

doi:10.3788/gzxb20174610.1014002

高功率激光装置快速自动准直系统

李红,朱健强,林强,杨朋千,张艳丽,刘代中,朱宝强

(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:为提高自动准直效率,结合以太网,设计出一套新型光路自动准直控制和检测方案.该方案采用基于耦合矩阵的前馈补偿及图像 Jacobian 矩阵的近远场串并行准直方式,并引入局部自适应阈值和二值化算法,同时将模糊控制算法运用到步进电机的调整过程中,提高光束近远场图像的处理精度,降低系统的准直时间.实验结果表明,该准直系统远场的平均调整误差为空间滤波器小孔直径 0.44%,能够满足准直系统远场调整精度(小于小孔直径5%)的要求,准直时间由原有的30 mins缩短至12 mins左右.

关键词:自动准直;图像处理;耦合矩阵;反馈控制;自适应阈值;模糊控制;二值化;高功率激光驱动器

中图分类号:TN242

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)10-1014002-7

Laser Beam Fast Automatic Alignment System for High Power Laser Facility

LI Hong, ZHU Jian-qiang, LIN Qiang, YANG Peng-qian, ZHANG Yan-li,

LIU Dai-zhong, ZHU Bao-qiang

(High Power Laser Physics Joint Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of automatic alignment, combined with Ethernet, a new optical path automatic alignment control and detection scheme was described. The proposed near-far field parallel alignment method implements forward feed back compensation based on coupling matrix and Jacobian image matrix. By introducing the image local adaptive thresholding, image binaryzation, and the fuzzy stepping motor control algorithm, the precision of near-far field image detection was improved with less processing time. The results show that the average far-field alignment error is smaller than 0.44% of spatial filter pinhole diameter, which meets the alignment system requirements (5% of spatial filter pinhole diameter), the alignment time reduces from the original 30 mins to 12 mins.

Key words: Automatic alignment; Image processing; Coupling matrix; Feedback control; Adaptive threshold; Fuzzy control; Binarization; High power lasers

OCIS Codes: 140.3295; 140.3300; 100.2000; 110.2970

0 引言

随着激光核聚变技术的不断深入研究,现代精密物理实验对高功率固体激光驱动器性能的要求也随之增高,而随着高功率固体激光器功率的不断提高,光束口径及路数急剧增长,光路长度及原器件的数目也随之增长,系统结构也更加复杂,从而导致影响装置稳定性的因素不断增加,因此人们对其可靠性以及可操作性及易维护性也提出了越来越高的要求^[1,2].自动准直系统是确保高功率激光驱动器正常运行的关键子系统之一,是推动高功率激光器发展的关键环节.目前国外高功率激光装置的准直技术已较为成熟,光束自动准

基金项目:国家高技术研究发展计划(No.2007SQ804)和中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究课题(No.2012DFG62040)资助

第一作者:李红(1986—),女,助理研究员,硕士研究生,主要研究方向为高功率激光光束控制与准直.Emai:hongli_0309@163.com

导师(通讯作者):朱健强(1964—),男,研究员,博士,主要研究方向为激光驱动器的总体光学设计、结构设计、相关检测技术和测控技术等.Emai:jqzhu@mail.shnc.ac.cn

收稿日期:2017-04-11;录用日期:2017-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

直系统在 20 世纪七十年代就已经在美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)的 Shiva 装置上得到了应用,在 NIF 装置上自动准直速率得到了质的飞跃,该装置 30 mins 内即可完成全部准直过程.我国的高功率激光驱动器自动准直技术起步较晚^[3].1986 年我国的神光 I 装置被建成,自动准直技术并没有得到应用,整个系统的准直过程仍完全依靠人力调整,准直可靠性及速率不能满足设备的需求,严重影响物理实验的进度^[4].自 20 世纪 90 年代起,我国科研人员首次开始尝试把光路自动准直技术引入高功率驱动器中,根据我国高功率驱动器的特点及发展方向,并吸收国外自动准直技术的成功经验,于 90 年代后期,成功将自动准直技术应用于我国神光 II 装置中^[5].但是自动准直的精度和效率仍与国外存在较大的差距,而自动准直的效率 and 可靠性又是制约高功率激光装置发展的关键技术点之一.实际系统中由于受局域空间排布及反射镜个数的限制,近场的准直过程存在对远场的扰动问题,这种情况极大地制约着自动准直系统的效率.针对这一问题,本文采用基于耦合矩阵的前馈补偿及图像 Jacobian 矩阵的近远场串并行准直方式,并引入局部自适应阈值、二值化图像处理算法,同时将模糊控制算法运用到步进电机的调整过程中,并在某高功率激光装置实验平台上经实际应用验证,结果满足设计要求,目前该系统已投入实际应用.

1 准直系统的设计原理

准直系统的主要功能是监测激光束传播过程中实际位置与参考位置的偏差,通过近场和远场检测系统自动引导反射镜在闭环控制系统中对光束位置进行调整,使其重返参考位置^[6,7].主要功能包括近场光束位置控制和远场光束指向控制.近场位置控制主要用于满足当光束经过光路时每一个光学元件的定位精度,远场指向控制主要用于满足传播方向的指向精度.光束的自动准直过程即是对光斑图像的处理过程,这一过程包含两个关键因素:1)激光光束真实中心位置的获取.图像光斑中心点的获取精度是反射镜调整准确的前提条件,是自动准直精度的保障;2)电机控制方式的选择.电机控制方式是准直时间长短的决定性因素,是自动准直效率的保障.

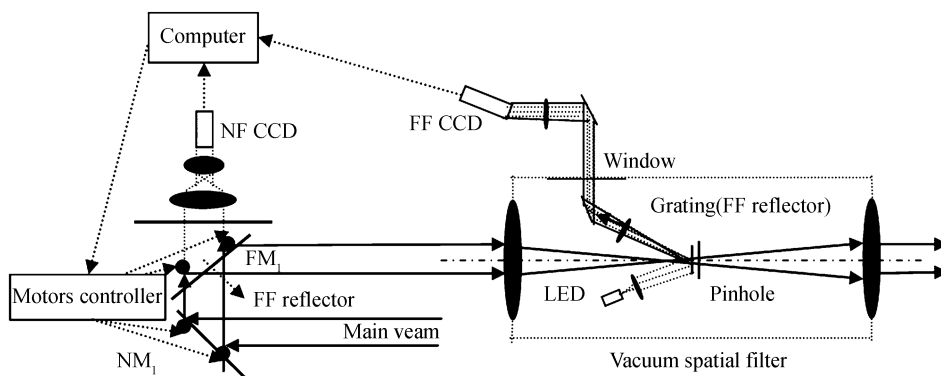


图 1 成像系统

Fig.1 The imaging system

需要进行自动准直的高功率激光装置由五束光路组成,共设有 65 个控制点,36 个图像采集点和 17 个近场监测点.图 1 为该装置预放系统第一级空间滤波器准直示意图.由再生放大器输出的光束经近场反射镜 NM_1 、远场反射镜 FM_1 反射后进入空间滤波器^[8-10].近场基准取样板设置于远场反射镜后,通过远场反射镜的漏光,成像到 CCD 中.空间滤波器共焦面上放置滤波小孔,抑制小尺度自聚焦,光栅基准中心与小孔中心完全重合,利用光栅的衍射特性,实现对远场图像的高分辨率在线取样.通过图像处理算法对近远场图像光斑位置形成的耦合矩阵进行前馈补偿,实现近远场并行准直.同时步进电机的控制策略上引入模糊控制算法,提高系统自动准直效率.

将每个近远场设为一个成像组,将准直管理软件定义成为一个可共享模块,因此通过模块与成像组的叠加即可实现多路自动准直系统的拓展叠加,满足未来高功率激光驱动器拓展需求.

2 图像处理及反馈控制

2.1 图像处理

由于系统中光路的传播距离超过了 100 m,因此获得的光斑图像会受到各类噪声的影响,从而影响到图像光斑中心的计算,而传统的图像中心提取算法,如结合质心求中心法本身没有去噪能力,因此需要寻求更适合的图像处理方法^[11].本文采用局部自适应阈值、二值化算法和 Canny 算子边缘检测算法获取光斑的中心位置^[12,13].

图像边缘检测引入 Canny 算子,假设某任意二维曲线在图像空间中可表示为

$$f(x, y, r_1, r_2, r_3 \cdots, r_n) = 0 \quad (1)$$

式中 x, y 是曲线的坐标值, $r_1, r_2, r_3 \cdots, r_n$ 是曲线的特征参数,如果对式(1)进行等价变换,将其中的特征参数与变量 x, y 分离,则式(1)可以等价表示为

$$G[(r_1, r_2, r_3 \cdots, r_n) \cdot (x, y)] = 0 \quad (2)$$

式(2)中 $r_1, r_2, r_3 \cdots, r_n$ 为自变量, x, y 为定值.该变换说明,当图像空间中同一曲线上的点通过式(2)变换为参数空间中一点时,该点由特征参数 $r_1, r_2, r_3 \cdots, r_n$ 来确定.因此,通过判断参数空间中各个特征参数,可以实现对图像空间中二维曲线的特征描述.

在自动准直图像处理中,圆形光斑方程为 $(x-a)^2 + (y-b)^2 = c^2$.令 $(x_i, y_i) (i=1, 2, 3 \cdots)$ 为图像中满足圆周特性的点集合,那么图像空间集合中的点 (x_i, y_i) 在参数空间中方程为

$$(a-x_i)^2 + (b-y_i)^2 = c^2 \quad (3)$$

所有满足式(3)的 (a, b, c) 构成了一个三维锥面.对于图像空间中满足圆周边界的像素点,则在参数空间中与之对应的三维锥面组成一组圆锥面簇.

为了能够检测到图像中光斑的圆心坐标 (a, b) ,则需在参数空间构建一个三维数组 $M(a, b, c)$.根据式(3)对图像圆周上每一个像素点计算 (a, b, c) .通过计算 $M(a, b, c)$ 数组中最大值 $\text{Max}(a, b, c)$,可知数组中的 (a, b) 就是图像空间中所求光斑圆周的圆心坐标, c 为半径.

系统中光斑图像边缘受到各类噪声的影响,尤其是同等灰度值噪声的影响使得原方案在设置阈值时无法得到连续的边界曲线或实际边界曲线受到干扰,影响了测量的精度及速度.图 2 为采用本文图像处理方法的处理过程,图 2(a)为原始图片,图 2(b)为图像二值化后得到的边缘曲线,图 2(c)为经过图像处理算法计算得到的中心图片.

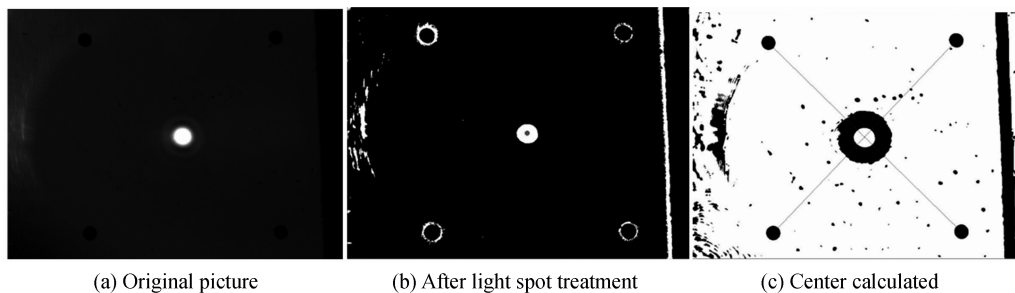


图 2 远场光斑处理

Fig.2 The far-field spot treatment

从图 2 可以看出,受到噪声影响左上侧标识点与其他标识点相比较亮度产生了明显变化,噪声较大的区域会影响到光斑的处理准确度,应用局部自适应阈值法避免了传统方法在阈值设置过程中无法得到连续的边界曲线或实际边界曲线受到噪声干扰的问题.通过处理后图 2(c)可以看出,此方法避免了噪声对图像处理过程的影响,基准点及光斑的提取准确性较高,满足系统的设计需求,有利于提高测量的精度及速度.

2.2 近远场内部反馈控制

自动准直系统中的反馈控制是计算图像光斑中心与基准中心的偏差量,将偏差量转换成步进马达的调整步数进行调整的过程^[14,16].理论上每个像素对应的调整值为固定值,但在实际情况中受到机械结构、温度等各种因素的影响,像素与马达步数的对应关系为非线性值,因此在调整时间上有着很大的波动性.为了克

服像素与马达步数的非线性关系带来的调整时间长的问题,本文采用基于图像 Jacobian 矩阵的近远场串并行同时处理的反馈控制结构,同时步进电机调整方式采用模糊控制算法来保证光束快速调整至基准中心,即将该非线性值设置为一系列阈值,根据实际误差距离进行实时变换步长控制,从而保证系统能够快速准确地自动准直,提高系统准直效率.

由于每一个光路近远场准直调整结构基本相同,包括反射镜结构参数、图像处理系统以及它们二者之间的位置对应关系都是相同的,反射镜结构调整系数矩阵 J_{co} 也是固定不变的,所以其线性部分的结构矩阵参数可以离线标定.

标定步骤为:控制步进电机使得第 m 级反射镜执行 N 次运动,记每次反馈调节中电机在 X 方向和 Y 方向上的运动量分别为 Δu_{mn} 和 Δk_{mn} ,与之相对应的光斑中心在 CCD 像面上的坐标变化量分别为 Δx_{mn} 和 Δy_{mn} ,其中 $1 \leq n \leq N, 1 \leq m \leq 7$,则有式(4)关系成立.

$$\begin{bmatrix} \Delta x_{m1} & \cdots & \Delta x_{mN} \\ \Delta y_{m1} & \cdots & \Delta y_{mN} \end{bmatrix} = J_{co} \begin{bmatrix} \Delta u_{m1} & \cdots & \Delta u_{mN} \\ \Delta v_{m1} & \cdots & \Delta v_{mN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

简记为

$$T = J_{co} M \quad (5)$$

式中 J_{co} 为反射镜图像调整 Jacobian 矩阵

$$T = \begin{bmatrix} \Delta x_{m1} & \cdots & \Delta x_{mN} \\ \Delta y_{m1} & \cdots & \Delta y_{mN} \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} \Delta u_{m1} & \cdots & \Delta u_{mN} \\ \Delta v_{m1} & \cdots & \Delta v_{mN} \end{bmatrix}$$

其中第 m 级图像的 Jacobian 矩阵的离线解为

$$J_{co} = TM^T(MM^T)^{-1} \quad (6)$$

则在第 k 轮准直周期中,第 m 级基准中心与光斑中心之间的偏差向量为 $[\Delta x_m(k), \Delta y_m(k)]^T$,则该孔两个反射镜的调节电机反馈调节量 ΔH_m^e 为

$$\Delta H_m^e = \begin{bmatrix} \Delta u_m(k) \\ \Delta k_m(k) \end{bmatrix} = -J_{co}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ \Delta y_m(k) \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据以往自动准直装置的调整经验数据,将光斑的偏离程度化为严重偏离、大偏离、小偏离和微小偏离等几个档次.同时对应步进电机的调整步长也相应设置为对应的等级.当偏离误差较大时能够进行大步长调整,接近光束中心时步距能够自适应减小,到光束中心点附近时精密定位.

在光路调整过程中,首先利用 CCD 获取的图像通过局部自适应阈值、二值化算法和边缘图像提取算法计算出光束中心与基准的偏差值,然后通过图像 Jacobian 矩阵再进行模糊量化处理,根据不同的阈值情况,计算出步进电机的步长,通过不断重复调整,使光束中心恢复到指定位置.

2.3 近远场并行的准直补偿控制

由于局部空间排布及反射镜个数限制,原准直过程都是完成近场准直后再开始远场准直,准直时间相对较长.采用基于耦合矩阵的前馈补偿近远场串并行的准直方式,从图 1 可以看出,当近场准直反射镜 NM_1 调整时,远场光斑位置也会发生变化,因此可以将其视为来自近场准直调节过程的扰动.为补偿这种扰动,远场反射镜 FM_1 需旋转一定角度以确保其光斑不偏离中心位置.考虑反射镜二维运动在准直过程中的影响,远场反射镜 FM_1 准直电机的补偿控制量及 X 、 Y 轴电机运动量同旋转角度之间的关系矩阵,通过运动机构参数可离线标定得到.

图 3 为本方案图像处理反馈控制流程,从图 3 可以看出此方法与传统准直方法相比主要有两点不同:首先在准直过程初期分别计算出 Jacobian 矩阵反馈调节量 J_1, J_2 ,然后通过近场反射镜反馈调节量 J_1 ,计算出远场反射镜补偿调节量 $J_2(J_0 J_1 \Delta 1 + J_2 \Delta 2)$,通过对远场反射镜的补偿实现近远场的同步准直.

分析可知,在实际应用过程中,当采用近远场并行准直时,必须考虑前后互联关系,即只有当近场准直结束后远场才能结束.首先近远场并行准直调节,当近场光斑中心与基准中心的 X 、 Y 坐标偏差均小于 1 pixel 后,近场准直结束,之后远场再进行一次耦合调节,确保最终达到系统准直要求.

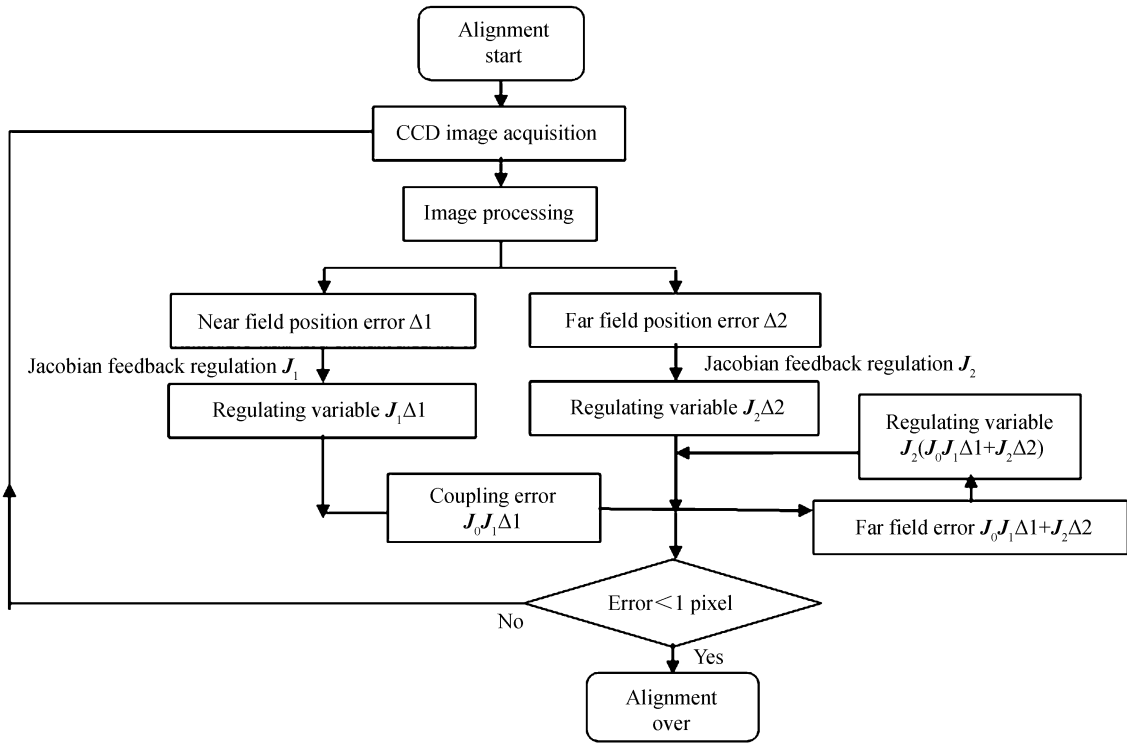


图3 图像处理反馈控制过程
Fig.3 Feedback control process of image processing

3 实验结果与分析

原系统准直方案和采用本文准直方案的准直效率对比见图4.图4(a)是近场准直误差变化曲线图,4(b)

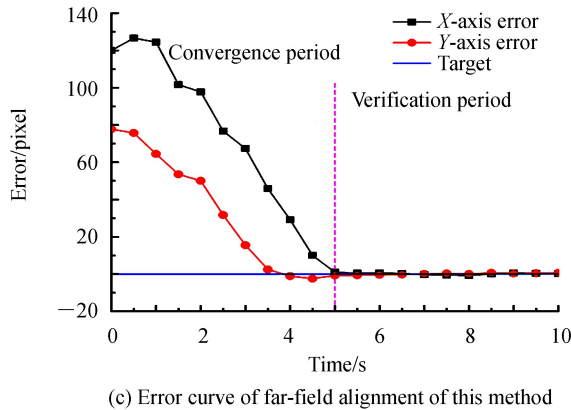
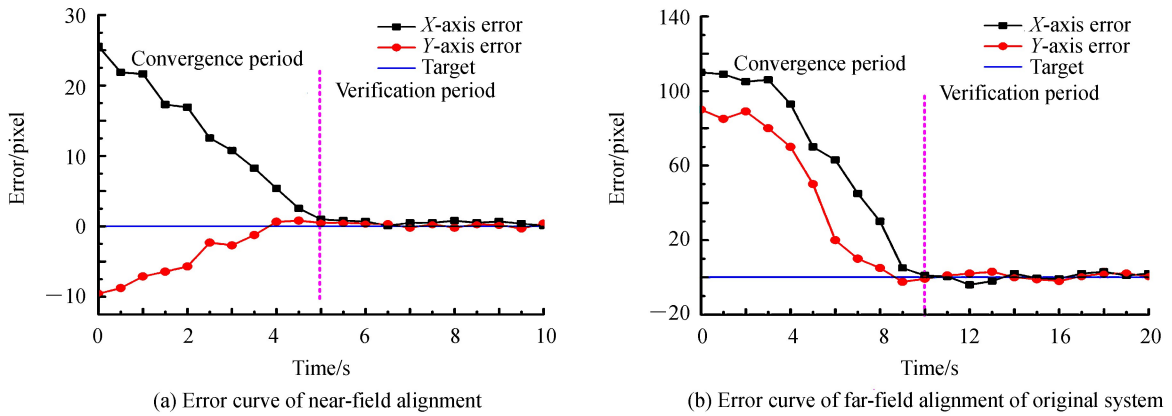


图4 近、远场误差曲线
Fig.4 Error curve for far-field and near-field

给出了原准直系统在远场准直过程中,光斑中心距基准中心偏差 0 至 1 个像素范围内的变化过程,图 4(c)为本方案准直系统在远场准直过程中光斑中心距基准中心偏差 0 至 1 个像素范围内的变化过程。

在单个准直单元中,原方案和本方案近场准直误差均在 5s 内收敛到一个像素,由图 4(a)、(b)、(c)可以看出,原方案的远场准直误差在 10 s 内完成收敛,而本方案改进了图像处理算法,远场准直误差在 5s 内完成收敛.一般来说近场准直误差收敛后需要 5 s 的检测期,所以原方案准直单元的准直时间最快为 20 s,而由于本方案引入了前馈补偿,近场、远场能够实现并行准直,所以本方案准直单元的准直时间最快为 10 s.而整个系统包含多束光路,需要分段、分层进行准直,同时受到相互耦合的影响,实验结果表明,整个系统的准直时间由原来的 30 mins 缩短到 12 mins.

表 1 光斑中心误差对比
Table 1 Comparison of spot center error

	Actual value	Reference value	Error
The original system far field X	372.848	371.699	-1.149
The original system far field Y	281.186	278.730	-2.456
This scheme far field X	370.749	371.699	0.950
This scheme far field Y	279.178	278.730	-0.448

表 1 为光斑中心误差对比数据,由表 1 可知,传统远场检测方法得到小孔中心坐标像素平均值为 (371.699,278.730),光斑中心坐标像素为 (372.848,281.186),按 1 : 1 成像计算两个中心实际距离为 22.5 μm ,而本系统远场检测方法得到小孔中心坐标像素平均值为 (371.699,278.730),光斑中心坐标像素为 (370.749,279.178),按 1 : 1 成像计算两个中心实际距离为 8.7 μm ,小孔直径为 2 mm,经过计算,该准直系统的平均调整误差为空间滤波器小孔直径 0.44%,能够满足准直系统远场调整精度(小于小孔直径 5%)的要求。

4 结论

采用自适应阈值、二值化算法和 Canny 算子边缘检测算法,实现了高功率激光装置光束近远场图像中心点的高可靠性、高精度提取,并以此为基础提出基于耦合矩阵的前馈补偿及图像 Jacobian 矩阵的近远场串并行的准直方式,同时将模糊控制算法运用到步进电机的调整过程中,大大提高了系统的准直效率.该方案在某高功率激光装置实验平台上进行了实验验证,结果表明,该准直系统远场的平均调整误差为空间滤波器小孔直径 0.44%,能够满足准直系统远场调整精度(小于小孔直径 5%)的要求,系统准直时间由原有的 30 mins 缩短至 12 mins 左右。

参考文献

- [1] WAXER L J, MAYWAR D N, KELLY J H, *et al.* High-energy petawatt capability for the omega laser[J]. *Optics and Photonics News*, 2005, **16**(7): 30-36.
- [2] FLEUROT N, CAVAILLER C, BOURGADE J L. The Laser Mégajoule(LMJ) project dedicated to inertial confinement fusion: development and construction status[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, **74**(1/4): 147-154.
- [3] AWWAL A, COHEN S, LOWE-WEBB R, *et al.* Alignment mask design and image processing for the Advanced Radiographic Capability (ARC) at the national facility[C]. SPIE International Symposium on Optical Engineering, 2015, 9: 9 - 13.
- [4] GAO Yan-qi, ZHU Bao-qiang, LIU Dai-zhong, *et al.* Far field auto-alignment system used in SG-II-Up system[J]. *Journal of Physics*, 2011, **60**(6): 065204.
高妍琦,朱宝强,刘代中,等. 神光 II 升级装置远场准直系统研究[J]. 物理学报. 2011, **60**(6): 065204.
- [5] SAYRE D B, BARBOSA F, CAGGIANO J A, *et al.* Calibration of scintillation-light filters for neutron time-of-flight spectrometers at the national ignition facility[J]. *Review of Scientific*, 2016, **87**, 11D802.
- [6] DA Zheng-shang, LI Dong-jian, ZHOU Wei, *et al.* Mathematical model for beam automatic fast alignment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37** (12): 2534-2538.
达争尚,李东坚,周维,等.光路自动准直快速调整数学模型研究[J]. 光子学报, 2008, **37** (12): 2534-2538.
- [7] SPAETH M L, MANES K R, BOWERS M, *et al.* National ignition facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, **69**(1): 366-394.
- [8] AO Lei, TAN Jiu-bin, CUI Ji-wen, *et al.* Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator [J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **2**(27): 253-258.
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, **2**(27):

253-258.

- [9] FENG Jun-ping, ZHAO Zhuan-ping, XU Tao. Morphological edge detection technology in digital image processing[J]. *Aeronautical Computer Technique*, 2004, **34**(3): 53-56.
冯俊萍,赵转萍,徐涛. 基于数学形态学的图像边缘检测技术[J]. 航空计算技术, 2004, **34**(3): 53-56.
- [10] 赵轶彦. 步进电机的智能控制在自动聚焦中的应用研究[D]. 太原理工大学, 2008.
- [11] LU Feng-nian, LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. *Optical Technology*, 2005, **3**(3): 72-74.
吕凤年, 刘代中, 旭仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 光学技术, 2005, **3**(3): 72-74.
- [12] SHI Gui-ming, WEI Qing-tao, MENG Fan-sheng. The image edge detection algorithm based on canny operator [J]. *Journal of Modern Electronic Technology*, 2015, **12**(38), 92-97.
石柱名, 魏庆涛, 孟繁盛. 基于 Canny 算子的图像边缘检测算法[J]. 现代电子技术, 2015, **12**(38), 92-97.
- [13] WANG Na, LIU Xia. A new kind of improved canny edge detection algorithm[J]. *Journal of Shenzhen University*, 2005, **4**(2), 149-152.
王娜, 刘霞. 一种新型的改进 canny 边缘检测算法, 深圳大学学报, 2005, **4**(2), 149-152.
- [14] LI Jie, MIAO Chang-yun, WU Zhi-gang, *et al.*. Algorithm for edge detection of image based on mathematical morphology[J]. *Compute Science*, 2012, **39**(6A): 546-548.
李杰, 苗长云, 武志刚, 等. 基于数学形态学的图像边缘检测算法的研究[J]. 计算机科学, 2012, **39**(6A): 546-548.
- [15] WANG Da-hui, QIAN Hang, ZHAO Xue-qing, *et al.*. Automatic alignment of multiplexed beams of excimer laser system based on fluorescence imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(4): 949-955.
王大辉, 钱航, 赵学庆, 等. 基于荧光成像的准分子激光系统多路光束自动准直[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(4): 949-955.
- [16] LEACH R R, BELTSAR I, BURKHART S, *et al.*. Near field intensity trends of main laser alignment images in the National Ignition Facility (NIF)[J]. *High Power Lasers for Fusion Research*, 2015, 10.1117/12.2084006.