

基于 OpenGL 的 3-CCD 靶定位仿真系统

宋薇¹ 李小磊¹ 章亚男¹ 沈林勇¹ 赵东峰² 邵平²

¹上海大学机械工程与自动化学院, 上海 200072

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 为了提高高功率激光装置中各组成系统调试阶段的工作效率, 利用 OpenGL 图形软件建立了靶定位仿真系统, 使得靶定位算法的调试和初步验证在实验平台等硬件条件尚未完善的情况下能够独立进行。利用模板匹配和 3-CCD 空间定位法对靶丸进行定位监测, 并考虑姿态调整过程中由于靶杆长度引起的位置偏移, 在算法中给予补偿。仿真系统不仅实现了目标靶丸、送靶机构等虚拟构建, 还运用 OpenGL 成像技术实现了 CCD 仿真图像的采集。最后利用该仿真系统对靶丸特征检测、空间位姿计算、补偿式姿态调整等算法进行了调试。结果表明, 通过相机监测可将靶丸由任意位姿调至目标零位, 验证了该检测与定位算法应用于实际工程的可行性。

关键词 测量; 仿真; OpenGL; CCD 监测; 模板匹配

中图分类号 TP391.9; TL67 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.101204

OpenGL Simulation for 3-CCD Target Positioning System

Song Wei¹ Li Xiaolei¹ Zhang Ya'nan¹ Shen Linyong¹ Zhao Dongfeng² Shao Ping²

¹School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract To improve the operating efficiency of high power laser facility project, a simulation system using "OpenGL" graphics software is built to evaluate the target positioning algorithm at the debugging phases, which is independent on imperfect hardware experimental environment. The proposed positioning method calculates the target's spatial coordinate and rotational angles by integrating the feature values obtained by three CCDs, and adjusts the target-sending mechanism to put the target in a desired position. The simulation results show the target-sending mechanism is confirmed to be able to adjust the target in a desired position based on the measurement results, which verifies the practicality of the proposed positioning algorithm to be used in the real ICF physical experiment.

Key words measurement; simulation; OpenGL; CCD observation; template matching

OCIS codes 120.6085; 100.3008; 150.6910; 140.4232

1 引言

惯性约束核聚变(ICF)利用高功率激光束均匀辐照氘、氚等热核燃料组成的微型靶丸,使其在极短的时间里发生聚变,释放出巨大的能量,在新型能源方面有着很好的应用前景^[1-2]。在惯性约束核聚变实验后需要更换新靶,每次根据新靶被放置的位姿来调整激光与靶的高精度束靶耦合、以及其他众多的物理诊断设备的精确准直会带来巨大的工作量,因此需要通过靶进行位姿检测和定位调整来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^[3]。实验中靶丸是否位于靶室中心,其姿态是否符合要求,多路模拟光(激光校准用)是否准确会聚于靶丸的某一特定部位上,这些都需要进行实时检测,其精度直接影响到激光打靶实验的结果,因此实现微小靶丸的快速、准确定位对整个系统来说意义重大。

目前国内外普遍采用 CCD 图像检测技术测量靶的位姿并进行定位调整^[4-5],其中涉及到关于图像处理、坐标变换、姿态角计算等一系列算法,需要大量的调试工作来评价算法的可行性并进行优化。但是用来实

收稿日期: 2014-01-24; 收到修改稿日期: 2014-06-04; 网络出版日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(61105029)、上海市浦江人才计划(11PJ1403700)、上海市“机械电子工程”创新团队资助课题

作者简介: 宋薇(1981—),女,博士,副研究员,主要从事机器视觉与精密测量等方面的研究。

E-mail: song_wei@shu.edu.cn

现ICF的高功率激光装置是一个复杂工程,组件多且精密性高,在实际系统装置中进行靶定位调试有许多不便之处,例如工作效率低,标靶损坏机率大,检测及定位精度难以评估等。

针对这些问题,本文在C++Builder 6.0环境下利用“OpenGL”图形库建立了ICF靶定位实验平台的仿真系统,不仅对目标靶丸、送靶机构等进行了仿真构建,还在仿真系统中运用OpenGL的成像技术^[6-7]实现了CCD仿真图像的采集,并利用该仿真系统对靶丸特征检测、空间位姿计算、补偿式姿态调整等算法进行了调试和初步验证。通过建立ICF靶定位仿真系统使算法的调试脱离了对实验平台的依赖,从而使软件编程与硬件(机构)的设计、加工同时进行,提高了工作效率;同时仿真系统可快速切换不同尺寸、不同类型的标靶来满足不同条件的调试要求,减少了调试过程中标靶的使用损耗;仿真环境也避免了来自安装误差、机械误差、加工误差等多方面因素的影响,为测量与定位算法的调试及初步验证提供了合适的环境条件。

2 仿真系统构建

仿真系统是以ICF实验中靶自动准直系统实验平台为基础进行设计和构建的,其结构图如图1所示。该系统的检测装置包括三个CCD相机,其中两个CCD(A和B)位于竖直方向,光轴在同一直线,分别从上下两个角度获取靶的图像信息;另外一个CCD(C)位于水平方向,其光轴所在的直线与前两个CCD光轴所在的直线垂直,从侧面获取靶的图像信息。

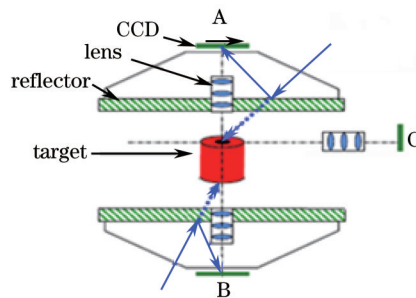


图1 微型靶位姿检测装置结构图

Fig.1 Structure chart of tiny-target measurement system

2.1 目标靶丸及其OpenGL仿真绘制

ICF中靶的尺寸非常小,以图2(a)中所示的柱腔靶为例,直径为2 mm,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射入靶体内部,辐照气体胶囊引发聚变产生能量。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。

以目前ICF实验中应用较多的喇叭口柱腔靶作为目标靶丸,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 col)对(截顶)圆锥体、圆柱体曲面进行仿真绘制,其中r1和r2分别为(截顶)圆锥曲面上端面的内外半径,r3和r4分别为下端面的内外半径,h为曲面高度,col为曲面颜色,可以用来绘制不同尺寸的空心(截顶)圆锥体。当r3=r1,r4=r2时,可以绘制出空心圆柱体。将喇叭口柱腔靶的靶体分为三个部分:上端面喇叭口、圆柱体和下端面喇叭口,分别调用函数cylinder对各部分进行仿真绘制,如图3(a)所示;各部分搭建在一起完成目标靶丸的三维仿真,如图3(b)所示。标靶的结构及尺寸可通过函数cylinder的参数设置进行更改。



图2 (a) 直径为2 mm的柱腔靶; (b) 喇叭口柱腔靶示意图

Fig.2 (a) Cylindrical cavity target with a diameter of 2 mm; (b) structure of a (trumpet) cylindrical cavity target

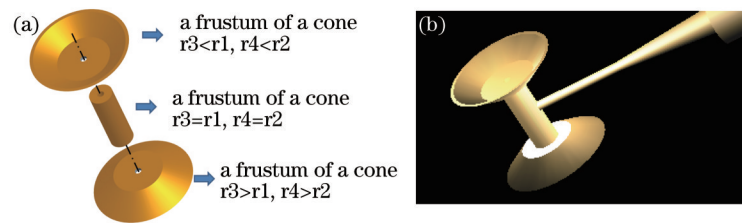


图3 (a) 喇叭口柱腔靶的OpenGL仿真构建; (b) 喇叭口柱腔靶OpenGL仿真图

Fig.3 (a) Simulation build of trumpet cylindrical cavity target by OpenGL; (b) simulation diagram of trumpet cylindrical cavity target by OpenGL

2.2 靶丸位移和旋转功能实现

ICF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,在仿真系统中利用OpenGL库函数中的 $glTranslatef(x, y, z)$ 函数和 $glRotatef(\alpha, \beta, \gamma)$ 函数可以分别实现靶的移动和旋转功能。标靶固接坐标系的定义如图2(b)中所示,上述函数中参数 x, y, z 为沿 X, Y, Z 轴移动的位移, α, β, γ 分别为靶绕自身 X, Y, Z 轴旋转的角度。图4为进行不同轴向的移动和旋转后目标靶丸的仿真。

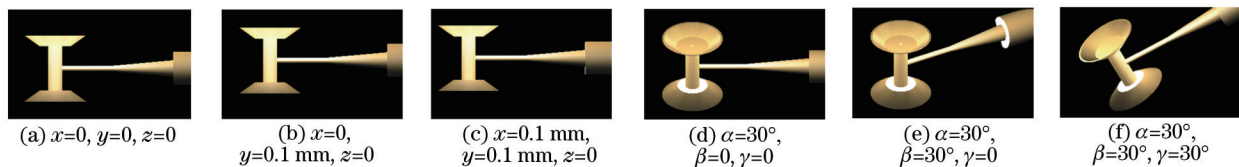


图4 靶的位移和旋转

Fig.4 Target translation and rotation

2.3 基于OpenGL的CCD成像仿真

OpenGL的相机模拟是通过坐标转换实现的,物体经过视图变换、模型变换、投影变换和视口变换等主要步骤从三维空间投影到二维成像平面,并显示在视口平面上即可得CCD仿真图像。

图5(a)为利用型号为WAT 902H2的相机在CCD-A的位置上所采集的一幅靶丸的上表面的图像。图5(b)为CCD-A对目标靶丸的仿真成像,仿真相机的焦距设置与实际相机一致。图5(b)中标靶的尺寸和颜色与图5(a)略有不同,这可根据实际情况利用cylinder函数的参数设置来进行调整。通过对比可知,仿真图像所获得的图像与实际图像大体相同,清晰准确地显示出了标靶的主要特征——靶孔,因此仿真成像能够通过靶孔进行特征提取来计算出标靶的位姿偏移(见下文),表明该仿真图像可用来对位姿测量及定位算法进行调试与验证。

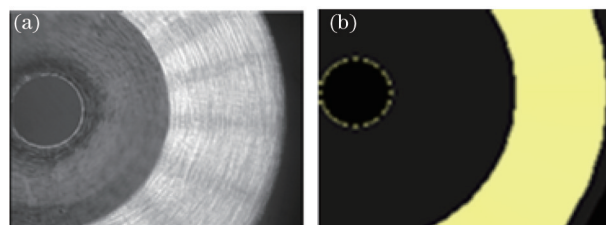


图5 (a) WAT 902H2相机所采集的靶丸图像; (b) CCD-A仿真图像

Fig.5 (a) Target image taken by WAT 902H2 camera; (b) simulation image of CCD-A made by OpenGL

但仿真图像是理想图像,并未加入噪声及图像纹理等细节,仿真图像中靶标的边缘锐利。而在实际图像中,由于照明、聚焦、图像采集和传输等原因,靶标的实际成像效果会受到影响,采用实际图像的检测结果也会存在误差,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检测分析得到^[8]。

利用仿真图像进行定位调试的意义在于仿真图像创建了理想的检测条件,最大限度地减小了特征点的提取误差,便于对后续的3-CCD信息融合进行位姿计算等算法的调试。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。

2.4 光源及系统显示界面

图6所示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、三个 CCD 相机所放位置及各自所获得的仿真图像。由于送靶方向与 CCD 所在的平面垂直,因此从图6中观察不到与标靶固接、用来调整标靶位姿的靶杆部分。

系统采用同轴光检测,即将光源和 CCD 放于被测物体的同侧,这种条件下获得的图像对比度高,有利于进行表面特征识别,因此要求在检测时根据所用 CCD 的不同、切换不同的光源来分别获得三幅仿真图像。

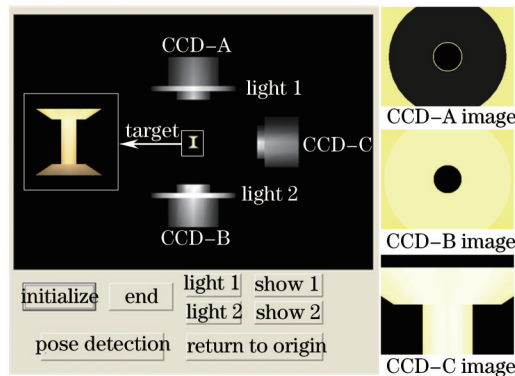


图6 仿真系统的显示界面

Fig.6 Interface of the target measurement simulation system

3 3-CCD 空间定位法

利用三个 CCD 相机分别获得靶丸上表面、下表面及侧面的仿真图像,提取每幅图像中靶丸的特征点,综合三个方向的检测信息计算出靶丸的空间位姿。

3.1 基于模板匹配的靶丸特征检测

模板匹配过程是将模板图像在源图像上依次移动,通过计算相关函数来评价其吻合程度进行匹配^[9-10]。本文中相关函数是归一化相关系数

$$R(x, y) = \frac{\sum_{y=0}^{h-1} \sum_{x=0}^{w-1} T'(x', y') I'(x+x', y+y')}{\sqrt{\sum_{y=0}^{h-1} \sum_{x=0}^{w-1} T'(x', y')^2 I'(x+x', y+y')^2}}, \quad (1)$$

式中 $I'(x+x', y+y') = I(x+x', y+y') - \bar{I}$, $T'(x', y') = T(x', y') - \bar{T}$; I 为源图像; T 为模板; \bar{I} 为当前模板所在源图像的灰度均值; \bar{T} 为模板图像灰度均值。当 $0 \leq R \leq 1$ 时,具有单峰性;当 $R=0$ 时,表示模板与源图像的某一区域完全不相关;当 $R=1$ 时,表示两者完全相关。

用来检测 CCD-A 和 CCD-B 图像的模板是将靶丸放在目标位置时图像的靶孔部分,预先截取好。测量时将该模板与被测源图像的重叠区域进行比较,找到 R 值最大点,该点位置 (u, v) 即为检测出的图像特征值。根据该点所在的位置和模板的大小,在输出图像上绘制出矩形框显示检测结果,如图7所示。

由于 CCD-C 是从侧面对靶丸进行观测,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8所示的特征提取结果。

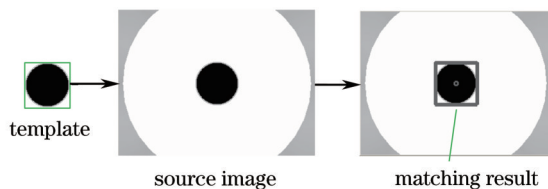


图7 CCD-A 和 CCD-B 图像的检测结果

Fig.7 Template matching result of CCD-A and CCD-B

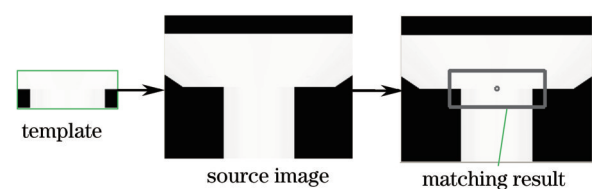


图8 CCD-C 图像的检测结果

Fig. 8 Template matching result of CCD-C

3.2 靶丸空间位姿计算

3.2.1 系统各坐标系定义

图9为系统坐标系定义,世界坐标系定义为 ΣW ,原点 O 设置在相机A、B光轴连线的中点处。三个CCD组件A、B和C分别获得的图像坐标系定义为 ΣI_A 、 ΣI_B 和 ΣI_C ,图像的左上方顶点处定义为各图像坐标系的原点 O_A 、 O_B 和 O_C ,坐标轴定义为 U_A 、 V_A 和 U_B 、 V_B 以及 U_C 、 V_C 。靶丸坐标系定义为 ΣT ,与靶丸固接,原点 O_T 设置在标靶的几何中心处。

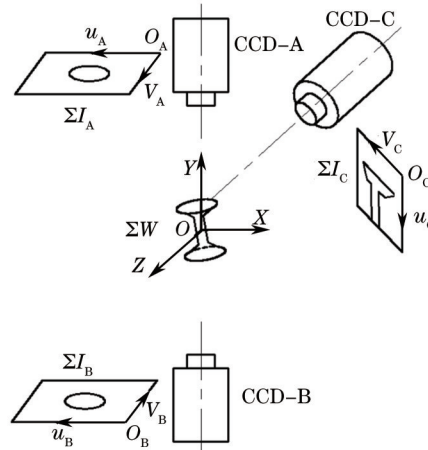


图9 系统坐标系定义

Fig.9 System coordinate definition

3.2.2 位置计算

利用模板匹配方法分别对三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 ΣI_A 中的坐标 $(u_{o_1}^A, v_{o_1}^A)$,该图像中心点坐标为 (u_o^A, v_o^A) ;2)下端面靶孔中心点 O_2 在图像坐标系 ΣI_B 中的坐标 $(u_{o_2}^B, v_{o_2}^B)$,该图像中心点坐标为 (u_o^B, v_o^B) ;3)上锥面与柱面的相交线中点(即 O_1 点)在图像坐标系 ΣI_C 中坐标为 $(u_{o_1}^C, v_{o_1}^C)$,该图像中心点坐标为 (u_o^C, v_o^C) 。利用这些检测信息可以计算出上端面靶孔中心点 O_1 在空间坐标系 ΣW 中的坐标:

$$\begin{cases} x_{o_1} = -k_u^A (u_{o_1}^A - u_o^A) \\ y_{o_1} = -k_u^C (u_{o_1}^C - u_o^C) \\ z_{o_1} = k_v^A (v_{o_1}^A - v_o^A) \end{cases} \quad (2)$$

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

下端面靶孔中心点 O_2 在空间坐标系 ΣW 的 XOZ 平面的坐标为:

$$\begin{cases} x_{o_2} = -k_u^B (u_{o_2}^B - u_o^B) \\ z_{o_2} = -k_v^B (v_{o_2}^B - v_o^B) \end{cases} \quad (3)$$

CCD-C从侧面只对腔靶上锥形底部和圆柱面相交处进行观测,不对 y_{o_2} 的值进行测量。

3.2.3 姿态角计算

采用滚动、倾斜和偏离(RPY)角描述靶的姿态。设腔靶绕 x 轴的旋转角为 ψ ,绕 y 轴的旋转角为 θ ,绕 z 轴的旋转角为 φ ,且 φ 、 θ 、 $\psi \in [0, \pi/2]$ 。则可建立靶的旋转矩阵^[11]

$${}^w_t R = R(z, \varphi) R(y, \theta) R(x, \psi) = \begin{bmatrix} c\varphi & -s\varphi & 0 \\ s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\psi & -s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这里把 \cos 简写为 c , \sin 简写为 s ,下文同。因为腔靶是回转体,所以设绕 y 轴的转角 $\theta=0$,代入(4)式得

$${}^w R = \begin{bmatrix} {}^w x_T & {}^w y_T & {}^w z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\varphi & -s\varphi c\psi & s\varphi s\psi \\ s\varphi & c\varphi c\psi & -c\varphi s\psi \\ 0 & s\psi & c\psi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 ${}^w y_T$ 为坐标系 ΣT 的 y 轴上的单位向量在坐标系 ΣW 中的表示, 也就是直线 O_1O_2 的方向余弦。定义直线 O_1O_2 与 ΣW 的 x 、 y 、 z 轴的夹角分别为 α 、 β 、 γ , 直线 O_1O_2 的方向余弦为

$$\begin{bmatrix} c\alpha \\ c\beta \\ c\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_{o_1} - x_{o_2}) / \sqrt{(x_{o_2} - x_{o_1})^2 + (y_{o_2} - y_{o_1})^2 + (z_{o_2} - z_{o_1})^2} \\ (y_{o_1} - y_{o_2}) / \sqrt{(x_{o_2} - x_{o_1})^2 + (y_{o_2} - y_{o_1})^2 + (z_{o_2} - z_{o_1})^2} \\ (z_{o_1} - z_{o_2}) / \sqrt{(x_{o_2} - x_{o_1})^2 + (y_{o_2} - y_{o_1})^2 + (z_{o_2} - z_{o_1})^2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

因此有

$${}^w y_T = [-s\varphi c\psi \quad c\varphi c\psi \quad s\psi]^T = [c\alpha \quad c\beta \quad c\gamma]^T. \quad (7)$$

设靶的上下端面的长度为 d , 则 $d = \sqrt{(x_{o_2} - x_{o_1})^2 + (y_{o_2} - y_{o_1})^2 + (z_{o_2} - z_{o_1})^2}$ 。代入(6)式, 由(6), (7)式可计算出腔靶的姿态角

$$\begin{cases} \psi = \arcsin[(z_{o_1} - z_{o_2})/d] \\ \varphi = \arcsin[-(x_{o_1} - x_{o_2})/(d c\psi)] \end{cases}. \quad (8)$$

3.3 姿态旋转引起的位置偏移补偿

在靶定位系统中, 标靶与长度为 L 的靶杆相固接, 靶杆的另一端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引起靶丸的位置变化。受系统精密结构的限制, CCD相机只能近距离小视场对靶丸进行位姿监测, 靶杆的长度 L 所引起的位移将有可能导致标靶移出相机视场, 甚至碰到系统其他部件导致标靶损坏, 因此要在送靶机构的位姿调整算法中将杆长所引起的位置偏移给予补偿。

由几何关系可计算出由姿态角 φ 旋转引起的位置偏移的补偿量为 $[L(c\varphi - 1), Ls\varphi, 0]$ 。

根据上文所述的各种算法, 归纳靶定位系统的位姿调整流程如下:

1) 对靶丸进行特征识别, 由(2), (3)式得到 $x_{o_1}, y_{o_1}, z_{o_1}, x_{o_2}, z_{o_2}$ 。

2) 由(8)式计算出姿态角 φ, ψ 。

3) 计算出姿态旋转引起的位置偏移的补偿量 $L(c\varphi - 1), Ls\varphi$ 。

4) 确定送靶机构的位姿调整量及调整顺序为:

绕 z 轴旋转量: $\underline{\psi} = -\psi$;

绕 x 轴旋转量: $\underline{\varphi} = -\varphi$;

x, y, z 轴位移量: $\underline{x} = -\frac{x_{o_1} + x_{o_2}}{2} + L(c\varphi - 1), \underline{y} = -y_{o_1} + Ls\varphi, \underline{z} = -\frac{z_{o_1} + z_{o_2}}{2}$ 。

4 仿真验证

在 OpenGL 靶定位仿真环境下, 将靶丸设置在各相机可视范围内的任意位姿状态, 对上述靶丸特征识别、空间位姿计算、补偿式姿态调整等算法进行调试和验证。

图 10 为调整前靶的位姿, 图 10(a) 为靶当前的位姿图, 图 10(b)~(d) 分别为 CCD-A、CCD-B 和 CCD-C 对靶丸的仿真图像, 图 10(e) 和 (f) 为利用模板匹配法提取到的上端面靶孔中心点和下端面靶孔中心点的位置, 图 10(g) 为提取的腔靶上锥形底部和圆柱面相交处转折角的图像特征的中心位置。由图 (b)、(c) 中孔洞内的月牙部分为腔靶的孔壁投射成像可知, 该靶丸在 CCD-A 与 CCD-B 的轴线方向上有倾斜角度, 该角度偏差与靶丸的水平位移偏差共同影响图 10(e)、(f) 中靶孔中心点的图像位置。需将靶孔中心点的图像位置调至图像中心处, 这时靶丸姿态将实现准直, 水平位移也无偏差。图 10(g) 中所提取的靶丸侧面特征点目前位于图像中心上方, 表明靶丸在竖直方向上也存在位移偏差, 需将该特征点的位置调至图像中心处。

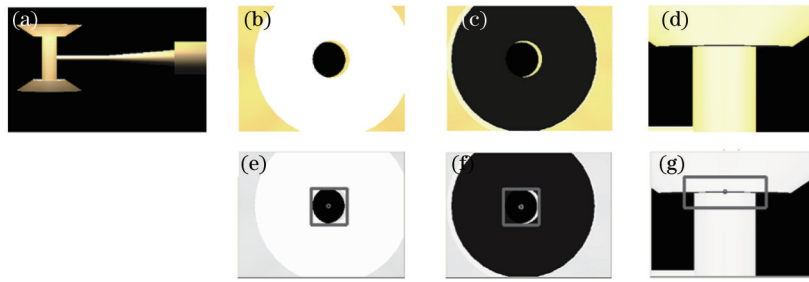


图 10 调整前靶丸的空间位姿及 CCD 图像。(a) 靶丸的空间位置;(b) CCD-A 的仿真图像;(c) CCD-B 的仿真图像;(d) CCD-C 的仿真图像;(e) CCD-A 的匹配结果;(f) CCD-B 的匹配结果;(g) CCD-C 的匹配结果

Fig.10 Target pose before adjustment and CCD simulation image. (a) Target pose; (b) simulation image of CCD-A; (c) simulation image of CCD-B; (d) simulation image of CCD-C; (e) matching result of CCD-A; (f) matching result of CCD-B; (g) matching result of CCD-C

按照前文归纳的靶定位系统位姿调整流程依次对靶丸进行特征检测、姿态角计算和位置偏移的补偿量计算,最后确定位姿调整量对靶丸进行定位调整。为了便于分析,实验中先对靶丸的姿态进行单自由度逐一调整,调至零位后再对靶丸的位置进行三自由度同时调整。表 1 为每次调整后靶丸的位姿测量值。

表 1 位姿调整仿真实验

Table 1 Pose adjustment simulation

Number	$x / \mu\text{m}$	$y / \mu\text{m}$	$z / \mu\text{m}$	$\psi / (^{\circ})$	$\varphi / (^{\circ})$
0	197.06	301.47	196.18	1.934	0.348
1	197.06	301.47	195.59	0.090	0.348
2	197.06	301.47	195.42	0.000	0.348
3	196.87	302.71	196.18	0.000	0.025
4	196.72	302.84	196.18	0.000	0.008
5	196.68	302.96	196.18	0.000	0.000
6	4.12	-2.94	4.41	0.000	0.000
7	0.59	0.00	-0.18	0.000	0.000
8	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000

表 1 中第一行数据是调整前靶丸的位移与姿态偏差,首先对姿态角 ψ 进行调整,经过两次调整后偏差为零。在此过程中,靶丸的位置几乎没有受到姿态变化的影响,说明位移补偿算法正确。姿态角 φ 经过三次调整后偏差为零;位移 x, y, z 进行同时调整,三次调整后偏差均为零。

调整后靶丸的空间位姿及各 CCD 图像的靶丸特征如图 11 所示。靶孔中心点与靶丸侧面特征点的图像位置均已调至图像中心处,表明靶丸姿态实现准直,位置也无偏差。

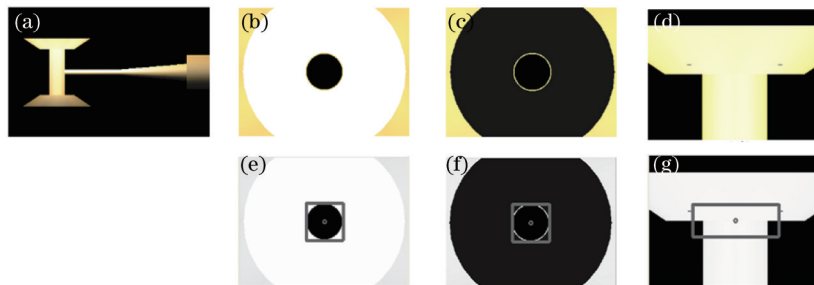


图 11 调整后靶丸的空间位姿及 CCD 图像。(a) 靶丸的空间位置;(b) CCD-A 的仿真图像;(c) CCD-B 的仿真图像;(d) CCD-C 的仿真图像;(e) CCD-A 的匹配结果;(f) CCD-B 的匹配结果;(g) CCD-C 的匹配结果

Fig. 11 Target pose after adjustment and CCD simulation image. (a) Target pose; (b) simulation image of CCD-A; (c) simulation image of CCD-B; (d) simulation image of CCD-C; (e) matching result of CCD-A; (f) matching result of CCD-B; (g) matching result of CCD-C

仿真结果表明,通过 3-CCD 相机对目标靶丸的位姿检测,可以将靶丸从任意位姿调至零位,验证了所

提出的检测与定位算法的正确性与应用于实际工程的可行性。

5 结 论

使用 C++builder 6.0 作为软件开发平台,基于 OpenGL 图形编程实现了靶定位系统的仿真。在该环境下对靶丸特征识别、空间位姿计算、补偿式位姿调整等算法进行了验证。结果表明,通过相机监测可实现对靶丸位姿的逐步调整,验证了该检测与定位算法应用于实际工程的可行性。

参 考 文 献

- 1 M Kunioki. Status and future prospects of laser fusion and high power laser applications[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244(1): 012005.
- 2 J D Lindl, L J Atherton, P A Amednt, *et al.*. Progress towards ignition on the national Ignition facility[J]. Nuclear Fusion, 2011, 51(9): 094024.
- 3 Zhao Dongfeng, Hua Neng, Zhang Ya'nan, *et al.*. Development of final optics assembly for additional beam in 'Shenguang-II' laser facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(2): 245-248.
赵东峰, 华 能, 章亚男, 等. "神光-II"装置第九路靶场终端光学组件的研制[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(2): 245-248.
- 4 Liu Guodong, Wu Huilan, Hu Tao, *et al.*. Inertial confinement fusion experiment target gesture estimation technology[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 800-803.
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.
- 5 Feng Bin, Chen Fengdong, Li Fuquan, *et al.*. A novel inertial-confinement-fusion targets position on-line monitoring method[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 3035-3038.
冯 斌, 陈凤东, 李富全, 等. 一种新的惯性约束聚变靶在线监测技术[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 3035-3038.
- 6 Su Guozhong, Zheng Shunyi, Zheng Jianqing, *et al.*. How to relate the OpenGL imaging process with exterior and interior parameters of photogrammetry[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(4): 540-544.
苏国中, 郑顺义, 张剑清, 等. OpenGL 模拟摄影测量方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 540-544.
- 7 Zhang Zuxun, Su Guozhong, Zheng Shunyi, *et al.*. Relating OpenGL imaging process with exterior and interior parameters of photogrammetry[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(7): 570-574.
张祖勋, 苏国中, 郑顺义, 等. OpenGL 成像机理及其与摄影测量方位元素的相关分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(7): 570-574.
- 8 Zhang Ya'nan, Chen Xu, Song Wei, *et al.*. Visual measurement of micro-target pose in ICF experiment[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 39(5): 18-24.
章亚男, 陈 旭, 宋 薇, 等. ICF 实验中靶位姿的视觉检测[J]. 光电工程, 2012, 39(5): 18-24.
- 9 You Lin, Xiu Chunbo. Target recognition algorithm based on template matching[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(s1): 737-740.
由 霖, 修春波. 基于模式匹配的目标识别算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(s1): 737-740.
- 10 H Schweitzer, R Deng, R F Anderson. A dual-bound algorithm for very fast and exact template matching[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(3): 459-470.
- 11 Xiong Youlun. Fundamentals of Robot Techniques[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1996. 15-30.
熊有伦. 机器人技术基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996. 15-30.