文章编号：　1001-4322(2013)09-2203-05

高功率激光驱动器光束自动准直目标定位算法*

李　红[1]，　王东方[2]，　林　强[1]，　姜卓偲[1]，　高妍琦[3]，　刘代中[1]，　朱宝强[1]

(1. 中国科学院 上海光学精密机械研究所，上海 201800；　2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，长春 130021；
3. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所，上海 201800)

摘　要：　为满足高功率激光驱动器光束自动准直的高精度和实时性要求，提出了一种快速高精度的自动准直目标定位算法。首先利用变结构元广义数学形态学边缘检测算法在充分提取图像边缘细节信息的同时抑制图像噪声的影响，然后采用拉格朗日多项式插值算法对圆目标轮廓进行快速亚像素定位，最后利用最小二乘拟合以及几何形心拟合的方法实现图像中光斑目标中心的精确定位。该算法在神光Ⅱ升级装置的光路自动准直中得以验证，实验结果表明八路预放光路准直时间小于 3 min，主放光路准直时间小于 7 min，主放输出光束近场准直准确度优于 0.2%，远场指向准确度优于 0.2″(RMS)。

关键词：　自动准直；　图像处理；　变结构元广义数学形态学算法；　拉格朗日多项式插值

中图分类号：　TN242　　**文献标志码：**　A　　**doi**：10.3788/HPLPB20132509.2203

应用于惯性约束聚变(ICF)的高功率激光驱动器是目前人类历史上规模最大的一类激光系统，其结构非常复杂，同时包含大量光学元器件和相应的机械支撑、调整机构等。对于已调整好的高功率激光装置的光路而言，元器件位置虽然已固定，但由于存在温度变化、反射镜机械结构蠕变、地基和支撑框架微振动、振荡器输出光束方向漂移和其他随机因素的影响，光束通常会偏离原来光路，因此每次在发射前，需要对激光器的光路进行快速校准[2]。光路自动准直的任务就是通过逐段检测光束位置和方向的偏差，由前向后依次调整光路中的反射镜，使各路光束恢复到原定光路上。其主要难点是在不影响主光路的情况下准确获得激光光束的真实位置的误差信号，为后续电机调整提供准确数据[3-5]。本文针对高功率激光系统中光路自动准直环节中的图像处理与识别方面提出了一种快速高精度的目标识别方法，采用变结构元广义形态学边缘检测算法和多项式插值算法，通过对光路中光斑的快速定位，准确快速地获得光路中激光光束的实际信息。

1　自动准直原理

光路准直是基于“两点确定一线”的原理。取光路上相隔一定距离的两个光束中心为基准点，准直精度取决于两基准点的间距，距离越长精度越高，但存在使用上的限制，因此通常选择一个远场基准和一个近场基准，远场决定激光束指向，近场决定激光束偏离。光路调整是通过调整设置在光路中的反射镜实现的，而光路与基准的偏差是通过设置在光路中的 CCD 相机测量得到的。

光路自动准直是通过计算机控制系统自动调整反射镜角度来进行光路调节的。如图 1 所示，光路自动准直环节主要包括光学采样、图像采集、计算机处理以及伺服反射镜。激光束的近场和远场通过光束取样成像到图像采集 CCD 上，计算机通过图像卡读取 CCD 采集到的光学图像，结合图像处理技术计算出光束近场和远场的位置与基准位置的偏差，从而解算出伺服反射镜的步进电机转动的步数和方向。准确、快速地完成高功率激

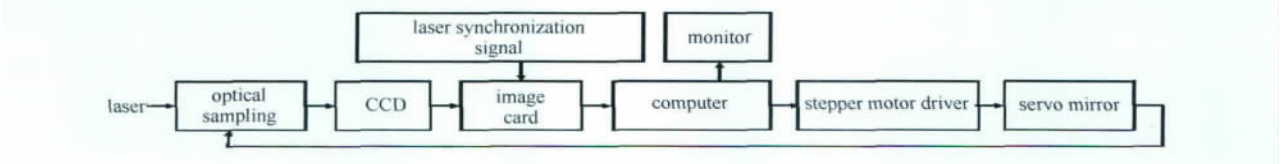


Fig. 1　Closed-loop feedback control flow graph of alignment system

图 1　准直系统闭环反馈控制流程图

*　收稿日期：2013-04-03；　修订日期：2013-05-09
基金项目：国家高技术发展计划项目；中日韩激光聚变高能量密度物理合作研究资助课题；国家自然科学基金青年基金项目(61205137)
作者简介：李　红(1986—)，女，助理研究员，主要从事高功率激光光束控制与准直方面的研究；hongli_0309@163.com。

光装置光路自动准直调整，保证激光脉冲准确无误地打在靶点上。因此，通过图像处理快速准确地获得光束的近、远场偏差是光路自动准直的关键技术。

2 光束图像目标处理算法

2.1 图像边缘检测

数学形态学是一种非线性数学理论，它从集合论的角度分析刻画图像性质和特征，在图像处理中获得广泛的应用。它的基本思想是用一定形态的结构元度量和提取图像中对应的形状以达到对图像分析和识别的目的。基于这种方法对图像进行图像边缘检测，既能体现图像几何特征、很好地检测图像边缘，又能满足实时性要求，并且可以在边缘检测的基础上，通过改变形态尺度克服噪声影响。但若算法中只采用单一的结构元，则会在滤除噪声的同时损失一些图像的细节特征。为此，本文采用一种新颖的变结构元多尺度广义形态算法对图像进行有效的边缘检测[6-7]。

定义 $f(r,c)$ 为二维离散空间 Z^2（表示整数集合）上的数字图像，结构元 $B(i,j)$ 为 Z^2 上的子集，则形态膨胀和腐蚀分别定义为

$$(f \oplus B)(r,c) = \max_{(i,j)\in B}\{f(r-i,c-j)+B(i,j)\} \tag{1}$$

$$(f \ominus B)(r,c) = \min_{(i,j)\in B}\{f(r+i,c+j)+B(i,j)\} \tag{2}$$

采用广义形态学边缘提取算法检测得到的边缘图像 $E_{ij}(r,c)$ 为

$$E_{ij}(r,c) = \{[f(r,c) \oplus B_i(r,c)] - [f(r,c) \ominus B_j(r,c)]\} \tag{3}$$

式中：$i=1,2,\cdots,N$ 和 $B_j(r,c)(j=1,2,\cdots,M)$ 为选定的变结构元。

利用变结构元在结构和方向上的对称和互补特性，取其边缘提取结果的累计平均值作为输出，可充分提取图像边缘各个方向上的细节特征，同时有效地平滑图像的噪声，由此可得变结构元广义形态学边缘提取的边缘图像 $E(r,c)$ 为

$$E(r,c) = \frac{1}{N}\left\{\sum_{k=1}^{m}[E_{k,k+m}(r,c)+E_{k+m,k}(r,c)]\right\} \tag{4}$$

式中：N 为选定的变结构元的个数，$m=N/2$ 为选定的变结构元中结构和方向上互补的元素组个数，对每一个确定的 k 和 m，$E_{k,k+m}(r,c)$ 和 $E_{k+m,k}(r,c)$ 为一组结构和方向上互补的变结构元，采用式(4)计算得到边缘图像。为了有效消除图像中比结构元小的噪声，同时避免大的结构元平滑图像边缘细节信息和由此带来的计算复杂性，本文取如图 2 所示的 3×3 邻域内三点线性变结构元进行广义形态学边缘提取。

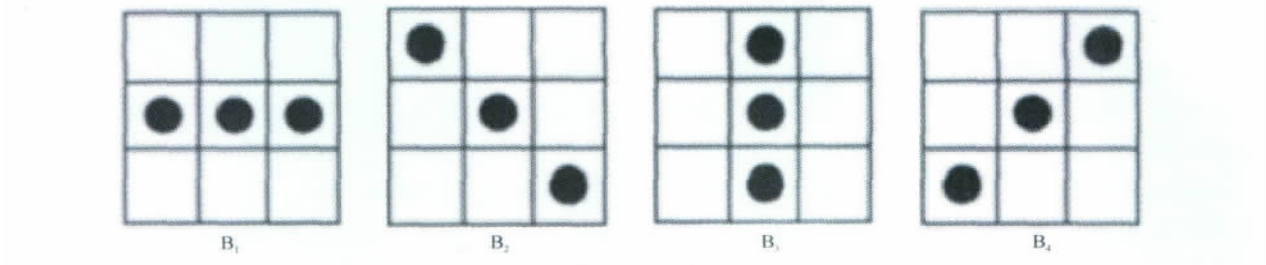


Fig. 2 Structuring elements

图 2 选取的结构元形式

由式(3)和式(4)可知，该算法采用简单求极值的方法代替了传统边缘提取复杂的模版内求和乘积运算，计算简单且易于并行处理、实时性强。不仅充分地提取了边缘细节信息，同时也有效地抑制了图像中的噪声。

2.2 多项式插值亚像素边缘定位算法

利用变结构元广义数学形态学算法可快速有效地提取 CCD 上目标的边缘图像。为了进一步提高 CCD 对目标的定位精度，本文采用拉格朗日多项式插值算法对图像边缘进行快速亚像素定位[8]。设 CCD 光敏元在 X 方向上的间距为 W，Y 方向上的间距为 H，则对边缘图像 $E(x,y)$ 上确定的边缘点 (X_i,Y_j)，在 X 方向上取三点 $E(X_i-1,Y_j)$，$E(X_i,Y_j)$，$E(X_i+1,Y_j)$，以这三点的灰度值作为函数值，X_i-1，X_i，X_i+1 为插值基点，代入二次多项式插值函数 $L_2(x)$，令 $\mathrm{d}L_2(x)/\mathrm{d}x=0$ 求出插值函数最大值的 X 方向的亚像素位置 X_s；同理在 Y 方向上取三点 $E(X_i,Y_j-1)$，$E(X_i,Y_j)$，$E(X_i,Y_j+1)$ 进行相同的操作，可求得 Y 方向的亚像素位置 Y_s。

则插值函数 $L_2(x)$ 为

$$L_2(x) = y_0 l_0 + y_1 l_1 + y_2 l_2 \tag{5}$$

其中插值基函数

$$l_0 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)},\quad l_1 = \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)},\quad l_2 = \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)},$$

式中：x_0，x_1，x_2 为插值基点；y_0，y_1，y_2 为相应插值函数值。

分别令 $\mathrm{d}L_2(x)/\mathrm{d}x = 0$ 和 $\mathrm{d}L_2(y)/\mathrm{d}y = 0$，即可得到边缘点 (X_i, Y_j) 的亚像素位置 (X_s, Y_s) 为

$$\begin{cases} X_s = X_i + \dfrac{E(X_i-1,Y_j) - E(X_i+1,Y_j)}{E(X_i-1,Y_j) - 2E(X_i,Y_j) + E(X_i+1,Y_j)} \times \dfrac{W}{2} \\ Y_s = Y_i + \dfrac{E(X_i,Y_j-1) - E(X_i,Y_j+1)}{E(X_i,Y_j-1) - 2E(X_i,Y_j) + E(X_i,Y_j+1)} \times \dfrac{H}{2} \end{cases} \tag{6}$$

通过式(6)可以将边缘定位精度提高至远小于一个像素以下，但实际上由于 CCD 上接收的图像会受到光学系统像差及衍射的影响，实际定位精度会低于算法的理论精度。

3　光束中心点的确定

神光Ⅱ升级装置自动准直过程中的每个环节均包括近场准直和远场准直两个部分。在准直过程中，分别依据光束近场中心和近场基准中心之间的偏差、光束远场中心同远场基准中心之间的偏差、主放光束远场中心点同基准点的偏差，反馈调节相应的二维反射镜步进电机使光束近、远场中心与相应的基准中心重合。为了实现这一过程，光路自动准直系统应该包括光源和光路基准的选取，图像信息处理及光束偏差信息获取，反馈控制程序和伺服执行机构等功能单元。

在图像处理环节中，首先通过本文的算法获取图像边缘轮廓信息，再通过最小二乘法获得几何图像的中心，然后通过几何构造获得图像几何形心，通过形心拟合获取其质心，以保证光斑质心的准确及准直控制过程的稳定性和收敛性。图 3 和图 4 的中心处圆和十字形分别是通过该算法所获得近场光斑、远场光斑和基准的形心。

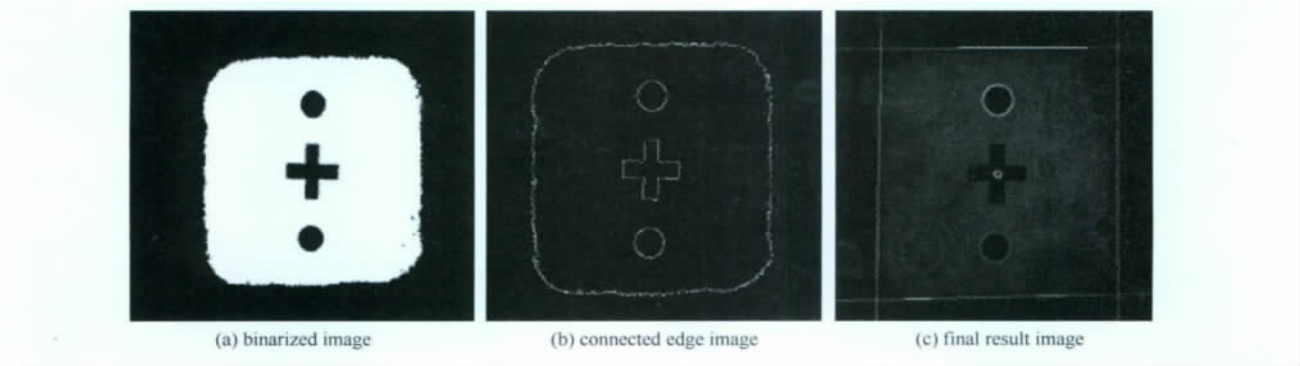


Fig. 3　Abstraction of laser beam's and reference's geometrical centers for near-field spot

图 3　近场光斑和基准形心提取

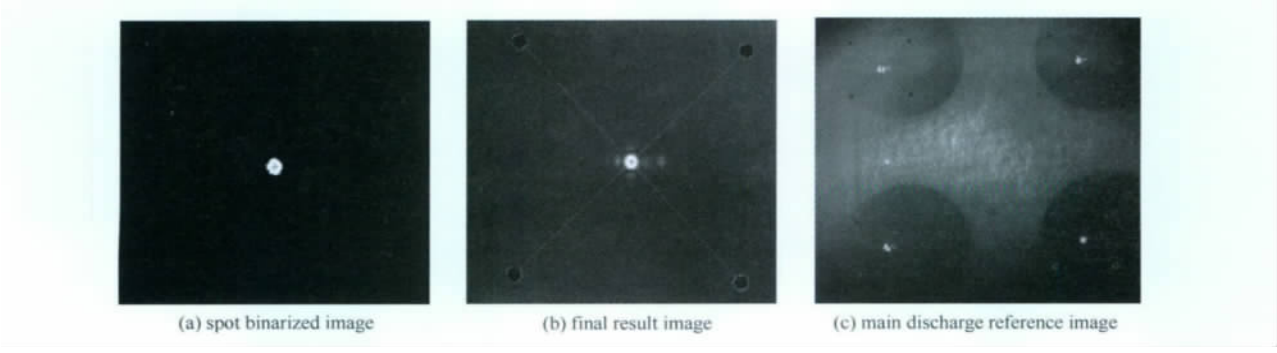


Fig. 4　Abstraction of laser spot's and reference's geometrical centers for far-field spot

图 4　远场光斑和基准形心提取

4 结果及数据分析

为了验证该算法的快速性和准确性，在神光Ⅱ升级装置光路准直系统上进行验证。此方法在系统中经过多次验证使得光斑的调整精度大大改观。图 5 给出了近场准直过程中平行光斑中心同基准中心之间偏差由(−13.87，22.14)准直至 1 个像素范围内的变化曲线图；图 6 给出了远场准直过程中焦点光斑中心同基准中心之间偏差由(63.06，123.68)准直至 1 个像素范围内的变化曲线图。

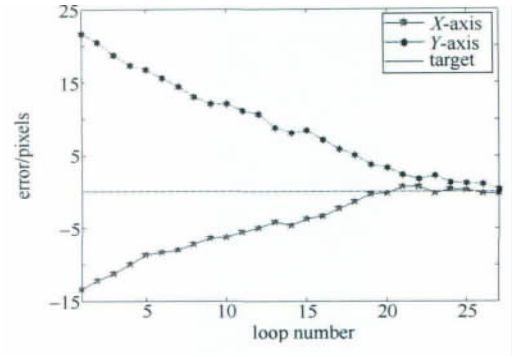


Fig. 5 Error curve of near-field alignment

图 5 近场准直误差曲线

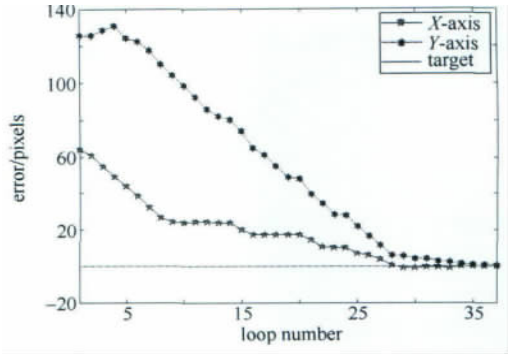


Fig. 6 Error curve of far-field alignment

图 6 远场准直误差曲线

由图 5～6 可以看出：采用本文所述控制方法，无论近场还是远场，均能较为快速和稳定地收敛至允许误差范围内，且波动较小。在图 6 所示曲线的初始段，Y 轴误差有所增加，这主要是由两步进电机运行所导致的图像特征在变化方向上存在一定的耦合所造成的。

5 结 论

光路自动准直控制算法在神光Ⅱ升级装置上得以成功实施，同原控制算法比较八路预放系统的光路准直时间缩短了 5 min，主放大级光路的准直时间缩短了 8 min，系统全部光路的准直时间在 10 min，主放输出光束近场准直准确度提高了 0.1%，远场指向的准确度提高了 0.1″(RMS)，分别为主放输出光束近场准直准确度优于 0.2%，远场指向准确度优于 0.2″(RMS)。该算法在保证光路稳定的同时能够正确的选择光斑基准点并根据远、近场图像偏差量实现两个电动反射镜方位、俯仰的同时调整缩短光路自动准直闭环调整的次数和时间。

参考文献：

[1] 朱健强. 中国的神光——神光Ⅱ高功率激光实验装置[J]. 自然杂志，2006，**28**(5)：271-273. (Zhu Jianqiang. S-G-Ⅱ：High power laser facility. *Chinese Journal of Nature*，2006，**28**(5)：271-273)

[2] 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**：**065204**. (Gao Yanqi，Zhu Baoqiang，Liu Daizhong，et al. Far field auto-alignment system used in SG-Ⅱ-Up system. *Acta Physica Sinica*，2011，**60**：**065204**)

[3] 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 Daizhong，Zhu Jianqiang，Xu Renfang，et al. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers. *High Power Laser and Particle Beams*，2004，**16**(5)：582-586)

[4] 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. (Lü Fengnian，Liu Daizhong，Xu Renfang，et al. Performance of image processing in beams automatic alignment system. *Optical Technology*，2005，**3**(3)：72-74)

[5] 陈庆浩，徐仁芳，彭增云，等. 用于激光核聚变的光路自动准直[J]. 光学学报，1995，**15**(5)：531-533. (Chen Qinghao，Xu Renfang，Peng Zhengyun，et al. Automatic beam alignment for laser-fusion facility. *Acta Optica Sinica*，1995，**15**(5)：531-533)

[6] 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. (Li Jie，Miao Changyun，Wu Zhigang，et al. Algorithm for edge detection of image based on mathematical morphology. *Computer Science*，2012，**39**(6A)：546-548)

[7] 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. (Feng Junping，Zhao Zhuanping，Xu Tao. Morphological edge detection technology in digital image processing. *Aeronautical Computer Technique*，2004，**34**(3)：53-56)

[8] 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. (Ao Lei，Tan Jiubin，Cui Jiwen，et al. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator. *Acta Optica Sinica*，2007，**27**(2)：253-258)

Fast and precise center location for target of high power laser driver beam automatic alignment

Li Hong[1], Wang Dongfang[2], Lin Qiang[1], Jiang Zhuochai[1], Gao Yanqi[3], Liu Daizhong[1], Zhu Baoqiang[1]

(1. *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201800, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130021, *China*;
3. *Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, Shanghai* 201800, *China*)

Abstract: To meet the requirements for high accuracy and real time performance of high power laser driver beam automatic alignment, a fast and precise center location method for target of high power laser driver beam automatic alignment is proposed. The specific characteristics of the target edge are fully extracted by using multiple structuring elements-based generalized morphological edge detection, while the influences of the noises on images are diminished. Then, the edge is quickly located in sub-pixel precision by adopting the Lagrange polynomial interpolation method, at last the center position of the spot target in image is accurately acquired by using circle fitting method based on least square fitting method and geometric centroid. This algorithm is verified in the Shenguang Ⅱ upgrade device, the alignment time of eight prelight roads is less than 3 min, and the alignment time of the main light path is less than 7 min. The main output of the near-field beam collimation accuracy is better than 0.2%, and the far field accuracy is better than 0.2″(RMS).

Key words: automatic alignment; image processing; multiple structuring elements-based mathematical morphology; Lagrange polynomial interpolation