



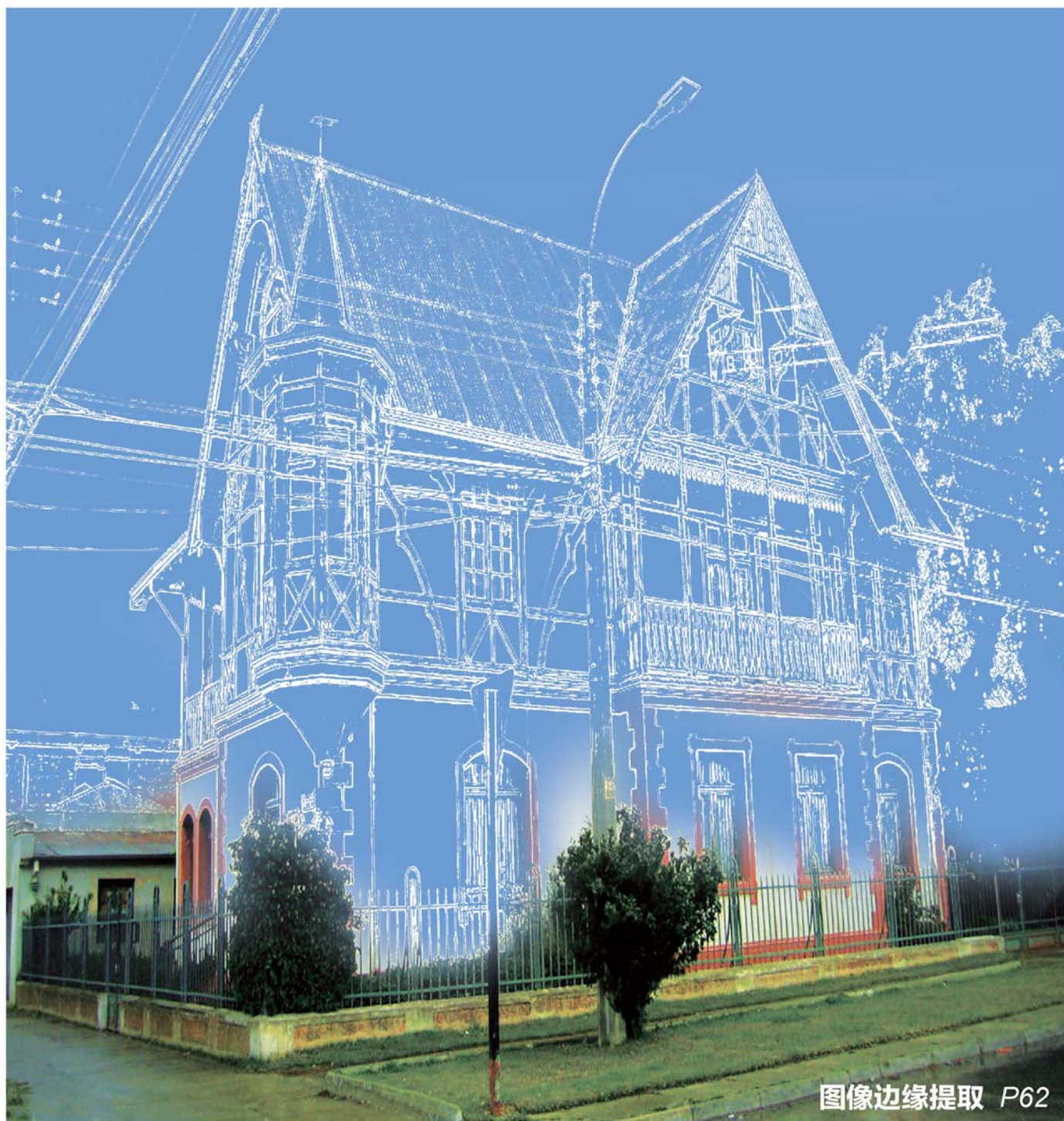
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2014
01
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像边缘提取 P62



第19卷第1期（总第213期）

2014年1月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

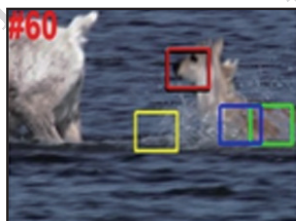
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

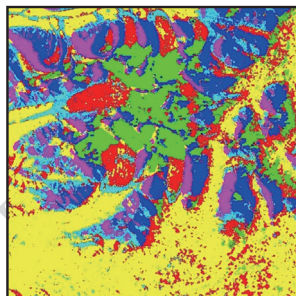
国内定价 50.00元



基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪(第36页)



数字地球渲染中单精度浮点数误差改正(第119页)



全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用(第150页)

图像处理和编码

图像阈值化的自适应粗糙熵方法

吴涛 0001

利用局部极值点特性的多聚焦图像快速融合

杨达, 王孝通, 徐冠雷, 吴俊波 0011

摄像机位姿的高精度快速求解

李书杰, 刘晓平 0020

整数变换实现大容量图像无损信息隐藏

邱应强 0028

图像分析和识别

基于 L_2 范数最小化的实时目标跟踪

齐美彬, 杨勋, 杨艳芳, 陆磊, 蒋建国 0036

利用七宫格的遮挡车辆凹性检测与分割

刘万军, 陈虹宇, 姚雪, 曲海成 0045

基于体素的人手结构自动估测

姚争为, 潘志庚 0054

结合高斯加权距离图的图像边缘提取

贾迪, 孟祥福, 孟琰, 董娜, 方金凤 0062

基于标定的任意半径柱面上2维条形码畸变校正

王伟, 何卫平, 郭改放, 牛晋波, 曹西征 0069

面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测

吴倩, 邹伟, 徐德, 张峰 0076

融合MBP和EPMOD的人脸识别

闫海婷, 王玲, 李昆明, 刘机福 0085

遮挡目标的分片跟踪处理

张彦超, 许宏丽 0092

图像理解和计算机视觉

多尺度分析的运动注意力计算

刘龙, 樊波阳 0101

多尺度空间判别性概率潜在语义分析的场景分类

季海峰, 高隽, 郑鹏, 王婧 0109

计算机图形学

数字地球渲染中单精度浮点数误差改正

李尚林, 郑利平, 张静, 杨柳青 0119

医学图像处理

小波与双边滤波的医学超声图像去噪

张聚, 王陈, 程芸 0126

Contourlet变换系数加权的医学图像融合

张鑫, 陈伟斌 0133

遥感图像处理

滑坡高分辨率遥感多维解译方法及其应用

鲁学军, 史振春, 尚伟涛, 周和颐 0141

全极化合成孔径雷达影像地形纠正及其在雪冰制图中的应用

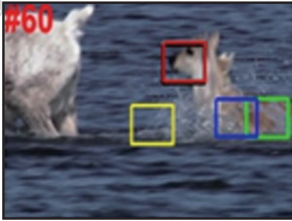
符思涛, 李震, 田帮森 0150

结合邻域相关影像与最大相关性最小冗余性特征选择的面向对象变化检测

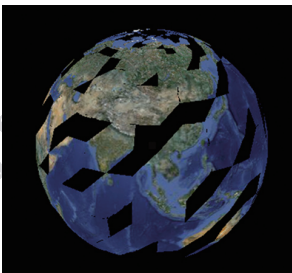
邹利东, 潘耀忠, 朱文泉, 周公器, 李宜展 0158

CONTENTS

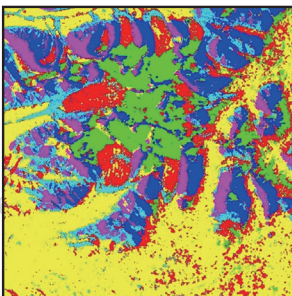
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization(P36)



Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering(P119)



Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping(P150)

Image Processing and Coding

- Adaptive rough entropy method for image thresholding 0001
Wu Tao
- Multi-focus image fusion based on properties of local extrema 0011
Yang Da, Wang Xiaotong, Xu Guanlei, Wu Junbo
- An accurate and fast algorithm for camera pose estimation 0020
Li Shujie, Liu Xiaoping
- Large capacity lossless information hiding in images using integer transform 0028
Qiu Yingqiang

Image Analysis and Recognition

- Real-time object tracking based on L_2 -norm minimization 0036
Qi Meibin, Yang Xun, Yang Yanfang, Lu Lei, Jiang Jianguo
- Detection and segmentation of occluded vehicles based on seven grids 0045
Liu Wanjun, Chen Hongyu, Yao Xue, Qu Haicheng
- Automatic calibration of hand structures based on voxel data 0054
Yao Zhengwei, Pan Zhigeng
- Image edge extraction combined with a Gaussian weighted distance graph 0062
Jia Di, Meng Xiangfu, Meng Lu, Dong Na, Fang Jinfeng
- Restoration of distorted 2D barcode marked on arbitrary radius cylinder based on calibrated camera 0069
Wang Wei, He Weiping, Guo Gaifang, Niu Jinbo, Cao Xizheng
- Fast ellipse detection for target images in ICF experiment 0076
Wu Qian, Zou Wei, Xu De, Zhang Feng
- Face recognition by fusing MBP and EPMOD 0085
Yan Haiting, Wang Ling, Li Kunming, Liu Jifu
- Fragments tracking under occluded target 0092
Zhang Yanchao, Xu Hongli

Image Understanding and Computer Vision

- Multi-scale analysis based motion attention computation 0101
Liu Long, Fan Boyang
- Scene classification based on multi-scale spatial discriminative probabilistic latent semantic analysis 0109
Ji Haifeng, Gao Jun, Zheng Peng, Wang Jing

Computer Graphics

- Correction method of single-precision floating-point error for digital Earth rendering 0119
Li Shanglin, Zheng Liping, Zhang Jing, Yang Liuqing

Medical Image Processing

- Despeckling for medical ultrasound images based on wavelet and bilateral filter 0126
Zhang Ju, Wang Chen, Cheng Yun
- Medical image fusion based on weighted Contourlet transformation coefficients 0133
Zhang Xin, Chen Weibin

Remote Sensing Image Processing

- The method and application of multi-dimension interpretation for landslides using high resolution remote sensing image 0141
Lu Xuejun, Shi Zhenchun, Shang Weitao, Zhou Heyi
- Topographic correction of polarimetric synthetic aperture radar and its application in snow and ice mapping 0150
Fu Sitao, Li Zhen, Tian Bangsen
- The object-oriented change detection based on neighborhood correlation images and the minimum-redundancy-maximum-relevance feature selection 0158
Zou Lidong, Pan Yaozhong, Zhu Wenquan, Zhou Gongqi, Li Yizhan

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)01-0076-09

论文引用格式: 吴倩, 邹伟, 徐德, 张峰. 面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 76-84. [DOI: 10.11834/jig.20140110]

面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测

吴倩, 邹伟, 徐德, 张峰

中国科学院自动化研究所, 北京 100190

摘要: **目的** 针对惯性约束核聚变实验中靶图像轮廓模糊、亮度不均匀等问题, 从提高图像处理实时性角度出发, 提出一种高可靠性和高精度的快速椭圆检测方法。**方法** 首先利用椭圆边缘点在它与圆心相连方向上具有较大灰度变化率这一特点, 以预估中心点为极点建立极坐标系, 通过从极点出发的射线上灰度变化率极值点搜索实现椭圆边缘点检测, 极值点搜索在图像局部范围进行保证边缘点检测的有效性和实时性; 其次利用基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取算法得到最终椭圆参数, 该方法利用椭圆参数空间聚类分析选取最优椭圆参数, 从而实现了一致样本集的自适应选择, 在保证椭圆参数拟合精度的同时提高了算法的适应性和鲁棒性。**结果** 采用本文算法检测一幅图像的平均时间约为 110 ms, 与常用椭圆检测方法相比检测速度有显著提高。**结论** 对比实验结果表明, 本文提出的椭圆检测方法与其他方法相比具有更高的精度、更快的实时性和更强的鲁棒性。

关键词: 惯性约束核聚变; 靶测量; 边缘检测; 椭圆检测

Fast ellipse detection for target images in ICF experiment

Wu Qian, Zou Wei, Xu De, Zhang Feng

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: **Objective** In inertia confinement fusion (ICF) experiments, the visual measurement accuracy and speed of targets directly affect the success rate. Since important imaging feature of several kinds of targets are elliptical, a fast and effective ellipse detection algorithm is required for the targets visual measurement. However, the vague contours and irregular brightness of target images pose great challenges to conventional ellipse detection approaches. Meanwhile, considering the real-time requirement, a new fast ellipse detection algorithm is proposed to solve the problems mentioned above. **Method** The ellipse detection process includes two parts: extracting edge pixels of ellipses, and then extracting the ellipse parameters fitting these edge pixels. In order to obtain accurate edges pixels of ellipse, a feature that edge pixels of ellipse have large gray change rate in the direction, which connects the edge pixel and the center of ellipse, is used. The new ellipse-edge detection algorithm is called polar coordinates edge detection (PCED). First, a downscaling target image is used to pre-estimate the center of the ellipse with a conventional ellipse detection method. Second, a polar coordinates system is built, and the origin point of the system is the pre-estimate center of the ellipse. Last, PCED finds the pixels with extreme gray change rate in the ray, which starts from the origin point of the polar coordinates system, as the detected edge pixels. Furthermore, PCED keeps the edge detection in the local region of an image to guarantee the real-time requirement and the effectiveness. Once the edge pixels are detected by PCED, an adaptive ellipse parameters extraction algorithm based on RANSAC is adopted to get the ellipse parameters fitted to the edge pixels. The proposed ellipse parameters extraction algorithm adopts cluster analysis in ellipse parameters space to choose the optimal estimated ellipse parameters. Then, the consistent pixels of the optimal estimated ellipse parameters are chose from the detected ellipse edge pixels. Finally, the results

收稿日期: 2013-05-13; 修回日期: 2013-07-21

第一作者简介: 吴倩 (1989—), 女, 中国科学院自动化研究所读博士研究生, 主要研究方向为显微视觉测量与控制。

E-mail: qian_wu@ia.ac.cn

of the ellipse parameters are calculated by the consistent pixels using least square method. **Result** The results of comparison experiment between PCED algorithm and Canny algorithm show that the PCED algorithm could achieve more accurate and more effective ellipse edge pixels compared with Canny algorithm, which also makes the following ellipse parameters extracting process more easily. The experiment results of ellipse detection for practical target images show that the processing speed of the proposed algorithm is about 110 ms for one image, which is a significant increase compared to other conventional algorithms. Moreover, the proposed algorithm also has good performance in repeatability and consistency test experiments. **Conclusion** First, the proposed ellipse detection algorithm uses the PCED algorithm to gain the ellipse edge pixels effectively. Then, the proposed ellipse detection algorithm adopts the adaptive ellipse parameters extraction algorithm based on RANSAC to calculate the ellipse parameters fitting to the detected edge pixels. Taking the advantages of the two processes, the proposed algorithm could gain numerically small but effective ellipse edge pixels, and then could get accurate ellipse parameters fast. The comparison experiments demonstrate that the proposed method has advantages of low time consumption, high accuracy, and good robustness, compared to other conventional methods.

Key words: inertia confinement fusion; targets measurement; edge detection; ellipse detection

0 引言

惯性约束核聚变(ICF)利用大量高功率激光束作为驱动源同时轰击含有氘氚燃料的目标靶,从而实现受控热核聚变^[1]。在 ICF 实验中,目标靶的测量与定位技术直接影响激光束与目标靶的瞄准效果,是决定打靶能否成功的关键技术之一^[2]。目前 ICF 装置通常利用 CCD 采集目标靶图像,利用图像信息实现对目标靶的自动定位。椭圆是腔靶、平面靶和球靶等诸多目标靶型的一个重要成像几何特征,其检测精度直接决定了目标靶的位姿感知精度,具有较为重要的研究意义和应用价值。

面向 ICF 的目标靶椭圆检测必须考虑以下两个因素:1)由于靶制作工艺的限制和照明不均匀等诸多因素的影响,靶图像轮廓非常模糊,亮度分布不均匀;2)必须充分考虑目标靶椭圆检测的实时性,以保证后期控制过程的稳定。靶图像处理分为两个过程,即边缘检测和椭圆参数计算。常用的边缘检测算子,如 Sobel^[3]、Laplacian of Gaussian^[4]和 Canny^[5]等均需对整幅图像进行处理以提取图像边缘,应用在轮廓模糊、亮度分布不均匀的实际靶图像上时,易于出现虚假边缘和丢失局部边缘,使得后续椭圆参数提取的速度和精度难以得到保证。为此提出基于极坐标的射线边缘点检测方法,通过搜索从椭圆估计中心点出发的射线上灰度变换率极值点获取椭圆边缘点。该方法只对图像进行局部计算,提高了边缘检测的实时性和有效性。

常用的椭圆参数提取方法有基于 Hough 变换及其改进算法的方法、基于随机抽样一致性

(RANSAC)的算法、最小二乘拟合算法等。其中标准 Hough 变换是最常用的椭圆参数提取方法,易于实现并具有一定的抗干扰能力^[6],但算法的时间和空间复杂度非常高。为此,Xu 等人^[7-8]提出了随机 Hough 变换椭圆检测(RHT),但随机过程引入大量的无效采样,也会导致算法的时间和空间复杂度增长。直接最小二乘法是基于参数拟合的优化算法^[9],它对于高斯噪声具有较强的克服能力,但对粗大误差非常敏感,并且不能检测多个椭圆。Li 等人^[10]结合最小二乘法和随机 Hough 变换提出了随机椭圆检测算法(RED),虽然该方法利用随机采样提高了抗干扰能力,但是算法中用于最小二乘法的边缘点是随机抽取的少量边缘点,没有充分利用最小二乘法的优化能力。基于 RANSAC 的椭圆参数提取算法^[11-12]在随机抽样过程中寻找最优估计模型和有效椭圆边缘点,并在所有有效边缘点的规模上利用最小二乘法拟合椭圆参数,既提高了算法的抗干扰能力又充分利用了最小二乘法的优化能力。以标准 RANSAC 算法为基础,提出了基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取方法,利用参数空间聚类分析寻找最优估计模型,提高了算法的自适应性。

1 算法基本思路

目标靶椭圆轮廓检测的基本思路和整体流程如图 1 所示,主要包括 3 个阶段:中心点预估计、极坐标边缘点检测和基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取。

中心点预估计的目的是粗略估计椭圆的圆心作为极坐标系极点进行后续的射线边缘点检测。基本

步骤如下:1)对原图像进行2维下采样处理得到小尺寸图像,如图2(a)所示;2)利用Canny算子获取边缘图像,如图2(b)所示;3)用标准RANSAC椭圆检测算法检测椭圆,如图2(c)所示;4)根据原图像与小尺寸图像之间的比例关系求出椭圆圆心在原图像中的位置,得到预估中心点。

极坐标边缘点检测利用椭圆边缘点在与圆心相连方向上具有较大灰度变化率这一特点,在预估中

心点处建立极坐标系,在从极点出发的射线上寻找灰度变化率极值点作为椭圆边缘点。

基于RANSAC的自适应椭圆参数提取方法首先通过随机抽样得到椭圆参数集合,并在参数空间中对参数集合进行聚类分析得到正确估计模型,然后利用正确估计模型检验所有边缘点得到有效边缘点集合,最后采用最小二乘法用有效边缘点集合拟合得到椭圆参数。

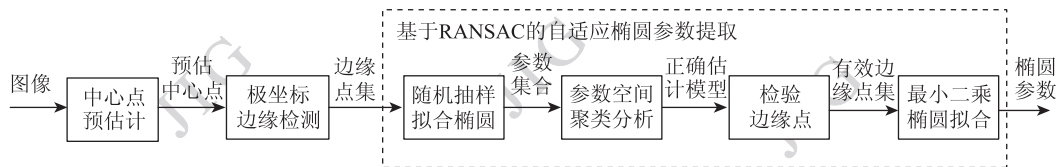


图1 靶图像椭圆检测过程

Fig. 1 Ellipse detection process for target image

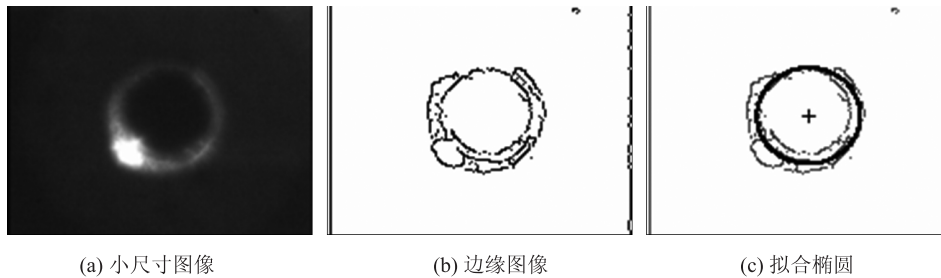


图2 椭圆轮廓的中心点预估示例

Fig. 2 Instance of pre-estimation for ellipse center

2 极坐标边缘点检测

2.1 极坐标边缘点检测步骤

极坐标边缘点检测的基本步骤描述如下:

1)以预估中心点 (u_0, v_0) 为极点建立极坐标系,并以极点为中心设置感兴趣矩形区域: $R_{ROI} = C_{Rect} \{u_0 - a - \delta, v_0 - a - \delta, u_0 + a + \delta, v_0 + a + \delta\}$,其中 (u_0, v_0) 为预估得到的椭圆圆心, a 为预估椭圆半长轴, $\delta > 0$ 为设定阈值;

2)确定 N 条从极点出发的射线 $l_i: \theta_i = \frac{2\pi}{N}, 0 \leq i < N$;

3)对于射线 l_i 上位于 R_{ROI} 内的所有图像点: $\{(x, y) \in R_{ROI} \mid x = r \cos \theta_i, y = r \sin \theta_i, r \geq 0\}$,按照2.2节所示方法计算其射线方向的灰度变化率;

4)寻找每条射线上灰度变化率极值点,根据图像灰度变化趋势,边缘点可能是极大值或极小值点,

需结合靶的成像特点在二者之间进行选择。

2.2 极角方向灰度变化率

图3(a)中极坐标系极点 O 是椭圆预估中心点。点 Z_5 是 R_{ROI} 内一点,当采用如图3(c)所示的 3×3 的滤波器模板计算点 Z_5 在 θ 角度的灰度变化率

$$g_\theta = [f(Z_1) + 2f(Z_2) + f(Z_3)] - [f(Z_7) + 2f(Z_8) + f(Z_9)] \quad (1)$$

式中, f 表示灰度值。

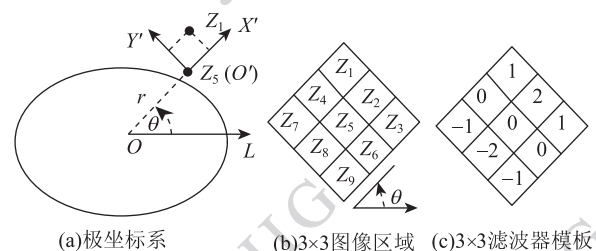


图3 灰度变化率计算示意图

Fig. 3 Diagram of grayscale change rate calculation

求模板点的灰度值需得到它在图像坐标系中的坐标, 设极点 O 在图像坐标系中的坐标为 (x_o, y_o) , 点 Z_5 在极坐标系和图像坐标系中的坐标分别为 (r, θ) 和 (x_5, y_5) , 则有

$$\begin{cases} x_5 = x_o + r \cos \theta \\ y_5 = y_o + r \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

以 Z_5 为原点建立直角坐标系 $O'X'Y'$, X' 轴方向为 Z_5 在极坐标系中对应极角方向, 如图 3(a) 所示, 则从坐标系 $O'X'Y'$ 到图像坐标系的变换矩阵 T 可求解为

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & x_o + r \cos \theta \\ \sin \theta & \cos \theta & y_o + r \sin \theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

对于模板中的任意点 $Z_i, i = 1, \dots, 9$, 设其在坐标系 $O'X'Y'$ 中坐标为 (x'_i, y'_i) , 则它在图像坐标系中的坐标 (x_i, y_i) 为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

代入式(3)得

$$\begin{cases} x_i = x_o + r \cos \theta + x'_i \cos \theta - y'_i \sin \theta \\ y_i = y_o + r \sin \theta + x'_i \sin \theta + y'_i \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

由此可以得到 $f(Z_i) = F(x_i, y_i)$, 其中 F 表示图像灰度函数。当图像坐标计算结果不为整数时, 采用最近邻法对灰度值进行插值。

3 自适应 RANSAC 椭圆参数提取

3.1 RANSAC 算法的基本思想

RANSAC 算法的基本思想是用尽量少的点估计模型, 再利用剩余的点来检验估计的模型, 即求出估计模型的一致集的大小。这种方法可以有效的减轻样本点中存在严重错误数据时对模型参数估计的影响。RANSAC 算法在循环的随机抽样过程中寻找最优模型, 当某个估计模型的一致集中样本个数大于阈值 N_r (N_r 为正确模型的一致集所含的最小样本数) 时, 则认为得到正确的估计模型, 并利用它的一致集采用最小二乘法拟合得到最终的模型参数。

在以上过程中, 阈值 N_r 是提前设定的, 当在线检测过程中环境参数等发生变化时, 所得到样本集合会发生变化, 提前设定的阈值 N_r 可能不再适用, 因此上述算法的适应性较差。针对这一缺点, 基于

聚类技术提出了一种自适应 RANSAC 的椭圆参数提取方法, 增强算法的鲁棒性。

3.2 自适应 RANSAC 椭圆参数提取算法

在 RANSAC 随机抽样过程中, 若抽到的点都是有效边缘点, 则在参数空间中估计模型的参数与正确模型的参数非常接近; 若抽到的点中含有噪声点时, 则估计模型的参数在参数空间中远离正确模型且分布零散。图 4 是腔靶图像边缘点随机抽样 500 次所拟合椭圆圆心概率分布图, 由此可见多次随机抽样得到的多组参数会在正确模型参数附近出现较密集, 在其他区域则较分散。本文方法就是以此为出发点, 在多次随机抽样得到参数集合之后对这些参数进行聚类分析, 包含样本点最多且分布密集的那一类别的聚类中心即为正确估计模型的参数。这样在参数提取过程中, 不再需要固定阈值 N_r , 使得算法具有自适应性。

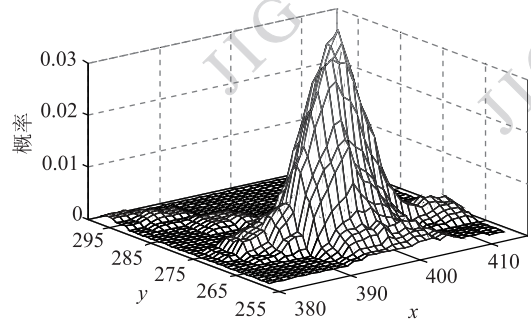


图 4 随机抽样椭圆圆心分布图

Fig. 4 Probability distribution of ellipses center with random sampling

基于聚类分析的自适应 RANSAC 椭圆参数提取方法的整体流程如图 5 所示, 具体描述如下:

- 1) 设定抽样次数 N ;
- 2) 在样本集 P 中随即抽取包含 n 个样本点的子集 S , 其中 $5 \leq n \leq \text{Num}(P)$, $\text{Num}(P)$ 表示样本集 P 包含样本点的个数。用子集 S 采用最小二乘法拟合椭圆得到椭圆参数;
- 4) 重复 N 次步骤 2), 得到椭圆参数集合;
- 5) 利用 3.4 节方法在参数空间内对椭圆参数集合进行聚类分析, 得到每一类的聚类中心和所含样本的个数, 找到包含样本最多的类别, 它的聚类中心就是正确估计椭圆 M^* 的参数;
- 6) 利用 3.5 节方法计算样本集 P 中的样本点与正确估计椭圆 M^* 的偏差, 当偏差小于 T 时, 则样本点是椭圆有效边缘点, 得到有效边缘点集合 P^* ;

7) 用集合 P^* 采用最小二乘法拟合椭圆, 得到最终椭圆检测结果 M 。

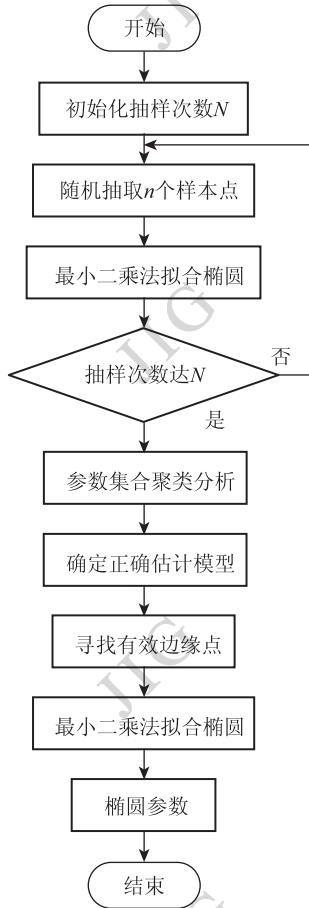


图5 椭圆参数提取算法流程图

Fig. 5 Flowcharts of ellipse parameters extraction algorithm

若图像中包含的椭圆不止一个, 则含样本最多的几个类别的聚类中心即为不同椭圆的正确估计椭圆参数, 然后分别寻找不同椭圆的有效边缘点集合拟合椭圆。

3.3 最小二乘法拟合椭圆

在2维坐标系中, 椭圆的一般方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (6)$$

$$B^2 - 4AC < 0$$

采用最小二乘法拟合椭圆的优化目标是使 n 个样本点到椭圆代数距离的平方和最小, 即使式(7)所示的目标函数值最小。

$$e = \sum_{i=1}^n (Ax_i^2 + Bx_iy_i + Cy_i^2 + Dx_i + Ey_i + F)^2 \quad (7)$$

为了避免零解和成倍数的解出现, 加入约束条件 $A = 1$ 。用拉格朗日算子求解极值, 求其他5个参

数对目标函数的偏导, 令其为0可得到一个线性方程组, 据此可求出椭圆一般方程的参数。当结果满足 $B^2 - 4AC < 0$ 时, 所得结果是椭圆。若不满足不等式, 则在RANSAC循环过程中舍弃这一结果。

由于椭圆一般方程的参数不能表示椭圆的几何特性, 后续椭圆拟合步骤中还需知道椭圆的几何参数, 即椭圆圆心坐标 (x_o, y_o) 、长轴 a 、短轴 b 和旋转角 θ 。由椭圆的一般方程得到椭圆的几何参数为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{B}{A - C} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_o = -n_1/2m_1 \\ y_o = -n_2/2m_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$a = \sqrt{\frac{m_2n_1^2 + m_1n_2^2 - 4m_1m_2F}{4m_1^2m_2}} \quad (10)$$

$$b = \sqrt{\frac{m_2n_1^2 + m_1n_2^2 - 4m_1m_2F}{4m_1m_2^2}} \quad (11)$$

式中, $m_1 = A\cos^2\theta + B\sin\theta\cos\theta + C\sin^2\theta$,

$$n_1 = D\cos\theta + E\sin\theta,$$

$$m_2 = A\sin^2\theta - B\sin\theta\cos\theta + C\cos^2\theta,$$

$$n_2 = -D\sin\theta + E\cos\theta.$$

3.4 椭圆参数集合聚类

对椭圆参数集合进行聚类分析的目的是获取正确估计椭圆, 采用合并的层次聚类方法。设 $P_i(x_{oi}, y_{oi}, a_i, b_i, \theta_i)$ 、 $P_j(x_{oj}, y_{oj}, a_j, b_j, \theta_j)$ 为两组椭圆参数向量, 它们之间的距离定义为

$$d(P_i, P_j) = \max(|x_{oi} - x_{oj}|, |y_{oi} - y_{oj}|, |a_i - a_j|, |b_i - b_j|) \quad (12)$$

由于当椭圆近似为圆时, 计算过程中的微小误差会导致旋转角 θ 值发生很大的改变, 因此计算参数向量的距离不考虑旋转角。

对一个包含 M 组参数的椭圆参数集合进行层次聚类的步骤如下:

1) 将每一组参数作为一个类别, 每个类别记为 c_i , 所含样本数记为 n_i , 聚类中心记为 P_i 。初始化类间距离矩阵

$$D = \begin{bmatrix} d(c_1, c_1) & d(c_1, c_2) & \cdots & d(c_1, c_M) \\ d(c_2, c_1) & d(c_2, c_2) & \cdots & d(c_2, c_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d(c_M, c_1) & d(c_M, c_2) & \cdots & d(c_M, c_M) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d(P_1, P_1) & d(P_1, P_2) & \cdots & d(P_1, P_M) \\ d(P_2, P_1) & d(P_2, P_2) & \cdots & d(P_2, P_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d(P_M, P_1) & d(P_M, P_2) & \cdots & d(P_M, P_M) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2) 将类间距离最小的两类 c_i 、 c_j 合并为新的 c_i 类, 新聚类中心为 $(P_i \times n_i + P_j \times n_j) / (n_i + n_j)$;

3) 删除类间距离矩阵中的 j 行和 j 列, 并根据新的聚类中心重新计算类间距离矩阵 i 行和 i 列的值;

4) 重复步骤 2) 3), 直到最小的类间距离大于阈值 T' 时停止聚类。

3.5 偏差估计

边缘点与正确估计椭圆的偏差是自适应椭圆参数提取算法根据正确估计椭圆寻找有效边缘点的参考量。由于点与椭圆的代数距离没有明确的几何意义, 不方便根据椭圆拟合精度要求设置阈值, 所以采用点到椭圆的几何距离衡量点与估计椭圆的偏差。又因椭圆外一点到椭圆的几何距离的计算非常复杂, 本文采用了一个近似方法。图 6 中 G 为椭圆外一点, O 为椭圆的圆心, H 是 GO 与椭圆的交点, 则将 G , H 之间的距离视为点 G 到估计椭圆的偏差 $e(G)$ 。

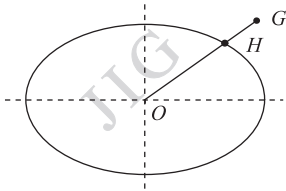


图 6 点与估计椭圆的偏差

Fig. 6 The deviation of a sample from the estimated ellipse

设椭圆的长短轴分别为 a 、 b , 旋转角为 θ , 圆心坐标为 (x_o, y_o) , G 点坐标为 (x_G, y_G) 。将椭圆与点 G 沿着 x 轴负方向平移 x_o , 沿着 y 轴负方向平移 y_o , 再以坐标原点为中心顺时针旋转 θ , 变换之后椭圆圆心与坐标原点重合, 长短轴与坐标系 x 、 y 轴重合。则 G 的新坐标和椭圆的新表达式分别为

$$\begin{cases} x'_G = (x_G - x_o) \cos \theta + (y_G - y_o) \sin \theta \\ y'_G = (y_G - y_o) \cos \theta - (x_G - x_o) \sin \theta \end{cases} \quad (14)$$

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1 \quad (15)$$

求出点 H 在平移旋转变换后的坐标为

$$\begin{cases} x'_H = \frac{abx'_G}{\sqrt{a^2 y'^2 + b^2 x'^2}} \\ y'_H = \frac{aby'_G}{\sqrt{a^2 y'^2 + b^2 x'^2}} \end{cases} \quad (16)$$

则点 G 到椭圆的拟合误差为

$$e(G) = \sqrt{(x'_G - x'_H)^2 + (y'_G - y'_H)^2} \quad (17)$$

4 对比实验及结果分析

实验在主频为 3.1 GHz 的 PC 机上进行, 用 Visual Studio 2010 软件编程实现, 所使用的图像是 ICF 装置中腔靶和平面靶的实际图像, 分别如图 7(a)(c) 所示, 要检测的几何特征分别是腔靶的内环椭圆和平面靶的轮廓椭圆, 为清晰起见, 待检测的几何特征用白色椭圆在图 7(b)(d) 中人工标记。实验验证的性能指标为算法的运行时间、一致性和重复性。一致性用以衡量算法对目标靶在同一状态不同时刻的图像检测结果的一致程度, 重复性用以衡量算法对目标靶同一幅图像进行多次检测时结果的重复程度。

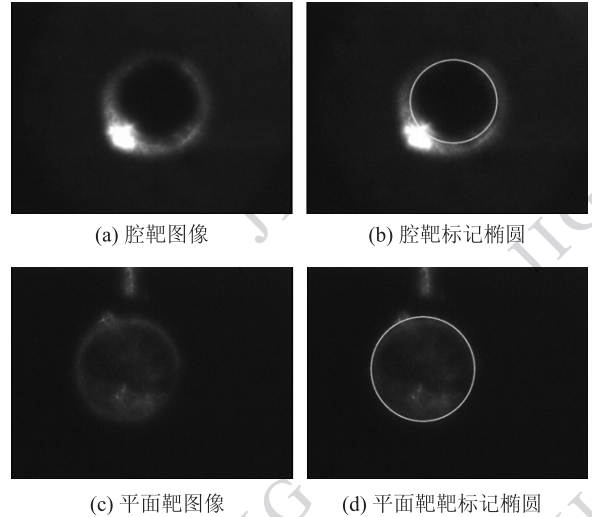


图 7 靶图像

Fig. 7 Target images

对比实验采用的边缘检测方法有本文的极坐标边缘检测法和 Canny 边缘检测法, 采用的椭圆检测算法有基于 RANSAC 的自适应椭圆检测算法和随机椭圆检测算法 (RED), 因此共有 4 种靶图像检测方案, 分别是

1) 本文方法 极坐标边缘检测和基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取;

2) PCED&RED 极坐标边缘检测和随机椭圆检测;

3) Canny&RANSAC Canny 边缘检测和基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取;

4) Canny&RED Canny 边缘检测和随机椭圆检测。

图 8(a)(c) 是腔靶和平面靶图像采用本文极坐标边缘检测法所得到的边缘点图像, 得到边缘点个数

均为 200。图 8(b)(d) 是腔靶和平面靶图像采用 Canny 算子得到的边缘图像,得到边缘点个数分别为 4 589 和 5 532。显然采用 Canny 算子得到的边缘信息中包含很多非检测椭圆的边缘,并缺失了检测椭圆的部分边缘,而采用本文方法得到的边缘点虽然数目较少,但都在检测椭圆的边缘上,并且均匀分布在不同的角度,因而采用本文方法得到的边缘点的有效性更高。

采用 4 种检测方案对一幅腔靶图像和一幅平面靶图像进行检测,得到的结果如图 9 所示。表 1 列出了每种方案处理一幅图像使用的平均时间。显然采用极坐标边缘检测的方案由于边缘点有效性高、数量少,使得图像处理的速度有了显著地提高。同时采用基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取算法也能提高整个图像处理的速度,因此本文的靶椭圆轮廓检测算法在 4 种方案中具有最快的处理速度。

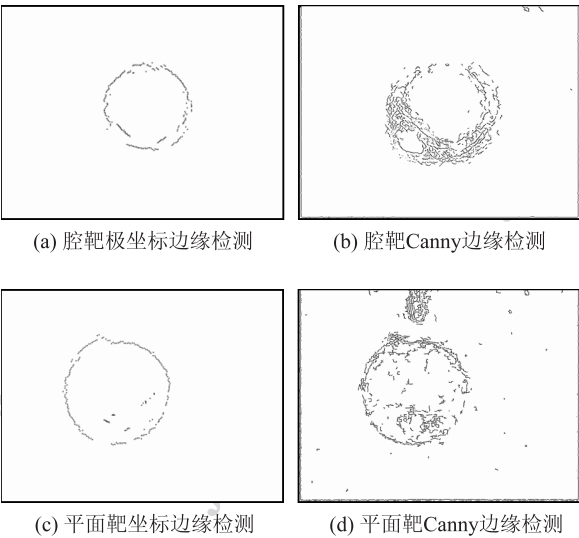


图 8 边缘图像
Fig. 8 Edge detected images

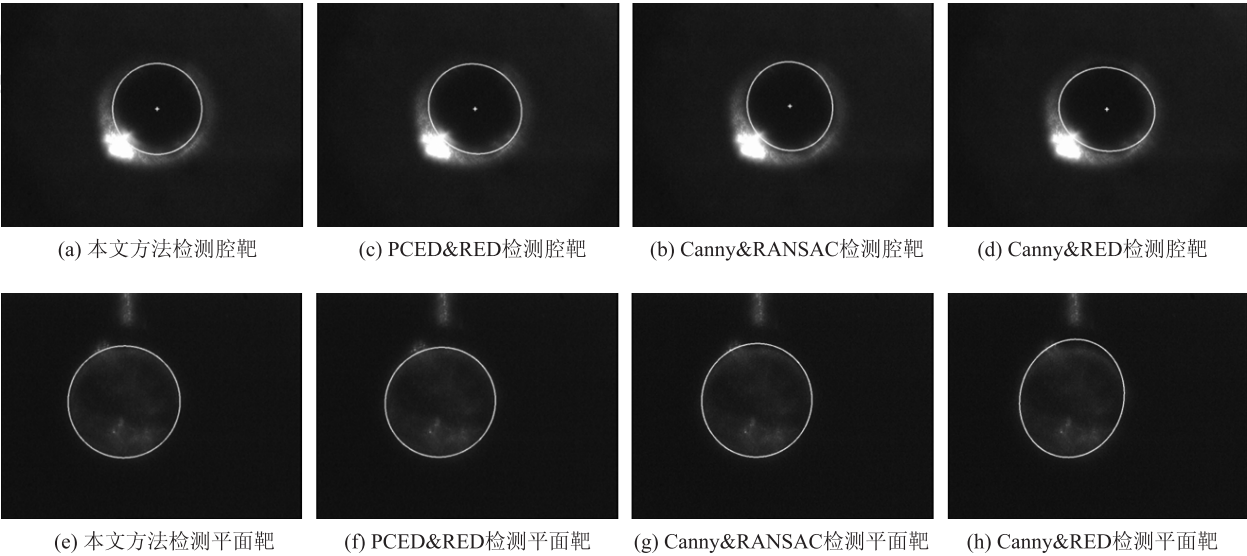


图 9 靶图像检测结果
Fig. 9 Detection results of target images

表 1 处理一幅图像的平均时间
Table 1 Average computation time for an image

	本文方法	PCED & RED	Canny & RANSAC	Canny & RED
腔靶	112	180	864	1 968
平面靶	105	196	984	2 004

为了考察 4 种检测方案的一致性,用它们分别检测在同一位置不同时刻的 300 幅靶图像,得到检

测椭圆圆心坐标、长短轴的平均值和标准差如表 2 所示。其中 $\bar{x}_0$ 、 $\bar{y}_0$ 、 $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$ 分别表示椭圆圆心横坐标、圆心纵坐标、长轴和短轴的均值, Δx_0 、 Δy_0 、 Δa 、 Δb 分别表示它们的标准差。从实验结果可以看出,采用本文方法所得到的椭圆参数标准差最小,对腔靶图像检测的结果一致性最好。

为了考察 4 种方案的重复性,用它们分别处理同一幅靶图像 300 次,得到检测椭圆的圆心坐标、长短轴的平均值和标准差如表 3 所示。从实验数据可以看出,当采用本文方法时,检测椭圆各项参数的标

准差都小于 1 个像素,说明该方法具有很好的重复性。此外,采用 Canny 算子的两个方案检测椭圆各项参数的标准差为零,算法的重复性非常好,说明了

边缘点数量增加能够提高椭圆检测算法的重复性,但是采用 Canny 算子时处理时间显著增加,且算法的一致性差。

表 2 一致性实验结果
Table 2 Consistency experiment results

		/像素							
方案		$\bar{x}_o$	$\bar{y}_o$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	Δx_o	Δy_o	Δa	Δb
腔靶	本文	398.47	271.61	115.95	111.26	0.85	0.67	0.67	0.95
	PCED&RED	398.15	272.30	117.00	111.40	2.50	2.04	1.75	1.65
	Canny&RANSAC	396.45	278.68	130.11	108.61	8.00	10.35	6.96	5.91
	Canny&RED	392.88	281.09	135.90	110.79	10.95	12.47	9.65	8.44
平面靶	本文	313.80	276.03	144.12	141.34	0.50	0.65	0.78	0.50
	PCED&RED	315.19	277.87	144.24	138.82	1.42	2.25	2.03	1.89
	Canny&RANSAC	313.14	269.62	150.77	126.83	6.91	13.57	11.62	8.74
	Canny&RED	313.16	270.72	146.97	125.10	12.20	15.15	12.72	12.89

表 3 重复性实验结果
Table 3 Repeatability experiment results

		/像素							
方案		$\bar{x}_o$	$\bar{y}_o$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	Δx_o	Δy_o	Δa	Δb
腔靶	本文	398.24	271.97	115.80	112.99	0.49	0.27	0.29	0.27
	PCED&RED	399.15	271.84	119.03	111.98	2.64	1.41	1.92	0.84
	Canny&RANSAC	401.02	265.45	114.09	108.31	0.00	0.00	0.00	0.00
	Canny&RED	404.97	272.58	132.68	123.16	0.00	0.00	0.00	0.00
平面靶	本文	314.54	276.37	142.74	141.36	0.26	0.55	0.33	0.32
	PCED&RED	315.98	278.52	143.51	138.48	0.89	1.14	0.87	1.21
	Canny&RANSAC	317.75	272.60	145.28	139.70	0.00	0.00	0.00	0.00
	Canny&RED	316.42	267.92	152.48	131.85	0.00	0.00	0.00	0.00

5 结 论

本文针对 ICF 装置中目标靶图像轮廓模糊、亮度不均匀等特点,并从提高实时性的角度出发,提出了面向 ICF 目标靶模糊图像的快速椭圆轮廓检测方法。该方法通过对靶图像进行局部射线边缘检测获取目标靶轮廓椭圆的边缘点,再采用基于 RANSAC 的自适应椭圆参数提取算法得到检测椭圆的参数。通过对比实验结果验证了极坐标边缘检测方法与 Canny 边缘检测算子相比得到的边缘点的有效性和

精度更高。此外,实验结果也验证了本文提出的靶图像椭圆检测方法具有速度快、精度高、稳定性强的优点。

参考文献 (References)

[1] Lin Z Q. Progress of laser fusion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37 (9): 2202-2207. [林尊琪. 激光核聚变的发展 [J]. 中国激光, 2010, 37 (9): 2202-2207.] [DOI: 10.3788/CJL20103709.2202]
[2] Li F Q, Yuan X D, Liu C X. Target recognition technique in ICF experiment [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31 (5):

- 14-16. [李富全, 袁晓东, 刘昌孝. ICF 实验中的靶识别技术 [J]. 光电工程, 2004, 31(5): 14-16.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2004.05.005]
- [3] Gao W, Zhang X, Yang L, et al. An improved Sobel edge detection [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology. Chengdu: IEEE, 2010: 67-71. [DOI: 10.1109/ICCSIT.2010.5563693]
- [4] Sharifi M, Fathy M, Mahmoudi M T. A classified and comparative study of edge detection algorithms [C]// Proceedings of International Conference on Information Technology: Coding and Computing. Las Vegas, Nevada: IEEE Computer Society, 2002: 117-120. [DOI: 10.1109/ITCC.2002.1000371]
- [5] Ding L, Goshtasby A. On the Canny edge detector [J]. Pattern Recognition, 2001, 34(3): 721-725. [DOI: 10.1016/S0031-3203(00)00023-6]
- [6] Nair P S, Saunders Jr A T. Hough transform based ellipse detection algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 1996, 17(7): 777-784. [DOI: 10.1016/0167-8655(96)00014-1]
- [7] Xu L, Oja E, Kultanen P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. Pattern Recognition Letters, 1990, 11(5): 331-338. [DOI: 10.1016/0167-8655(90)90042-Z]
- [8] McLaughlin R A. Randomized hough transform: improved ellipse detection with comparison [J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19(3): 299-305. [DOI: 10.1016/S0167-8655(98)00010-5]
- [9] Fitzgibbon A, Pilu M, Fisher R B. Direct least square fitting of ellipses [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1999, 21(5): 476-480. [DOI: 10.1109/34.765658]
- [10] Li L F, Feng Z R, He K L. An improved algorithm for ellipse detection based on randomized Hough transform [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2005, 18(4): 459-464. [李良福, 冯祖仁, 贺凯良. 一种基于随机 Hough 变化的椭圆检测算法研究 [J]. 模式识别与人工智能, 2005, 18(4): 459-464.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-6059.2005.04.012]
- [11] Mai F, Hung Y S, Zhong H, et al. A hierarchical approach for fast and robust ellipse extraction [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(8): 2512-2524. [DOI: 10.1016/j.patcog.2008.01.027]
- [12] Cheng Y C, Lee S C. A new method for quadratic curve detection using K-RANSAC with acceleration techniques [J]. Pattern Recognition, 1995, 28(5): 663-682. [DOI: 10.1016/0031-3203(94)00138-C]