

文章编号: 1002-1582(2005)03-0335-03

# 图像处理在光路自动准直系统中的应用\*

吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 曹金洲, 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

**摘要:** 光路自动准直系统应用于惯性约束聚变的高功率激光装置中的光束自动调整。图像处理是光路自动准直的关键技术之一。针对神光Ⅲ原型装置, 结合阈值化、重心法、中值滤波和圆拟合等多种不同的图像处理方法设计了一套合理的准直方案, 并且在模拟实验平台上进行了实验验证。实验结果表明, 光路自动准直系统能够在 15min 之内顺利完成光路的自动调整, 光束近场调整精度优于近场光斑的  $\pm 0.5\%$ , 光束远场调整精度  $\leq \pm 0.3''$ , 满足了原型装置的总体要求。

**关键词:** 激光技术; 激光光斑; 自动准直; 图像处理

中图分类号: TN242 文献标识码: A

## Performance of image processing in beams automatic alignment system

LU Feng nian, LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, CAO Jin-zhou, FAN Dian-yuan

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

**Abstract:** The laser beams automatic alignment system is used to adjust beam lines automatically in the high power laser facility for inertial confinement fusion. Image processing is one of the key techniques in laser beam automatic alignment. Considering the SG-III, combining different kinds of methods in image processing such as threshold, gravity model, median filter, circle fitting and so on, a reasonable scheme for automatic alignment was presented. It was demonstrated on the simulation experiment system. Results indicated that beam paths adjustment can be finished in 15 minutes by the automatic alignment system. The precision of the near field adjustment was less than 0.5% of the spot. The accuracy of the far field adjustment was less than 0.3". Requirements of the SG-III prototype facility are met.

**Key words:** laser techniques; laser spot; automatic alignment; image processing

## 1 引言

激光核聚变装置是规模最大的一类激光系统, 如美国诺瓦装置(NOVA)、国家点火装置(NIF), 日本 GEKKO-XII、中国神光 II 装置等, 其中均包含有大量激光器件、光学元件和组件, 光路总长度达到 100m 以上。为了确保系统在每次运行时, 从振荡器发出的激光束能够稳定、精确地穿过预放大器、主放大器、倍频器、靶室, 并精确地照射到微型靶丸上, 激光装置均配置了光路自动准直系统。自动准直系统已经成为大型激光装置中必不可少的重要组成部分。

## 2 光路自动准直<sup>[1]</sup>

对于一个已经预先调整好的激光系统, 其元器件的位置均已固定, 但由于温度变化、反射镜机械结构蠕变、地基和支撑框架微振动、振荡器输出光束反向漂移和其它随机因素的影响, 光束会偏离原定的

光路, 因此在激光装置重新发射前需要进行校正。光路自动准直的任务就是通过逐段检测光束位置和反向的误差, 反馈控制一对反射镜, 使光束恢复到原定光路上。这样逐段由前向后依次调整直至靶点。光路自动准直是个闭环系统, CCD 近远场摄像机探测光束位置, 经图像卡将 TV 模拟信号转换成数字信号输入计算机。计算机通过图像处理求出实时图像中心和标准中心的误差信号  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 此误差信号放大后推动伺服反射镜的步进马达, 使光束恢复到原来的位置。

## 3 激光光斑的图像处理

### 3.1 阈值法

阈值就像设置了一个门槛, 比它小的就是 0 (黑), 比它高的就是 255 (白)<sup>[2]</sup>。图 1 是对激光光斑处理后得到的结果。

可以看出, 对阈值大小的选择非常重要, 否则无法得到一个较清晰、规则的光斑来进行下一步的处

\* 收稿日期: 2004-06-03 E-mail: lvfengnian@sina.com

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题(2003AA845041)

作者简介: 吕凤年(1980), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所助理工程师, 从事图像处理、自动控制研究。

理。图中 1(c) 和 (d) 的阈值选取显然不当, 而(b) 则相对比较准确。

### 3.2 重心法<sup>[3]</sup>

如图 2, 假设光斑图像在平面坐标系中, 尺寸为  $A \times B$ ,  $g(i, j)$  为其中某点的灰度值。

重心法求光斑中心  $(x_0, y_0)$  的算法如下

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B jg(i, j)}{\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B g(i, j)} \\ y_0 &= \frac{\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B ig(i, j)}{\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^B g(i, j)} \end{aligned} \right\} (1)$$

很明显图 2 激光束的近场图像整体灰度值偏低, 且由于镜面灰尘等因素的影响, 导致图像中出现很多噪声区, 降低了检测精度, 所以需要通过阈值化尽可能地先将它们去除, 然后再按照公式(1) 求出光斑的中心。远场图像的灰度值较高, 噪声区不明显, 某些情况下可以省去阈值化的步骤。

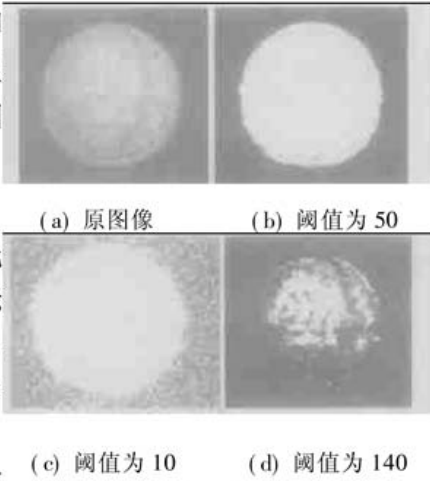


图 1 激光光斑的阈值化处理

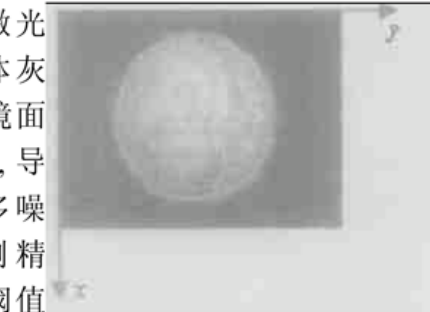


图 2 图像坐标系

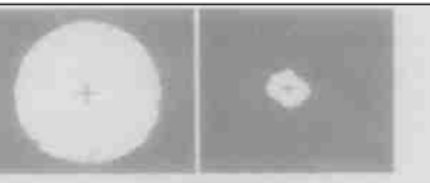


图 3 处理后得到的图像

图 3 为分别针对近、远场两种激光光斑的处理结果。

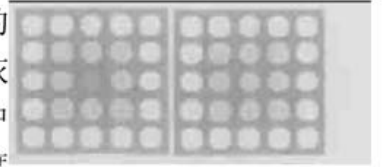
$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(\overline{x^2 x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2 y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ b &= \frac{(\overline{x^2 y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2 x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy})}{2(\overline{x^2} - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ r &= \sqrt{a^2 - 2\overline{xa} + b^2 - 2\overline{yb} + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{aligned} \right\} (4)$$

其中参数

$$\overline{x^m y^n} = \frac{\sum_{i \in E} x_i^m y_i^n}{\sum_{i \in E} 1} \quad (5)$$

### 3.3 滤波

在图 1(b) 中, 可以看到在光斑内存在着一些灰度值为 0 的点, 我们称作噪声, 它们的存在显然对检测精度有影响, 这里就需要用到滤波。简单的说, 滤波就是去除灰度突变的点, 为了在保护图像边缘的前提下去除噪声, 我们使用了中值滤波, 举个例子如图 4。



其中的圆点代表该位置处的灰度。容易看出, 原图中中间的点和周围点的灰度相差较大, 是一个噪声, 中值滤波将以某点  $(x, y)$  为中心的小窗口内的所有像素的灰度按从大到小的顺序排列, 将中间值作为  $(x, y)$  处的灰度值 (若窗口内有偶数个像素, 则取两个中间值的平均), 经过  $3 \times 3$  模板的中值滤波, 得到处理后的图, 噪声点就被去除了。

在对光斑图像阈值化之后, 我们采用了  $13 \times 13$  的模板进行中值滤波, 必须指出的是, 模板大小的选择需通过反复对比最终的结果来确定, 具体例子见图 5, 处理后图像边缘保持的比较完整。

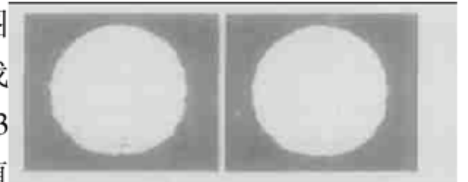


图 5 中值滤波实例

### 3.4 圆拟合

当光斑形状比较规则(圆形)且光强均匀时, 重心法还是适用的, 但如果光斑形状不规则或者需要检测其半径时, 重心法就无能为力了, 这时需要用到圆拟合。设圆方程为

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (2)$$

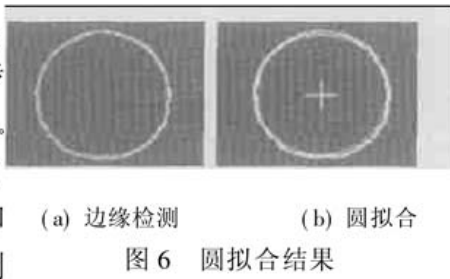
取残差绝对值

$$\varepsilon_i = |(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2| \quad (3)$$

其中  $i \in E$ ,  $E$  表示所有边界点的集合, 按照最小二乘法原理, 可以推导出圆参数为

先用边缘检测的方法提取出光斑边界点, 然后通过(4)式计算出光斑参数, 再代回(3)式计算出各点的残差绝对值, 并求出残差绝对值的平均, 将各点残差与平均值进行比较滤去残差较大的点, 再将边

界点代入(4)式,多次迭代进一步提高检测精度。图6是对图5(b)进行边缘提取和圆拟合之后得到的光斑中心和逼近的圆周图像。



(a) 边缘检测 (b) 圆拟合  
图6 圆拟合结果

#### 4 方案设计及实验结果

针对神光 III 原型装置按 1:2 设计了模拟实验平台,准直部分结构如图 7 所示。光路准直的难点在于:1)空间滤波器内空间狭小,不能在其中取样,腔镜后面也不允许取样;2)腔镜的方位是唯一的,若不准确则无论如何调整其它反射镜也不能实现全光路准直,该方案通过在 IM1、BM3、BM2 和 TM1 的后面分别安装了 CCD 摄像头,通过这两对近、远场监测点来实现 1、2 程和 3、4 程的准直。

为考核光路准直的重复性,每隔半小时做一次准直操作,图 8 显示了连续 10 次准直远场 CCDFF34 的结果(光束指向),三角形点是准直前有偏差的

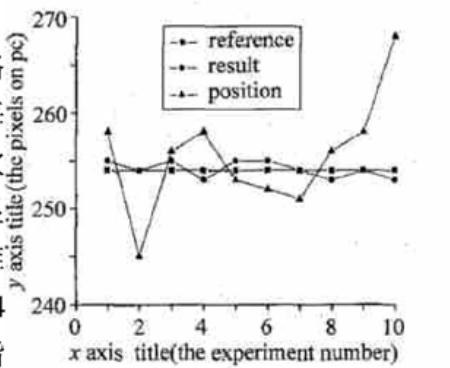


图8 光斑远场(指向)准直结果分布曲线

(上接第 334 页)

(4) 利用恒星辐射谱数学模型和 SAO 恒星数据库,对全天恒星背景分布进行了仿真分析,结果表明通过提高 CCD 采样频率、降低光学系统带宽,可以有效地减少恒星噪点,降低恒星背景对卫星光通信系统的影响。

(5) 提出以恒星背景抑制参数  $\psi$  来表征卫星光通信系统对恒星噪点的抑制能力,为评价系统抗噪性能提供了理论依据。

该项工作为进一步优化卫星光通信系统参数,提高其空间运行稳定性打下基础。影响卫星光通信系统的其它背景噪声分析及补偿方法研究将在后续文章中进行讨论。

参考文献:

远场点,矩形点是准直的参考基准,圆点是自动准直后修正的远场位置,均达到了预定的总体调整要求。

#### 5 结论

实验表明,系统能够在 15min 内顺利完成主放大级系统的光路调整,光束近场调整精度优于近场

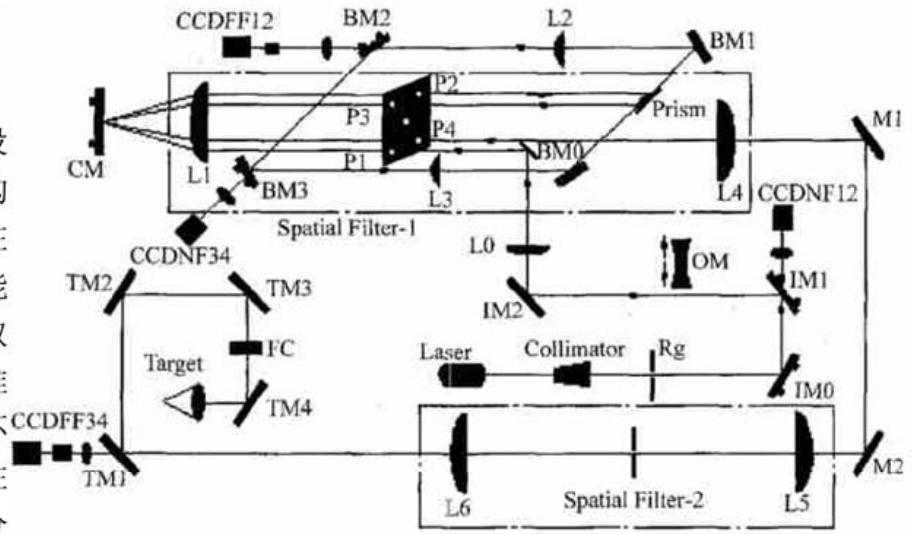


图7 四程放大模拟实验平台

光斑的  $\pm 0.5\%$ , 光束远场调整精度  $\leq \pm 0.3''$ 。

参考文献:

- [1] 刘代中,陈庆灏,徐仁芳,等. 光纤技术在光路自动准直中的应用[J]. 中国激光, 2004, 31(增刊): 409-411.
- [2] 吕凤军. 数字图像处理编程入门[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [3] 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.
- [4] Gonzalez C, Woods R E. Digital image processing, Second edition [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [5] 陈庆灏,徐仁芳,彭增云,等. 用于激光核聚变装置的光路自动准直[J]. 光学学报, 1995, 15(5): 531-533.

- [1] Nilsson O. Fundamental limits and possibilities for future telecommunications[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(5): 164-167.
- [2] Wittig M, et al. Performance of optical intersatellite links[J]. International Journal of Satellite Communications, SPIE, 1988, (6): 153-162.
- [3] Bouzoubaa M, et al. Model reference control of a laser beam steering system for laser communication applications [J]. SPIE Proc., 2001, 4272: 93-103.
- [4] Kim I I, Eric J K, Harel H, et al. Horizontal link performance of the STRV\_2 lasercom experiment ground terminals [J]. SPIE Proc., 1999, 3615: 11-22.
- [5] Chan V W S. Optical space communications[J]. IEEE J. Quantum Electron, 2002, 6(6): 959-975.
- [6] Arnon S, et al. Optimum transmitter optics aperture for free space satellite optical communication as a function of tracking system performance[J]. SPIE Proc. 1996, 2811: 252-263.