

文章编号 1004-924X(2015)02-0520-08

## 高功率激光装置中靶的定位调试

宋 薇\*, 章亚男, 沈林勇

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘要:** 为了提高高功率激光装置中靶定位调试的效率和精度, 提出了一种仿真初调和实验误差分析相结合的靶定位调试方法。该方法采用 3-CCD 传感器进行定位监测, 利用 OpenGL 成像技术实现 CCD 仿真图像的采集, 并对目标靶、送靶机构等进行虚拟构建。基于仿真实验分析了实际系统中靶定位的误差来源, 包括图像检测误差、3-CCD 传感器的装校误差及送靶机构的定位误差等。靶定位算法的调试和初步验证在仿真系统中独立进行, 实现了理想条件下的零误差定位调整; 调试后的算法在实际系统中的靶定位精度小于  $\pm 5 \mu\text{m}$ , 角度误差为  $\pm 0.015^\circ$ 。由于仿真初调可脱离实验平台进行, 故有效地提高了工程效率。提出的调试方法在实际系统中的定位精度满足高功率激光打靶的要求。

**关键词:** 高功率激光装置; CCD 监测; 靶定位; OpenGL; 误差分析

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0520

## Target positioning in high power laser device

SONG Wei\*, ZHANG Ya-nan, SHEN Lin-yong

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

\* Corresponding author, E-mail: song\_wei@shu.edu.cn

**Abstract:** A target positioning method based on simulation primary adjustment and experimental error analysis was proposed to improve the efficiency and precision of target positioning in a high power laser device. A 3-CCD sensor was used to positioning and the "OpenGL" graphics software was used to capture CCD simulation images and to construct a cylindrical cavity target and a target-sending mechanism virtually. Then, the positioning precision of the experimental system was discussed, including the image detection error, the calibration error of 3-CCD sensor and the movement errors of the target-sending mechanism. The accuracy of the positioning method was confirmed in the simulation system independently by adjusting the target to a desired position without errors. In the experiment, the precision of the target positioning is less than  $\pm 5 \mu\text{m}$  and the orientation error is  $\pm 0.015^\circ$ . It indicates that the simulation primary adjustment can be implemented from the experimental platform, so the working efficiency is improved. The experimental result shows that the proposed method satisfies the precision requirements of the target positioning in high power laser devices.

**Key words:** high power laser device; CCD measurement; target positioning; OpenGL; error analysis

收稿日期: 2014-03-25; 修订日期: 2014-05-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61105029); 上海市浦江人才计划资助项目 (No. 11PJ1403700); 上海市“机械电子工程”创新团队资助项目。

## 1 引 言

近年来,为了实现实验室热核聚变点火和一定的能量增益,各国的高功率激光物理实验装置不断升级,参与打靶的激光束的数目也越来越多。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室国家点火装置(NIF)的光束数为 192 路<sup>[1]</sup>,法国的 LMJ 装置预计为 240 路<sup>[2]</sup>,我国的神光 III 装置也从原有神光 II 装置的 8 路升级到 48 路<sup>[3,4]</sup>。同时,实验室进行打靶的次数也大幅度提高,美国 NIF 装置每年将为大范围的实验用户进行大约 750 次实验<sup>[5]</sup>。这种发展现状对激光物理实验装置的快速点火提出了更高的要求,因此,高精度、耗时少的束靶耦合成为一项迫切需要解决的关键技术。

目前国内外普遍采用电荷耦合器件(CCD)图像检测技术测量靶的位姿并进行定位调整,使其保持在一个最有利于物理诊断和多束激光引导的位置上。文献[6-10]讨论了靶特征检测的图像处理部分,并应用边缘提取、椭圆拟合、特征匹配等常用的图像处理方法进行靶特征检测。随着图像处理技术的日益成熟,检测精度已达到 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 左右,这为实现高精度的靶定位奠定了基础。

但是,尽管在单幅图像处理上取得了上述进展,实际的靶定位调试过程却还存在以下两方面的问题:①系统多采用 3-CCD 空间定位,在调试过程中,由于无法得到靶的绝对位置且存在各种误差干扰,很难评价 3-CCD 信息融合过程中包含多坐标变换及多姿态角计算的空间定位方法的可行性。②由于调试过程不能脱离实验平台,其常常被系统各组成部分的机构设计、组件加工等工作中断,且等待时间较长,影响效率。

为了解决上述问题,本文提出了一种由仿真初调和实验误差分析相结合的靶定位调试方法。利用“Open GL”图形库在 C++Builder 6.0 环境下建立了靶定位的仿真调试系统。工程初期、在实验平台等硬件条件尚未搭建完善的情况下,由该仿真系统完成靶定位算法的初步验证,从而使调试过程既脱离了实验平台,又避免了各种误差的干扰;待实验平台搭建完善后,将调试后的程序用于实际系统,对各项误差来源进行分析,讨论其定位精度是否符合实际打靶要求;最后,通过实际靶定位的结果验证该定位调试方法在实际工程应用的可行性。

## 2 仿真初调

### 2.1 仿真系统构建

本文所述仿真系统是以高功率激光物理实验装置中靶自动准直系统为基础构建的。其结构如图 1 所示。

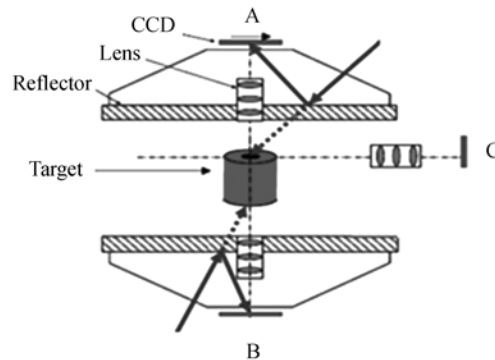


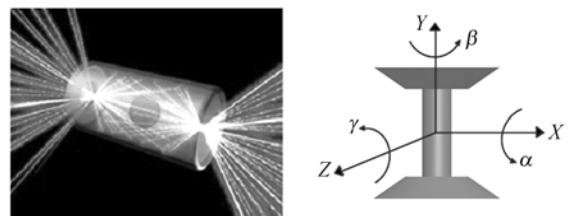
图 1 3-CCD 检测装置结构图

Fig. 1 Structure of 3-CCD measurement system

该系统的检测装置是基于光学共轭原理设计的 3-CCD 传感器<sup>[11]</sup>,其中两个 CCD 位于竖直方向,它们的光轴在同一直线;另外一个 CCD 位于水平方向,其光轴与前两个 CCD 的光轴垂直相交。目标靶安装在送靶机构上,由垂直于 CCD 所在平面的方向送入监测视场,3-CCD 传感器测量目标靶的位姿,并将测量值反馈给送靶机构进行定位调整。

#### 2.1.1 目标靶及其 Open GL 仿真绘制

高功率激光物理实验装置中靶的尺寸非常小,常见的 2 种形式的柱腔靶示意图如图 2 所示。以图 2(a)中所示的柱腔靶为例,其直径为 2 mm,



(a) 柱腔靶示意图 (b) (喇叭口)柱腔靶示意图

(a) Structure of a cylindrical cavity target (b) Structure of a (trumpet) cylindrical cavity target

图 2 高功率激光物理实验装置中的常用靶示意图

Fig. 2 Schematic of commonly used target in high power laser physical experimental apparatus

腔内装有一个豌豆粒大小的氘氟气体胶囊,激光光束经由两端面的中心孔(靶孔)射入靶体内部,辐照气体胶囊引发聚变产生能量<sup>[12]</sup>。实验中需要对靶体的位置和姿态进行精准定位,以保证调整好的激光光束能准确射入靶体内部。

本文以目前应用较多的喇叭口柱腔靶作为目标靶,其结构如图 2(b)所示。利用 OpenGL 定义函数 `cylinder(float r1, float r2, float r3, float r4, float h, int s, int col, int type)` 对(截顶)圆锥体、圆柱体曲面进行仿真绘制,标靶的结构及尺寸可通过设置 `cylinder` 函数的参数进行更改。

2.1.2 靶的位移和旋转功能实现

靶定位系统中靶的位置与姿态的定位调整是通过 6 自由度送靶机构来实现的,在仿真系统中分别利用 OpenGL 库函数中的 `glTranslate f(x, y, z)` 函数和 `glRotate f(α, β, γ)` 函数实现靶的移动和旋转功能。图 3 为进行不同轴向的移动和旋转后目标靶的仿真结果。

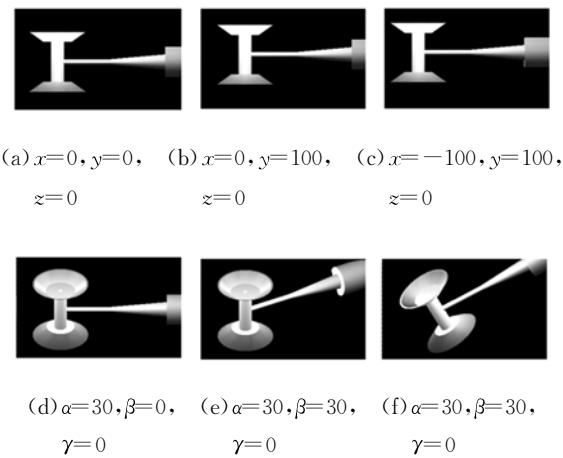


图 3 靶的位移(单位 mm)和旋转(单位 °)仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of target translation (unit: mm) and rotation (unit: degree)

2.1.3 系统显示界面

图 4 为仿真系统的显示界面,该界面可实时显示标靶的空间姿态、3 个 CCD 相机所放位置及各自所获得的仿真图像。仿真图像由 OpenGL 的模拟摄像技术实现<sup>[13]</sup>,经过视图变换、模型变换、投影变换和视口变换等主要步骤将物体从三维空间投影到二维成像平面。

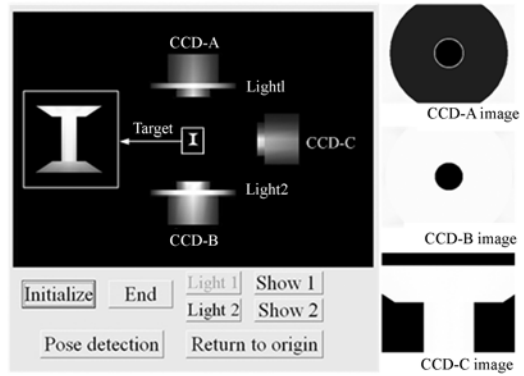


图 4 仿真系统的显示界面

Fig. 4 Interface of measurement simulation system

2.2 仿真系统中的靶定位调试

在 OpenGL 靶定位仿真环境下,将目标靶设置在 3 个 CCD 相机可视范围内的任意位姿状态,按以下步骤对靶丸进行定位调试:

2.2.1 分别获得靶上、下表面及侧面图像,提取每幅图像中靶的特征点

本文采用模板匹配方法提取图像中的靶的特征。模板匹配过程是将模板图像在源图像上依次移动,通过评价其吻合程度进行匹配<sup>[14-15]</sup>。

用来检测 CCD-A 和 CCD-B 图像的模板是靶在目标位置时图像的靶孔部分。测量时将该模板与被测源图像进行比较,找到最佳匹配值,其中心点位置( $\mu, \nu$ )即为检测出的图像特征值,如图 5 所示。

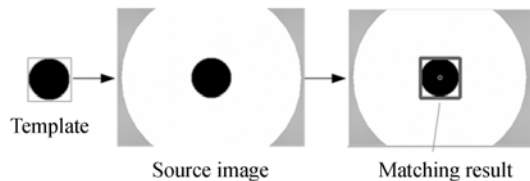


图 5 CCD-A 和 CCD-B 图像的检测结果

Fig. 5 Template matching results of CCD-A and CCD-B

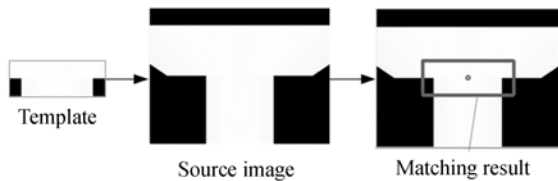


图 6 CCD-C 图像的检测结果

Fig. 6 Template matching result of CCD-C

由于 CCD-C 是从侧面对靶进行观测的,因此选择腔靶上锥形底部和圆柱面相交处的转折角作为图像特征。截取在目标位置时的转折角部分作为模板进行匹配,得到如图 6 所示的特征提取结果。

### 2.2.2 综合 3-CCD 的检测信息得到靶的空间位姿

利用模板匹配方法分别对 3 幅图像进行特征提取后可以得到:①上端面靶孔中心点  $O_1$  在图像坐标系  $\Sigma I_A$  中的坐标  $(u_{01}^A, v_{01}^A)$ ,该图像中心点坐标为  $(u_{01}^A, v_{01}^A)$ ;②下端面靶孔中心点  $O_2$  在图像坐标系  $\Sigma I_B$  中的坐标  $(u_{02}^B, v_{02}^B)$ ,该图像中心点坐标为  $(u_{02}^B, v_{02}^B)$ ;③上锥面与柱面的相交线中点(即  $O_1$  点)在图像坐标系  $\Sigma I_C$  中的坐标  $(u_{01}^C, v_{01}^C)$ ,该图像中心点坐标为  $(u_{01}^C, v_{01}^C)$ 。

将 3CCD 的光轴交点定义为基坐标系  $\Sigma \omega$  的原点,各坐标轴方向与相机光轴方向一致,利用上述检测信息可以计算出上、下端面靶孔中心点  $O_1$  和  $O_2$  在坐标系  $\Sigma \omega$  中的坐标:

$$\begin{cases} x_{O_1} = -k_u^A(u_{01}^A - u_{01}^C) \\ y_{O_1} = -k_v^C(u_{01}^C - u_{01}^A) \\ z_{O_1} = k_v^A(v_{01}^A - v_{01}^C) \end{cases}, \quad \begin{cases} x_{O_2} = -k_u^B(u_{02}^B - u_{02}^C) \\ z_{O_2} = -k_v^B(v_{02}^B - v_{02}^C) \end{cases}, \quad (1)$$

其中:参数  $k_u^A, k_v^C$  表示图像中一个像素所代表的物理尺寸,单位是  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ,该值大小由相机内部参数标定。

靶的姿态采用 RPY (Roll-Pitch-Yaw)角来描述。设腔靶绕  $x$  轴的旋转角为  $\psi$ ,绕  $y$  轴的旋转角为  $\theta$ ,绕  $z$  轴的旋转角为  $\varphi$ ,且  $\varphi, \theta, \psi \in [0, \pi/2]$ 。由于腔靶是回转体,所以可不考虑绕  $y$  轴的转角  $\theta$ ,利用几何关系可计算出腔靶的姿态角  $\psi$  和  $\varphi$ 。定义目标靶的位姿检测值为  $\hat{\Omega}$ ,则有:

$$\hat{\Omega} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_{O_1} + x_{O_2})/2 \\ y_{O_1} \\ (z_{O_1} + z_{O_2})/2 \\ -\arcsin[(z_{O_1} - z_{O_2})/d] \\ \arcsin[(x_{O_1} - x_{O_2})/(d \cos \psi)] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $d$  为靶的上下端面长度。

### 2.2.3 位姿偏差计算

在高功率激光装置中,目标靶要定位在球形靶室的中心且姿态准直。因此,在实验前首先要对 3-CCD 视觉检测装置进行靶场位姿标定<sup>[16]</sup>,使 3 个 CCD 的光轴交点与靶室球心重合且各光轴方向准直,这样就保证了在检测装置的基坐标系  $\Sigma \omega$  内调整好的靶的位姿能够符合靶室空间的定位要求。

本文假设 3-CCD 视觉检测装置的位姿已在球形靶室内标定好,此时靶的定位可考虑为在检测装置基坐标系  $\Sigma \tau$  内的定位,因此靶的目标位置即为  $\Sigma \tau$  的原点,目标姿态与  $\Sigma \tau$  一致,即  $\Omega_d = [x_d \ y_d \ z_d \ \psi_d \ \varphi_d]^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。 (3)

利用式(2)中的位姿检测值和式(3)中的目标值可计算出当前靶的位姿偏差:

$$\delta \Omega = \Omega_d - \hat{\Omega} = \begin{bmatrix} -(x_{O_1} + x_{O_2})/2 \\ -y_{O_1} \\ -(z_{O_1} + z_{O_2})/2 \\ \arcsin[(z_{O_1} - z_{O_2})/d] \\ -\arcsin[(x_{O_1} - x_{O_2})/(d \cos \psi)] \end{bmatrix}. \quad (4)$$

### 2.2.4 送靶机构的位姿调整

由于标靶的靶杆长度为  $L$ ,其固定在送靶机构的位移/旋转工作台末端,因此直接依据姿态的偏差值来调整送靶机构的旋转角将使标靶位置发生变化。本文通过几何关系计算出由姿态角旋转引起的位置偏移量,并在送靶机构的位姿调整算法中给予补偿。经计算,最终得到送靶机构的位姿调整量为:

$$\tilde{\Omega} = \begin{bmatrix} -(x_{O_1} + x_{O_2})/2 + L \sin \psi \cos \varphi \\ -y_{O_1} + L \sin \psi \cos \varphi \\ -(z_{O_1} + z_{O_2})/2 + L(\cos \psi - 1) \\ \arcsin[(z_{O_1} - z_{O_2})/d] \\ -\arcsin[(x_{O_1} - x_{O_2})/(d \cos \psi)] \end{bmatrix}. \quad (5)$$

### 2.3 仿真系统中的靶定位调试结果

本文采用视觉反馈控制方法进行靶的定位调整。控制框图如图 7 所示,送靶机构将目标靶送入靶室后,由 3-CCD 视觉检测系统检测靶的位姿,得到当前目标靶的位姿  $\hat{\Omega}$ ;该值通过反馈与目

标位姿  $\Omega_d$  相比较得到差值  $\delta\Omega$ ; 经位移补偿后得到送靶机构的调整量  $\delta\tilde{\Omega}$ ; 送靶机构对靶进行位姿调整后产生新的位姿。通过不断的反馈调整, 位姿偏差逐渐减小, 在仿真系统中可减小至零, 实际系统最终将其定位在某一给定的最小误差范围内。

在仿真系统中按上述视觉反馈控制方法进行仿真测试。为了便于分析, 先对靶的姿态逐一进行单自由度调整, 各自由度均调至零位后再对靶的位置进行三自由度同时调整。表 1 中的数据记录了位姿调整过程中每次的位姿测量值。

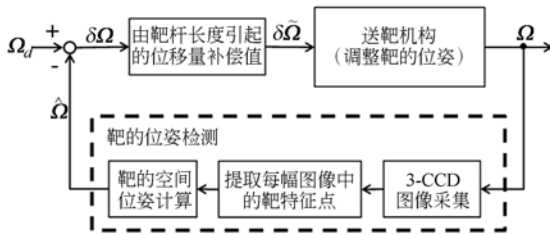


图 7 基于视觉反馈的靶的定位调试控制框图

Fig. 7 Control system of target-positioning based on visual feedback

表 1 位姿调整仿真实验

Tab. 1 Simulation experiment of pose adjustment

次数	X/ $\mu\text{m}$	Y/ $\mu\text{m}$	Z/ $\mu\text{m}$	$\psi/(^{\circ})$	$\varphi/(^{\circ})$
0	197.1	301.5	196.2	1.934	0.348
1	197.1	301.5	195.6	0.090	0.348
2	197.1	301.5	195.4	0.000	0.348
3	196.9	302.7	196.2	0.000	0.025
4	196.7	302.8	196.2	0.000	0.008
5	196.7	303.0	196.2	0.000	0.000
6	4.1	-2.9	4.4	0.000	0.000
7	0.6	0.00	-0.2	0.000	0.000
8	0.0	0.0	0.0	0.000	0.000

表中第一行数据是调整前靶的位置与姿态偏差。首先对姿态角  $\psi$  进行调整, 经过两次调整后, 其偏差为零, 在此过程中, 靶的位置几乎没有受到姿态变化的影响, 这说明位移补偿算法正确; 姿态角经过 3 次调整后偏差为零; 同时调整位移 X, Y, Z, 经过 3 次调整后, 偏差均为零。仿真结果表明: 靶定位算法的调试和初步验证能够在仿真系统中独立进行, 可实现理想条件下的零误差定位调整。

### 3 靶定位实验平台及误差分析

#### 3.1 3-CCD 靶定位实验平台

为了验证经仿真系统调试可行的算法在实际靶定位中的可靠性, 按照高功率激光物理实验装置中的靶自动准直系统的设计要求搭建了 3-CCD 靶定位实验平台, 如图 8 所示。实验系统中使用的 CCD 相机型号为 WAT 902H2, 分辨率为  $768 \times 576$ , 像元大小为  $8.4 \mu\text{m}$ 。图像采集卡采用 Matrox 公司的 Cronosplus 型号。为了突显图像中目标靶的外形特征, 系统中的光源采用三光源分别照明的方式, 其中 CCD-A、CCD-B 采用正投光源, 而 CCD-C 采用的是背投光源。每个相机采集图像时只打开其对应的光源, 其他光源关闭, 以避免干扰。通过图像采集卡上的用户自定义输出端口作为光源启闭的触发信号实现多路光源间的切换。

实验系统中的送靶机构为德国 PI 公司的 6 自由度并联微型机器人 (M-810)。将检测用的真实靶 (类型为喇叭口柱腔靶) 固定在 PI 机器人送靶的靶架上, 送入各相机可视范围内进行检测及定位调整。

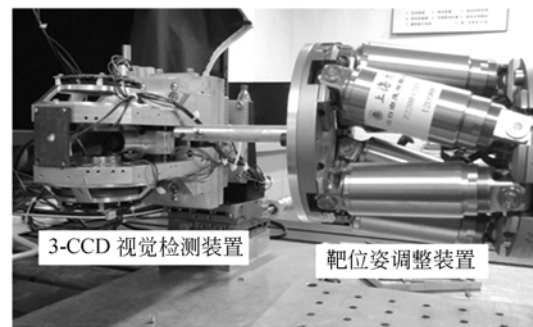


图 8 3-CCD 靶定位实验平台

Fig. 8 Experiment system of 3-CCD target-positioning

#### 3.2 实验系统误差分析

##### 3.2.1 图像检测误差 (即特征点提取误差)

以 3-CCD 视觉实验平台中 CCD-A 所采集的图像为例考察特征点提取误差。实验方法为将目标靶固定在同一位置, 用 CCD-A 多次采集图像并检测出靶特征点在图像中的位置, 检测结果如表 2 所示。经标定, 实验中所用 CCD 的一个像素所代表的物理尺寸为  $4.3 \mu\text{m}$ , 采用双立方插值法

表2 靶特征点的重复性检测实验

Tab.2 Repeatability detection experiment for target feature points (pixel)

序号	圆心坐标	
	x	y
1	278.7	248.4
2	278.8	248.5
3	278.8	248.4
4	278.9	248.3
5	278.6	248.2
6	278.7	248.2
7	278.8	248.5
8	278.7	248.3
9	279.0	248.5
10	278.8	248.3
标准差	0.27	0.22

进行亚像素匹配可将图像检测的分辨率提高至0.1 pixel。对柱腔靶的上表面靶孔特征的重复性检测误差为:

$$\Delta_1 = \sqrt{0.27^2 + 0.22^2} \times 4.3 \approx 1.5 \mu\text{m}. \quad (6)$$

### 3.2.2 3-CCD传感器的装校误差

在装配过程中,根据光学共轭原理设计的3-CCD视觉传感器会由于机械加工及装配过程产生偏差,并不满足所设计的共轭理论模型。由高功率激光装置的靶自动准直系统的装校和标定要求可知,上下CCD光轴的同轴度误差为 $80 \mu\text{rad}$ ,所引起的局部误差为 $3.2 \mu\text{m}$ ;中间CCD与上下CCD光轴的垂直度误差为 $80 \mu\text{rad}$ ,所引起的局部误差为 $1.6 \mu\text{m}$ 。则3-CCD传感器的装校总误差为:

$$\Delta_2 = \sqrt{3.2^2 + 1.6^2} \approx 3.6 \mu\text{m}. \quad (7)$$

### 3.2.3 实验系统中所用送靶机构的定位误差

实验系统中所用的送靶机构为PI公司M-810并联机器人,其在X,Y方向上移动的最小步长为 $1 \mu\text{m}$ ,精度为 $\pm 2 \mu\text{m}$ ;Z方向上的最小步长为 $0.2 \mu\text{m}$ ,精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 。故该送靶机构的定位误差为:

$$\Delta_3 = \sqrt{2^2 + 2^2 + 0.5^2} \approx 3 \mu\text{m}. \quad (8)$$

由以上分析可得该实验系统的定位精度为:

$$\Delta = \pm \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} \approx \pm 5 \mu\text{m}. \quad (9)$$

## 4 靶定位实验结果

### 4.1 图像检测结果

图9为CCD-A所采集的图像、检测模板及特

征匹配结果;由于CCD-B与CCD-A是从上下两个相对位置对靶进行检测的,因此其所采集的图像及模板匹配情况与CCD-A相同;CCD-C从侧面对靶进行观测,所采集的图像、检测模板及特征匹配结果如图10所示。

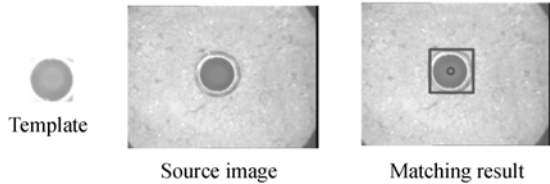


图9 CCD-A和CCD-B图像的检测结果

Fig.9 Template matching results of CCD-A and CCD-B

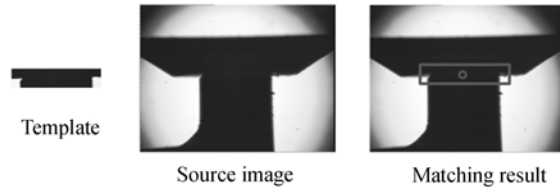


图10 CCD-C图像的检测结果

Fig.10 Template matching results of CCD-C

### 4.2 与仿真图像的对比分析

通过对比图5、图6与图9、图10可知,仿真图像的图像概貌与实际图像大体相同,仿真图像可以清晰、准确地显示标靶的主要特征——靶孔,因此仿真图像能对模板匹配算法进行调试。将调试通过的算法移植到实际检测系统中也可以准确地提取出图像特征点。

仿真图像是理想图像,没有加入噪声及图像纹理等细节,故仿真图像中靶标的边缘锐利;而实际图像则由于靶标的实际成像效果会受照明、聚焦、图像采集和传输等原因的影响,故采用实际图像进行分析时检测结果会存在误差,这个误差在仿真系统中是无法给出的,需要在实际环境下通过实验分析得到(如3.2.1中所述)。

仿真图像创建了理想的检测条件,可以最大限度地减小特征点提取误差,便于对后续的位姿计算等进行调试。需要说明的是:在毫米以上级别的普通尺度测量中,各种系统误差由于与之相比量级较小,对调试的影响不明显。但高功率激光装置中靶定位的精度为微米级,在无法得到靶的绝对位置且存在各种误差干扰的条件下,很难评价包含多坐标变换及多姿态角度计算的空间定

位方法的可行性,因此创建理想的检测条件在初期调试工作中是有必要的。

表 3 基于 3-CCD 视觉实验平台的靶定位实验

Tab. 3 Pose adjustment experiment

次数	X/ $\mu\text{m}$	Y/ $\mu\text{m}$	Z/ $\mu\text{m}$	$\phi/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
0	152.9	9.9	-268.7	1.568	5.194
1	219.2	-469.3	-53.0	-0.302	0.151
2	-13.7	103.2	9.8	-0.256	0.558
3	-9.8	81.3	8.0	-0.015	0.015
4	3.0	3.6	1.1	-0.015	0.000
5	2.1	4.2	1.1	0.015	0.015
6	-2.2	3.2	0.7	-0.015	0.000

### 4.3 靶定位实验结果

利用所搭建的 3-CCD 靶定位实验平台,按照前文所述视觉反馈控制方法对靶进行了定位调整(各自由度同时控制)。表 3 记录了调整过程中每次反馈控制后靶的位姿。

表中第一行数据是调整前腔靶的位姿偏差,在  $x$  轴与  $z$  轴的位置偏差均大于  $150.0 \mu\text{m}$ ,在绕  $x$  轴转动方向上的角度偏差大于  $5^\circ$ 。角度偏差在调整过程中逐渐减小,3 次调整后基本达到目标角度。随着角度偏差的明显减小,靶位置也迅速、平稳地向目标点收敛。最终的靶定位精度为:

$$\Delta' = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = \sqrt{2.2^2 + 3.2^2 + 0.7^2} \approx 3.9 \mu\text{m}. \quad (10)$$

该定位精度优于实验系统的定位精度( $< 5 \mu\text{m}$ )。

由公式(2)可知,靶的姿态角可由上下两个端

面的靶孔中心位置计算得到,实验中采用双立方插值法进行亚像素匹配,将图像检测的分辨率提高至  $0.1 \text{ pixel}$ ,即  $0.43 \mu\text{m}$ ,另外,靶的上下端面的长度  $d$  为  $1650.0 \mu\text{m}$ ,因此角度的可测分辨率为:

$$\arcsin(0.43 \mu\text{m}/1650.0 \mu\text{m}) \approx 0.015^\circ. \quad (11)$$

实验数据表明:经过 3 次定位调整后角度的残留误差为  $\pm 0.015^\circ$ ,为最小分辨程度,不可再调,此时靶的位姿为准直状态,符合打靶要求。

该实验中每一次反馈定位的耗时约为  $10 \text{ s}$ ,其中靶的位姿检测(包括图像采集、特征点提取、空间位姿计算)耗时约为  $6 \text{ s}$ ,将图像检测得到的数据传递给送靶机构的控制器,并进行定位调整的耗时约为  $4 \text{ s}$ 。实验经 6 次反馈控制后将靶的位姿调整好,这一过程的总耗时约为  $1 \text{ min}$ 。

## 5 结 论

本文提出了一种由仿真初调和实验误差分析相结合的靶定位调试方法。利用“Open GL”图形库建立了仿真调试系统,实现了理想条件下的零误差定位调整。调试过程在计算机仿真环境下独立完成,实验平台搭建可以同时进行,从而有效地提高了工程效率。

调试后的程序应用于 3-CCD 靶定位实验平台,通过对各项误差来源进行分析,得到系统的定位精度小于  $\pm 5 \mu\text{m}$ ,角度误差为  $\pm 0.015^\circ$ ,满足高功率激光打靶的要求,可应用于实际工程中。

### 参考文献:

- [1] EDWARDS M J, PATEL P K, LINDL J D, *et al.*. Progress towards ignition on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(7).
- [2] DE CERVENS D R, GOMME J C, RAIMBOURG J, *et al.*. Specifically measurement protections for high voltage and high power on Megajoule Laser [C]. *Proceedings of the 2008 IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, PMHVC*, 2008, 170-173.
- [3] 吕凤年,彭增云,刘代中. 神光 II 第九路光路自动准直系统研究[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(5): 21-

- 24.
- [4] LV F N, PENG Z Y, LIU D ZH. Laser beam automatic alignment system in the 9th beam of SG-II [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2013, 11(5): 21-24. (in Chinese)
- [4] 徐元利,陈学前,高海鹰,等. 神光 III 主机装置真空靶室组件研制[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(11): 2623-2626.
- XU Y L, CHEN X Q, GAO H Y, *et al.*. Development of vacuum target chamber component in Shengguang-III laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(11): 2623-2626. (in Chinese)
- [5] SANDRA B. Overview of the National Ignition Fa-

- cility [J]. *Health Physics*, 2013, 104: 544-556.
- [6] AWWAL A A S, RICE K L, TAHA T M. Fast implementation of matched-filter-based automatic alignment image processing [J]. *Optics and Laser Technology*, 2009, 41(2): 193-197.
- [7] LEACH J, RICHARD R, FIELD J E, *et al.*. Image processing methods for characterizing cryogenic target quality during ice layer formation at the National Ignition Facility (NIF) [C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8602.
- [8] 刘国栋, 吴慧兰, 胡涛, 等. 惯性约束聚变实验靶姿态的检测技术[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 800-803. LIU G D, WU H L, HU T, *et al.*. Inertial confinement fusion experiment target gesture estimation technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(3): 800-803. (in Chinese)
- [9] 郭俊杰, 邱丽荣, 王允, 等. 用于惯性约束聚变靶丸测量的激光差动共焦传感器[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 644-651. GUO J J, QIU L R, WANG Y, *et al.*. Laser differential confocal sensor for ICF capsule measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 644-651. (in Chinese)
- [10] 吴倩, 邹伟, 徐德, 等. 面向惯性约束聚变实验靶图像的快速椭圆检测[J]. *中国图像图形学报*, 2014, 19(1): 76-84. WU Q, ZOU W, XU D, *et al.*. Fast ellipse detection for target images in ICF experiment [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(1): 76-84. (in Chinese)
- [11] 刘炳国, 刘国栋, 浦昭邦, 等. 惯性约束聚变束靶耦合的监测及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 542-548. LIU B G, LIU G D, PU ZH B, *et al.*. Measurement and precision analysis on alignment of laser and target in ICF [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 542-548. (in Chinese)
- [12] 张林, 杜凯. 激光惯性约束聚变靶技术现状及其发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3091-3097. ZHANG L, DU K. Target technologies for laser inertial confinement fusion: State-of-the-art and future perspective [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3091-3097. (in Chinese)
- [13] 宋碧波, 卢小平, 孙晓峰, 等. OpenGL 虚拟相机模拟摄影测量二次成像[J]. *测绘通报*, 2012, (7): 21-23. SONG B B, LU X P, SUN X F, *et al.*. Simulation of secondary photogrammetric imaging with OpenGL virtual camera [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012, (7): 21-23.
- [14] CHEN L, MAN H, JIA H D. On scanning linear barcodes from out-of-focus blurred images: a spatial domain dynamic template matching approach [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, (23): 2637-2650.
- [15] 吴晓军, 邹广华. 基于边缘几何特征的高性能模板匹配算法[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(7): 1462-1469. WU X J, ZOU G H. High performance template matching algorithm based on edge geometric features [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(7): 1462-1469. (in Chinese)
- [16] 刘国栋, 浦昭邦, 张琢, 等. 惯性约束核聚变靶场监测系统空间坐标系的建立与标定方法[J]. *光学技术*, 2004, 30(2): 204-208. LIU G D, PU ZH B, ZHANG ZH, *et al.*. Method of coordinate building and calibrating for ICF shooting range monitoring system [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 204-208. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋薇(1981—),女,辽宁铁岭人,博士,副研究员,2006年、2009年于日本福井大学分别获得硕士、博士学位,主要从事机器视觉及精密测量方面的研究。E-mail: song\_wei@shu.edu.cn



章亚男(1962—),女,浙江绍兴人,博士,教授,1982年于浙江大学获得学士学位,2011年于上海大学获得博士学位,主要从事光学仪器、精密机械等方面研究。E-mail: ynzhang@mail.shu.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)