

文章编号 1004-924X(2014)10-2779-08

高能电子束冲击实验用靶丝精确复位系统

张 元*, 钟 兴, 徐 振, 金 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:考虑高能电子束冲击实验中韧致辐射靶丝对精确复位的需求,设计了用于靶丝精确复位的辅助系统。首先,根据双目视觉原理推导了用于复位系统的重要公式;然后,根据实际使用的工况,设计了靶丝精确复位系统方案,包括硬件指标论证和软件算法设计。最后,在模拟真实工况环境下,搭建了实验平台,对系统的复位精度误差进行了测算。测试结果显示所研制的复位系统的复位精度误差为 2%。半实物仿真实验结果显示,这套复位系统实现了高能电子束冲击实验中对韧致辐射靶丝的精确复位。由于研究对象是复位系统,而非定位系统,不需要进行标定,因此不存在标定误差,其研制成功保证了高能电子束冲击实验的可靠性。

关 键 词:高能电子束冲击;韧致辐射靶丝;双目立体视觉;复位系统

中图分类号:TP242.6;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2779

Target filament accurate restoring system in high-energetic particle burst experiment

ZHANG Yuan*, ZHONG Xing, XU Zhen, JIN Guang

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangyuanfresh@126.com

Abstract: In consideration of the demand of bremsstrahlung conversion target filament for accurate restoring in high-energetic particle burst experiments, a service device for target filament accurate restoring was designed. First, some key formulas of restoring system were derived according to the stereoscopic theory. Then, a scheme for design of an accurate restoring system of the micro target filament was proposed according to the real application. Finally, an experiment platform to simulate real conditions was established to test the restoring accuracy error of this system. The experiment results indicate that the accuracy error of this restoring system is 2%. The semi-physical simulation experiment illustrates that this restoring system reaches the accurate restoring of the bremsstrahlung conversion target filament in the high-energetic particle burst experiments. As the research object is a restoring system rather than a positioning system, it do not need to be calibrated, so there is no calibration error. The target filament accurate restoring system developed ensures the reliability of high energy e-

收稿日期:2013-12-03;修订日期:2014-01-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA121502)

electron beam burst experiments.

Key words: high-energetic particle burst; bremsstrahlung target filament; binocular stereovision; restoring system

1 引言

多脉冲的直线感应加速器能够产生多个连续的、能量为 10~20 MeV、流强大于 2 kA、脉宽 (FWHM) 约为 60 ns 的脉冲电子束。电子束与韧致辐射靶作用后能够产生高剂量的、连续多脉冲 X 射线。该韧致辐射靶被称为 X 光转换靶。单脉冲的电子束与韧致辐射靶作用产生 X 光时, 一部分电子束能量被沉积在靶内, 这部分能量会烧蚀破坏靶材料, 甚至直接将其烧穿, 因此韧致辐射靶经过一次电子束轰击后就耗尽了。为了保证再次做实验时靶丝能够精确复位, 需要高精度的复位系统来辅助实现; 而要实现目标的精确复位, 需要获取目标所在区域的三维场景信息。根据采用照明方式的不同, 测量过程分为主动式方法和被动式方法^[1]。主动式方法是指向被测物体发射可控制的光束, 然后拍摄光束在物体表面上形成的图像, 再通过几何关系计算出被测物体距离的方法, 它主要有结构光方法和激光自动聚焦法两类; 被动式方法是指不向被测物体发射可控制的光束, 而是根据直接拍摄的物体图像进行距离测量的方法, 它主要分为双目视觉、三目视觉、单目视觉等方法。相对主动式方法, 被动式方法的系统构成简单, 受环境限制小, 其中双目视觉方法是最主要的也是使用最广泛的方法。

双目视觉技术的关键是传感器的标定。近几年国内外学者在传感器的标定算法方面开展了一系列研究。汤勇等人提出了一种多摄像机下的高精度光学头部位置定位系统, 其静态位置误差为 $0.051 \text{ cm}^{[2]}$ 。文献[3-10]在提高测量精度和减小标定误差方面进行了深入研究。但是, 这些文章缺少对于系统硬件实现方案的详细论述, 文献[5]虽然给出了系统硬件的简单参数, 但并没有给出实际测量结果; 文献[11]利用双目视觉原理设计了一套用于观察快速运动目标的高速记录系统, 但并未对定位误差展开讨论。

本文在研究双目视觉技术原理的基础上, 按照高能粒子束冲击实验对直径为 0.1 mm、长度

为 1 mm 的靶丝复位精度 ($10 \mu\text{m}$) 的要求, 设计了靶丝精确复位系统, 包括硬件指标论证和软件算法设计, 并实验验证了该方案的复位精确度。由于本文的应用背景与上述文章不同, 本文的研究对象是复位系统, 而非定位系统, 因此不需要进行标定, 也不存在标定误差。

2 复位系统原理

2.1 双目视觉基本原理

立体视觉的基本原理与人类双目视觉的立体感知过程类似, 即从 2 个或 2 个以上的视点观察同一物体得到不同视角下的感知图像, 通过分析不同图像中同一像点的视差来获取物体表面的三维形状信息^[12]。根据使用传感器的数量, 立体视觉又分为多目立体视觉和双目立体视觉, 双目立体视觉三维坐标测量的数学模型和相应的坐标系如图 1 所示^[13]。

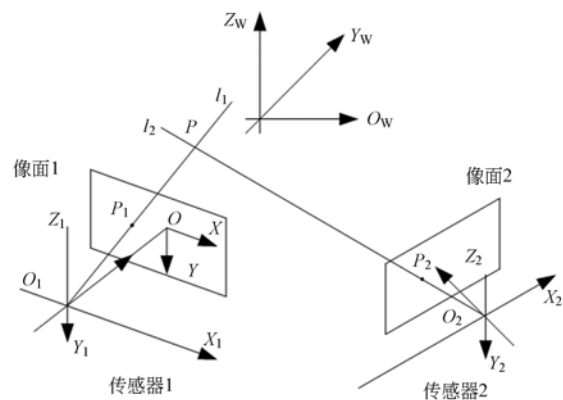


图 1 双目立体视觉模型
Fig. 1 Binocular stereovision model

其中, $O_w X_w Y_w Z_w$ 为物方世界坐标系; $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 为左传感器坐标系; $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 为右传感器坐标系; OXY 为像平面坐标系。物方点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 在左右传感器中对应的像点分别为 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$, 直线 $O_1 P_1$ 和 $O_2 P_2$ 相交于 P 点。

对两传感器进行标定, 可以得到左传感器坐

标系 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 与右传感器坐标系 $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 的相对关系^[13]:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + \mathbf{t}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ 为右传感器坐标系对左传

感器坐标系的旋转矩阵, $\mathbf{t} = [t_x t_y t_z]^T$ 为右传感器坐标系对左传感器坐标系的平移矩阵。在已知像点 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 和坐标系 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{t}$ 的条件下即可计算 P 点的三维坐标 X_w, Y_w, Z_w :

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}, \quad (2)$$

其中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_1 \\ 0 & 1 & -y_1 \\ r_1 - r_7 x_2 & r_2 - r_8 x_2 & r_3 - r_9 x_2 \\ r_4 - r_7 y_2 & r_5 - r_8 y_2 & r_6 - r_9 y_2 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_2 t_z - t_x \\ y_2 t_z - t_y \end{bmatrix}.$$

2.2 复位系统的工作原理

在本系统中,定义第一次放置的靶丝空间位置坐标为 X_{w1}, Y_{w1}, Z_{w1} ,第二次放置的靶丝空间位置坐标为 X_{w2}, Y_{w2}, Z_{w2} ,为了使 2 次靶丝位置重合,则要求:

$$\begin{bmatrix} X_{w1} \\ Y_{w1} \\ Z_{w1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{w2} \\ Y_{w2} \\ Z_{w2} \end{bmatrix} = 0, \quad (3)$$

由式(2)得到

$$(\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1} \mathbf{A}_1^T \mathbf{b}_1 - (\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \mathbf{b}_2 = 0, \quad (4)$$

其中: $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_{11} \\ 0 & 1 & -y_{11} \\ r_1 - r_7 x_{21} & r_2 - r_8 x_{21} & r_3 - r_9 x_{21} \\ r_4 - r_7 y_{21} & r_5 - r_8 y_{21} & r_6 - r_9 y_{21} \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_{12} \\ 0 & 1 & -y_{12} \\ r_1 - r_7 x_{22} & r_2 - r_8 x_{22} & r_3 - r_9 x_{22} \\ r_4 - r_7 y_{22} & r_5 - r_8 y_{22} & r_6 - r_9 y_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_{21} t_z - t_x \\ y_{21} t_z - t_y \end{bmatrix}, \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_{22} t_z - t_x \\ y_{22} t_z - t_y \end{bmatrix}.$$

对于公式(4),其中一组解为:

$$\begin{bmatrix} x_{11} - x_{12} \\ y_{11} - y_{12} \\ x_{21} - x_{22} \\ y_{21} - y_{22} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

从上面的推导可知,要实现靶丝的精确复位,只需要使 P 点对 2 个传感器所成像点 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 的坐标相同,而不需要知道公式(1)中的旋转矩阵 $\mathbf{R}$ 和平移矩阵 $\mathbf{t}$ 的具体形式,也即不需要对 2 个传感器的坐标系进行标定。因此,从工作原理上,该复位系统减少了双目立体视觉系统中最繁琐也是对精度影响最大的标定步骤。

3 方案设计

3.1 结构布局设计

需要复位的靶丝位于截面为八边形的真空腔的中轴处,图 2 为腔体的横截面示意图。2 个传感器通过在八边形斜上方开的 2 个观察窗口进行观测。每个传感器都由显微镜头和 CCD 器件组成,这 2 个传感器的光轴夹角为 90° 。建立如图 2 所示的 xyz 坐标系, y 轴垂直纸面向外。则传感器 1 的光轴与 z 轴成 -45° 角,传感器 2 与 z 轴成 45° 角。

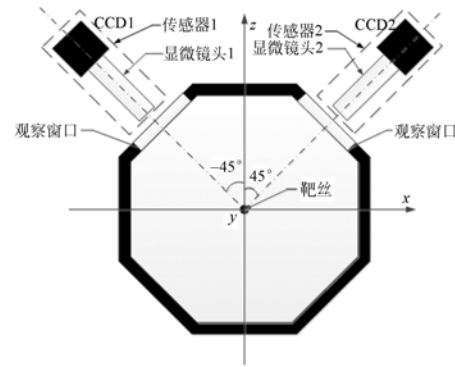


图 2 复位系统的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of restoring system

建立传感器 1 焦面、传感器 2 焦面与靶丝的坐标模型,如图 3 所示。传感器 1 焦面坐标系的 $x_1 y_1$ 平面与传感器 1 的焦面重合, z_1 轴与传感器 1 的光轴重合;传感器 2 焦面坐标系的 $x_2 y_2$ 平面与传感器 2 的焦面重合, z_2 轴与传感器 2 的光轴重合。

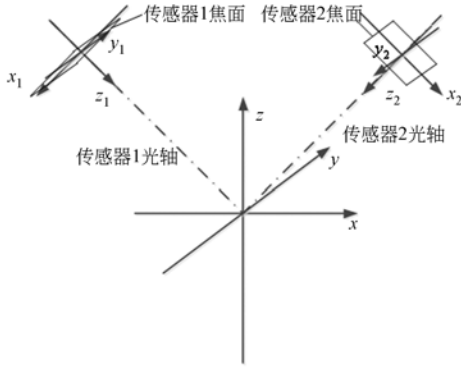


图 3 传感器焦面坐标系模型

Fig. 3 Coordinates model of focal planes of sensors

假设传感器 1 显微物镜的放大倍率为 β_1 , 传感器 2 显微物镜的放大倍率为 β_2 , 按照图 3 所示的坐标关系, 则 xyz 坐标系中 P 点的坐标 (x, y, z) 与 2 传感器焦面像点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 的关系如下:

$$\begin{cases} x_1 = \beta_1 x / \cos 45^\circ + \beta_1 z / \sin 45^\circ \\ y_1 = \beta_1 y \\ x_2 = \beta_2 x / \cos 45^\circ + \beta_2 z / \sin 45^\circ \\ y_2 = -\beta_2 y \end{cases} \quad (6)$$

对公式(6)微分得到:

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \sqrt{2} \beta_1 \Delta x + \sqrt{2} \beta_1 \Delta z \\ \Delta y_1 = \beta_1 \Delta y \\ \Delta x_2 = \sqrt{2} \beta_2 \Delta x + \sqrt{2} \beta_2 \Delta z \\ \Delta y_2 = -\beta_2 \Delta y \end{cases} \quad (7)$$

从公式(7)可以知道,若 P 点坐标 $P(x, y, z)$ 变为 $P'(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$, 则传感器 1 和传感器 2 的坐标相应变为 $P_1(x_1 + \Delta x_1, y_1 + \Delta y_1)$ 和 $P_2(x_2 + \Delta x_2, y_2 + \Delta y_2)$ 。

3.2 传感器系统设计

复位系统的工作对象是直径为 0.1 mm, 长约 1 mm 的靶丝材料;使用的 CCD 的像元大小 a 为 $5.5 \mu\text{m}$, 像元数为 1920×1080 , 型号为 AVT GE1910。为了使靶丝在 CCD 焦面上的像所占的

像元数多一些,要在 CCD 前面连接显微物镜,从而使靶丝放大成像在 CCD 焦面上。窗口玻璃距离靶室中轴线 300 mm, 因此要求所使用的显微物镜要在较长前工作距离的情况下具有较大的放大倍数。

显微物镜的最小分辨距公式如下^[14]:

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (8)$$

式中: σ 代表物面最小空间分辨率; λ 代表系统光谱中心波长; NA 代表系统的数值孔径。

将 $\sigma = 5.5$, $\lambda = 0.55$, 代入公式(6)中, 得到 $NA = 0.061$ 。

两传感器均选用 Navitar Zoom 12× 系列的显微镜头, 在此工作距下, 它们的放大倍率约为 3, 数值孔径为 0.006。按照公式(8), 数值孔径 $NA = 0.006$ 时, 光学系统的最小分辨距 $\sigma = 55 \mu\text{m}$, 其是 CCD 像元的 10 倍, 而且也不能达到任务所要求的 $10 \mu\text{m}$ 的复位精度, 因此必须借助图像处理来实现。图像处理的目的是获得靶丝的质心。采用 Sobel 算子得到靶丝像的边缘坐标^[15]。根据这些坐标, 可利用质心算法求出靶丝像的质心位置。

通过一阶矩方法计算出光斑质心^[16], 从而确定光斑质心的精确位置, 光斑质心 (x, y) 的坐标计算公式为:

$$x = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N x_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}} \quad (9)$$

$$y = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N y_{nm} I_{nm}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{nm}} \quad (10)$$

式中: x_{nm} 、 y_{nm} 分别为 (m, n) 处像素的 x 坐标和 y 坐标, I_{nm} 是位于 (m, n) 处像素的灰度值。

采用靶丝像的质心作为复位精度的判别标准有两方面好处: 其一, 质心算法对目标位置变化的敏感性比对目标本身形状变化的要强, 因此如果 2 次实验中所用靶丝存在微小形状差异, 对其图像质心位置判读影响不大; 其二, 传感器的光学系统存在微小离焦的情况下, 不影响靶丝位置的判断。不足之处在于, 这种算法对图像的灰度变化较为敏感。为了使测量误差尽量小, 需要保证多次测量中光照环境稳定, 同时, 如果靶丝发生绕图

像质心(基本在靶丝中段)的空间旋转运动,该算法则无法判别。在本应用中,由于靶丝的一端由夹持机构固定,因此不会发生绕质心的空间旋转。

图 4 为复位系统的结构示意图,2 个传感器的调整机构通过窗口法兰固定在靶室腔体上。调整机构不仅可以使传感器进行小角度调节,使传感器光轴对准靶丝位置,而且还具备锁死功能,可以保证实验过程中,2 个传感器的相对位置不发生变化。

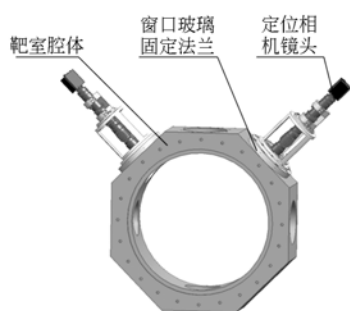


图 4 复位系统结构设计图

Fig. 4 Structural design chart of restoring system

3.3 照明系统设计

由于真空腔内是黑暗环境,而靶丝本身是不发光体,因此必须有光源提供照明,又因为靶丝材料的反射率并不高,只有 0.6 左右,因此要求照明光源具有较大功率。

本文选用最大功率为 100 W 的可调节卤素灯作为照明光源,卤素光源通过光纤发出光。光纤发光强度的计算公式如下:

$$I = \frac{\phi}{\omega}, \quad (11)$$

式中: ϕ 代表光源光通量; ω 表示光纤发散角。光纤的出射发散角 ω 为 $\pi/6$,经过换算可知,卤素光源的光通量 ϕ 约为 2 000 lm,代入式(11),可得到光纤发光强度 $I=3\,822\text{ cd}$ 。

靶丝目标处的照度如下所示:

$$E = \frac{I \cos i}{R^2}. \quad (12)$$

将 $i=45^\circ$, $R=0.3\text{ m}$ 代入式(12)可得, $E=30\,000\text{ lx}$ 。

光亮度与光照度转换公式如下:

$$L = \frac{\rho E}{\pi}, \quad (13)$$

式中:反射率 $\rho=0.6$,由式(13)计算得到靶丝目

标的光亮度 $L=5\,733\text{ lm}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 。

传感器信噪比估算公式:

$$\text{SNR} = 20 \lg \left(\frac{100\pi NA^2}{N_{\text{camera}}} R \tau t_{\text{exp}} L \right), \quad (14)$$

式中: N_{camera} 表示 CCD 的总噪声值; NA 表示光学系统的数值孔径; R 为 CCD 器件响应; t_{exp} 为曝光时间; τ 为光学系统透过率; L 为系统接收到的目标靶丝光谱幅亮度。

根据 CCD 的参数,取 $N_{\text{camera}}=1.2\text{ mV}$, $NA=0.006$, $R=400\text{ V} \cdot \text{cm}^2 \cdot (\mu\text{J})^{-1}$, $\tau=0.7$, $L=5\,733\text{ lm}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$, $t_{\text{exp}}=1.5\text{ ms}$,代入式(14)中,计算得到传感器的信噪比 $\text{SNR}=69.06\text{ dB}$ 。

通过以上计算,预估得到传感器系统的最高信噪比为 69.06 dB,这是很高的,若将光源功率调小,则可以使系统的 SNR 调整为 20~40 dB,从而能够满足系统照明的需要。

4 复位精度实验

4.1 实验结果

为了验证系统的复位精度,搭建了实验平台,如图 5 所示。实验平台由模拟工况工装、三维微位移平台、以及目标靶丝组成。

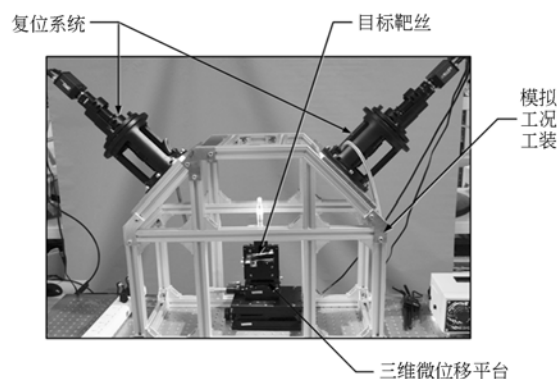


图 5 靶丝精确复位系统实验平台

Fig. 5 Experiment platform of target filament accurate restoring system

根据需要,编制了相应的程序,其利用质心算法提取出靶丝的像面坐标。由 2.2 节的论述可知,只要靶丝的像面坐标不发生变化,靶丝的位置就不会发生变化,因此,软件中只需给出像面坐标即可。

表 1 靶丝像坐标原始数据表

Tab. 1 Original data table for target filament coordinates

次数	(x_{10}, y_{10})	(x_{20}, y_{20})	(x_{12}, y_{12})	(x_{22}, y_{22})
X 方	1 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(986, 522)
向移	2 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 025, 446)	(985, 522)
动量	3 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
	4 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(986, 522)
	5 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
Y 方	1 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
向移	2 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 521)
动量	3 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 025, 446)	(986, 522)
	4 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
	5 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
Z 方	1 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 522)
向移	2 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 025, 446)	(986, 522)
动量	3 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(985, 521)
	4 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(986, 522)
	5 (1 024, 446)	(985, 522)	(1 024, 446)	(986, 522)

系统重复定位精度的检测方法如下:

a) 记录靶丝起始位置, 分别记录传感器 1 和传感器 2 中靶丝像的质心位置坐标 (x_{10}, y_{10}) 和 (x_{20}, y_{20}) ;

b) 利用三维微位移平台将靶丝沿 x 正方向移动 $10 \mu\text{m}$, 其他 2 个方向不动, 再次记录传感器 1 和传感器 2 中的靶丝质心位置坐标 (x_{11}, y_{11}) 和 (x_{21}, y_{21}) ;

c) 利用三维微位移平台使靶丝沿 x 负方向移动 $10 \mu\text{m}$, 其他 2 个方向不动, 再次记录 2 个传感器中的靶丝质心像的位置 (x_{12}, y_{12}) 和 (x_{22}, y_{22}) ;

d) 比较 (x_{12}, y_{12}) 、 (x_{22}, y_{22}) 和 (x_{10}, y_{10}) 、 (x_{20}, y_{20}) 的差别, 用坐标差值乘以像元大小, 再除以系统的放大倍率, 即得到 x 方向的重复定位精度;

e) 在 y 方向重复步骤 a)~步骤 d), 得到 y 方向的重复定位精度;

f) 在 z 方向重复步骤 a)~步骤 d), 得到 z 方向的重复定位精度。

g) 重复 5 次步骤 a)~步骤 f), 取平均值, 得到 x 、 y 、 z 3 个方向的重复定位精度。

按照上述方法, 对系统的重复定位精度进行测量, 得到的原始数据如表 1 所示。计算 (x_{12}, y_{12}) 和 (x_{10}, y_{10}) 之间的差异 r_1 以及 (x_{22}, y_{22}) 与 (x_{20}, y_{20}) 之间的差异 r_2 , 计算公式分别如式(7)



图 6 复位系统的软件工作界面

Fig. 6 Software interface of restoring system

和式(8)所示:

$$r_1 = \frac{a}{\beta_1} \sqrt{(x_{12} - x_{10})^2 + (y_{12} - y_{10})^2}, \quad (11)$$

$$r_2 = \frac{a}{\beta_2} \sqrt{(x_{22} - x_{20})^2 + (y_{22} - y_{20})^2}. \quad (12)$$

将表 1 的数据代入式(5)和式(6)得到的计算结果如表 2 所示。

表 2 系统复位精度计算结果

Tab. 2 Calculation results of restoring precision (μm)

Test No.	r_1	r_2
X 方	1 0	1.83
向移	2 1.83	0
动量	3 0	0
	4 0	1.83
	5 0	0
Y 方	1 0	0
向移	2 0	1.83
动量	3 1.83	1.83
	4 0	0
	5 0	0
Z 方	1 0	0
向移	2 1.83	1.83
动量	3 0	1.83
	4 0	1.83
	5 0	1.83

由表 2 可知, 系统的复位精度在 $1.83 \mu\text{m}$ 以内, 而靶丝的芯径为 $100 \mu\text{m}$, 因此系统的复位精度小于 2%。

4.2 误差分析

由公式(6)、(7)、(9)、(10)可知, 实验误差主要来源于以下两方面:

其一, 光源亮度的稳定性。因为复位系统通过检测靶丝的反射像来判断靶丝的空间位置, 而靶丝的反射亮度决定了传感器上形成的图像灰度值, 即公式(9)、(10)中的 I_{mn} 。因此, 若要减小靶

丝的复位误差,应尽量保证靶丝的反射率基本不变,且照明光源的亮度不变。

其二,工装的牢固性和稳定性。传感器通过法兰盘固定在真空腔体上,传感器相对于靶丝的位置决定了系统的坐标,表现为公式(9)、(10)中的 x_m, y_m 。因此,测量时应保证传感器和法兰盘,以及法兰盘与真空腔之间的连接牢固、稳定,从而降低复位误差。

5 结 论

本文对高能电子束冲击实验中微小初致辐射

靶丝的精确复位系统进行了研究,从双目定位的基本原理出发,推导了复位系统的理论依据,并依据这一理论依据设计并研制了用于微小靶丝复位的高能电子束冲击实验的辅助系统。通过模拟实际工况,对复位系统的复位精度误差进行了测量,测量结果显示复位误差小于2%。

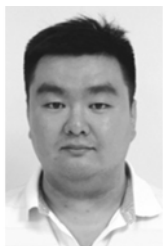
本文所论述复位系统作为高能粒子束冲击实验的辅助设备,若其研制成功将为我国的核聚变前沿领域的研究提供保障,对推动核工业在国防、能源领域的发展具有十分积极意义。

参考文献:

- [1] 祝世平, 强锡富. 工件特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 192-197.
ZHU SH P, QIANG X F. Analysis of 3-D coordinate vision measuring methods with feature points on workpiece [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 192-197. (in Chinese)
- [2] 汤勇, 顾宏斌, 张丛喆. 高精度光学头部位置定位系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 488-494.
TANG Y, GU H B, ZHANG C ZH. High accurate optical head pose tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 488-494. (in Chinese)
- [3] ZHANG ZH Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, 1999, 11(1): 666-673.
- [4] 李瑞峰, 李庆喜. 机器人双目视觉系统的标定与定位算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11): 1719-1722.
LI R F, LI Q X. Calculation of the position between mobile robot and object based on two CCD cameras [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2007, 39(11): 1719-1722. (in Chinese)
- [5] 宋丽梅. 双目立体机器视觉检测系统及其应用[J]. 西南科技大学学报, 2006, 21(1): 30-34.
SONG L M. Design and application of vision measurement system based on binocular stereo [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2006, 21(1): 30-34. (in Chinese)
- [6] 张庆君, 胡修林, 叶斌, 等. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 156-161.
ZHANG Q J, HU X L, YE B, *et al.*. Binocular vision-based relative position and attitude determination between spacecrafts [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(1): 156-161. (in Chinese)
- [7] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)
- [8] 韩建栋, 吕乃光, 王锋, 等. 采用光学定位跟踪技术的三维数据拼接方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 45-51.
HAN J D, LV N G, WANG F, *et al.*. 3D data registration method based on optical location tracking technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 45-51. (in Chinese)
- [9] 陈刚, 姚英学. 多视点大空间三维坐标数据归一化方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1309-1314.
CHEN G, YAO Y X. 3D datum mosaic method of multi view and large scale based on optical coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1309-1314. (in Chinese)
- [10] JIN T, JIA H ZH. Evaluating 3D position and velocity of subject in parabolic flight experiment by use of the binocular stereo vision measurement [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 601-605.
- [11] WANG Y, ZHANG G J. A novel virtual four-ocular stereo vision system based on single camera for measuring insect motion parameters [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(11): 679-682.
- [12] OZTURKAO, HALICIU, ULUSOYI, *et al.*. 3D

- face reconstruction using stereo images and structured light [C]. *IEEE 16th Signal Processing and Communications Applications Conference, Didim, Turkey*, 2008, 1-2:878-881.
- [13] 刘建伟, 梁晋. 大尺寸工业视觉测量系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):126-133.
- LIU J W, LIANG J. Industrial vision measuring system for large dimension work-pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):126-134. (in Chinese)
- [14] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学像差光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2004.
- LI X T, CENG ZH F. *Geometrical Optics Aberration Optical Design*[M]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2004. (in Chinese)
- [15] 赵见川, 邵俊峰. 航母中线电视监视系统的设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(6): 625-629.
- ZHAO J CH, SHAO J F. Design of centerline television surveillance system for aircraft landing on carriers[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):625-629. (in Chinese)
- [16] 夏爱利, 马彩文. 基于图像处理技术的光斑质心高精度测量[J]. *光电子激光*, 2011, 22(10):1542-1545.
- XIA A L, MA C W. Measurement of focal spot centroid based on image processing [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2011, 22(10): 1542-1545. (in Chinese)

作者简介:



张元(1985—),男,吉林市人,硕士,助理研究员,2007年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学系统设计及检测的研究工作。E-mail: zhangyuanfresh@126.com



钟兴(1982—),男,四川自贡人,博士,副研究员,2004年于吉林大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得工学博士学位,主要从事光学遥感技术、光学测量与光学导航设备方面的研究工作。E-mail: ciomper@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)