

文章编号: 0253-2239(2008)12-2311-05

基于残差修剪的激光光斑高精度定位方法

卢 泉 刘上乾 王会峰

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 为满足复杂靶标背景下激光光斑形心的高精度定位要求, 提出了一种基于几何特征约束残差修剪的定位方法。首先通过分析成像特点提取激光光斑; 然后在几何特征约束下对残差边缘进行二次修剪, 优化边缘; 最后利用最小二乘拟合法得到激光光斑形心的精确定位, 并将其应用于火炮的重要静态参数——弯曲度测量。实验结果表明, 该方法具有较强的稳定性, 定位精度高且实时性好, 与传统的定位方法相比, 复杂靶标上激光光斑的水平和竖直定位偏差均由 ± 1.2 pixel 提高到 ± 0.2 pixel, 单次定位时间小于 0.31 s, 可实现复杂靶标背景下激光光斑形心的快速精确定位。

关键词 弯曲度测量; 残差修剪; 几何特征约束; 最小二乘拟合法

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082812.2311

Precise Location of Laser Spot Center Based on Residual Pruning

Lu Quan Liu Shangqian Wang Huifeng

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract For the precise location of laser spot center on the complex target, a method based on residual pruning with geometric feature constraints is proposed. Firstly, the laser spot is extracted by analyzing the character of imaging. Then, the edge of laser spot is pruned twice with the geometric feature constraints to optimize the edge. Finally, the location of laser spot center is acquired accurately by using the least square fitting method. And it's applied to the curvature measurement, an important status parameter of cannon. Experimental results show that the method proposed is quite stable, fast and accurate. Compared with the traditional location methods, the horizontal and vertical location errors of laser spot on the complex target are both improved from ± 1.2 pixel to ± 0.2 pixel. And the time of a signal location is less than 0.31s. It can accomplish the location of laser spot center on the complex target with high speed and accuracy.

Key words curvature measurement; residual pruning; geometric feature constraint; least square fitting method

1 引 言

目前激光光斑形心的定位方法主要有模板法、重心法、加权重心法、Hough 变换法、圆拟合法以及矩估计法^[1~3]等, 它们有各自的特点, 适用于不同的场合。为了满足火炮重要静态参数^[4,5]——弯曲度的高精度测量要求, 以复杂靶标系统作为定位基准——十字线提供水平和竖直参考, 同心圆提供实时径向畸变校正^[6~8]参考。然而, 当激光光斑打在靶标标尺上时, 光斑由于标尺的灰度重建而形成较

大的残差, 表征弯曲度变化的激光光斑很不理想, 且残差的大小和位置随着管道进深弯曲度的变化而变化, 传统方法难以获得较高的定位精度。

针对上述问题, 通过分析靶标系统的几何特征和激光光斑的成像特点, 提出了一种基于几何特征约束残差修剪^[9,10]的定位方法。先对激光光斑的边缘进行二次残差修剪, 优化边缘, 然后进行最小二乘拟合可获得复杂靶标背景下激光光斑形心的快速精确定位。

收稿日期: 2008-03-11; **收到修改稿日期:** 2008-05-19

作者简介: 卢 泉(1982-)男, 博士研究生, 主要从事光电成像与实时图像处理、高精度光电测量方面的研究。

E-mail: luquanwater@sohu.com

导师简介: 刘上乾(1937-)男, 教授, 博士生导师, 主要从事高精度图像测量和实时图像处理方面的研究。

E-mail: shqliu@xidian.edu.cn

2 弯曲度测量原理

火炮由于身管自重和炮管的悬臂梁结构、不均匀加热以及其他加工、使用等原因,实际轴线偏离理论轴线,偏离量的大小称为弯曲度。根据弯曲度的定义,设计了相应的测量系统^[4,5],其原理模型如图1所示。

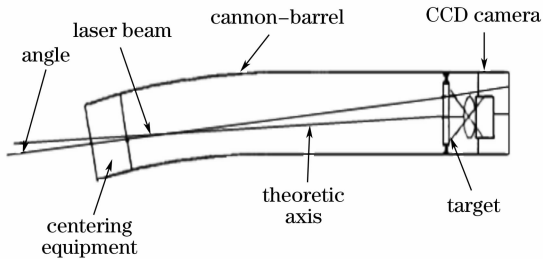


图1 弯曲度测量系统原理框图

Fig.1 Block diagram of curvature measuring system

测量时激光从炮口的定中位置打进,爬行器载体推动自适应定中靶标到达指定位置,此时激光光斑形心的位置 (x, y) 反应了此点弯曲度大小 ρ 和方

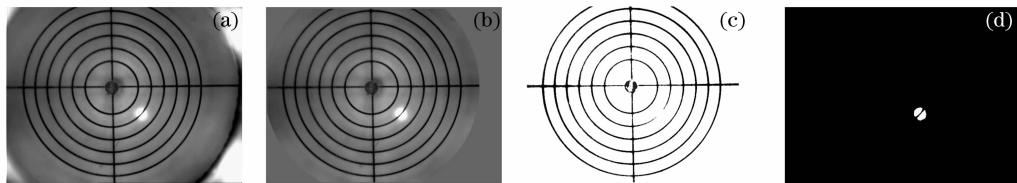


图2 激光光斑的提取。(a) 原始图像; (b) 背景剪除; (c) 靶标; (d) 激光光斑

Fig.2 Extraction of laser spot. (a) Original image; (b) clear background; (c) target; (d) laser spot

3.2 标尺约束的一次残差修剪

光斑经边缘检测、轮廓提取后的轮廓线如图3(a)所示, L_0 为轮廓线上所有像素点的集合,即 $l(n)$ 的集合

$$L_0 = \{l(n) = [x(n), y(n)] \mid n = 1, 2, \dots, N\}. \quad (3)$$

由于光斑和标尺间存在灰度重建,经轮廓提取后所

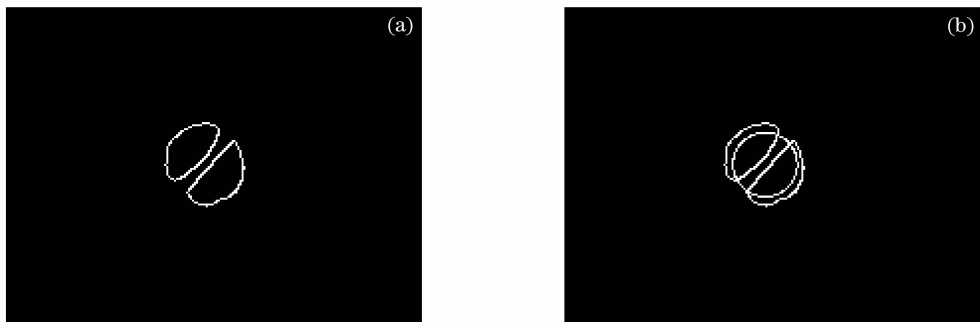


图3 无残差修剪 (a) 激光光斑边缘; (b) 直接拟合结果

Fig.3 Without residual pruning (a) edge of laser spot; (b) result of fitting directly

位角 β :

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1)$$

$$\tan\beta = \frac{y}{x}, \quad (2)$$

因此光斑形心的精确定位是整个弯曲度测量的关键。

3 激光光斑的定位

3.1 光斑的提取

图2(a)是在火炮弯曲度实际测量过程中采集的一幅图像,由于光电噪声和火炮内膛复杂空间结构等多种因素的作用,内场空间的小尺寸照明系统难以提供外场较为理想的照度,靶标成像背景比较复杂,所以必须先对图像进行中值滤波和背景剪除,然后利用自适应最大类别方差双阈值法^[7]将背景、同心圆十字靶标、激光光斑分离。图2(b)是图2(a)经中值滤波和背景剪除后的图像,对其分割后得到的靶标和光斑分别如图2(c)和图2(d)所示。

得的边缘残差较大,采用无残差修剪的传统定位方法,直接进行最小二乘拟合^[2]得到的偏差较大,如图3(b)所示。激光光斑形心的定位与参与拟合的边缘像素点的坐标 $[x(n), y(n)]$ 和像素点总数 N 均有关,测量误差 $[\Delta x(n), \Delta y(n)]$ 、 ΔN 决定了中心检测误差,通过残差修剪剔除偏差较大的点进而优化边缘,可改善边缘的拟合效果,提高光斑的定位精度。

对复杂靶标的成像特点进行分析,发现激光光斑对标尺的影响很小,采用基于距离空间聚类的检测方法^[7]对 2(c)进行拟合,提取同心圆和十字标尺,标尺所在的区域为 L

$$L = \left\{ l(n) = [x(n), y(n)] \mid \begin{array}{l} (r_i - d)^2 \leq [x(n) - a]^2 + [y(n) - b]^2 \leq (r_i + d)^2 \cup \\ |x(n) - a| \leq d \cup |y(n) - b| \leq d \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中 $r_i (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 为同心圆的各个半径, (a, b) 为同心圆的圆心坐标, d 为标尺的宽度, L_1 为光斑与标尺叠加区域:

$$L_1 = L_0 \cap L. \quad (5)$$

在 L_1 内的边缘点基本上都是残差较大的边缘点,然后以 L_1 作为几何约束特征^[9]进行残差修剪,所得的边缘如图 4(a)所示。一次残差修剪后的边缘为 C

$$C = L_0 - L_1 = \{c(n) = [x(n), y(n)] \mid n = 0, 1, \dots, M\}, \quad (6)$$

式中 M 为边缘点数。一次残差剪除后的拟合效果有了较大的改善,如图 4(b)所示。

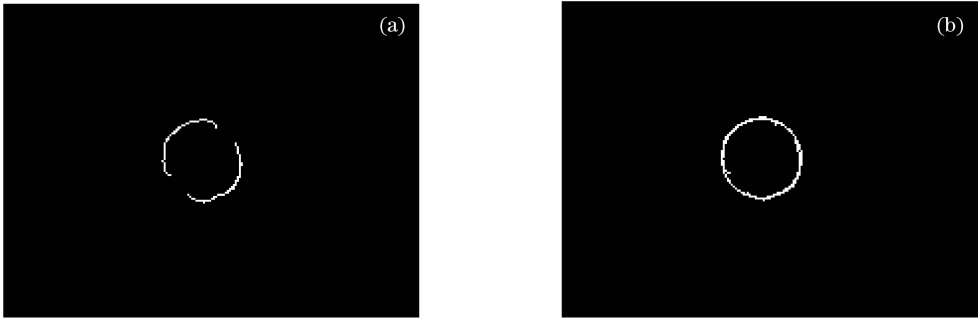


图 4 一次残差修剪。(a)一次修剪后的边缘;(b)一次修剪后的拟合结果

Fig. 4 First residual pruning. (a) edge after first pruning; (b) fitting result after first pruning

3.3 曲率约束的二次残差修剪

一次残差剪除后的边缘有了较大的改善,然而由于靶面粗糙度的非均匀性以及标尺边缘效应的影响,部分边缘点仍存在不小的偏差。利用曲率特征约束^[9,10]进行进一步的残差修剪,继续优化边缘。

图 4(a)的边缘连续度不一致,传统曲率计算方

法^[10]必须先进行曲线平滑,而曲线的平滑会引入收缩性误差且增加计算量。利用一次残差剪除后的拟合结果,补充曲率计算的非连续支撑区域,得到一致性的连续边缘,如图 4(b)所示。在图 4(b)中考察图 4(a)中的任意边缘点 $c(n)$,该点与以 r 为支撑半径的各点构成的支撑区域为 $S(n)$:

$$S(n) = \{s(m) = [x(m), y(m)] \mid m = n - r \dots, n - 1, n, n + 1 \dots, n + r\}, \quad (7)$$

当 $m = n$ 时, $s(n) = c(n)$ 为考察点; $m \neq n$ 时, $s(m)$ 由支撑半径范围内的所有边缘点组成,前后支撑区域的几何中心分别为 $c_{\Delta}(n)$ 、 $c_{\nabla}(n)$:

$$\begin{cases} c_{\Delta}(n) = [x_{\Delta}(n), y_{\Delta}(n)] = \left[\frac{1}{L_{\Delta}} \sum_{m=n+1}^{n+r} x(m), \frac{1}{L_{\Delta}} \sum_{m=n+1}^{n+r} y(m) \right], \\ c_{\nabla}(n) = [x_{\nabla}(n), y_{\nabla}(n)] = \left[\frac{1}{L_{\nabla}} \sum_{m=n-r}^{n-1} x(m), \frac{1}{L_{\nabla}} \sum_{m=n-r}^{n-1} y(m) \right] \end{cases}, \quad (8)$$

式中 L_{Δ} 和 L_{∇} 为前后支撑区域的边缘点数,则 $c_{\Delta}(n)$ 与 $c(n)$ 及 $c(n)$ 与 $c_{\nabla}(n)$ 构成向量的方向角分别为 $\theta_{\Delta}(n)$ 、 $\theta_{\nabla}(n)$

$$\begin{cases} \theta_{\Delta}(n) = \arctan\{[y(n) - y_{\Delta}(n)]/[x(n) - x_{\Delta}(n)]\}, \\ \theta_{\nabla}(n) = \arctan\{[y(n) - y_{\nabla}(n)]/[x(n) - x_{\nabla}(n)]\} \end{cases}, \quad (9)$$

利用(7)式中的 $\theta_{\Delta}(n)$ 、 $\theta_{\nabla}(n)$ 定义曲率角为 $\theta(n)$

$$\theta(n) = \theta_{\Delta}(n) - \theta_{\nabla}(n), \quad (10)$$

曲率的大小与曲率角成正比,比例的选择与支撑区

域的大小 r 有关,选择合适的 r 既可以提高曲率计算精度还可以减少计算量, r 一般取 5~8,曲率大小为

$$k(n) \propto |\theta(n)|. \quad (11)$$

理想靶标背景下光斑的成像是曲率大小为 K 的圆, 在曲率特征约束条件^[9]

$$K - \varepsilon \leq k(n) \leq K + \varepsilon \quad (12)$$

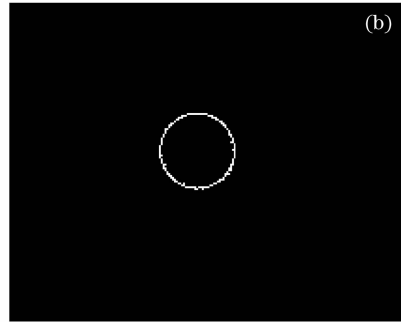
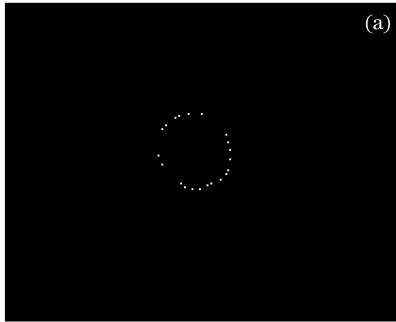


图 5 二次残差修剪。(a) 二次修剪后的边缘; (b) 二次修剪后的拟合结果

Fig. 5 Further residual pruning. (a) edge after further pruning; (b) fitting result after further pruning

3.4 光斑的定位结果

不改变激光器的定中位置, 用简单靶标代替复杂靶标, 在上位机的控制下弯曲度测量系统到达管内的相同位置采集图像, 结果如图 6 所示。从图 6 可见, 由于简单靶标上激光光斑不受靶标标尺的影响, 成像效果比较理想, 通过多次反复测量定位可以得到该点激光光斑形心的准确位置 (348.82, 439.79), 以此作为复杂靶标下激光光斑的定位基准。表 1 给出了采用传统的无残差修剪、一次残差修剪和二次残差修剪三种方法对应图 2(a) 中复杂靶标上激光光斑形心的定位结果以及相对定位基准的一次偏差。

从表 1 可见, 采用二次残差修剪的方法可以较好地消除靶标标尺对激光光斑定位的影响, 与传统

对图 4(a) 中的边缘进行进一步的残差修剪, 所得的边缘如图 5(a) 所示。修剪后的拟合效果得到更好的改善, 如图 5(b) 所示。

无残差修剪的直接拟合法相比, 水平和竖直的定位偏差均由 ± 1.2 pixel 提高到 ± 0.2 pixel, 大大提高复杂靶标背景下激光光斑的定位精度。

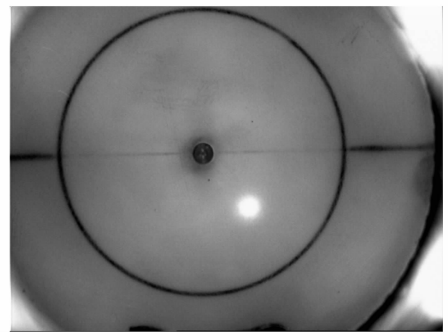


图 6 简单靶标

Fig. 6 Simple target

表 1 定位结果和偏差

Table 1 Location results and errors

	Without residual pruning	First residual pruning	Further residual pruning
Results/pixel	(349.93, 438.71)	(349.09, 439.46)	(348.93, 439.61)
Errors/pixel	(1.11, -1.08)	(0.27, -0.33)	(0.11, -0.18)

4 实验结果及数据分析

为了验证上述方法的定位精度及可靠性, 不改变激光的定中位置及测量系统的进深距离, 只随机改变标尺相对激光光斑的位置即改变标尺对光斑的灰度重建, 进行 50 组重复定位试验, 实验条件为: 高分辨率、高灵敏度的 $1/2''$ 微型 CCD 黑白摄像机

LCL-902HS, 像素数 $768 \text{ pixel} \times 576 \text{ pixel}$; SSE0612, 6.0 mm, F1.2 镜头; 物距为 42 mm; 波长为 650 nm 和功率为 10 mW 的固体激光器。

以图 6 中的激光光斑的准确定位作为基准参考, 图 7(a), (b) 分别给出了激光光斑水平和竖直方向的定位偏差。表 2 为随机抽取的 10 组单次定位时间。

表 2 单次定位时间

Table 2 Time of a signal location

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Time/s	0.302	0.301	0.291	0.293	0.303	0.304	0.305	0.304	0.304	0.305

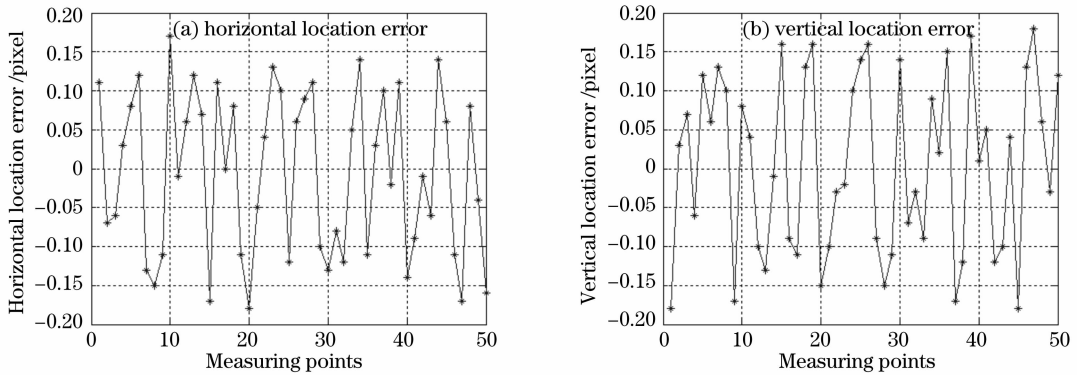


图 7 水平定位偏差(a)和竖直定位偏差(b)

Fig. 7 Horizontal location errors (a) and vertical location errors (b)

由图 7 和表 2 可见,该方法具有较强的稳定性,定位精度高且实时性好,可满足复杂靶标背景下激光光斑中心的快速精确定位要求,以简单靶标的光斑位置作为定位基准,水平和竖直的定位偏差均小于 ± 0.2 pixel,单次定位时间小于 0.31 s。

5 结 论

提出了一种基于几何特征约束残差修剪的光斑定位方法,可实现复杂靶标背景下激光光斑的快速精确定位。实验结果表明,该方法具有很强的稳定性,定位精度高且实时性好,与传统的定位方法相比,复杂靶标上激光光斑的水平 and 竖直定位偏差均由 ± 1.2 pixel 提高到 ± 0.2 pixel,单次定位时间小于 0.31 s,可满足基于复杂动态靶标定标的特殊管道弯曲度测量的快速高精度测量要求,为复杂靶标上激光光斑的精确定位提供新的参考方法。

参 考 文 献

- 1 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 253~258(in Chinese)
- 敖磊, 谭久彬, 崔继文等. 一种快速高精度激光 CCD 自准直仪圆目标中心的定位方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 253~258
- 2 Kong Bing, Wang Zhao, Tan Yushan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 275~279(in Chinese)
- 孔兵, 王昭, 谭玉山. 基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 275~279
- 3 Yu Xinrui, Wang Shigang, Guan Baiqing *et al.*. A fast interference-resistant deformable template method for detecting the circle [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1115~1119(in Chinese)

- 于新瑞, 王石刚, 关柏青等. 一种快速检测圆的抗干扰变形模板方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1115~1119
- 4 Cheng Shi, Huang Ping. Straight line measuring of cannon barrel and choosing component [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2007, **2**(2): 53~55(in Chinese)
- 程石, 黄平. 火炮身管直线度检测方法 & 测量元件选择[J]. *国防技术基础*, 2007, **2**(2): 53~55
- 5 Han Baojun, Jiang Hongchao, Niu Jianjun *et al.*. Measurement of cannon barrel straightness based on CCD [J]. *Journal of Yunnan University*, 2005, **27**(5A): 171~174(in Chinese)
- 韩保君, 姜洪朝, 牛建军等. 基于 CCD 身管弯曲度的测量[J]. *云南大学学报*, 2005, **27**(5A): 171~174
- 6 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **74**(8): 1440~1442(in Chinese)
- 余俊, 林家明, 杨建宇等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. *光学学报*, 2007, **74**(8): 1440~1442
- 7 Niu Jianjun, Liu Shangqian, Han Baojun *et al.*. Algorithm for region partition in concentric circles detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(12): 1946~1949(in Chinese)
- 牛建军, 刘上乾, 韩保君等. 同心圆检测中的区域划分算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(12): 1946~1949
- 8 Richard I. Hartley, Sing Bing Kang. Parameter-free radial distortion correction with centre of distortion estimation [J]. *Proceeding of the Tenth IEEE international Conference on Computer Vision*, In ICCV, 2005, 1~8
- 9 Pierre Parent, Steven W. Zucker. Trace inference, curvature consistency, and curve detection. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 1989, **11**(8): 823~838
- 10 Zhang Wenjing, Xu Xiaoming, Ding Guojun *et al.*. Approach to extract feature points on boundary based on curvature [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 1999, **33**(5): 592~595(in Chinese)
- 张文景, 许晓鸣, 丁国骏等. 一种基于曲率提取轮廓特征点的方法[J]. *上海交通大学学报*, 1999, **33**(5): 592~595