

doi: 10.3788/gzxb20144306.0612002

神光Ⅲ装置用搭载平台高准确度自动瞄准方法

王维, 王拯洲, 何俊华, 张敏, 韦明智, 闫亚东

(中科院西安光学精密机械研究所, 西安 710072)

摘 要:为了实现搭载平台对打靶目标的高准确度定位瞄准,提出了一种基于视觉伺服的瞄准方法.定义视觉系统中的脱靶量与投影矩阵,并用投影矩阵计算脱靶量,使得计算值接近于真值;再使用三自由度混联机构运动模型,提高姿态调节准确度;最后,通过投影矩阵与运动模型优化视觉伺服策略,使得整个瞄准过程得到很大简化,不需较准视觉系统即可进行自动瞄准.将搭载平台安装到神光装置上进行自动瞄准准确度检测,得到其瞄准准确度为: X 方向 $11\ \mu\text{m}$, Y 方向 $12\ \mu\text{m}$, Z 方向 $14\ \mu\text{m}$.搭载条纹相机进行激光打靶考核验证,得到了物理实验过程的完整数据,表明该瞄准方法满足工程使用要求.

关键词:搭载平台;视觉伺服;投影矩阵;运动模型

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)06-0612002-5

A Method for Shenguang III Diagnostic Instrument Manipulator High Precision Automatic Aiming

WANG Wei, WANG Zheng-zhou, HE Jun-hua, ZHANG Min, WEI Ming-zhi, YAN Ya-dong
(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to realize diagnostic instrument manipulator precise targeting, an aiming method based on visual servoing was proposed. Defined the target deviation and projection matrix in the vision system, the calculated target deviation value computed by projection matrix was closed to the true value. Using a 3-DOF hybrid mechanism motion mode, the motion accuracy was promoted. With optimizing visual servoing strategy based on projection matrix and motion mode, the total targeting work was greatly simplified, making the vision system calibration unnecessary. Automatic positioning tests indicate that pointing accuracy is $11\ \mu\text{m}$ in X direction and $12\ \mu\text{m}$ in Y direction. Radical positioning accuracy is $14\ \mu\text{m}$. Laser shot tests with streak camera show that the automatic aiming method can satisfy the requirements of project.

Key words: Diagnostic instrument manipulator; Visual servoing; Projection matrix; Motion mode

OCIS Codes: 120.0120; 150.0150; 110.0110; 330.1880

0 引言

在激光惯性约束聚变实验(Inertial Confinement Fusion, ICF)中,使用了包括光学、X射线、中子在内的许多物理诊断设备.为了获取准确的实验数据,诊断设备必须能够精确、可靠地对打靶目标进行瞄准.物理诊断设备本身没有精确瞄准功能,需要搭载平台(Diagnostic Instrument Manipulator, DIM)搭载送入球型靶室,由 DIM 进行精确定位瞄准.美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)上的 DIM 针对

不同诊断设备提出了多种瞄准方法,其中基于反向端口对准的坐标映射瞄准方法,其瞄准准确度优于 $25\ \mu\text{m}$ ^[1-4].在 DIM 系统升级优化中,通过改进径向瞄准运动系统,以提高瞄准稳定性及安全性^[5].神光原型装置上,搭载平台采用 2 台高灵敏度相机,使用了基于视觉-移动控制方式的瞄准方法,瞄准时,需要人工判读靶点中心,并输入控制量.在神光Ⅲ主机中,搭载平台采用多 CCD 视觉系统和三自由度混联机构,实现了高准确度自动瞄准.视觉系统中的粗瞄准 CCD 引导诊断设备接近打靶目标,当打靶目标进入到精瞄准 CCD

基金项目:国家自然科学基金(No. 40805013)资助

第一作者:王维(1980—),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为机器视觉与运动控制. Email: wangweii@opt. ac. cn

收稿日期:2013-09-11;录用日期:2013-12-17

<http://www.photon.ac.cn>

的视场内时,搭载平台自动判读靶点,进行自动瞄准.

本文介绍了一种基于双目视觉伺服的搭载平台三自由度精确定位瞄准法.该方法将基于图像伺服控制中的雅可比矩阵计算问题简化为脱靶量的线性估算问题,基于运动模型,瞄准过程仅需一次离线目标标定即可,相比于常用视觉伺服结构,不需校准视觉系统,简化了视觉伺服策略.另外,伺服过程中,在脱靶量测量与运动控制算法间,增加一个中间层,生成微动步数,保证了瞄准过程中搭载平台运动的稳定,同时提高了瞄准准确度.

1 视觉伺服瞄准法

如图 1 所示,搭载平台瞄准系统由三自由度混联机构和多 CCD 视觉系统组成.其中三自由度混联机构由径向伸缩机构与双脚万向调节机构组成,完成诊断设备在径向方向上的伸缩与指向方向上的摆动与俯仰.多 CCD 视觉系统安装在诊断设备前端与诊断设备一起放置到径向伸缩机构上,当打靶目标进入到精瞄准 CCD 视场内时,搭载平台进行自动瞄准.

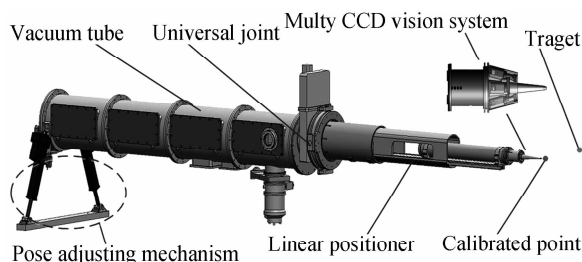
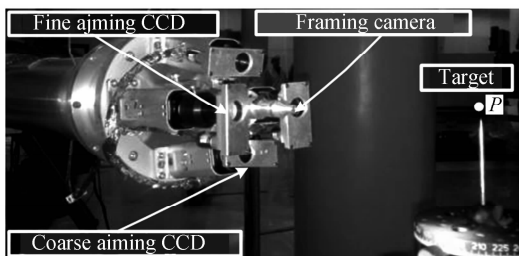


图 1 诊断搭载平台

Fig. 1 Diagnostics instrument manipulator

1.1 离线标定

在对靶室内的打靶目标瞄准之前,首先对多 CCD 视觉系统与诊断设备进行一次离线标定.如图 2(a)所示,将视觉系统安装在诊断设备前端,共同对准前方放置的一个直径为 200 μm 金球靶丸,调整金球靶位置,使之处于诊断设备的目标点上,记录粗瞄准 CCD 中球靶球心的坐标.然后调节 2 台精瞄准 CCD 的位置,使球靶的球心位于 2 台精瞄准 CCD 的图像中心(实际使用时,只要模拟球靶进入到 2 台精瞄准 CCD 的视场内即可),记录此时球靶球心 P 在 2 台精瞄准 CCD 中的位置 P_l 、 P_r .



(a) Offline calibration

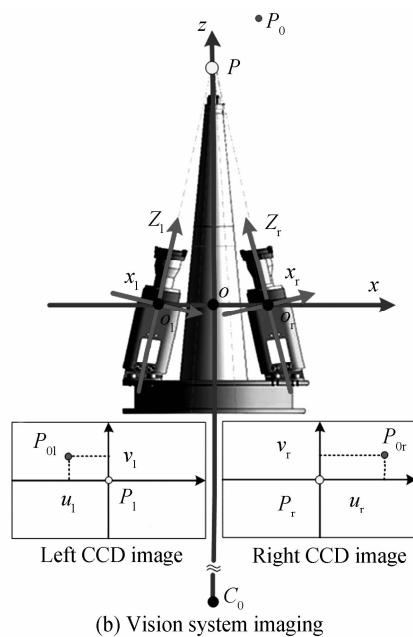


图 2 多 CCD 视觉系统

Fig. 2 Multi-CCD Vision system

1.2 脱靶量测量

标定完成后,安装了视觉系统的诊断设备被装配到搭载平台的径向伸缩机构上,送入球型靶室内. P 点固定于 2 台精瞄准 CCD 前与视觉系统一起运动,如图 2(b)所示.当打靶目标 P_0 沿 x 轴方向运动时,其在 2 台精瞄准 CCD 上的投影点 P_{0l} 与 P_{0r} 向相同方向运动;当 P_0 沿 y 轴方向运动时,其投影点也沿着相同方向运动;当 P_0 沿着 z 轴方向运动,远离 P 时, P_{0l} 与 P_{0r} 运动方向相反,做背离运动.靠近时, P_{0l} 与 P_{0r} 运动方向相反,做靠近运动.一种特殊情况是(以 z_l 轴为参考),当 P_0 运动到 z_l 轴上时, P_{0l} 与 P_{0r} 两点重合,此时 P_{0r} 落在右 CCD 图像的水平坐标轴上.其位置有三种情况: u_r 大于 0 时, P_0 在 P 前方. u_r 小于 0 时, P_0 在 P 后方. u_r 等于 0 时, P_0 与 P 重合,此时为瞄准状态.根据 P_{0l} 与 P_{0r} 的运动特征,建立反映 P_0 相对于 P 点脱靶量变化的投影矩阵,即

$$S = \begin{bmatrix} u_l & 0 & 0 \\ 0 & v_l & 0 \\ 0 & 0 & u_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

P 点可绕十字关节中心 C_0 水平转动、俯仰以及在深度方向上(z)伸缩,运动到 P_0 ,如图 3.此过程中 θ 变为 0, ϕ (为俯仰角,未标出)变为 0, z 变为 0.则 P_0 相对于的脱靶量可定义为

$$W = [\theta \quad \phi \quad z] \quad (2)$$

由图 5 可计算 θ 、 ϕ 、 z 为

$$\theta = \arctan \frac{|u_l dX|}{f} \approx \alpha \frac{u_l}{f} \quad (3)$$

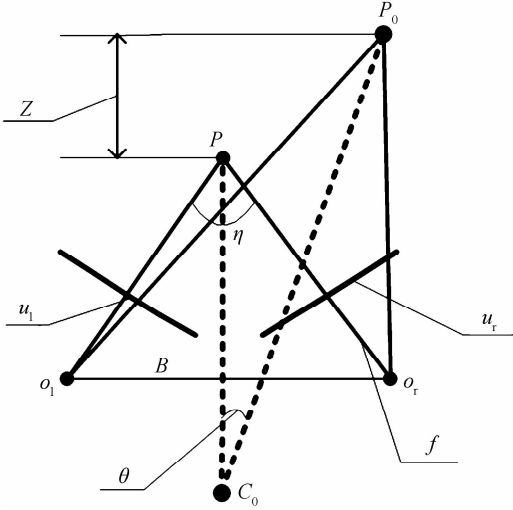


图3 测量原理图

Fig. 3 Measurement principle diagram

$$\phi = \arctan \frac{|v_1 dY|}{f} \approx \beta \frac{v_1}{f} \quad (4)$$

$$z \approx \frac{u_r dX}{f} \times \frac{B}{\sin \eta/2} = \gamma \frac{u_r B}{\phi \sin \eta/2} \quad (5)$$

式中, f 为焦距, dX 、 dY 为像素物理尺寸, B 为基线长, η 为两 CCD 光轴夹角. α 、 β 、 γ 均为比例因子, 在伺服初始时给定一个较小的值, 后续值在伺服过程中进行调整. θ 、 ϕ 、 z 均为估算值, 当点运动到周围一个很小的区域内时, 测量的 θ 、 ϕ 、 z 近似为真值. 当前图像的 u_1 、 v_1 、 u_r 由求形心算法算出, 由式(1)~(5)可得打靶目标的脱靶量与三维向量的关系为

$$W = Ls \quad (6)$$

打靶目标脱靶量与投影矩阵的关联矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} \alpha/f & 0 & 0 \\ 0 & \beta/f & 0 \\ 0 & 0 & \gamma B/f \sin \frac{\eta}{2} \end{bmatrix}$$

1.3 运动模型

三自由度运动部件中的双脚万向调节机构进行搭载平台的姿态调节, 如图 4, 电动缸 l_1 、 l_2 的合成运动实现平台的摆动与俯仰. 径向伸缩机构完成深度方向的距离调节. 建立三自由度混联机构的运动模型如图 5 所示, 搭载平台的微动矩阵可以定为

$$\Delta W = \begin{bmatrix} \Delta\theta & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\phi & 0 \\ 0 & 0 & \Delta z \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 $\Delta\theta$ 为水平转动角, $\Delta\phi$ 为垂直俯仰角, Δz 为径向伸缩量. 如图 5 所示, P 先水平转动一个微小角度 $\Delta\theta$,

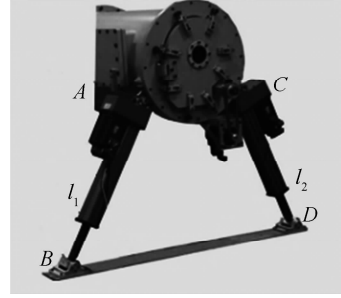


图4 姿态调节机构

Fig. 4 Pose adjusting mechanism

再俯仰一个微小角度 $\Delta\phi$, 最后伸长一个微小距离 Δz , 运动到一个中间位置, 此过程重复进行, 则 P 最终运动到 P_0 .

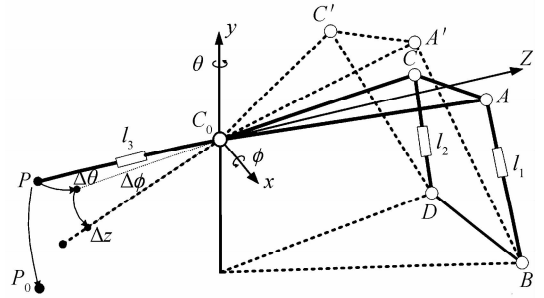


图5 运动模型

Fig. 5 Motion mode

在 $\sigma\text{-}xyz$ 坐标系下, ΔCAC_0 先绕 x 轴旋转 $\Delta\theta$, 后绕轴俯仰 $\Delta\phi$, A 、 C 两点运动后的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_{A'} & y_{A'} & z_{A'} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_A & y_A & z_A \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{C'} & y_{C'} & z_{C'} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_C & y_C & z_C \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中

$$M = \begin{bmatrix} \sin \Delta\theta & 0 & \cos \Delta\theta \\ \sin \Delta\phi \cos \Delta\theta & \cos \Delta\phi & -\sin \Delta\theta \sin \Delta\phi \\ \cos \Delta\theta \cos \Delta\phi & -\sin \Delta\phi & -\sin \Delta\theta \sin \Delta\phi \end{bmatrix}$$

由式(7)~(9)可推导出杆长 l_1 、 l_2 、 l_3 增量方程为

$$\begin{cases} \Delta l_{1i} = \sqrt{(x_{A'} - x_A)^2 + (y_{A'} - y_A)^2 + (z_{A'} - z_A)^2} \\ \Delta l_{2i} = \sqrt{(x_{C'} - x_C)^2 + (y_{C'} - y_C)^2 + (z_{C'} - z_C)^2} \\ \Delta l_{3i} = \Delta z \end{cases} \quad (10)$$

1.4 视觉伺服瞄准

令式(7)中搭载平台的微动步长 $\Delta\theta = 1''$, $\Delta\phi = 1''$, $\Delta z = 1 \mu\text{m}$ (硬件的功能允许设置到这样的细分). 则平台微动一次, 依据式(10), 输出一组 l_1 、 l_2 、 l_3 的微动长度, 因初始坐标的更新, l_1 、 l_2 的微动长度每次输出不同, l_3 的微动长度不变. 基于投影矩阵与微动模型, 搭载平台自动瞄准控制器设计如图 6. s_0 为期望的投影

矩阵(由离线标定得到),靶丸进入到测量 CCD 视场时,产生投影图像,在图像伺服环中提取靶丸的形心坐标 P_0 ,经式(1)构造出投影矩阵 s , s 与 s_0 的差值输入到控制算法中.瞄准控制策略中,不直接生成常用视觉伺服结构的摄像头平移和旋转控制量,在脱靶量生成算法与运动控制算法之间,产生一个中间层^[6-8],输出微动步数,由式(1)、(6)、(7)可得微动步数为

$$k = \min \{Ls\Delta w\} \quad (11)$$

依据式(10)、(11),一个图像伺服周期内产生的三自由度运动机构的运动量为

$$\Delta l = [\sum_{i=1}^k \Delta l_{1i}, \sum_{i=1}^k \Delta l_{2i}, k\Delta l_{3i}] \quad (12)$$

基于式(12),一个图像伺服周期产生一组三自由度运动机构的微动组合,形成了 P 到 P_0 的一段空间直线差补运动,微动步长越小瞄准准确度越高.当搭载平台一次性摆动角度较大(大于 1°)时,双脚万向调节机构在运动过程中会对靶室产生较大的弯扭作用力,破坏球形靶室.而基于微动组合的运动控制方式,能够保证在任意瞬时 AC 两点的位置是匹配的,此时的位置可保证 AC 平行球形靶室的赤道面,不会对靶室产生大的弯扭之力,保证了搭载平台的运动平稳与靶室的受力安全.当前图像产生的投影矩阵与期望的投影矩阵偏差落在设定的误差容限范围内时,瞄准完成.此时 P 与 P_0 重合.

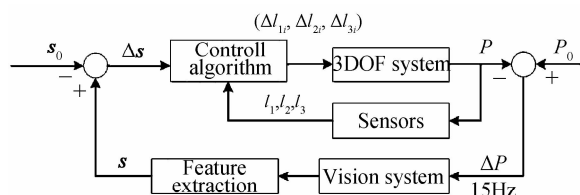


图6 瞄准视觉伺服控制器

Fig. 6 Positioning visual servo controller

2 瞄准测试及打靶实验

2.1 瞄准测试

搭载平台瞄准的打靶目标尺寸非常小,较小的球靶直径仅为 0.2 mm ,而搭载平台搭载的诊断设备的目标点又是预先标定出来的一个虚拟点,因此测量实际的瞄准误差需要在目标点上引入一个实体球靶.如图7所示,在诊断设备前端安装一个呈伸出状的直径为 $100 \mu\text{m}$ 的金球靶,调整球靶位置,使球心位于多 CCD 视觉系统的左右 CCD 图像中心.在离开金球靶的任意位置放置一直径为 $200 \mu\text{m}$ 的标准圆孔,让搭载平台对圆孔中心进行瞄准.

为了测量这种微米级的位置误差,采用了两套长焦显微摄影系统.在标准圆孔的正后方以及侧面放置

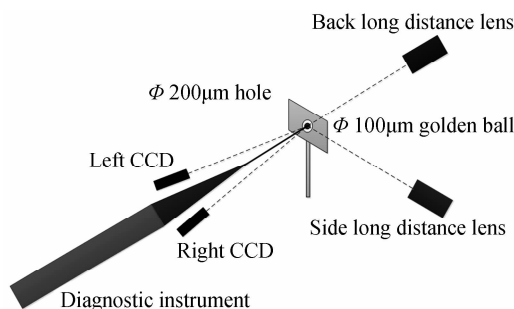


图7 准确度测试布局

Fig. 7 Precision testing setup

2台柯士达长焦显微镜,测量球靶与标准圆孔的相对位置.1台测量指向(x, y)瞄准准确度,另1台测量径向(z)瞄准准确度.这种基于显微视觉的测量方法,具有简便、安全(非接触)以及通用性好的特点,能够完成许多传统测试方法无法完成的任务.如微小气泡测量、表面损伤检测、粒子分析等^[9].

安装好测量显微镜后,运行自动瞄准程序,瞄准定位结束后,拍摄的瞄准结果如图8.移动标准圆孔的位置,重复瞄准实验10次.

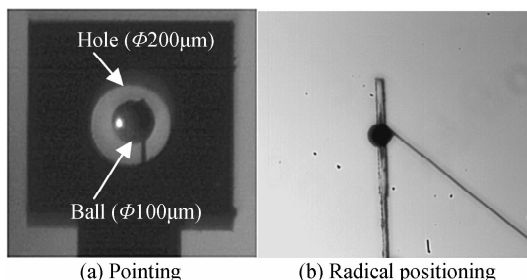


图8 瞄准结果

Fig. 8 Aiming result

Hough 变换能够较好地检测图像中的直线和曲线,它对噪声和线型残缺不敏感^[10].采用基于 Hough 变换的图像处理算法,检测获取的瞄准图像中标准圆孔中心、金球中心以及金平面的侧面直线位置,检测结果如图9,得到坐标后计算瞄准误差,计算结果如图10.10次重复实验得出的瞄准准确度为: x, y 方向的指向瞄准准确度分别为 $11 \mu\text{m}$ 和 $12 \mu\text{m}$, z 方向的径向瞄准准确度为 $14 \mu\text{m}$.

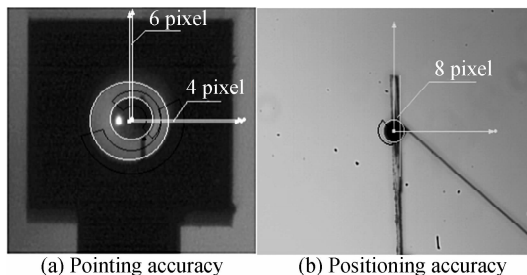


图9 瞄准准确度测量

Fig. 9 Accuracy measurement

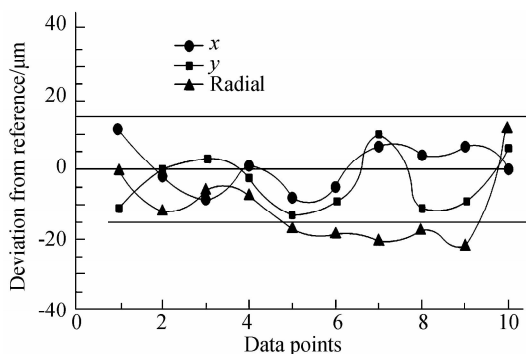


图 10 搭载平台瞄准系统准确度

Fig.10 Accuracy of automatic aiming system

2.2 激光打靶瞄准实验

首先对条纹相机与双光路瞄准系统进行一次离线标定,在条纹相机前端安装一个 200 μm 金球靶,调整其位置,使之处于条纹相机目标点上,记录此时金球靶球心(即点 P)在多 CCD 视觉系统左右 CCD 上的位置.得到标定点 P 后,搭载平台搭载条纹相机,送入靶室,瞄准状态图如图 11. 分别对不同的打靶目标进行瞄准实验,瞄准后得到的打靶目标瞄准图像,如图 12. 打靶实验结束后,条纹相机得到了物理实验过程的完整数据,从工程实验的角度证明了瞄准方法符合实际使用要求.

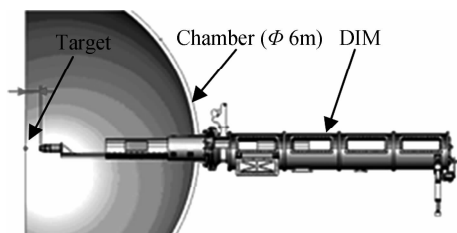


图 11 搭载平台瞄准目标

Fig.11 DIM pointing the target

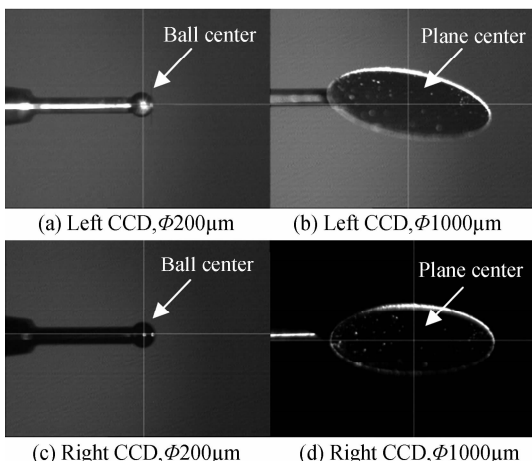


图 12 不同靶瞄准图像

Fig.12 Collimation image of different target aiming

3 结论

介绍了一种搭载平台自动瞄准方法,多 CCD 视觉系统生成计算打靶目标脱靶量的投影矩阵. 基于投影矩阵的反馈,三自由度混联机构完成搭载平台的姿态与径向位置调整,实现了对打靶目标的精确定位瞄准. 实验结果表明瞄准系统的瞄准准确度为:径向定位瞄准准确度为 14 μm,摆动定位准确度为 11 μm,俯仰定位准确度为 12 μm. 满足工程使用要求.

参考文献

- [1] HIBBARD W J, LANDON M D, VERGINO M D, *et al.* Design of the national ignition facility diagnostic instrument manipulator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, **72** (1): 530-532.
- [2] BOURGADE J L, REVERDIN C, BAILLEUX D, *et al.* SID: An automated diagnostic inserter system for inertial confinement fusion experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, **68**(1): 889-892.
- [3] GLEBOV V Y, MEYERHOFER D D, SANGSTER T C, *et al.* Development of nuclear diagnostic for the national ignition facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**: 10E715.
- [4] SHINGLETON N, KALANTAR D, WOOD R, *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) [C]. SPIE, 2012, **8505**, Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion, 85050A (October 15, 2012).
- [5] PLUMMER R, Diagnostic Instrument Manipulator (DIM) upgrades for reliability and operational efficiency in a radiological contamination environment at the National Ignition Facility (NIF)[C]. SPIE, 2012, 8850.
- [6] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. Visual servo Control-Part II: advanced approach[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, **14**(1):109-118.
- [7] POMARE J, PEREA I, JARA C A, *et al.* Dynamic visual servo control of a 4-axis joint tool to track image trajectories during machining complex shapes[J]. *Robotics And Computer-integrated Manufacturing*, 2013, **29**(4):261-270.
- [8] KIM G W. Uncalibrated Visual servoing through the efficient estimation of the image jacobian for large residual[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2013, **8**(2): 385-392.
- [9] GORO O, ASHISH D. Vision systems applications [M]. roatia:I-Tech Education and Publishing,2007.
- [10] SONKA M, HIAVAC V, BOYLE R. Image proceeding: analysis, and machine vision [M]. AI Hai-zhou, SU Yan-chao, *et al.*, transl. Beijing: Qinghua University Press, 2011. 桑卡,赫拉瓦卡,博伊尔. 图像处理、分析与机器视觉[M]. 艾海舟,苏延超,等,译. 北京:清华大学出版社,2011.