

文章编号:1007-2780(2014)06-1003-07

基于几何特征的圆形标志点亚像素中心定位

王林波^{1,2},王延杰^{1*},邸男¹,金明河³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学,北京 100049;

3. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:视觉测量系统中圆形标志点中心定位的精度易受噪声的影响。为了增强其抗噪性从而提高定位精度,提出了一种利用几何特征以降低噪声干扰的中心定位算法。首先将自适应阈值分割法与质心法相结合,对点目标进行圆心粗定位。利用粗定位的圆心和半径对 Canny 算子检测到的边缘进行半径约束,以消除孤立点和噪声点。然后根据理想的圆成像后边缘点分布的几何特征和链接规律,采用一种基于分区原理的方法获取点目标的理想边缘。最后,采用 Zernike 正交矩对像素级边缘点进行亚像素定位,并用最小二乘椭圆拟合法计算得到中心坐标。实验结果表明,该方法的定位精度可以达到 0.023 7 pixel,算法的运行时间为 2~3 ms,基本满足测量系统对于圆形标志点中心定位在精度、稳定性和实时性上的要求。

关键词:视觉测量;边缘检测;几何特征;Zernike 矩;椭圆拟合

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142906.1003

Subpixel location of circle target center based on geometric features

WANG Lin-bo^{1,2}, WANG Yan-jie^{1*}, DI Nan¹, JIN Ming-he³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *State Key Laboratory of Robotics and System,*

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The location accuracy of circle target center in vision measurement system is susceptible to the noise. In order to enhance the capacity of anti-interference of noise and improve the location accuracy, a modified subpixel location algorithm of circle target center based on geometric features is proposed in this paper. Firstly, coarse location of circle target center is realized by combining adaptive threshold segmentation and centroid method, which is used for radius constraint of the edge detected by Canny operator to remove the isolated points and the noisy points. Then, starting from the geometric distribution characteristics and linking discipline of the ideal imaging of circle, a method based on partition theory is brought forward to obtain ideal and continuous edge of circle target. Finally, Zernike moment is used to carry out the subpixel location of the edge, and the center location is achieved by the least-squares ellipse fitting method. The experiments results show that the location

收稿日期:2014-03-03;修订日期:2014-03-24.

基金项目:973 项目(No. 2013CB733103)

* 通信联系人, E-mail: wangyj@ciomp. ac. cn

accuracy can reach to 0.023 7 pixels, and the operation time is between 2 and 3 ms. It can satisfy the high requirements of precision, stabilization and real-time ability of circle target center in the measurement system.

Key words: vision measurement; edge detection; geometric features; Zernike moment; ellipse fitting

1 引言

近些年,基于图像的测量系统以其非接触性、快速和准确的特点越来越多地应用到航空航天、国防工业、机器人导航、医学检测等领域中^[1-3]。测量中常采用圆形标志点作为合作目标进行物体位姿测量,标志点中心定位的精度则将直接影响整个测量系统的精度^[4]。因此,研究如何提高标志点中心定位的精度具有十分重要的意义。

目前常见的圆形标志点亚像素中心定位算法一般分为 3 个步骤^[5]:像素级边缘定位、亚像素级边缘定位、中心定位。常见的点目标中心定位方法主要有^[6-10]:灰度重心法、Hough 变换法、最小二乘曲线拟合法、高斯曲面拟合法等。灰度重心法的定位精度受灰度分布均匀程度的影响较大,Hough 变换法和高斯曲面拟合法计算量较大,实时性受限制。最小二乘拟合法原理简单、易实现,因而在目前众多的亚像素中心定位算法中得到广泛的应用。

研究者常利用图像梯度信息来改进算法以提高中心定位精度^[11]。例如文献[11]采用非极大值抑制法来获取连续细化的理想边缘,不能有效消除孤立的噪声点。而且实际应用中获得的图像梯度信息往往会受到噪声影响而发生局部的变化,边缘定位的准确度也随之降低。针对这一问题,本文避开了梯度信息,转而从圆成像后的几何特征的角度出发,提出了一种改进的亚像素中心定位算法,在像素级边缘定位阶段“剔除”噪声点,利用几何特征获取连续细化的理想边缘。实验表明本文算法具有高精度和高实时性,是一种准确有效的方法。

2 像素级边缘定位

2.1 Canny 边缘检测

Canny 算子被认为是目前众多边缘检测算子中的最优检测算子,在图像处理中得到了广泛的应用。在边缘检测之前首先要采用高斯平滑滤波去噪,但是在消除图像噪声的同时,同时也会模糊

甚至是“擦除”某些边缘信息。若采用 5×5 的高斯内核($\delta=1.0$)^[12],则能够更好地保留边缘信息的完整性,表示如下:

$$K_{\text{Gauss}} = \frac{1}{273} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 16 & 26 & 41 & 26 & 16 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

计算梯度幅值和方向时采用检测性能和抗噪性较好的 Sobel 算子,其式表示如下:

$$\begin{cases} G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} \\ G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

然后利用图像的梯度信息进行非极大值抑制和双阈值连接^[13-14]得到边缘点。实验室环境下拍摄的圆形标志点和 Canny 边缘检测结果如图 1(a)、(b)所示。

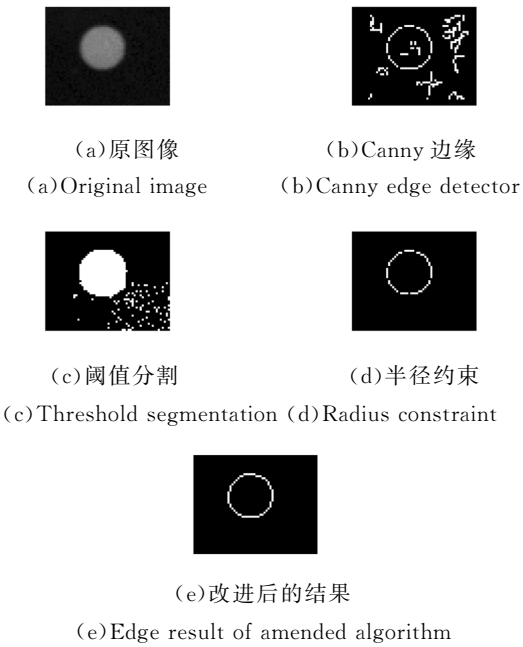


图 1 像素级边缘定位

Fig. 1 Pixel accuracy location of edge

2.2 基于半径约束的边缘提取

如图 1(b)所示,Canny 算子检测到的边缘中包含有非目标边缘点,若直接进行中心定位,则将严重影响定位精度。常用的方法是对 Canny 提取的边缘进行边界跟踪以识别目标圆弧,但这样大大降低了时间效率。本文提出一种快速精确的目标边缘识别方法,首先利用自适应阈值分割法分割原始图像^[15],然后遍历分割图像以识别目标点:若某个像素点和它的八邻域点的像素值皆为 255,则保留该点,否则令其像素值为 0。经过识别后得到的是一个“缩小”的白色“类圆”区域,接着采用质心法对该区域中心进行粗定位,然后利用粗定位的中心和半径对 Canny 提取的边缘进行半径约束得到圆目标边缘。设 $P(x,y)$ 为任一像素级边缘点,粗定位的中心和半径分别为 (C_x,C_y) 和 r ,约束表达式如下:

$$\Delta = \left| \sqrt{(c_x - x)^2 + (c_y - y)^2} - r - 1 \right|. \quad (3)$$

取阈值(通常为 1 与 Δ 比较,判断是否保留为目标边缘点。图 1(a)所示的原图像经过自适应阈值分割和半径约束后结果如图 1(c)、(d)所示。

2.3 基于几何特征获取“理想边缘”

经过上述处理,图 1(d)中目标边缘达到像素级精度,但有多处间断,并非连续的边缘,这将对后续的中心拟合精度造成一定的影响。关于“理想边缘”的定义为^[11]:有且只有两个边缘点存在于目标边缘点的八邻域内。结合粗定位的圆心和圆成像的理想边缘分布特征,本文提出一种基于几何特征的利用分区的方法来获取圆目标的单像素宽且连续的理想边缘。如图 2 所示, O 为粗定

位的圆心,按坐标轴首先将圆周分为 4 个大的区域:Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ。令直线 L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 将整个圆周等分为 12 个子区域,这里用数字 1~12 表示。任意选取圆周上一点 $P(x,y)$,以 P 为起点开始跟踪和连接边缘点,直至回到起点为止。

对于已知的边缘点 $P(x,y)$,首先根据粗定位的圆心坐标判断该点所属的子区域。如图 2 中箭头所示,每个子区域的点都有各自的优先跟踪和连接方向,这里也用数字 1~12 表示。4 个大区域的点的跟踪和连接方向如图 3 所示。以图 2 中的区域Ⅰ为例,其跟踪和连接的准则如下:

若点 $P(x,y)$ 位于子区域 1 内,则优先考虑沿着方向 1 的前 3 个点寻找下一个边缘点。若找到边缘点 Q ,则认为点 Q 与 P 之间的方向 1 上的点皆为边缘点,连接 PQ 后再以 Q 为起点重新判断。若在方向 1 上未找到边缘点,则考虑是否为位于子区域边界上的点,沿着方向 2 继续跟踪,若仍未找到边缘点,则将沿方向 1 的下一个点 $Q(x,y+1)$ 作为下一个边缘点。

若点 $P(x,y)$ 位于子区域 2 内,则优先考虑方向 2,再依次考虑方向 1 和 3,处理方法与子区域 1 相同。若都未寻找到边缘点时,将沿着方向 2 的下一个点 $Q(x+1,y+1)$ 作为下一个边缘点。

若点 $P(x,y)$ 位于子区域 3 内,则优先考虑方向 3,然后是方向 2,处理方法与子区域 1 的相

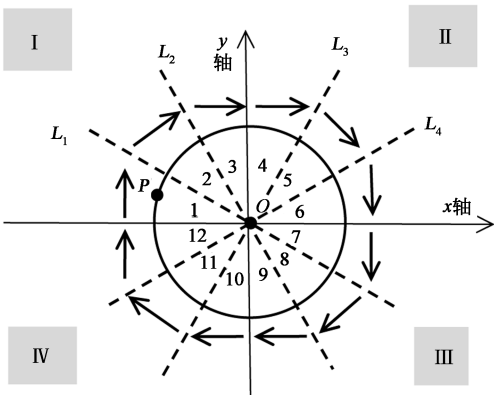


图 2 圆目标边缘点区域划分

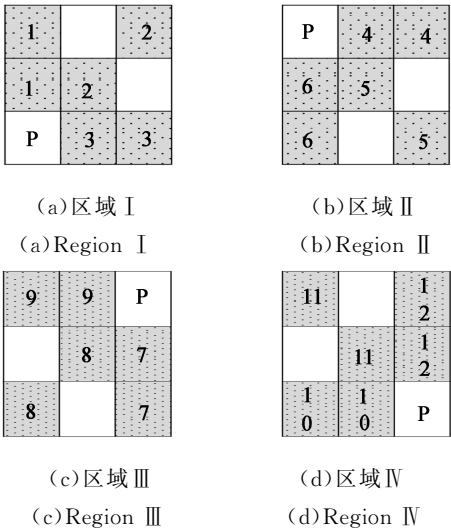


图 3 4 个大区域的优先连接和跟踪方向

Fig. 3 Preferential directions for linking and tracking of each region

Fig. 2 Regional division for edge of circle target

同。若都未找到边缘点,则将沿着方向 3 的下一个点 $Q(x+1,y)$ 作为下一个边缘点。

根据上述分析,当点 P 位于区域 I 不同的子区域内时,跟踪和连接的方向优先级也随之不同,如表 1 所示。其他 3 个大区域内的边缘点的处理方法与区域 I 类似,不做赘述。如图 1(e)所示为图 1(d)经过上述算法连接之后的结果。由图 1(d)和图 1(e)比较可以看出利用分区的方法可以将间断的圆弧很好地连接起来,并且不受噪声的影响,从而达到理想边缘的效果。

表 1 区域 I 的方向优先级
Tab.1 Directions priority of region I

子区域	方向优先级
1	1>2
2	2>1,3
3	3>2

3 亚像素级边缘定位

基于矩的技术^[16]是常见的几类亚像素边缘算法之一,如灰度矩、空间矩、Zernike 矩和 Legendre 矩等。

Zernike 矩是一种正交复数矩,具有旋转不变性,而且信息冗余度小,定位精度高。Ghosal 和 Mehrotra 于 1993 年提出将其应用于亚像素边缘检测^[17],并且在算法中建立了理想的阶跃灰度模型,如图 4 所示。图中的 4 个参数 h,k,l,Φ 分别表示:背景灰度值、灰度阶跃值、模板中心到边缘的距离、 l 与 x 轴的夹角。

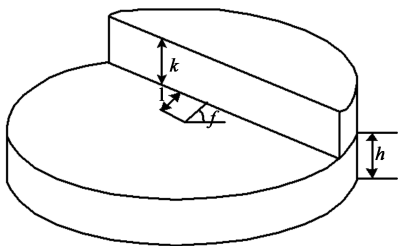


图 4 亚像素理想阶跃灰度模型
Fig.4 Ideal subpixel step edge model

令 A_{nm} 表示图像 $f(x,y)$ 的 Zernike 矩, A'_{nm} 表示将图像旋转角度 Φ 之后的 Zernike 矩,根据

其旋转不变性,则有:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2=1} f(x,y)V_{nm}^*(\rho,\theta)dxdy. \tag{4}$$

$$A'_{nm} = A_{nm}e^{-jn\Phi}. \tag{5}$$

又有如下关系:

$$A'_{00} = A_{00}. \tag{6}$$

$$A'_{11} = A_{11}e^{j\Phi}. \tag{7}$$

$$A'_{20} = A_{20}. \tag{8}$$

参数 h,k,l,Φ 可通过以下公式计算得到:

$$\Phi = \arctan\left(\frac{Im[A_{11}]}{Re[A_{11}]}\right). \tag{9}$$

$$l = \frac{A_{20}}{A'_{11}}. \tag{10}$$

$$k = \frac{3A'_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}}. \tag{11}$$

$$h = \frac{A_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \arcsin(l) + kl \sqrt{(1-l^2)}}{\pi}. \tag{12}$$

当采用 $N \times N$ 的 Zernike 矩模板时,像素级的边缘点 $P(x,y)$ 的亚像素级边缘定位公式为:

$$\begin{cases} x' = x + \frac{N \times l}{2} \cos \Phi \\ y' = y + \frac{N \times l}{2} \sin \Phi \end{cases}. \tag{13}$$

当模板直径 N 值越大,Zernike 矩的计算量随之增大,故选取常用的 5×5 模板。

4 点目标中心定位

由于圆形标志点经过透镜投影变换后一般为平面椭圆,所以采用最小二乘椭圆拟合来定位点目标中心。平面椭圆的目标函数为:

$$F(A,B,C,D,E) = \delta^2(x_i^2 + A \times x_i y_i + B \times y_i^2 + C \times x_i + D \times y_i + E), \tag{14}$$

对于椭圆参数 A,B,C,D,E 求解的方法一般是对每个参数求式(14)的一阶偏导,并令其为 0,可得五元线性方程组:

$$\mathbf{M}_{5 \times 5} \times \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix}, \tag{15}$$

其中, $\mathbf{M}_{5 \times 5}$ 为方程组的系数矩阵。解方程组得到各个参数值,若令点目标中心坐标为 $P(x_0, y_0)$, 则其计算公式为:

$$\begin{cases} x_0 = (2BC - AD)/(A^2 - 4B) \\ y_0 = (2D - AD)/(A^2 - 4B) \end{cases} \quad (16)$$

通过上述分析,我们将算法总结如下:

Step1:对图像进行自适应阈值分割,然后在分割区域内确定“缩小”的点目标。

Step2:利用质心法对“缩小”的点目标区域进行圆心粗定位,从而得到标志点的粗定位半径和圆心。

Step3:采用 Canny 算子检测目标边缘,利用粗定位半径进行半径约束抑制噪声点的影响。

Step4:采用本文提出的基于几何特征的分区方法跟踪和连接半径约束后的边缘,得到理想边缘效果。

Step5:采用 Zernike 矩进行亚像素级边缘定位。

Step6:对于 Step5 得到的亚像素级边缘点进行最小二乘椭圆拟合,计算点目标的中心坐标。

5 实验验证及分析

5.1 实验一

根据方形孔径采样原理生成圆心坐标已知的理想圆的图像,然后采用文献[5]的方法生成理想圆测试图像,如图 5 所示。

对于测试图像加入不同信噪比的高斯噪声,分别采用质心法、“Canny 边缘+Zernike 矩+最小二乘拟合法”和本文算法检测噪声图像的圆心坐标,并计算其与理想圆心坐标的偏差,实验结果如表 2 所示。为使下文表述方便,这 3 种算法依次命名为算法一、算法二、算法三。

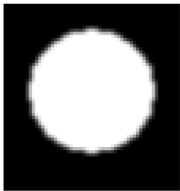


图 5 理想圆测试图像

Fig. 5 Testing image of ideal circle imaging

表 2 噪声图像定位误差比较

Tab. 2 Comparison of location results for noisy image (Unit: 1% pixel)

SNR/dB	算法一	算法二	算法三
50	(7.12, 7.69)	(0.83, 0.98)	(0.28, 0.35)
40	(8.31, 8.14)	(1.65, 1.23)	(0.42, 0.48)
30	(12.52, 12.99)	(3.52, 5.68)	(0.94, 1.09)
20	(18.42, 19.63)	(5.76, 6.24)	(1.39, 1.67)
10	(41.81, 45.65)	(8.07, 9.18)	(4.68, 5.61)

由于 3 种方法的定位误差较小,所以表示时单位采用 1% 像素。由表 2 可以看出,3 种算法的误差都随着噪声的增强而增大。其中,算法一的定位精度最不稳定,变化最为明显。算法二的精度在信噪比为 10 dB 时明显降低,而本文算法的精度明显高于其他两种算法,而且变化缓慢,一直维持在较高的定位精度上,其抗噪性明显优于其他两种算法。

5.2 实验二

实验室环境下拍摄的图像如图 1(a)所示,将靶标固定在实验平台上,保持拍摄装置静止不动,拍摄连续 50 幅的点目标图像,并采用上述的 3 种算法进行中心定位,其定位结果如表 3 所示。

表 3 实测图像定位结果比较

Tab. 3 Comparison of location results of the real tested image (Unit: pixel)

	坐标均值	标准差
算法一	(26.729 6, 30.303 7)	(0.041 3, 0.051 4)
算法二	(27.023 0, 31.277 5)	(0.016 5, 0.020 1)
算法三	(27.018 1, 31.286 8)	(0.015 2, 0.018 2)

由表 3 可以看出,对于实测图像,算法三也具有优于其他两种算法的精度。中心坐标 x 方向的标准差 δ_x 为 0.015 2 pixel, y 方向的标准差 δ_y 为 0.018 2 pixel,故总标准偏差 δ 为

$$\delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2} = 0.023 7. \quad (17)$$

此外,本文算法采用的点目标图像截取自实验室拍摄的大小为 1 024 pixel×1 024 pixel 的图像,实测图像大小为 53×53 pixel。实验是在内存为 2 G, CPU 主频为 3.40 GHz 系统配置的电脑上经 VC6.0 编程运行,整个程序运行的时间为

2~3 ms,取得很好的实时性效果。

6 结 论

提出的点目标中心定位算法在传统的算法流程基础上,利用圆心粗定位、半径约束以及点目标

成像的边缘点几何分布特征,获取了连续且单像素宽的点目标近似理想边缘,然后采用 Zernike 进行亚像素级边缘定位和最小二乘椭圆拟合得到中心坐标。实验结果表明,圆形标志点中心定位精度达到 0.023 7 pixel,运行时间为 2~3 ms,能够满足一般视觉测量系统的要求。

参 考 文 献:

- [1] 张子森,王鹏,孙长库.单目视觉位姿测量方法和数字仿真[J].天津大学学报,2011,44(5):440-444.
Zhang Z M, Wang P, Sun C K. Position and orientation measurement method with monocular vision and digital simulation [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011,44(5):440-444. (in Chinese)
- [2] 郭杰,雷刚,陈健生,等.基于机器视觉的钢包头检测系统设计[J].液晶与显示,2013,28(5):770-775.
Guo J, Lei G, Chen J S, *et al.* Design of steel toecaps inspection system based on machine vision [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013,28(5):770-775. (in Chinese)
- [3] 闫辉,许廷发,吴青青,等.多特征融合匹配的多目标跟踪[J].中国光学,2013,6(2):163-170.
Yan H, Xu T F, Wu Q Q, *et al.* Multi-object tracking based on multi-feature joint matching [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(2):163-170. (in Chinese)
- [4] Zhao R. A fast and accurate detection algorithm for circle target [C]//*International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence(ACAI 2012)*, IET, 2012: 54-56.
- [5] 李元锋,李正生,王洋. CCD 摄像头圆目标中心定位方法[J].应用光学,2010,31(006):956-960.
Li Y F, Li Z S, Wang Y. Center location of circle target captured by CCD camera [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(006):956-960. (in Chinese)
- [6] 郝颖明,朱枫.视觉位姿测量中的点状目标中心自适应定位方法[J].仪器仪表学报,2007,28(增刊 8):619-624.
Hao Y M, Zhu F. Adaptive positioning method on the centers of point targets in pose estimation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007,28(Suppl 8):S619-S624. (in Chinese)
- [7] 陈光静,陈明贵,肖玉强.一种基于 Hough 变换新的亚像素定位算法[J].电子设计工程,2010,18(12):127-130.
Chen G J, Chen M G, Xiao Y Q. The new sub-pixel location algorithm based on Hough transform [J]. *Electronic Design Engineering*, 2010,18(12): 127-130. (in Chinese)
- [8] 刘书桂,李蓬,那永林.基于最小二乘原理的平面任意位置椭圆的评价[J].计量学报,2002,23(4):245-247.
Liu S G, Li P, Na Y L. Evaluation of the form error of ellipse based on least square method [J]. *Acta Metrologica Sinica*,2002, 23(4): 245-247. (in Chinese)
- [9] 邓江生,樊利恒,古立莉.星图像的亚像素细分定位方法研究[J].电子设计工程,2012,20(22):186-189.
Deng J S, Fan L H, Gu L L. Research on method for sub-pixel location of star image [J]. *Electronic Design Engineering*, 2012,20(22):186-189. (in Chinese)
- [10] 黄继鹏,王延杰,孙宏海,等.激光光斑位置精确测量系统[J].光学精密工程,2013,21(4):841-848.
Huang J P, Wang Y J, Sun H H, *et al.* Precise position measuring system for laser spots [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4):841-848. (in Chinese)
- [11] 王静,王海亮,向茂生,等.基于非极大值抑制的圆目标亚像素中心定位[J].仪器仪表学报,2012,33(7):1460-1468.
Wang J, Wang H L, Xiang M S, *et al.* Subpixel accuracy central location of circle target based on nonmaximum suppression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7):1460-1468. (in Chinese)
- [12] Wu J, Li J, Xiao C, *et al.* Real-time robust algorithm for circle object detection [C]//*The 9th International Conference for Young Computer Scientists*, 2008,IEEE,2008:1722-1727.
- [13] 范生宏,黄桂平,陈继华,等.Canny 算子对人工标志中心的亚像素精度定位[J].测绘科学技术学报,2006,23(1):

76-78.

- Fan S H, Huang G P, Chen J H, *et al*. Subpixel accuracy artificial target location using Canny operator [J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping*, 2006, 23(1):76-78. (in Chinese)
- [14] 吴君钦,刘昊,罗勇.静态背景下的运动目标检测算法[J].液晶与显示,2012,27(5):682-686.
Wu J Q, Liu H, Luo Y. Algorithm of moving object detection in static background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 27(5):682-686. (in Chinese)
- [15] 刘震,尚砚娜.多尺度光点图像中心的高精度定位[J].光学精密工程,2013,21(6):1586-1591.
Liu Z, Shang Y N. High precision location for multi-scale light spot center [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6):1586-1591. (in Chinese)
- [16] 祝宏,曾祥进. Zernike矩和最小二乘椭圆拟合的亚像素边缘提取[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(17):148-150.
Zhu H, Zeng X J. Sub-pixel edge detection algorithm of Zernike moments and least-squares ellipse fitting [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(17):148-150. (in Chinese)
- [17] Ghosal S, Mehrotra R. Orthogonal moment operators for subpixel edge detection [J]. *Pattern recognition*, 1993, 26(2): 295-306.

作者简介:王林波(1989—),女,甘肃天水人,硕士研究生,主要研究方向为数字图像处理。E-mail:wanglb53@163.com