-79.
HUANG Jian-ling, ZOU Hui. An image edge detection method of multi-structure elements and mutil-scale based on morphology [J]. Microelectronics & Computer. 2009. 26(8): 76-79. (in Chinese with an English abstract)

[6] 董鸿燕.边缘检测的若干技术研究[D].长沙:国防科技大学,2008:29-30.
DONG Hong-yan. Research on some techniques in edge detection[D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2008:29-30. (in Chinese)

[7] 文华.基于数学形态学的图像处理算法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007:67-70.
WEN Hua. Research of image processing algorithm based on mathematic morphology[D]. Harbin : Harbin Engineering University, 2007: 67-70. (in Chinese)

[8] 刘庆民.基于计算机视觉的小尺寸零件精密测量技术研究[D].长春:吉林大学,2006:77-79.
LIU Qing-min. Precision measurement technique study on small size parts based on computer vision [D]. Changchun: Jilin University, 2006: 77-79. (in Chinese)

[9] 陈向伟.机械零件计算机视觉检测关键技术的研究[D]. 长春:吉林大学,2005:67-70.
CHEN Xiang-wei. Key technique research on computer vision inspection of mechanical part [D]. Changchun: Jilin University, 2005: 67-70. (in Chinese)

[10] 刘珂,周富强,张广军.半径约束最小二乘圆拟合法及其误差分析[J].光电子·激光,2006,17(5):604-607.
LIU Ke, ZHOU Fu-qiang, ZHANG Guang-jun. Radius constraint least-square circle fitting method and error analysis[J]. Journal of Optoelectronics. Laser, 2006, 17(5): 604-607. (in Chinese with an English abstract)