

## 光路远场自动准直图像处理优化

郭文彬<sup>1</sup>, 曾沛颖<sup>2\*</sup>, 程宁波<sup>1\*\*</sup>, 纪彤<sup>2</sup>, 邹伟<sup>1</sup><sup>1</sup>中国科学院自动化研究所, 北京 100190;<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

**摘要** 对大型激光装置主放远场自动准直的图像处理进行优化研究, 主要包括远场基准计算和远场光斑中心计算两个方面。为了进一步提高图像处理的稳定性和计算效率, 在远场基准计算和远场光斑中心计算时对处理图像的区域施加约束。在远场基准计算时, 针对 transport spatial filter (TSF) 图像和 cavity spatial filter (CSF) 图像, 分别采用两个处理流程。在远场光斑中心计算时, 对 TSF 图像和 CSF 图像, 采用统一的处理流程, 采用聚类方法计算远场光斑中心。实验结果表明所提图像处理方法具有有效性。

**关键词** 光路自动准直; 远场准直; 图像处理; 高功率激光器; 神光 II 升级装置

中图分类号 TP242 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221213

## Image Process Optimization in Laser Beam Far-Field Automatic Alignment

Guo Wenbin<sup>1</sup>, Zeng Peiyong<sup>2\*</sup>, Cheng Ningbo<sup>1\*\*</sup>, Ji Tong<sup>2</sup>, Zou Wei<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;<sup>2</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** This article discusses how to improve image processing for autonomous far-field laser beam alignment for the main amplifier in a sizable laser facility. The image process mainly includes two parts, far-field reference computation and far-field center computation. To further enhance the computation stability and the computation efficacy for image processing, the image regions chosen in far-field reference computation and the far-field center computation are all constrained to a particular region. In far-field reference computation, two process flows are shown for the transport spatial filter (TSF) image and cavity spatial filter (CSF) image respectively. In far-field center computation, one process flow is compatible for both the TSF image and CSF image, and the clustering approach is adopted in computing the center of the far-fields. Experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed image processing method.

**Key words** automatic beam alignment; far-field alignment; image processing; high power laser; SGII-Up laser facility

## 1 引言

高功率激光装置<sup>[1-4]</sup>的光路自动准直系统是此类激光装置的重要组成部分之一<sup>[5-6]</sup>。光路自动准直系统的主要功能是在多种因素导致光路偏离原定光路的情况下实现自动的光路校正, 保证光束的位置和指向<sup>[6]</sup>。光路自动准直过程是通过计算机控制来实现的, 利用计算机软件完成图像采集、图像处理、反射镜调整等步骤的闭环迭代调整。其中, 图像处理指的是光束的近场图像处理和远场图像处理, 主要包含基准

信息和目标中心信息的提取。对于远场图像处理, 核心是通过计算提取远场基准中心和远场光斑中心, 远场光斑中心又简称为光斑中心。远场图像处理是自动准直过程中的关键环节之一, 国内研究学者已经在这方面进行了相关研究。刘代中等<sup>[6]</sup>先对光束图像进行二值化, 而后提取边缘轮廓, 最后通过求几何中心来确定光束中心。吕凤年等<sup>[7]</sup>结合阈值化、重心法、中值滤波和圆拟合等来确定光斑的中心。李红等<sup>[8]</sup>利用变结构元广义数学形态学边缘检测算法提取图像边缘细节, 采用拉格朗日多项式插值算法对圆目标轮廓进行

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-04-20; 网络首发日期: 2022-04-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA25020000)

通信作者: \*zengpeiyong@siom.ac.cn; \*\*ningbo.cheng@ia.ac.cn

快速亚像素定位,利用最小二乘法以及几何形心拟合的方法来精确定位图像中的光斑目标中心。曾沛颖等<sup>[9]</sup>将蚁群算法引入到准直基准轮廓提取及光斑轮廓提取中,提高了算法对基准和光斑的边缘提取能力。Liu等<sup>[10]</sup>针对基准中心提取,提出了一种结合位置估计和梯度极值搜索的方法来提高基准计算的精度和可靠性。其他研究学者也对基于圆拟合或椭圆拟合的激光光斑中心检测算法等进行了研究<sup>[11-14]</sup>。国外也有针对准直图像方面的相关报道,如文献[5]、文献[15]、文献[16]等,然而很少给出相关的算法探讨。

本文针对神光 II 升级装置中某个组件的主放大器的远场自动准直的图像处理进行优化研究。此类放大器需要借助传输空间滤波器(transport spatial filter)小孔板和腔空间滤波器(cavity spatial filter)小孔板的小孔(pinhole)完成光路准直。准直时需要采

集和处理的图像包括 TSF CCD 相机采集的小孔板图像(简称为 TSF 图像)和 CSF CCD 相机采集的小孔板图像(简称为 CSF 图像)。目前,对该组件的主放大器进行准直时所采用的图像处理算法存在如下不足:1)基准计算耗时较多,尤其在提取 CSF 图像中的基准时;2)远场光斑中心计算的可靠性需要进一步提高,当远场光斑中心偏差较大时,杂散光等因素的影响会导致远场光斑中心计算无法获得或得到错误的远场光斑中心值。本文针对这两方面的问题对图像处理算法进行改进。

## 2 准直图像及区域约束

主放大器光路准直的示意图如图 1 所示,可以看出该主放大器采用的是四程放大结构,不少高功率激光装置也采用相同或类似结构。

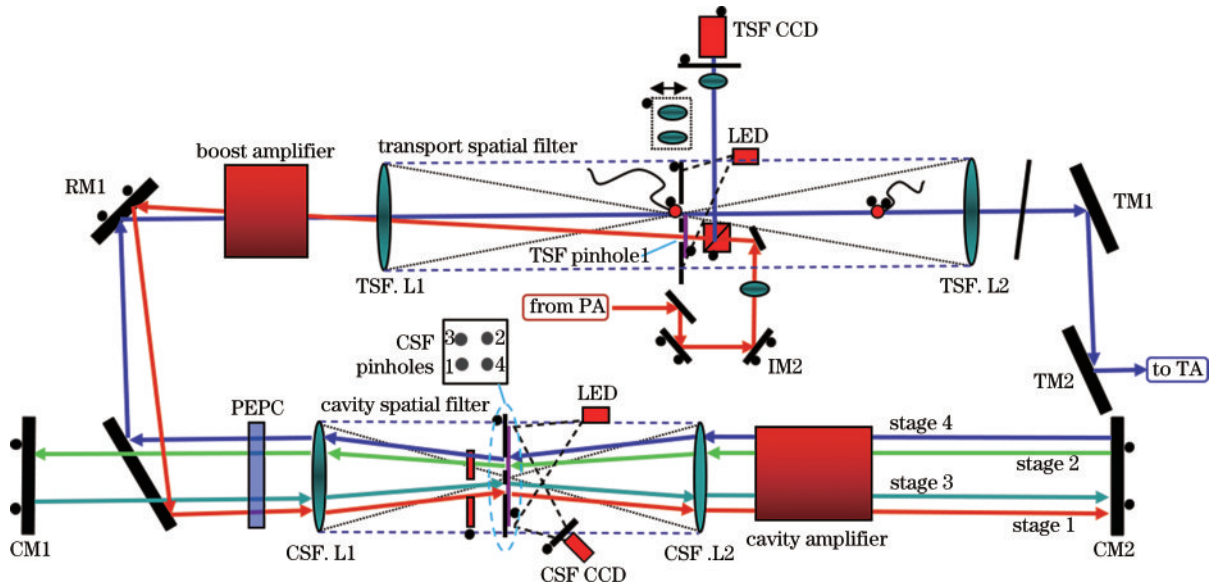


图 1 神光 II 升级装置中某组件的主放大器光路准直示意图

Fig. 1 Beam alignment schematic of the main amplifier of a component in SGII-up laser facility

### 2.1 准直图像

远场准直需要通过对 4 个孔进行准直来实现。准直时先对 TSF 的 1 孔进行准直,其次分别对 CSF 的 1 孔、2 孔和 3 孔进行准直,最后同时核验 CSF 的 4 个孔的远场光斑中心误差。准直时采集的 TSF 图像和 CSF 图像分别如图 2(a)和图 2(b)所示。图 2(a)中较暗的圆形区域是用于确定远场基准的基准小孔,较亮的光斑是光束的远场。如图 2(c)和图 2(d)所示,TSF 和 CSF 每个孔的远场基准由 4 个基准小孔来确定。对于 TSF 图像,由基准小孔 TC1~TC4 来确定 TSF 1 孔的基准中心 TR。对于 CSF 图像,由基准小孔 CC<sub>i</sub> 1~CC<sub>i</sub> 4 来确定 CSF 第 *i* 个孔的基准中心 CR<sub>*i*</sub> (*i*=1~4)。远场光斑中心通过远场光斑的几何中心来确定,如图 2(c)所示,TF 为通过 TSF 1 孔的光束的远场光斑中心;图 2(d)中 CF<sub>*i*</sub> 为通过 CSF 第 *i* 个孔的光束的

远场光斑中心 (*i*=1~4)。这些基准中心和远场光斑中心是图像处理需要得到的量。

### 2.2 图像处理区域约束

在进行不同次的准直时,由于重定位相机和光栅等原因,采集得到的 TSF 图像和 CSF 图像上的基准小孔的位置会略有偏差,为了获得更为精确的基准,需要重新计算一次基准。图 3 是对 TSF 图像处理的区域约束示意图,为了便于观察,对原图的亮度进行了调整。图 3 中 TC<sub>*i*</sub> constraint region (*i*=1~4) 分别为基准小孔 TC1~TC4 的图像处理区域,称为约束区域。这些约束区域包围了基准小孔所占据的区域,并留有一定裕量。由于基准小孔的位置偏差较小,增大基准小孔的约束区域可以保证基准小孔落在约束区域内。约束区域确定的具体方法是:首先人工给出基准小孔圆心的大概坐标值,然后选择略大于小孔直径的值(约

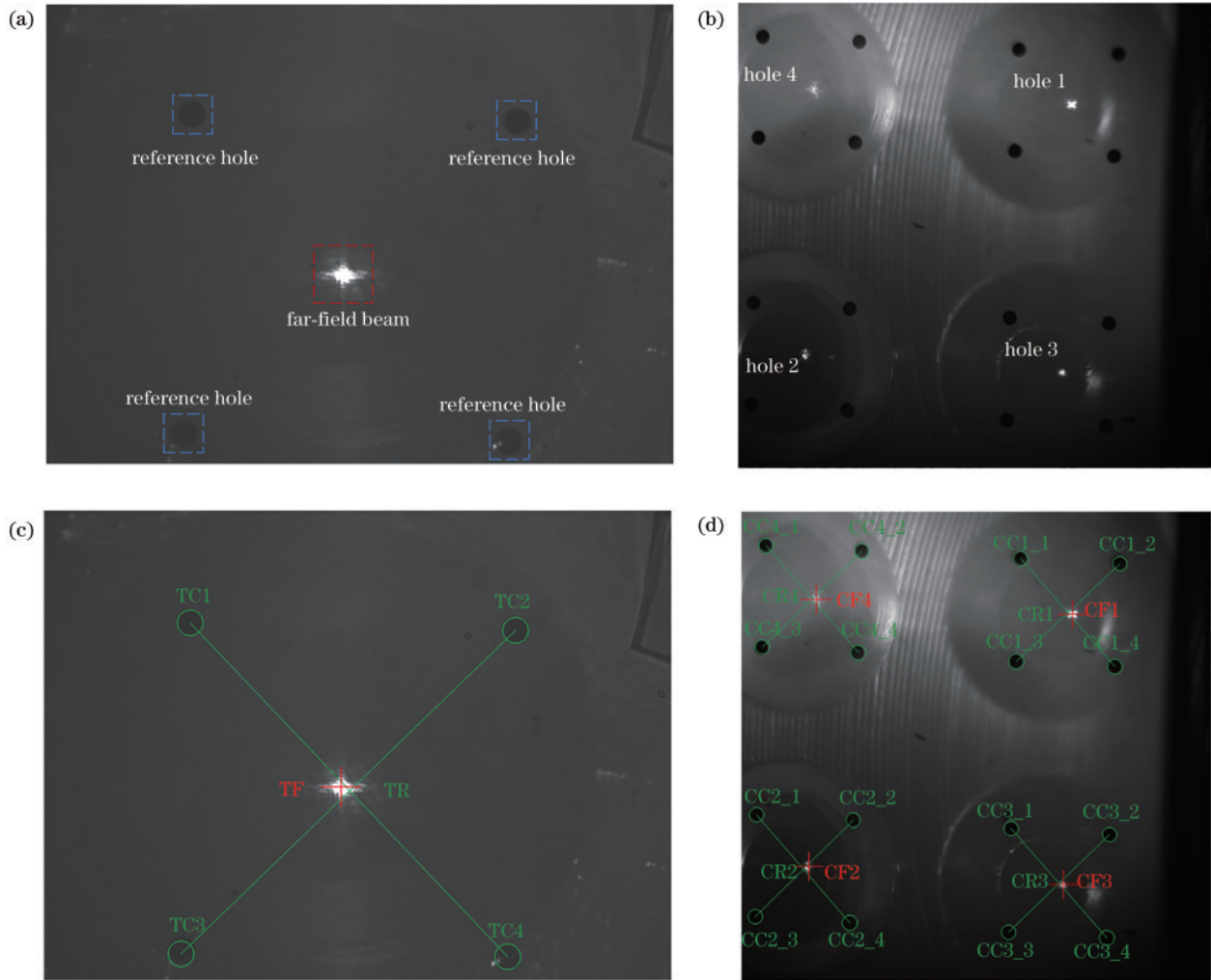


图 2 准直时 TFSF 相机和 CSF 相机采集的图像。(a) TFSF 图像; (b) CSF 图像; (c) TFSF 图像及中心标识; (d) CSF 图像及中心标识  
 Fig. 2 Images captured by TFSF CCD camera and CSF CCD camera in beam alignment. (a) TFSF image; (b) CSF image; (c) TFSF image with center markers; (d) CSF image with center markers

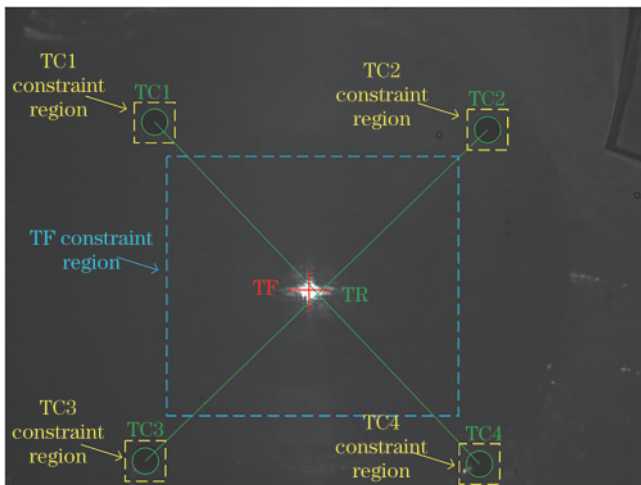


图 3 对 TFSF 图像处理时的区域约束

Fig. 3 Regional constraint in TFSF image processing

90 个像素, 根据实际情况选择该值) 作为约束区域的边长, 区域中心即为人工给定的基准小孔圆心位置。先通过处理约束区域的图像来计算 4 个基准小孔的

心和半径, 而后利用 4 个基准小孔的中心来得到基准中心。由于只对约束区域内的图像进行处理, 需要计算处理的像素点数大幅度减少, 因此能够很大程度上减少处理时间。

计算远场光斑中心时的图像处理区域如图 3 中 TF constraint region 所示。当检测到该约束区域内有远场光斑时, 调用图像处理算法以获得远场光斑中心, 否则给出无效的计算结果。这种处理方式是可以在远场光斑调整到该约束区域之外时暂停光路准直的闭环调整, 从而避免将远场光斑调整到采集相机视场之外。CSF 图像处理的区域约束如图 4 所示, 可以看出约束区域与 TFSF 图像相似, 它对应了 16 个基准小孔的计算处理和 4 个远场光斑中心的计算处理。

从图 4 可以看到, 通过 CSF 的 1 孔的光束的远场光斑的右侧和通过 CSF 的 3 孔的光束的远场光斑的右侧存在亮度较强的区域。这些亮度较强的区域是杂散光等因素导致的, 对于图像处理而言是干扰区域。这些干扰区域会对远场光斑中心的计算产生负面影响,

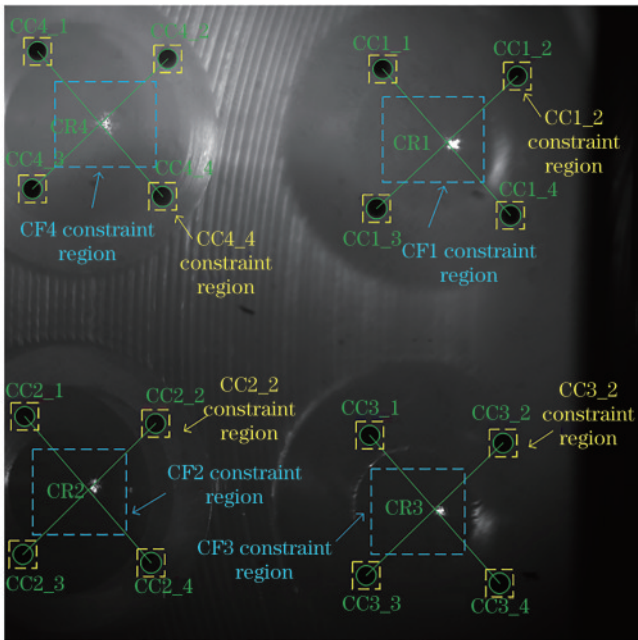


图 4 对 CSF 图像处理时的区域约束

Fig. 4 Regional constraint in CSF image processing

当远场光斑与这些干扰区域的距离较近时,远场光斑中心的计算精度会受到严重影响,甚至出现计算失败的情况。约束区域的引入则能够有效地避开这些干扰区域,保证了远场光斑中心计算的精度和可靠性。

### 3 图像处理

#### 3.1 远场基准中心提取算法

图 5 为 TSF 的 1 孔的远场基准的计算流程。处理步骤:高斯滤波;固定阈值二值化;基准小孔边缘检测;中心计算。其中,基准小孔边缘检测采用 Canny 算法。中心计算包括两个部分,先采用最小二乘法对边缘像素点进行椭圆拟合从而得到基准小孔的中心和半径,而后根据 4 个基准小孔中心求算远场基准中心。

图 6 是对 TSF 图像处理的结果,图 6(a)为对 TSF 图像进行边缘检测后得到的图像,图 6(b)是对 TSF 基准小孔的边缘像素点进行拟合得到的结果。

为了对所提 TSF 远场基准中心提取算法的计算耗时进行测试,采用两种方法来计算远场基准中心,对比

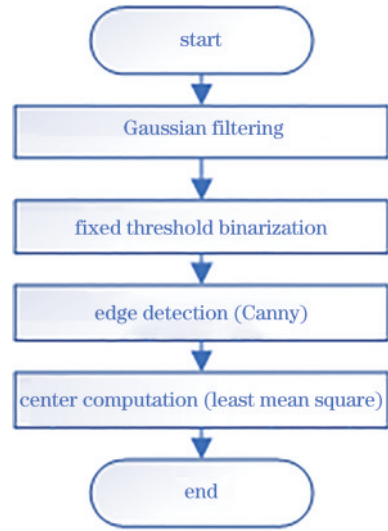


图 5 TSF 远场基准中心计算的处理流程

Fig. 5 TSF far-field reference center computation procedure

计算耗时。第一种是全图处理的基准计算方法,即通过对整幅图像进行处理来求算基准中心;第二种是所提基准计算方法。实验时,分别采用两种方法对相同的 TSF 图像进行处理,并记录各自耗时。采用的计算机配置是 CPU i5-10210U(主频为 1.6 GHz,最大睿频为 4.2 GHz,三级缓存为 6 MB),内存 8G。实验结果如图 7 所示,标记 whole image 的曲线是第一种方法计算基准的耗时,标记 constraint region 的曲线是第二种方法计算基准的耗时。从图 7 可以看出:采用全图处理的基准计算方法耗时在 950 ms 以上;采用所提基准计算方法时,每次耗时在 100 ms 以内,平均耗时在 50 ms 左右;TSF 基准计算耗时大幅度缩短。

与 TSF 图像相比,CSF 图像稍显复杂,若采用与 TSF 图像相同的基准处理流程时难以得到准确的结果,所以需要针对 CSF 图像的特点设计专用的处理流程。CSF 的 4 个孔的基准中心提取流程如图 8 所示。处理步骤如下:中值滤波,以消除图像中的椒盐噪声,保留边缘的尖锐度,除去均匀介质中的纹理;自适应阈值二值化处理;再次进行中值滤波以除去图像中的残余噪声;基准小孔边缘检测;中心计算。其中边缘检测和中心计算采用与 TSF 相同的计算方法。

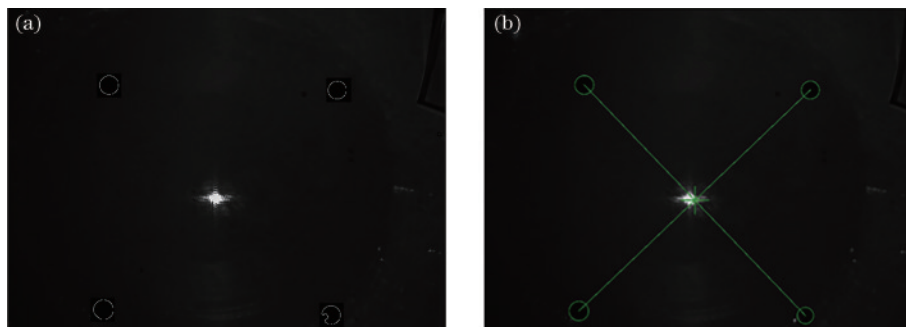


图 6 对 TSF 图像的远场基准计算。(a)边缘检测后得到的图像;(b)基准处理结果

Fig. 6 Far-field reference computation for TSF image. (a) Output image after edge detection; (b) reference result

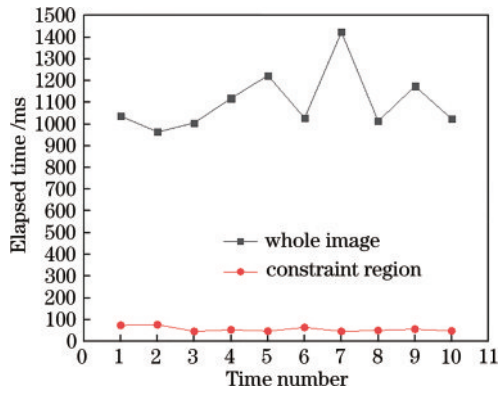


图7 TSF 图像远场基准计算耗对比

Fig. 7 Comparison of elapsed time for far-field reference computation for TSF image

采用上述方法对采集的图像进行处理。图 9 是对 CSF 图像处理的结果,图 9(a)为对 CSF 图像进行边缘检测后得到的图像,图 9(b)是对 CSF 基准小孔的边缘

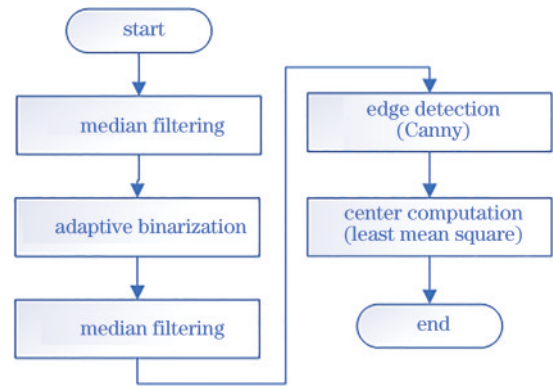


图8 CSF 远场基准中心计算的处理流程

Fig. 8 CSF far-field reference center computation procedure

像素点进行拟合得到的结果。可以看出,各基准小孔处都得到了比较清晰的边缘,利用这些清晰的边缘可以很容易计算得到基准小孔的中心和半径。

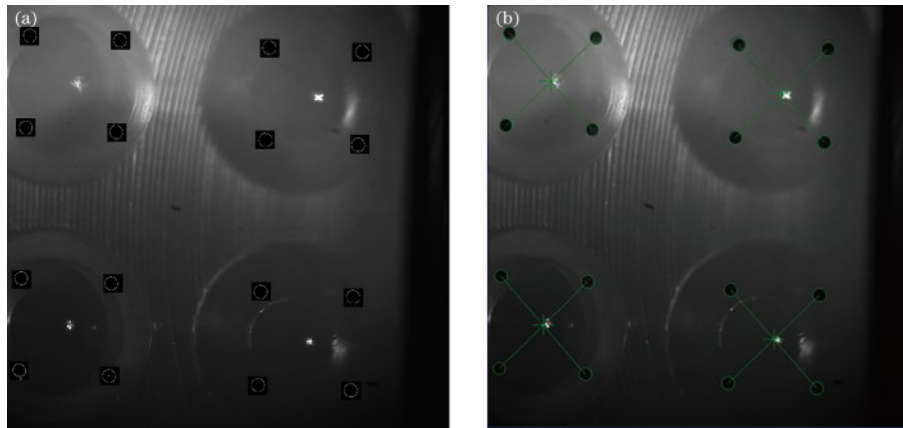


图9 CSF 图像的远场基准计算。(a)边缘检测后得到的图像;(b)基准处理结果

Fig. 9 Far-field reference computation for CSF image. (a) Output image after edge detection; (b) reference result

同样对所提 CSF 远场基准中心提取算法的计算耗时进行测试,采用两种方法来计算远场基准中心,对比计算耗时。采用与前述相同的计算机配置。第一种是全图处理的基准计算方法,即通过对整幅图像进行处理来求算基准中心;第二种是所提基准计算方法。实验结果如图 10 所示,可以看出:采用全图处理的基准计算方法耗时要在 3000 ms 以上;而采用所提方法时,计算耗时降到了 300 ms 以内,平均耗时在 250 ms 左右;CSF 基准计算耗时大幅度缩短。

### 3.2 远场光斑中心提取算法

由于区域约束将远场光斑限定在一个范围内,并且在该范围内远场光斑具有良好的区分度,所以远场光斑中心计算的处理流程得到大幅度简化,并且所有基准孔的远场光斑中心计算可以采用统一的处理流程,即图 11 所示的处理流程。首先对采集到的图像进行固定阈值二值化处理,以得到具有较好区分度的二值化后的远场光斑图像。需要注意的是,针对不同的基准孔的远场光斑图像,二值化阈值是不同的,需要根

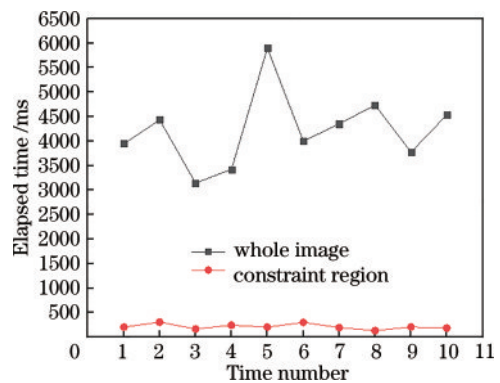


图10 CSF 图像远场基准计算耗对比

Fig. 10 Comparison of elapsed time for far-field reference computation for CSF image

据实际情况进行调整。而后对二值化后的图像利用 Kmean 方法进行聚类,求取远场光斑的像素点集合的几何中心,将该几何中心作为远场光斑中心。

图 12 给出了 TSF 远场光斑中心的计算结果,图 13

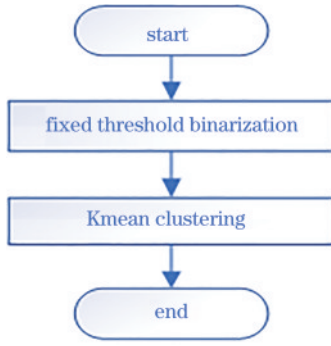


图 11 远场光斑中心计算的处理流程  
Fig. 11 Far-field center computation procedure

给出了CSF各孔远场光斑中心的计算结果。由图 13(a)可知,约束区域有效避免了杂散光等因素所导致的亮度较强区域对图像处理的干扰(如 hole 1 和 hole 3 右侧亮度较强的区域),非常有效地提高了远场光斑中心计算时图像处理的可靠性。由于聚类方法有可能会增加处理时间,所以在耗时方面进行了测试,采用与前述相同的计算机配置。图 14 分别为对 TSF 图像和 CSF 图像利用上述算法计算远场光斑中心的耗时情况,对 TSF 图像的远场计算耗时在 150 ms 以内,对 CSF 图像的远场光斑中心计算耗时在 170 ms 以内,算法有较好的计算效率,可以满足目前的光路自动准直的耗时要求。

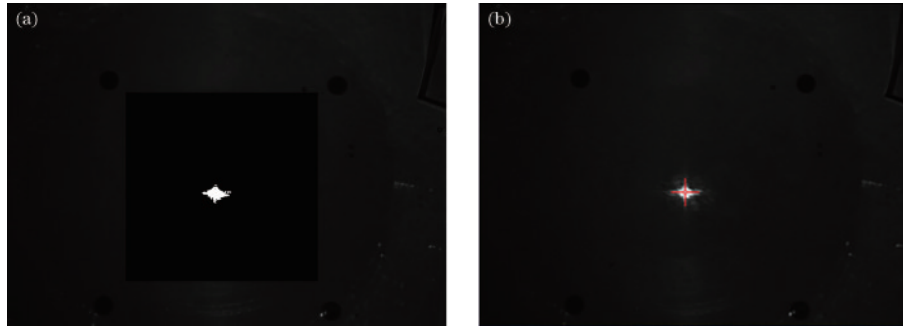


图 12 TSF 图像远场光斑中心处理结果。(a)二值化后得到的图像;(b)远场光斑中心计算结果  
Fig. 12 Far-field center computation result for TSF image. (a) Output image after binarization; (b) far-field center result

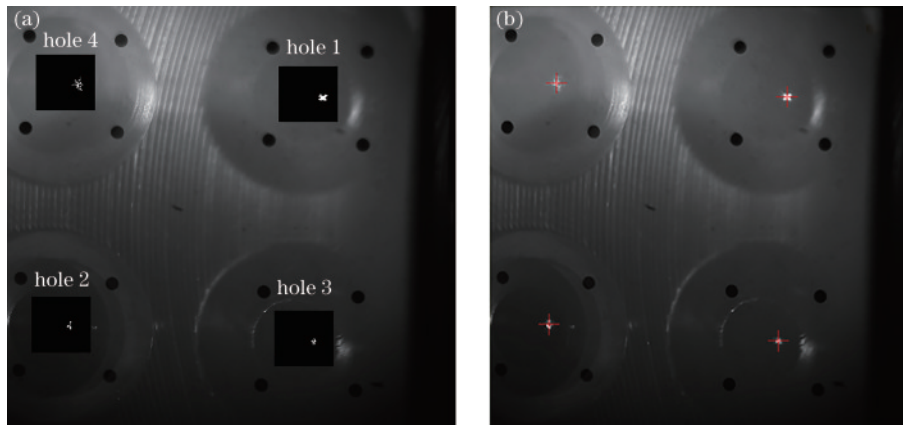


图 13 CSF 图像远场光斑中心处理结果。(a)二值化后得到的图像;(b)远场光斑中心计算结果  
Fig. 13 Far-field center computation result for CSF image. (a) Output image after binarization; (b) far-field center result

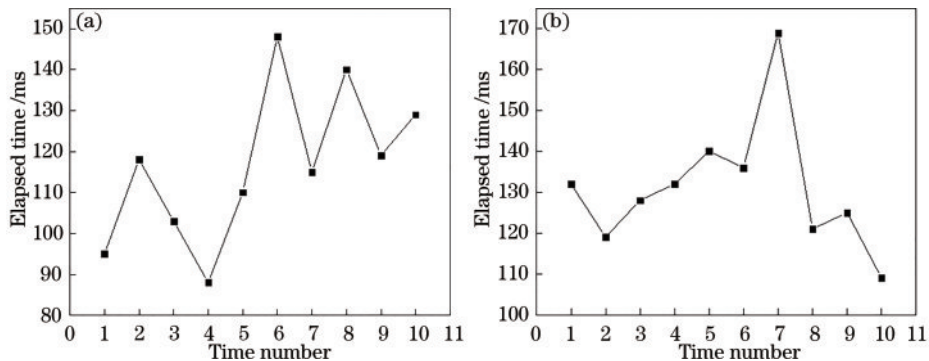


图 14 远场光斑中心计算耗时情况。(a)TSF 图像;(b)CSF 图像  
Fig. 14 Elapsed time for far-field center computation. (a) TSF image; (b) CSF image

## 4 结 论

对神光 II 升级装置中某个组件的主放大器的远场自动准直的图像处理问题进行了研究。对图像处理的区域施加约束以达到两个目的:提高远场基准计算的效率;提高远场光斑中心计算的可靠性。在进行远场基准计算时,分别对 TSF 图像处理和 CSF 图像处理设计两个处理流程。在远场光斑中心计算时,针对所有远场光斑中心计算的图像处理采用相同的处理流程,并采用聚类方法来求算远场光斑中心。实验结果表明:所提方法具有有效性;远场基准计算的耗时得到大幅度缩短,耗时满足目前应用要求;远场光斑中心计算的可靠性提高。

### 参 考 文 献

- [1] Moses E I. The National Ignition Facility (NIF): a path to fusion energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(7): 1795-1802.
- [2] Miquel J L, Lion C, Vivini P. The LMJ Program: overview and status of LMJ and PETAL projects[C]//CLEO: 2013, June 9-14, 2013, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2013.
- [3] 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 100002.  
Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang- II laser facility[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 100002.
- [4] 郑万国, 邓颖, 周维, 等. 激光聚变研究中心激光技术研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3082-3090.  
Zheng W G, Deng Y, Zhou W, et al. Development of laser technology in Research Center of Laser Fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3082-3090.
- [5] Burkhart S C, Bliss E, di Nicola P, et al. National Ignition Facility system alignment[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(8): 1136-1157.
- [6] 刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(5): 582-586.  
Liu D Z, Zhu J Q, Xu R F, et al. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2004, 16(5): 582-586.
- [7] 吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. *光学技术*, 2005, 31(3): 335-337.  
Lü F N, Liu D Z, Xu R F, et al. Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 335-337.
- [8] 李红, 王东方, 林强, 等. 高功率激光驱动器光束自动准直目标定位算法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2203-2207.  
Li H, Wang D F, Lin Q, et al. Fast and precise center location for target of high power laser driver beam automatic alignment[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2203-2207.
- [9] 曾沛颖, 朱宝强, 朱健强. 基于蚁群算法的准直图像处理研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1011001.  
Zeng P Y, Zhu B Q, Zhu J Q. Alignment image optimization based on ant colony algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1011001.
- [10] Liu D J, Zou W, Zhang F, et al. A reference center extraction method for SG-II-UP CSF alignment control [C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 29-July 4, 2014, Shenyang, China. New York: IEEE Press, 2014: 69-73.
- [11] 吴泽楷, 李恭强, 王文涛, 等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测[J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 346-350.  
Wu Z K, Li G Q, Wang W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 346-350.
- [12] 王拯洲, 许瑞华, 胡炳樑. 基于圆拟合的非完整圆激光光斑中心检测算法[J]. *激光与红外*, 2013, 43(6): 708-711.  
Wang Z Z, Xu R H, Hu B L. Algorithm of semicircular laser spot detection based on circle fitting[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(6): 708-711.
- [13] 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.  
Kong B, Wang Z, Tan Y S. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(3): 275-279.
- [14] 李红, 林强, 杨朋千, 等. 基于光斑形状光束快速自动准直算法[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 1114002.  
Li H, Lin Q, Yang P Q, et al. The fast algorithm of auto-alignment based on spot shape[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1114002.
- [15] Wilhhelmsen K C, Awwal A S, Ferguson S W, et al. Automatic alignment system for the national ignition facility[C]//International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems, October 14-20, 2007, Knoxville, TN, USA. Livermore: Lawrence Livermore National Lab, 2007.
- [16] Awwal A A S, Leach R R, Miller-Kamm V, et al. Image processing for the automatic alignment at the national ignition facility[C]//2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 5-10, 2016, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.