

靶瞄准中的图像处理

黄宏一 丘悦 范滇元

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 给出了激光聚变实验中对亮度分布不均匀、边缘轮廓模糊的黑腔靶图像确定几何中心的一种方法: 利用预处理消除图像噪音, 提取图像特征值并用原始 CCD 图像与特征值理论图像相关以精确确定出黑腔靶几何中心。该方法计算准确、速度快, 便于在实际装置中闭环连续处理图像, 并适用于确定激光光斑的几何中心和光斑半径。介绍了该方法在神光一装置靶瞄准中的应用及实验结果, 利用图像处理, 得到了 $5\ \mu\text{m}$ 的靶瞄准精度。

关键词 靶瞄准, 图像处理, 定中心

1 引言

神光一装置是目前我国最大的高功率固体激光装置, 其 8 路激光基频总能量可达 6 kJ, 激光脉宽为 1~ 3 ns, 主要用于惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, 以下简称 ICF)、X 光激光和状态方程等物理实验的研究。精确地引导激光能量会聚于靶丸是整个物理实验的核心部分之一。如图 1 所示, 要求多路高功率激光束穿过柱形黑腔靶两端面上的入射孔, 照射到柱靶的内侧壁上。任何一路激光束的瞄准偏差都会使部分光束照射到入射孔的边缘, 产生等离子体并向孔中心喷射而造成堵口效应^[1], 从而显著减小所有各路激光能量的注入率。实验测量表明, 只要有入射光总能量 0.01% 量级的光能量照射到孔边缘, 就会引起显著堵口。所以精确地确定入射孔的中心并使激光束瞄准中心是影响实验成败的关键。根据物理实验的要求, 黑腔靶入射孔直径不大于 $350\ \mu\text{m}$, 其中心的定位精度要达到 $10\ \mu\text{m}$ 以内。通过靶定位传感器中的光学系统^[2], 可将 ICF 黑腔靶上的入射孔放大成像到 CCD 探测器上, 由于黑腔靶的制作工艺的限制、靶照明的不均匀性等诸多因素使 CCD 上获得的图像轮廓模糊, 亮度分布不均匀。用一般方法很难准确地定出孔中心。本文提出了通过图像二值化、消除背景噪音以快速提取图像初始特征值并利用特征值进行图像相关计算精确确定孔中心的办法。

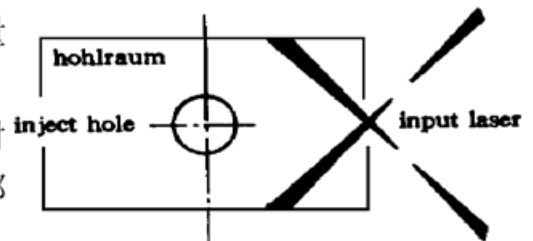


图 1 ICF 黑腔靶模型

Fig. 1 ICF hohlraum model

2 图像处理与算法

2.1 数学模型

设有理想黑腔靶图像的数学模型

$$f(r) = \begin{cases} 0, & r < R \\ 1, & r \geq R \end{cases} \quad (1)$$

其中 R 为黑腔靶的洞口半径。经像传递光学系统(靶定位传感系统)在 CCD 上有一轮廓模糊、亮度不均的图像,其径向不再是理想的二值函数,且图像不再轴对称,以 $f(r, \vartheta)$ 表示。由于 $f(r, \vartheta)$ 是从模型(1)中传递而得,必然包含其特征(洞口半径 R 及洞口中心),事实上只需对 $f(r, \vartheta)$ 做空间二维傅氏变换^[3],就能找到模型(1)的特征值。但对 CCD 图像做二维傅氏变换是费时和复杂的,不能适应装置物理实验快速的要求。因此直接在 $f(r, \vartheta)$ 上寻找模型(1)的初始特征值,通过 $f(r, \vartheta)$ 与模型(1)相关即 CCD 上的图像与含有初始特征值的理想黑腔靶的图像相关,来确定图像的入射孔中心。

2.2 预处理

图像的背景噪音是在像传递过程中随机产生的,它影响图像处理的速度和精度。由于是随机产生的,其特征属于频谱中的高频成分,可以用空间滤波器消除,在图像处理上对应于对图像做傅氏变换、滤波、傅氏反变换。但在实际算法中可以转化为

(1) 通过选取合适的阈值使图像二值化。即 $f(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) < f_v \\ 1, & f(x, y) \geq f_v \end{cases}$, 其中 f_v 为阈值,为便于计算将 $f(r, \vartheta)$ 进行坐标变换有 $f(x, y), 0 \leq x, y \leq 511$ 。 f_v 是原始图像的函数,与靶照明强度、靶表面散射系数、CCD 取样电压等参数有关。

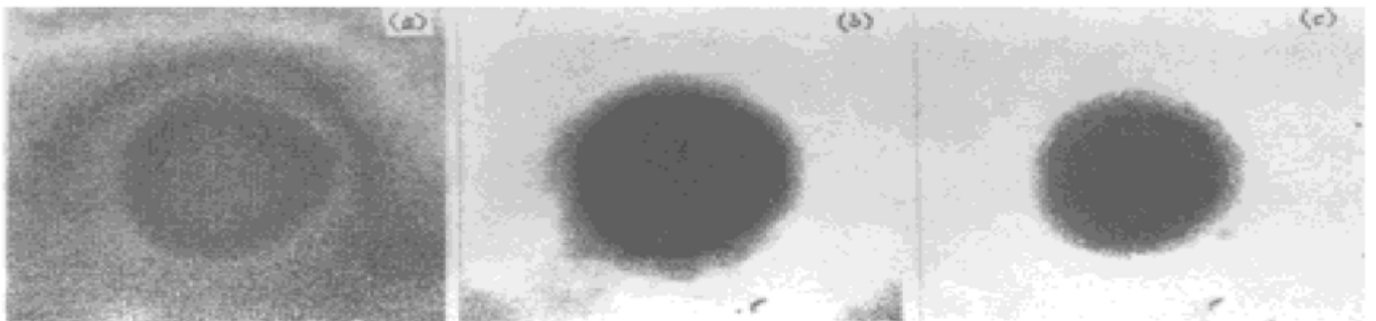


图 2 (a) 原始 CCD 采集的实验图像; (b) 二值化处理后的图像; (c) 消除随机背景噪音点后的图像

Fig. 2 (a) Experimental image; (b) Binary image;

(c) Binary image after elimination of the background random noise reduced

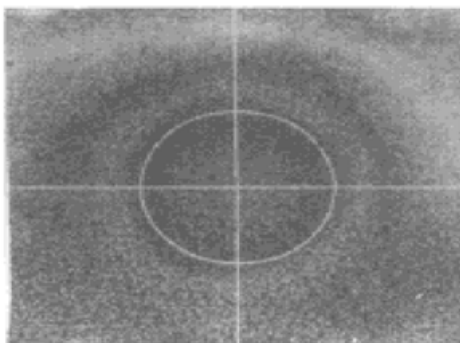


图 3 初步确定的图像特征值

Fig. 3 Initial eigenvalue

(2) 消除随机噪音点。我们将孤立的噪音点(斑)消除,对于图像中任意一点 $f(x, y) = 1$, 如果 $f(x - n, y - n)$ 到 $f(x + n, y + n)$ 均为 0, 即亮点 (x, y) 四周均为黑, 可以认为孤立噪音点予以消除置 $f(x, y) = 0$ 。与此相对应, 对于图像中任意一点 $f(x, y) = 0$, 如果 $f(x - n, y - n)$ 到 $f(x + n, y + n)$ 均为 1, 即黑点 (x, y) 四周均为亮, 也可以认为孤立噪音点予以消除置 $f(x, y) = 1$ 。如果 $n > 1$, 可以消除孤立噪音斑。如图 2(a) ~ (c) 所示。通过背景噪音的消除, 得到边缘轮廓更加清楚的图像。

在完成消除背景噪音后可以快速确定图像相关处理的初值, 即确定图像特征值的初值。通过寻找 $X, Y, +45^\circ, -45^\circ$ 的直径极值(连续 $f(x, y) = 0$ 的一维极值), 平均后可以确定图像的初始中心 (x_0, y_0) 和黑腔靶初始洞口半径 R_0 , 如图 3 所示。

2.3 相关处理

相关处理是利用预处理所得的图像特征初值作为理想黑腔靶图像模型与实际图像进行相关计算, 搜寻最符合图像特征的极值。即对特征初值进行图像匹配寻找^[4], 消除由于图像像素亮度不均匀而在二值化、消除背景噪音时所引入的误差。

我们有原始 CCD 采集的图像 $f(x, y), 0 \leq x, y \leq 511$ 和一个理想的黑腔靶洞口图像模型 $f_0(x, y) = \begin{cases} 0, & \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} < R_0 \\ 1, & \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \geq R_0 \end{cases}$ 进行图像相关处理, 并使 R_0 在合理的范围内变化, 即对入射孔的中心位置和洞口半径在小范围内进行二维搜寻。在 $(x_0 - \Delta, y_0 - \Delta)$ 到 $(x_0 + \Delta, y_0 + \Delta)$ 范围内, 寻找 $\Sigma f(x, y)$ 的极值。其中 Δ 为搜寻范围, 点 (x, y) 位于 $\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \leq R_0$ 中。其物理概念为寻找在特征初值附近黑腔靶洞口范围内的像素亮度之和的极值, 以避免在整个图像数据中寻找, 加快计算速度。

3 实验装置和结果

如图 4 所示, 利用精度达 $1 \mu\text{m}$ 的千分表测试靶定位传感系统的综合实验精度, 靶定位传感系统将黑腔靶洞口成像到 512×512 像素的 CCD 上(如图 5 (a) 所示), 通过图像处理定出黑腔靶入射孔中心(如图 5 (b) 所示的白色十字), 移动靶架, 从千分表上读出靶架的移动量与靶定位传感器系统测试量进行比较, 经多次实验测试靶定位综合系统精度平均达 $5 \mu\text{m}$ 。人为改变靶照明条件, 使黑腔靶洞口亮度不均, 利用上述图像处理方法, 得到几乎完全相同的黑腔靶洞口中心。说明对亮度不均、边缘轮廓模糊的图像进行相关处理的精度达到实验要求。

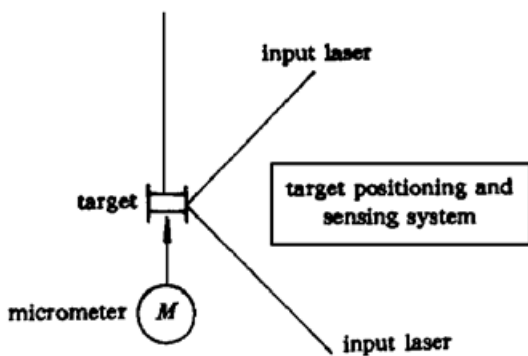


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Scheme of experiment

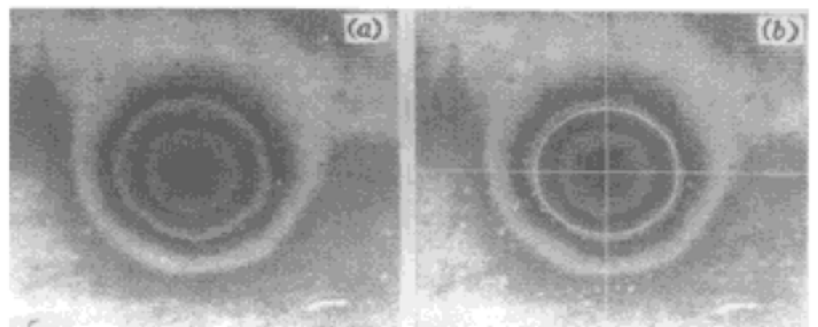


图 5 (a) 原始 CCD 图像(神光-装置实验数据);
(b) 图像处理后的中心十字线和洞口边缘

Fig. 5 (a) Experimental image (Shenguang- data);
(b) The cross and hole edge after image processed

4 结 论

由于黑腔靶本身所具有的特征值——中心、黑腔半径在图像传递过程中逐渐丢失特征信息, 不断增加背景噪音, 致使 CCD 上的图像轮廓模糊、明暗不匀。通过图像预处理(分离背景噪音)、对特征信息的提取, 有效地确定了黑腔靶入射孔的中心。这种方法亦可用于光强分布不均

匀的激光光斑的几何中心的确定,只需将图像反转一次。

本方法的精度取决于 CCD 的像素分辨率和图像处理的精度:像素分辨率为图像放大倍数及 CCD 像素单元的大小,图像放大倍数越大,CCD 像素单元越小,像素分辨率就越高;图像处理精度指图像在数字化后,由计算方法处理定中心所能达到的精度。

参 考 文 献

- 1 C. E. Max, J. D. Lindl, W. C. Mead. Effect of symmetry requirements on the wavelength scaling of directly driven laser fusion implosions. *Nuclear Fusion*, 1983, **23**(2): 131~ 145
- 2 H. Y. Huang, Y. Qiu, D. Y. Fan. Beam-targeting system for ShenGuang \square . *Proc. SPIE*, 1995**2633**: 596
- 3 E. O. Braim. Fast FFT. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1974. 3
- 4 J. W. Goodment. Furrier Optics Treatise. Beijing: Science Press, 1979. 161

Image Processing in Target Pointing

Huang Hongyi Qiu Yue Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper introduces a kind of image processing method for laser fusion experiment. Since the image of the hohlraum hole is dim and its brilliance distribution is non-uniform a technique to determine the geometric center of the image is thus necessary. Application of the technique to the target pointing in the Shen-guang \square project is also included.

Key words target pointing, image processing, image center

中国光学学会全息与光信息处理专委会 1998 年学术研讨会在成都召开

由成都电子科技大学应用物理系承办的中国光学学会全息与光信息处理专业委员会 1998 年学术研讨会于 1998 年 5 月 27 日至 6 月 1 日在四川省成都市电子科技大学召开,这是继 1985 年专委会成立以来召开的第十四次学术研讨会。

本次研讨会内容包括:光信息处理、全息及其应用、二元光学、光计算及神经网络、新记录材料等。来自全国大专院校、研究所及公司的 50 余名代表出席了会议。会议经评审,筛选出 40 篇论文已全文刊登在“电子科技大学学报”1998 年 27 卷 7 期增刊上。其中的 5 篇特邀报告和 5 篇论文进行了大会交流,5 篇特邀报告是母国光院士(姜晶代作)的“编码黑白图像的数字彩色再现技术”;专委会主任徐大雄教授的“防伪技术学介绍”;专委会副主任贺安之教授的“以干涉图再现数字波面”;宋菲君研究员的“液晶空间光调制器及液晶大屏幕投影电视”;刘守教授的“彩色编码二维彩虹全息术的单光束法”。尔后分两个分会场进行报告和交流。

与会期间,中国光学学会全息与光信息处理专业委员会还召开了工作会议。

(佟 林)