

激光聚变实验中诊断设备反馈控制瞄准技术

李颖洁, 陈 铭, 陈 黎, 张 兴[†], 杨 品, 杨正华

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在激光惯性约束聚变实验中, 诊断设备安装在巨大靶室中心微小靶点的周围, 因而发展诊断设备的高精度自动瞄准技术非常关键. 本文提出了一种自动瞄准技术, 包括靶图像自动识别和诊断搭载平台的反馈控制, 并且离线校准了靶位置偏差和图像位置偏差间的关系. 在离线情况下通过微米级平移台控制靶点运动, 模拟靶点与诊断设备的相对运动. 在本文的自动瞄准技术中, 首先, 通过图像识别靶心得到像素偏差; 其次, 根据离线校准结果计算出真实靶点的空间位置偏差; 第三, 根据运动控制算法实现诊断搭载平台的反馈控制. 在多次迭代后, 诊断设备可以准确指向靶室中心. 通过本文的反馈控制技术, 6次迭代可以实现优于 $50\ \mu\text{m}$ 的瞄准精度. 对于有很大容许偏差的诊断设备, 两次反馈控制可以满足瞄准需求. 诊断设备的瞄准效率得到了很大改善.

关键词: 诊断设备; 自动瞄准; 图像识别; 函数拟合; 反馈控制

引用格式: 李颖洁, 陈铭, 陈黎, 等. 激光聚变实验中诊断设备反馈控制瞄准技术. 控制理论与应用, 2020, 37(10): 2147 – 2154

DOI: 10.7641/CTA.2020.91038

A feedback control aiming technique of the diagnostic equipments in the inertial confinement fusion experiments

LI Ying-jie, CHEN Ming, CHEN Li, ZHANG Xing[†], YANG Pin, YANG Zheng-hua

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: In the laser driven inertial confinement fusion experiments, there are always many diagnostic equipments assembled in multiple view angles, around the tiny target in the center of the giant target chamber. It is very important to develop an automatic target pointing technique in a high precision for the diagnostic instruments. An automatic aiming technique is proposed in this work, which includes the automatic image recognition, the target and the feedback control of the diagnostic instrument manipulator. The off-line calibration of the relation between the target position shift and the image mark shift was also implemented, in which the target movement is controlled off-line by the micro level translation platform to simulate the relative movement of the target and the diagnostic equipment. In the automatic aiming technique in this work, firstly the center of the target is determined so as to find the pixel deviations. Secondly the spatial deviation of the target from the original position is automatically calculated according to the function fitting. And thirdly the feedback control of the diagnostic instrument manipulator is executed according to the movement control algorithm. After several iterations, the diagnostic instrument is able to pointing the target center in a high precision. By the feedback control technique in this work, it is found that 6 iterations can provide a pointing precision of less than $50\ \mu\text{m}$. For the instruments with a relatively large tolerance, twice feedback control can meet the aiming requirements. The aiming efficiency of the diagnostic instruments is improved much.

Key words: diagnostic equipment; automatic aiming; image recognition; function fitting; feedback control

Citation: LI Yingjie, CHEN Ming, CHEN Li, et al. A feedback control aiming technique of the diagnostic equipments in the inertial confinement fusion experiments. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(10): 2147 – 2154

1 引言

惯性约束聚变实验需要使用多门类诊断系统对若干关键物理量进行高时空分辨的诊断测量, 时间尺度

覆盖ps到ns, 空间分辨处于 μm 到百 μm 尺度, 包括多种测量可见光、X射线、离子、电子、中子等的强度、能谱、时间谱和空间分布等特征物理量的诊断设备^[1].

收稿日期: 2019-12-31; 录用日期: 2020-08-03.

[†]通信作者. E-mail: zhangxingjerry@sina.cn; Tel.: +86 13881195637.

本文责任编辑: 胡德文.

国家自然科学基金项目(11705178)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11705178).

我国已建立了系列激光装置,通过多种诊断系统开展物理实验参数测量.在我国最大的激光装置上,诊断设备要从距离靶点3~6 m的靶室外伸入靶室,运动到距离靶点200 mm左右的位置,靶尺寸通常在百 μm 量级.用于热斑测量时,对象尺寸仅50 μm .因而提高诊断设备的瞄准精度和瞄准效率对激光聚变实验有着非常重要的作用^[2].

美国大型激光装置(national ignition facility, NIF)根据不同瞄准需求采用了不同的瞄准方法:对置端口对准系统^[3-6](opposed port alignment system, OPAS)可实现靶点附近的高清晰度成像,瞄准精度约为20 $\mu\text{m}/\text{pix}$,但瞄准效率低,即使最熟练的操作人员也需要一个小时以上^[4];腔室内部监视系统(chamber interior viewing system, CIVS)粗瞄可达到1.28~3.34 mm/pix ,精瞄可达到0.30~0.42 mm/pix 的瞄准精度^[4];采用激光跟踪系统(advanced tracking laser alignment system, ATLAS)可提高瞄靶的灵活性和效率,精度在500 μm 以内^[5].法国兆焦耳装置(laser megajoule, LMJ)采用双光束交汇系统进行瞄准,可达到25~250 μm 的精度^[7].

我国系列激光装置诊断设备的瞄准采用双目瞄准技术,不需要占用其他法兰位置,具有较高的灵活性和瞄准精度.由于诊断设备自身并不具备瞄准功能,需要搭载在通用诊断搭载平台(diagnostic instrument manipulator, DIM)上进行瞄准^[2].瞄准过程可分为3步:离线记录、在线瞄准、控制诊断设备运行到位^[2,8];其中,在线瞄准过程需要人工操作来实现,通过人眼不断观察图像上当前靶点和理想靶点的偏差,人工调节控制电动缸伸缩,使诊断设备逐步运行到指定位置.由于通过人工识别靶心并控制诊断设备运行的过程耗时较长、随机性较大,不利于诊断系统工程化建设,因而自动瞄准技术的研究对诊断系统工程的建设有着非常重要的意义.

本文提出一种基于图像识别的诊断设备反馈控制瞄准技术,可以实现在自动控制模式下,指向优于23 μm ,径向优于50 μm 的瞄准精度.采用图像识别技术,可通过计算机自动识别出图像中靶心的位置,相较于人眼识别提高了识别精度和识别效率.根据识别出的靶心位置确定出像素偏差,再通过拟合函数计算出靶点空间位置偏差.根据得到的空间位置偏差控制DIM的俯仰、偏航以及径向伸缩运动,相较于当前瞄准方法大大降低了迭代次数,提高了瞄靶效率.

2 当前诊断设备瞄准方法简介

我国激光惯性约束聚变实验使用DIM将诊断设备送入靶室,如图1所示.通过双目瞄准系统和DIM的运动控制系统共同实现诊断设备的高精度瞄准.

双目瞄准系统包括瞄准监视系统和瞄准调节系

统^[9].瞄准监视系统主要包括四台电荷耦合元件(charge coupled device, CCD),其作用是采用双目交汇原理在搭载平台上确定出离线记录的位置;瞄准调节系统主要包括瞄准节上的调节机构,其作用是在离线时为记录靶点对成像镜头的位置进行调节与固定.双目瞄准系统结构如图1所示.

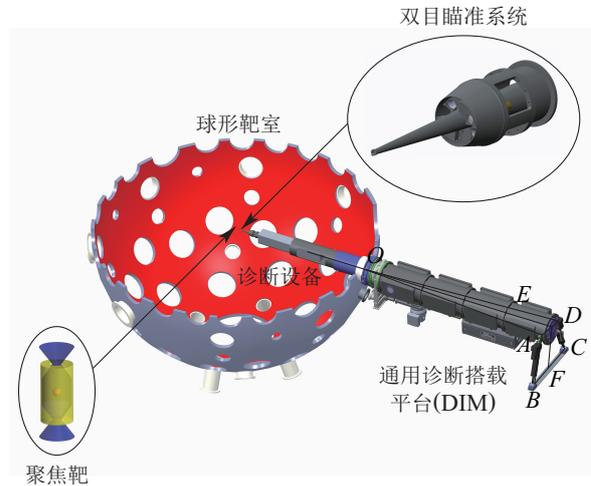


图1 诊断设备在线瞄靶示意图

Fig. 1 Schematic diagram of diagnostic equipment aiming at the target online

DIM的运动控制系统包括径向运动控制系统和指向运动控制系统.径向运动通过两个伺服电机分别驱动内筒和小车的运动实现;指向运动通过DIM尾部支撑腿上的两个伺服电机控制伸缩杆伸缩,使舱体绕图中O点进行俯仰和偏航转动实现,如图1所示.

当前瞄准过程实现步骤:首先,进行离线记录,调节镜头位置,使靶点能够清晰地呈现在粗瞄镜头和精瞄镜头视场中央,固定镜头位置,记录下理想靶点在4个CCD上的位置坐标,并在记录的坐标位置采用交叉丝进行标记;其次,将瞄准节固定在诊断设备前端,搭载在DIM上,根据预估值使诊断设备伸入靶室内合适位置,通过粗瞄镜头瞄准,根据当前图像与标记的交叉丝间的偏差人工控制DIM运动,使靶点进入精瞄视场;最后,通过精瞄镜头得到当前靶点在CCD上记录的图像,根据当前图像与标记的交叉丝间的偏差,通过人工控制DIM运动使图像上的靶点与记录的交叉丝位置重合即完成瞄准.

3 基于图像识别的反馈控制瞄准技术

当前瞄准方法需要通过人工判断出靶点与标记位置的偏差,并分析出DIM的运动方向,通过微量控制DIM运动直至图像中靶点与交叉丝重合从而实现瞄准.本文采用靶图像自动识别技术、诊断设备的离线标定以及DIM精确瞄准的反馈控制来实现诊断设备的自动瞄准.由于拟合过程和运动控制过程与实际存在偏差,通过多次迭代反馈控制,最终达到图像中靶心位置与标记的交叉丝位置重合,从而完成自动

瞄准.

3.1 靶图像自动识别

靶图像自动识别应保证在整个瞄准过程中都能准确获得靶心位置. 图像识别确定靶心的过程可分为两步: 1) 图像轮廓提取; 2) 采用霍夫变换法根据提取的轮廓计算靶心像素坐标^[10-12]. 采用传统的边缘检测算子可检测目标轮廓, 常用的边缘检测算子包括: Robert算子、Prewitt算子、Laplacian和Gaussian算子、Canny算子、Sobel算子. Robert算子提取的边缘较粗, 且未经过图像平滑计算, 不能抑制噪声; Prewitt算子计算量大; Laplacian和Gaussian算子提取的边缘准确但噪声太多; Canny算子得到的边缘完整但效率不高; Sobel算子方法简单、速度快并能抑制噪声^[13-14].

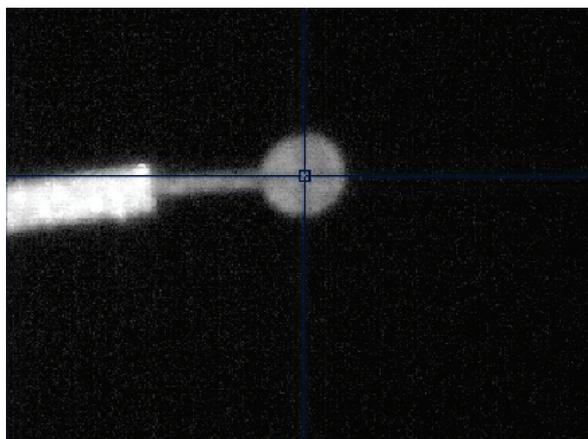
Sobel算子包含两组 3×3 的矩阵, 分别为横向算子及纵向算子, 将之与图像作平面卷积, 即可分别得出横向及纵向的亮度差分近似值. 如果以 A 代表原始图像, G_x 及 G_y 分别代表经横向及纵向边缘检测的图像灰度值, 其公式如下:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} A, \quad (1)$$

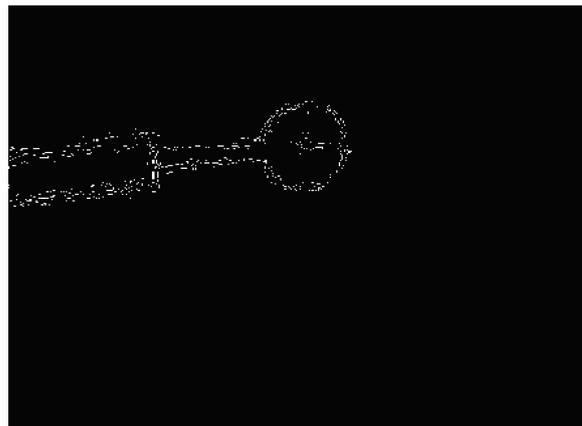
$$G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} A, \quad (2)$$

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}. \quad (3)$$

如果梯度 G 大于某一阈值, 则认为该点为边缘点. Sobel算子根据像素点上下、左右邻点灰度加权差在边缘处达到极值这一现象检测边缘. Sobel算子对噪声具有平滑作用, 能够提供较为精确的边缘方向信息. 图2(a)为靶室中采集得到的球靶图像. 对于图中噪声分布均匀的情况, 采用均值滤波法对图像进行滤波处理, 对滤波后的图像采用Sobel边缘检测法进行边缘提取, 可得到图像的边缘轮廓如图2(b)所示.



(a) 球靶图像



(b) 边缘轮廓

图 2 两台精瞄CCD靶室内测得靶的图像及轮廓提取效果
Fig. 2 Image and contour extraction of the target measured by two precision aiming CCD indoor

当前的许多圆检测方法都是在霍夫变换的基础上发展起来的. 使用霍夫变换检测圆, 首先将圆通过圆心坐标 (a, b) 和半径 r 参数化, 其表达形式为

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2. \quad (4)$$

对于任一给定轮廓点 (x_i, y_i) 满足上式的 (a, b, r) 在空间内为一个锥面, 如图3所示. 在每一个空间点处建立一个参数作为累加器, 若图像中大部分轮廓点所对应的锥面交于一点, 该点 (a_i, b_i, r_i) 对应的累加器的值即为这些轮廓点的个数; 其次, 根据圆心必须位于最大灰度梯度方向的限制条件, 可以只计算部分锥面对各累加器的贡献; 最终确定出累加器的峰值. 通过前面的步骤通常很难得到一个单一的峰值, 因而需要对数值较大的累加器再次进行处理. 对每一个边缘点, 假设其只对与其相关的累加器中数值最大的累加器有贡献, 因而边缘点和累加器存在一一对应的关系, 从而简化了累加器结构, 可以很容易找到数值最大的累加器, 得到相应的 (a, b, r) , 即为要找的圆参数.

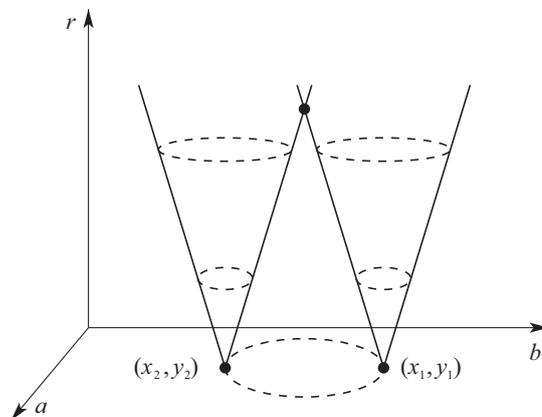


图 3 轮廓点对 (a, b, r) 参数空间的贡献

Fig. 3 Contribution of contour points to the (a, b, r) parameter space

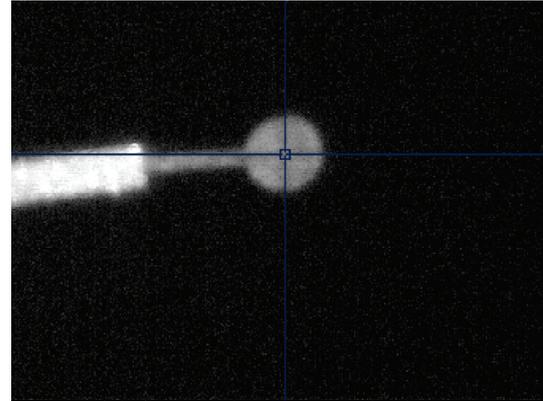
目前, 解决不同光照下图像识别的方法主要有以

下几类: 对于光照变化不大的情况, 可使用Appearance-based, Class-based, Model-based 等方法对识别出的图像进行处理, 使其尽可能与标准光照下的模板保持一致; 训练图像与测试图像有相同或者相似光照时, 通过在不同光源照射下的图像作为基图像构造光照空间, 再通过线性合成生成与待识别图像接近的模板, 完成图像识别; 测试图像与训练图像光照条件相差较大时, 利用径向基函数网络产生虚拟光照下的图像, 将虚拟光照下的样本加入训练集改善识别效果^[15].

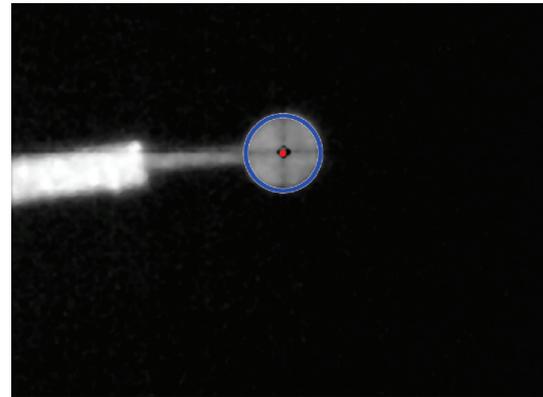
激光聚变实验装置是一个较大的真空球形靶室, 半径达到3~5 m及以上; 并且由于要保证激光光束的精确注入, 需要靶室内保持暗光环境. 激光聚变实验的靶通常是约1 mm大小的异形金属物体. 本文提到的诊断系统需要在10 cm到1 m的距离上实现对毫米及以下尺度的靶物体进行精确瞄准, 有的诊断系统需要实现50 μm 的瞄准精度; 并且诊断系统需要每一发次激光打靶前重新对每一发靶进行瞄准. 由于靶室直径过大, 目标靶尺寸非常小, 在靶室外的照明光源很难对靶进行准确的定向照明; 并且目标靶是金属材质, 表面为镜面反射光, 不同角度的照明会导致目标靶不同区域反射强度差异, 难以采用靶室外固定光源进行理想照明. 本项目通过在诊断系统的瞄准节上增加发光二极管(light emitting diode, LED)照明光源, 由于诊断系统前端立体角的限制, LED为固定式安装, 没有足够的空间去安装定向聚焦镜头等设施, 只能实现发散式照明; 并且瞄准节LED距离目标靶的距离也在30 cm以上, 对靶上的微米级特征点等难以定点照明. 在当前照明条件下, 采用Sobel边缘检测, Hough变换的方法可以得到靶心. 在图像识别过程中需要输入3个参数, 包括靶球半径、边缘阈值以及灵敏度. 离线测试时, 对不同光照情况确定出不同的阈值及灵敏度; 在线时, 通过调整阈值和灵敏度可实现不同光照下的靶心识别结果. 根据真实靶球的大小可估算出其在图像中的半径大小, 输入半径参数范围: 15~50; 采用多幅图像进行测试, 得到边缘阈值: 0.01, 灵敏度: 0.9, 则可识别出大部分球靶的中心. 图4(a)为光照充足, 质量较好的图像. 图4(b)为质量较好图像的识别结果. 图4(c)为靶室内光照不足, 得到质量较差的图像. 图4(d)为质量较差图像的识别结果. 由此, 可自动获取靶心在图像坐标系中的坐标.

3.2 诊断设备的离线标定

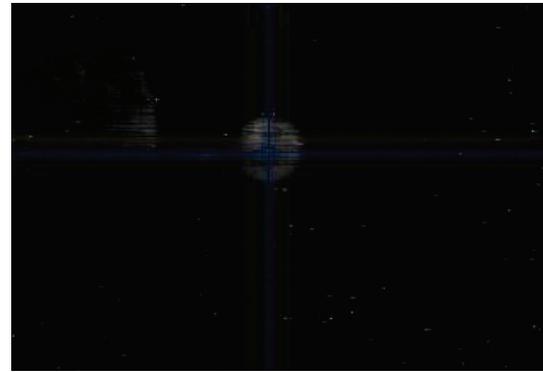
以两幅图像中十字叉丝位置为坐标原点, 根据图像识别技术, 可获得当前靶点在两幅图像上的像素坐标. 要获取当前靶点在世界坐标系中的坐标(以理想靶点为坐标原点)与靶点在两幅图像上的像素坐标间的关系, 便要对双目相机进行标定, 标定结果直接影响双目视觉测量系统的精度^[16].



(a) 质量较好的图像



(b) 质量较好图像的识别结果



(c) 质量较差的图像



(d) 质量较差图像的识别结果

图4 采集的靶球图像及识别结果

Fig. 4 The image and recognition result of the target ball

现有的标定方法包括直接线性变换、基于自标定的线性法、非线性优化法、张正友法^[17]等。线性变换法效率高, 但精度不够; 非线性优化法精度高, 但并不稳定。张正友标定法是一种介于两者之间的较为灵活的方法; 该方法将空间物体上的点与像素坐标平面上的点进行坐标转换, 则要建立像素坐标系、图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系。通过建立像素坐标系和图像坐标系、图像坐标系和摄像机坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系之间的关系, 则可由图像中的像素坐标还原到空间中的位置坐标^[18]。本文采用函数拟合的方法, 建立了靶点在两幅图像中的像素坐标和靶点在世界坐标系中的坐标间的转换关系。

根据实验条件考虑一种双目相机标定方法, 建立靶点在两幅图像中的像素坐标 (u_1, v_1) , (u_2, v_2) 和靶点在世界坐标系中的坐标 $P(P_x, P_y, P_z)$ 间的转换关系。平面像素坐标系中, 以理想靶点位置为坐标原点, 即十字叉丝位置为原点。为方便计算DIM的控制量, 世界坐标系以理想靶点位置为原点, 沿DIM径向运动方向为 Z 轴, X 轴位于水平方向。

离线情况下, 通过三维平移台模拟靶点在世界坐标系下的运动。分别使靶点沿 X 轴、 Y 轴和 Z 轴运动, 得到两像素坐标系中相应靶点的坐标, 从而确定出式(5)中的 A 矩阵:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由于 A 为 4×3 的矩阵, 无法直接对 A 求逆计算靶点在世界坐标系中的坐标。对 A 求广义逆^[19]得到 B 矩阵

$$B = A^+, \quad (6)$$

则有

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

可求得式中的 B 矩阵。至此, 根据靶点在图像中的像素坐标, 可得到靶点在世界坐标系中的坐标 $P(P_x, P_y, P_z)$ 。

3.3 DIM精确瞄准的反馈控制

根据图像中识别出的靶心位置计算出靶点在世界坐标系下的坐标后, 需要通过控制DIM的运动来实现诊断设备的在线瞄准。DIM径向运动和 Z 方向的调节可通过小车电机实现; X, Y 方向的调节通过指向电机实现。根据当前靶点在世界坐标系中的坐标 $P_0(P_x, P_y, P_z)$ 及DIM伸入靶室内的长度 l_{OP_0} , 可计算出DIM的俯仰角 θ 和偏航角 φ , 以及 Z 方向的运动控制量 Δl_z

$= P_z$ 。 Z 方向的调节量可通过小车电机直接控制小车的径向运动实现。另外, 还需要建立两指向电机电动机缸伸缩量 $\Delta l_1, \Delta l_2$ 与DIM俯仰角 θ , 偏航角 φ 之间的关系, 从而得到两指向电机的控制量。建立如图5所示的运动简化模型。

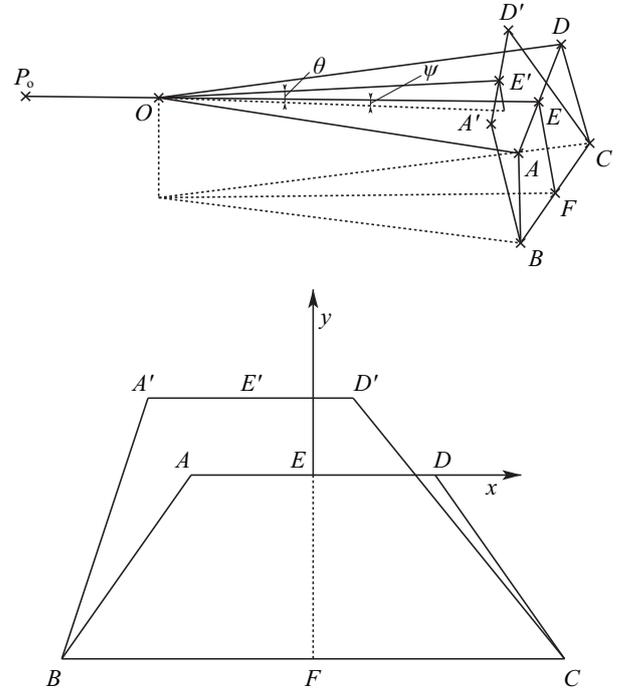


图 5 DIM运动模型简化示意图

Fig. 5 Simplified schematic diagram of DIM motion model

图5中, AB 和 CD 表示DIM尾部的支撑腿, 通过指向电机可调节 AB 和 CD 的长度, 从而控制俯仰角 θ 和偏航角 φ 。初始位置时, $l_{AB}, l_{BC}, l_{CD}, l_{DA}, h_{EF}, l_{OE}$ 均为已知量; E, F 分别为 AD, BC 中点。根据上一节中计算出当前靶点偏移理想靶点的坐标 $P_0(P_x, P_y, P_z)$, 可计算出俯仰角 θ , 偏航角 φ 。 $\theta = \frac{P_y}{l_{OP_0}}, \varphi = \frac{P_x}{l_{OP_0}}$ 。 l_{OP_0} 为转动支点到理想靶点距离, 如图5所示。通过电机控制DIM尾部 AD 运动到 $A'D'$ 位置。由于DIM自身结构特点, 调节时不能发生扭转, 即 $A'D'$ 始终平行于 AD , 则有

$$x_{E'} = \tan \varphi \cdot l_{OE}, y_{E'} = \tan \theta \cdot l_{OE}, \quad (8)$$

$$x_{A'} = x_{E'} - \frac{1}{2}l_{DA}, y_{A'} = y_{E'}, \quad (9)$$

$$x_{D'} = x_{E'} + \frac{1}{2}l_{DA}, y_{D'} = y_{E'}, \quad (10)$$

$$x_B = -\frac{1}{2}l_{BC}, y_B = -h_{EF}, \quad (11)$$

$$x_C = \frac{1}{2}l_{BC}, y_C = -h_{EF}, \quad (12)$$

$$\Delta l_1 = \sqrt{(x_{A'} - x_B)^2 + (y_{A'} - y_B)^2} - l_{AB}, \quad (13)$$

$$\Delta l_2 = \sqrt{(x_C - x_{D'})^2 + (y_C - y_{D'})^2} - l_{CD}. \quad (14)$$

由俯仰角 θ 、偏航角 φ 可计算出 $\Delta l_1, \Delta l_2$. 根据 $\Delta l_1, \Delta l_2$ 控制指向电机的调节量. 根据 Δl_z 控制小车电机的调节量. 控制DIM运行到位后, 由于拟合过程和控制过程存在一定偏差, 使得靶点中心坐标和交叉丝位置不能完全重合. 通过再次图像识别、坐标计算、反馈控制进行迭代, 直至靶点中心坐标和交叉丝位置间的距离满足要求即完成瞄准.

3.4 反馈控制瞄准技术方法流程

诊断设备瞄准过程主要分为两部分: 离线记录靶点位置、在线还原靶点位置. 为实现自动瞄准, 离线时还需要进行标定从而建立起图像像素偏差和空间位置偏差的关系. 在线还原靶点位置的过程如图6所示.

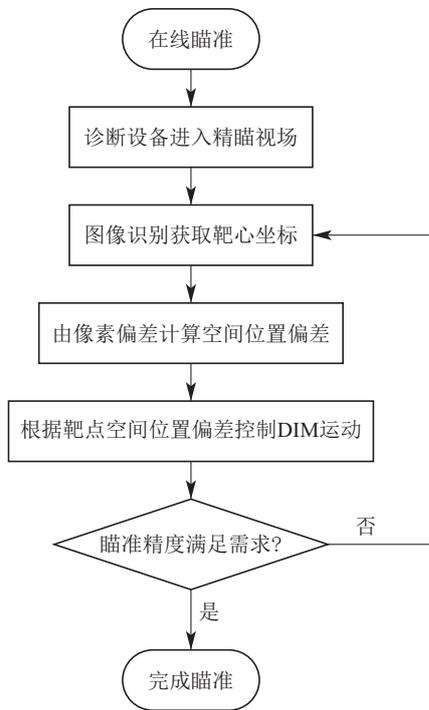


图6 自动瞄准方法流程图

Fig. 6 Flow chart of automatic aiming method

4 自动瞄准效果测试及应用

4.1 离线测试瞄准精度

为了得到采用本文图像识别及函数拟合方法确定自动瞄准的迭代收敛精度和收敛速度, 通过三维平移台模拟DIM在3个方向的运动, 通过离线实验测得本文方法在3个方向的迭代次数和迭代收敛精度.

采用三维平移台控制靶点运动, 三维平移台的3个运动方向与第3.2节建立的世界坐标系的方向一致. 平移台运动精度为0.001 mm. 在平移台上固定直径为0.2 mm的金球靶, 该点位置为理想靶点位置. 通过图像识别技术得到图像中靶心位置, 图像处理精度为0.1个像素. 标定完成得到拟合函数后在两精瞄摄像机视场内任取10个点, 将靶点移动到该位置, 根据其在CC-

D上的图像坐标, 计算出空间位置坐标, 即为当前靶点与理想靶点的偏差量. 根据计算得到的偏差量控制靶点运动, 表1-3为经过6次反馈控制偏差量的计算结果. 根据计算结果可以看出, 迭代2次已经可以保证毫米级的收敛精度. 测试用10个点迭代6次后, 在X方向偏差分别为 $4\mu\text{m}, 11\mu\text{m}, 10\mu\text{m}, 19\mu\text{m}, -9\mu\text{m}, -19\mu\text{m}, -15\mu\text{m}, 12\mu\text{m}, -4\mu\text{m}, 0\mu\text{m}$; 在Y方向偏差分别为: $8\mu\text{m}, 22\mu\text{m}, 12\mu\text{m}, 4\mu\text{m}, -16\mu\text{m}, -19\mu\text{m}, -2\mu\text{m}, -18\mu\text{m}, -51\mu\text{m}, 20\mu\text{m}$; 在Z方向偏差分别为 $61\mu\text{m}, 13\mu\text{m}, 38\mu\text{m}, 41\mu\text{m}, 30\mu\text{m}, -12\mu\text{m}, -62\mu\text{m}, 30\mu\text{m}, 12\mu\text{m}, 87\mu\text{m}$. 采用 $d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \epsilon_i^2}{10}}$ 可计算出系统在X, Y, Z 3个方向的精度分别为 $11.94\mu\text{m}, 21.57\mu\text{m}, 45.29\mu\text{m}$. 由于实验过程中存在气流、平台振动及三维平移台读数误差的影响, 导致个别点收敛较慢, 但并不影响系统整体的收敛精度.

表1 X方向迭代6次后偏差量(μm)

Table 1 Deviation after 6 iterations in X direction (μm)

测试点	迭代次数						
	0	1	2	3	4	5	6
1	3000	21	8	10	5	9	4
2	5000	12	24	28	27	20	11
3	5000	27	8	1	2	11	10
4	-1000	25	20	7	10	2	19
5	-1000	49	-43	-26	-25	10	-9
6	3500	-30	-23	0	9	59	-19
7	1000	-23	20	-7	-12	-8	-15
8	1000	-44	-48	-11	-71	-61	12
9	2000	52	-9	-13	38	34	-4
10	-500	-2	33	-464	30	24	0

表2 Y方向迭代6次后偏差量(μm)

Table 2 Deviation after 6 iterations in Y direction (μm)

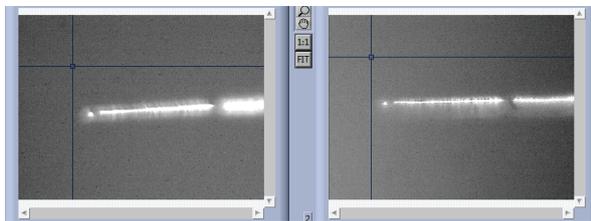
测试点	迭代次数						
	0	1	2	3	4	5	6
1	2000	8	18	20	24	14	8
2	3000	20	27	32	33	27	22
3	0	9	0	1	6	10	12
4	-1000	-47	-6	10	2	-1	4
5	500	29	-33	-42	-35	-29	-16
6	-1000	-50	-42	-25	-18	-19	-19
7	-1000	-74	6	17	5	-4	-2
8	-500	-51	456	70	-13	-20	-18
9	-1500	-41	32	56	57	41	-51
10	-1500	-70	-16	-43	-8	-16	20

表 3 Z 方向迭代 6 次后偏差量(μm)Table 3 Deviation after 6 iterations in Z direction (μm)

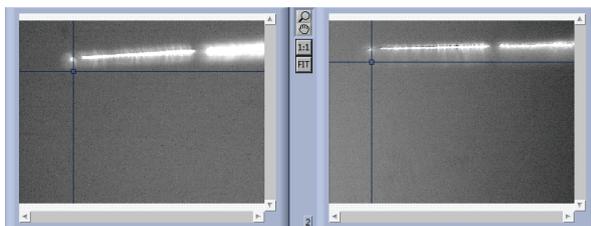
测试点	迭代次数						
	0	1	2	3	4	5	6
1	2000	106	29	25	48	16	61
2	5000	203	68	8	7	63	13
3	2000	45	82	20	4	45	38
4	-4000	-49	69	12	112	159	41
5	2000	-48	-165	40	73	180	30
6	-2000	145	-12	113	175	-419	-12
7	1000	-15	60	-111	-191	-166	-62
8	-1000	74	721	717	-96	-25	30
9	2000	-165	12	31	8	205	12
10	4000	-213	296	576	18	251	87

4.2 自动瞄准在线验证

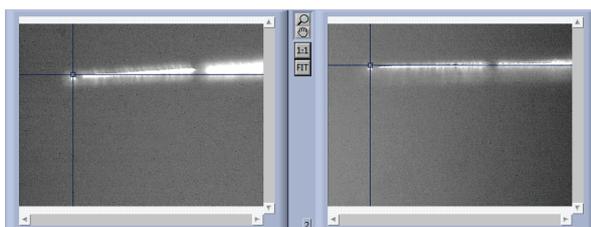
将质子谱仪及第 4.1 节中已完成标定的瞄准节搭载在 DIM 上进行在线验证, 诊断设备伸进靶室进入精瞄视场。由于靶室内无照明, 在双目瞄准系统前端增加照明装置, 采集图像如图 7(a) 所示。进行第 1 次反馈控制得到结果如图 7(b) 所示; 进行第 2 次反馈控制得到结果如图 7(c) 所示。



(a) 采集图像



(b) 进行第 1 次反馈控制



(c) 进行第 2 次反馈控制

图 7 初始图像及两次控制 DIM 运动后的瞄准效果

Fig. 7 The initial image and the targeting effect after twice controlling DIM movement

对大部分实验, 图 7(c) 中所示瞄准结果可满足实验需求。此方法简化了当前人眼识别靶点位置、人工判断 DIM 的调节方向和调节量的过程, 可自动识别、计算和控制诊断设备的运动, 根据实验需求设定瞄准精度。每次控制完成后判断是否满足精度要求, 若不满足, 则继续识别、计算、控制诊断设备运动; 若满足, 则停止迭代, 完成瞄准, 准备打靶。此过程可避免实验期间靶场进入瞄靶的过程, 有利于诊断系统的集中控制和工程化建设。

5 小结

本文通过靶图像识别、诊断设备离线标定与 DIM 瞄准反馈控制技术实现了诊断设备的自动瞄准, 解决了当前瞄准需要人工操作、瞄准效率低、随机性大等问题。

采用圆的霍夫变换方法, 实现了在靶室环境下得到的质量较差靶球图像的靶心识别技术。通过函数拟合的方法对双目相机进行离线标定, 由图像识别得到的靶心像素坐标计算出了当前靶点在世界坐标系下的坐标。最后根据 DIM 运动控制原理得到消除位置偏差的 DIM 运动控制量。通过反馈控制 DIM 运动, 使诊断设备瞄准靶点, 便可实现 X 方向 $11.94 \mu\text{m}$ 、Y 方向 $21.57 \mu\text{m}$ 、Z 方向 $45.29 \mu\text{m}$ 的瞄准精度; 并在线验证了该方法仅需两次反馈控制即可满足大部分实验瞄准需求, 提高了瞄准效率。

参考文献:

- [1] WANG Chuanke, JIANG Shaoen, DING Yongkun. The early research history of laser inertial confinement fusion experiment and diagnosis technology in China. *Physics*, 2014, 43(2): 120 - 126. (王传珂, 江少恩, 丁永坤. 我国激光惯性约束聚变实验与诊断技术早期研究历史. *物理*, 2014, 43(2): 120 - 126.)
- [2] WANG Wei, WANG Zhengzhou, He Junhua, et al. High accuracy automatic aiming method for diagnostic instrument manipulator. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 207 - 221. (王维, 王拯洲, 何俊华, 等. 通用诊断搭载平台高准确度自动瞄准方法. *光子学报*, 2014, 43(6): 207 - 221.)
- [3] MANUEL A M, MCCARVILLE T J, SEPPALA L G. Opposed port alignment system (OPAS): a commercial astronomical telescope modified for viewing the interior of the NIF target chamber. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2012, DOI: 10.1117/12.928726.
- [4] AYERS S. *Target & diagnostic alignment basics*. Livermore: Lawrence Livermore National Security, 2016.
- [5] BRUNTON G. Status of the national ignition facility (NIF) integrated computer control and information systems. *Proceedings of the 14th International Conference on Accelerator & Large Experimental Physics Control Systems*. Livermore: Lawrence Livermore National Security, 2017.
- [6] SHINGLETON N, BELL P, GRIM G P, et al. Alignment of an x-ray imager line of sight in the national ignition facility (NIF) target chamber using a diagnostic instrument manipulator (DIM) and opposed port alignment system (OPAS). *Proceedings of SPIE*. 2012, 62(4): 1 - 11.

- [7] LE BRETON J P, ALOZY E, BOUTIN J Y. Laser integration line target diagnostics first results (invited). *Review of Scientific Instrument*, 2006, DOI: 10.1063/1.2349746.
- [8] LU Weitao, YAN Yadong, ZHANG Min, et al. The diagnostic instrument manipulator is equipped with double CCD intersection and targeting system. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(4): 48 – 53. (卢卫涛, 闫亚东, 张敏, 等. 公共诊断搭载平台双CCD交汇瞄准系统. *应用光学*, 2011, 32(4): 48 – 53.)
- [9] YANG Zhenghua, LIU Shenyue, CAO Zhurong, et al. Development of the diagnostic instrument manipulator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(1): 115 – 120. (杨正华, 刘慎业, 曹柱荣, 等. 通用诊断搭载平台的研制. *强激光与粒子束*, 2011, 23(1): 115 – 120.)
- [10] XU De. *Microvision Measurement and Control*. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2014: 22 – 50. (徐德. 显微视觉测量与控制. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2014: 22 – 50.)
- [11] ATHERTON T J, KERBYSON D J. Size invariant circle detection. *Image and Vision Computing*, 1999, 17(11): 795 – 803.
- [12] YUEN H K, PRINCEN J, ILLINGWORTH J, et al. Comparative study of Hough transform methods for circle finding. *Image and Vision Computing*, 1990, 8(1): 71 – 77.
- [13] ZOU Baixian, LIN Jingrang. Contour extraction research of image. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(25): 161 – 165. (邹柏贤, 林京壤. 图像轮廓提取方法研究. *计算机工程与应用*, 2008, 44(25): 161 – 165.)
- [14] JIANG Bingxu, LIU Jie, SUN Ke. Refinement of sobel operator-edge detection. *Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 28(4): 503 – 506. (姜炳旭, 刘杰, 孙可. Sobel 边缘检测的细化. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(4): 503 – 506.)
- [15] SU Hongtao, ZHANG Yanning, WANG Jing, et al. Face recognition under varying illumination. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2004, 22(4): 426 – 430. (苏宏涛, 张艳宁, 王晶. 光照变化条件下的人脸识别研究. *西北工业大学学报*, 2004, 22(4): 426 – 430.)
- [16] ZHANG Qiang. *Research on 3d measurement and visualization based on binocular vision*. Changchun: Changchun University of Technology, 2018: 7 – 13. (张强. 基于双目视觉的三维测量及可视化技术研究. 长春: 长春工业大学, 2018: 7 – 13.)
- [17] LIU Yanghao, XIE Linbai. Research on improved camera calibration method based on common point. *Computer Engineering*, 2016, 42(8): 289 – 293. (刘杨豪, 谢林柏. 基于共面点的改进摄像机标定方法研究. *计算机工程*, 2016, 42(8): 289 – 293.)
- [18] LI Biao. *Research on 3d reconstruction based on binocular stereo vision*. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018: 9 – 12. (李彪. 基于双目立体视觉三维重建技术研究. 西安: 西安科技大学, 2018: 9 – 12.)
- [19] ZHANG Kaiyuan, XU Zhong. *Matrix Theory*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2013: 203 – 213. (张凯院, 徐仲. 矩阵论. 西安: 西北工业大学, 2013: 203 – 213.)

作者简介:

李颖洁 硕士研究生, 助理工程师, 目前研究方向为X射线成像诊断技术和诊断系统自动化技术, E-mail: 18792645703@163.com;

陈 铭 学士, 主要研究方向为光学诊断技术, E-mail: cmdongming@vip.sina.com;

陈 黎 学士, 主要研究方向为诊断系统自动化技术, E-mail: 892035186@qq.com;

张 兴 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为聚变等离子体物理与X射线成像诊断技术, E-mail: zhangxingjerry@sina.cn;

杨 品 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为X射线成像诊断技术和诊断系统自动化技术, E-mail: yangpin1987@126.com;

杨正华 硕士研究生, 副研究员, 主要研究方向为X射线成像诊断技术和诊断系统自动化技术, E-mail: yzh@caep.ac.cn.