

物理诊断设备精确自动准直方法

王 维¹,何俊华¹,张 敏¹,韦明志¹,闫亚东¹,杨正华²,杨 品²

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 7100071;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

摘 要: 为了获取准确的激光打靶实验数据,需要使用诊断搭载平台搭载物理诊断设备对打靶目标进行高精度准直。针对传统方法存在耗时、误差(RMS)较大的问题,根据搭载平台与物理诊断设备的特点,提出了一种基于视觉伺服的精确自动准直方法。首先,构建三维准直向量估算立体视觉系统中靶的偏差,在弱透视条件下,估算值接近于真值;然后,建立三自由度姿态调节模型,提高姿态调节精度。最后,运用准直向量与调节模型设计视觉伺服控制器,仅需一次离线标定即可进行快速准直。通过以上改进,实现了物理诊断设备的精确自动准直。实验结果表明,诊断设备的准直精度(RMS)分别为: x 指向为 $11\ \mu\text{m}$, y 指向为 $12\ \mu\text{m}$ 。搭载分幅相机进行激光打靶考核验证,得到了物理实验过程的X光焦斑图像,表明准直方法满足工程使用要求。

关键词: 自动准直; 准直向量; 调节模型; 搭载平台; 视觉伺服

中图分类号: TP271⁺.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-0901-05

Automatic alignment method for diagnostic instrument

Wang Wei¹, He Junhua¹, Zhang Min¹, Wei Mingzhi¹, Yan Yadong¹, Yang Zhenghua², Yang Pin²

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710071, China;
2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to capture accurate data of laser-driven fusion test, diagnostic instruments (DI) which are mounted onto diagnostic instrument manipulator (DIM) should align the target with tight tolerance. Traditional alignment methods have problems of time consumption and error large. An accurate automatic alignment method was introduced, which based on visual servoing according to the virtue of DIM and DI. First, a 3D alignment vector was constructed to estimate the target deviation in the stereo vision system. Under narrow field of view, estimated value was close to true deviation. Second, a 3 DOF pose adjusting mode was founded to promote motion accuracy. Finally, a visual servo controller based on the alignment vector and pose adjustment mode was designed. The process of alignment needs offline calibration only once. Through the three steps, DI can automatic align the target with high accuracy. Test indicates that alignment accuracy (RMS) is $11\ \mu\text{m}$ in x direction and $12\ \mu\text{m}$ in y direction. Laser shot test with X-ray framing camera show that the automatic align method can satisfy the project requirements.

Key words: automatic alignment; alignment vector; adjusting model; DIM; visual servoing

收稿日期:2014-07-12; 修订日期:2014-08-15

基金项目:国家自然科学基金(40805013)

作者简介:王维(1980-),男,助理研究员,硕士,主要从事机器视觉与运动控制方面的研究。Email:wangweii@opt.qc.cn

0 引言

美国国家点火装置(The National Ignition Facility, NIF)中,使用了多种 X-ray 成像诊断设备对靶丸的激光聚变内爆物理实验进行测量。为了获取到准确的靶内爆实验数据,物理诊断设备必须对打靶目标按严格的参数进行准直。在 NIF 装置中,对诊断搭载平台提出了一种基于反向端口对准的坐标映射准直方法,使得诊断设备的准直精度在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 内^[1-4],为激光惯性约束聚变实验(Inertial Confinement Fusion, ICF)中的诊断设备精确准直提供了有益的借鉴。国内的 ICF 实验中,先后提出了单激光光束准直、双激光光束交汇准直、光学镜头成像准直等方法。上述的准直方法中,存在标定较多,以及坐标系映射繁琐的问题^[3-5],更重要的是漂移误差大,严重影响数据测量的准确性。

在神光 III 主机装置中,搭载平台实现了一种快速精确准直方法,其多 CCD 视觉系统高速反馈靶室内打靶目标的对准偏差,运动控制系统利用对准偏差以微动补偿的方式控制搭载平台的三自由度姿态调节机构进行姿态调节,实现自动准直。文中介绍了一种基于视觉伺服的精确自动准直方法。方法中,利用构建的准直向量定义了一个以角度和径向距离为特征集的反馈偏差,相比于常用基于图像的视觉伺服控制^[6],其视觉伺服策略得到了很大简化。另外,姿态调节模型提高了运动的细分,当姿态进行大幅度调整时,微动组合保证了伺服过程中运动的平稳性。全部准直过程中,系统仅需一次离线目标标定,不需校准视觉系统以及标定多种坐标系。实验结果表明:诊断设备的准直误差在 $12 \mu\text{m}$ 内,满足诊断要求。

1 自动准直方法

搭载平台准直系统分为多 CCD 视觉系统与三自由度姿态调节机构两部分。多 CCD 视觉系统由 4 台 CCD 组成,2 台用于粗准直,2 台构成双目立体视觉形式,用于精准直,实验时视觉系统安装到诊断设备前端。三自由度姿态调节机构由径向伸缩机构与俯仰、摆动调节机构组成。如图 1 所示,搭载平台通过前端的法兰安装到球型靶室上,物理诊断设备放置到搭载平台真空舱中,由径向伸缩机构送入球型

靶室内非常接近打靶目标的位置。俯仰、摆动调节机构安装在真空舱尾端,可控制真空舱绕十字关节中心进行俯仰与摆动。准直时,姿态调节机构根据视觉系统反馈的信息对诊断设备进行姿态调节,实现准直。

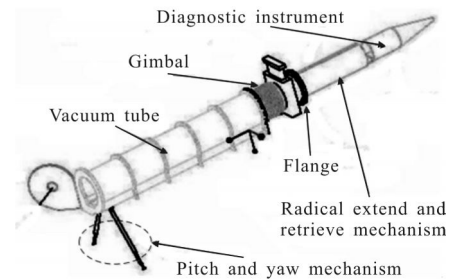


图 1 诊断搭载平台

Fig.1 Diagnostic instrument manipulator

1.1 离线目标标定

在诊断设备放置到搭载平台真空舱里面之前,对诊断设备进行一次离线打靶目标标定。如图 2 所示,将诊断设备安装到光学平台上,在诊断设备前端,通过转接环安装多 CCD 视觉系统(瞄准节)。诊断设备与视觉系统前方,放置一个直径 $200 \mu\text{m}$ 的模拟球靶,通过瞄准望远镜观察,调整三维精密调整支架移动模拟球靶,使诊断设备的光轴准直于模拟球靶。离线准直完成后,调整模拟球靶的径向距离,使其处于多 CCD 视觉系统中左右 CCD 的图像中心,位于中心不是必需的步骤,只要处于左右 CCD 的视场内即可。离线准直完成后,记录此时视觉系统中左右 CCD 图像中球靶中心 T 点坐标位置 ${}^L T$ 、 ${}^R T$ (见图 3)

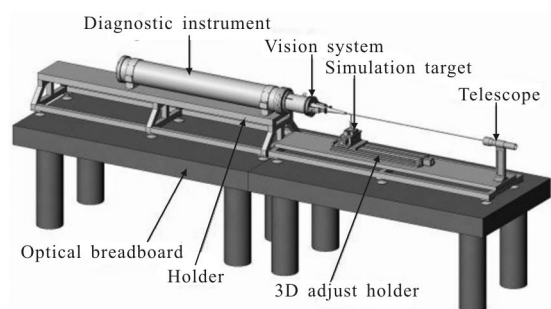


图 2 离线目标标定

Fig.2 Target off-line calibration

1.2 三维准直向量测量位置偏差

打靶实验时,多 CCD 视觉系统与诊断设备一起安装到搭载平台的径向伸缩机构上,送入球型靶室内。离线标定得到目标点 T 与诊断设备一起运动,

如图 3 所示,当 T 绕搭载平台十字关节中心 O 向右摆动接近靶 T_0 时,图像中的靶投影点 ${}^L T_0, {}^R T_0$ 靠近标定点投影点 ${}^L T, {}^R T$,运动方向相同。 T 绕 O 向左摆动远离靶 T_0 时,靶投影点 ${}^L T_0, {}^R T_0$ 远离标定点投影点 ${}^L T, {}^R T$,运动方向相同。俯仰方向与摆动方向运动规律相同。当 T 沿着诊断设备的 DI_y 轴运动时, ${}^L T_0, {}^R T_0$ 的运动方向相反,靠近或背离。一种特殊的情况是, T_0 落在左 CCD 的光轴 L_z 轴上时,即左 CCD 与靶点准直,投影点 ${}^R T_0$ 的纵坐标 ${}^R v_0$ 为 0,水平坐标为 ${}^R u_0$ 。 ${}^R u_0$ 有三种情况:(1) ${}^R u_0 > 0$,靶点 T_0 在标定点 T 的前方。(2) ${}^R u_0 < 0$,靶点 T_0 在标定点 T 的后方。(3) ${}^R u_0 = 0$,靶点 T_0 与标定点 T 重合,此时诊断设备与打靶目标准直。通过上述分析,建立反应打靶目标相对于标定点偏差的三维准直向量:

$$S_a = [{}^L u_0 \quad {}^L v_0 \quad {}^R u_0] \quad (1)$$

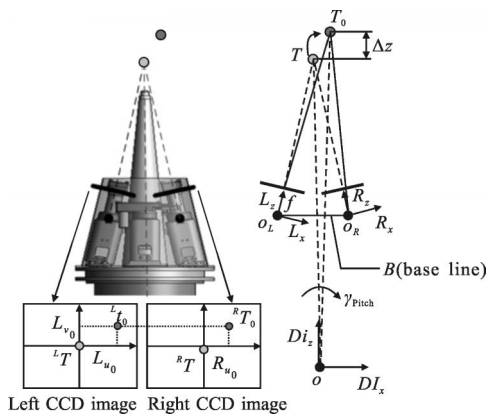


图 3 偏差测量

Fig.3 Deviation measurement

文中并不计算打靶目标在诊断设备坐标系下的空间点位置,而是定义一个由角度和距离组成的位置偏差,然后由准直向量来估算位置偏差,当目标点非常接近靶点时(弱透视条件下),偏差估算值接近于真值。如图 3 所示,目标点 T 绕搭载平台十字关节中心 O 转动 γ_{pitch} 、俯仰 Ψ_{yaw} (图中未标出)以及沿 DI_z 轴伸缩 Δz ,可运动到靶点 T_0 。此过程中 γ_{pitch} 变为 0, Ψ_{yaw} 变为 0, Δz 变为 0。因此定义位置偏差为:

$$e_{T-T_0} = [\gamma_{pitch} \quad \Psi_{yaw} \quad \Delta z] \quad (2)$$

在 e_{T-T_0} 趋向于 0 的过程中,靶投影点 ${}^L T_0, {}^R T_0$ 的坐标均趋于零,由准直向量估算 e_{T-T_0} :

$$\gamma_{pitch} = \arctan \frac{{}^L u_0 dX}{f} \approx \alpha \frac{{}^L u_0}{f} \quad (3)$$

$$\Psi_{yaw} = \arctan \frac{{}^L v_0 dY}{f} \approx \beta \frac{{}^L v_0}{f} \quad (4)$$

$$\Delta z \approx \frac{{}^R u_0 dX}{f} \cdot \frac{B}{\sin \eta/2} = \omega \frac{{}^R u_0}{\Phi} \cdot \frac{B}{\sin \eta/2} \quad (5)$$

式中: f 为焦距; dX, dY 为像素物理尺寸; B 为基线长(O_L, O_R 连线); η 为左右两 CCD 光轴夹角; α, β, ω 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; $\gamma_{pitch}, \Psi_{yaw}, \Delta z$ 均为估算值,当 T 点运动到 T_0 周围一个很小的区域内时,测量的 $\gamma_{pitch}, \Psi_{yaw}, \Delta z$ 近似为真值。当前图像中的 ${}^L u_0, {}^L v_0, {}^R u_0$ 由图像处理算法得出,由公式(1)~(5)可得打靶目标位置偏差与三维准直向量的关系为:

$$e_{T-T_0} = [\gamma_{pitch} \quad \Psi_{yaw} \quad \Delta z] = S_a L \quad (6)$$

靶与准直向量的关联矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} \alpha/f & 0 & 0 \\ 0 & \beta/f & 0 \\ 0 & 0 & \omega B/f \sin \frac{\eta}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.3 三自由度姿态调节模型

径向伸缩,绕十字关节中心俯仰、摆动构成诊断设备的三个自由度。径向伸缩机构完成径向距离调整,姿态调节机构安装在搭载平台真空仓的后端,对搭载平台进行俯仰、摆动的调节。在进行俯仰、摆动调节时,组成姿态调节机构的两台电动缸需要按严格的运动参数进行同步调节。否则会产生真空舱绕十字关节中心旋转的运动,导致靶室变形,发生重大事故。对姿态调节机构进行运动分析,建立三自由度姿态微调节模型,如图 4 所示,搭载平台的微动步长定义为:

$$\Delta step = [\Delta \gamma_{pitch} \quad \Delta \Psi_{yaw} \quad \Delta z] \quad (8)$$

式中: $\Delta \gamma_{pitch}$ 为水平微摆动角; $\Delta \Psi_{yaw}$ 为垂直微俯仰角; Δz 为径向伸缩量。其最小值的设定受限于硬件选型。 T 先水平摆动一个微小角度 $\Delta \gamma_{pitch}$,再俯仰一个微小角度 $\Delta \Psi_{yaw}$,最后再伸长一个微小距离 Δz ,运动到一个中间位置,此过程重复进行,则 T 最终运动到靶点 T_0 。在 $O-DI_x DI_y DI_z$ 坐标系下, $\Delta JAJBO$ 先绕 DI_x 轴旋转 $\Delta \gamma_{pitch}$,后绕 DI_y 轴俯仰 $\Delta \Psi_{yaw}$, JA, JB 两关节运动后的坐标为:

$$[x_{JA}' \quad y_{JA}' \quad z_{JA}'] = R[x_{JA} \quad y_{JA} \quad z_{JA}] \quad (9)$$

$$[x_{JB}' \quad y_{JB}' \quad z_{JB}'] = R[x_{JB} \quad y_{JB} \quad z_{JB}] \quad (10)$$

其中:

$$R = \begin{bmatrix} \sin\Delta\gamma & 0 & \cos\Delta\gamma \\ \sin\Delta\Psi \cos\Delta\Psi & \cos\Delta\Psi & -\sin\Delta\gamma \sin\Delta\Psi \\ \cos\Delta\gamma \cos\Delta\Psi & -\sin\Delta\Psi & -\sin\Delta\gamma \sin\Delta\Psi \end{bmatrix} \quad (11)$$

由公式(8)~(10)可推导出杆长 l_1, l_2, l_3 微动方程为:

$$\begin{cases} \Delta l_{1i} = \sqrt{(x_{JA}' - x_{JA})^2 + (y_{JA}' - y_{JA})^2 + (z_{JA}' - z_{JA})^2} \\ \Delta l_{2i} = \sqrt{(x_{JC}' - x_{JC})^2 + (y_{JC}' - y_{JC})^2 + (z_{JC}' - z_{JC})^2} \\ \Delta l_{3i} = \Delta z \end{cases} \quad (12)$$

式中: $x_{JA}, y_{JA}, z_{JA}, x_{JC}, y_{JC}$ 为两关节初始坐标, 在后续的运动过程中不断更新。

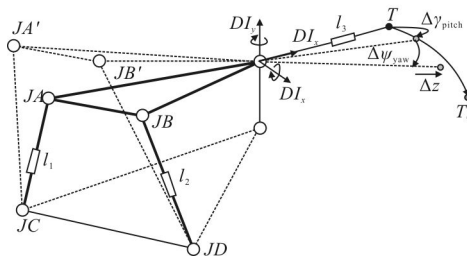
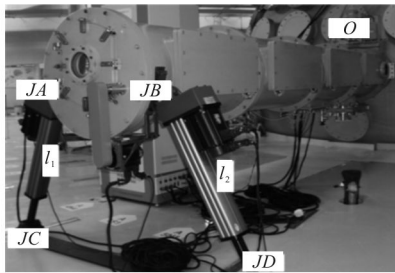


图 4 姿态调节模型

Fig.4 Pose adjusting mode

1.3 视觉伺服准直控制器

控制器通过准直向量 S_a 控制标定点 T 的位置, 准直过程中, 首先实现视觉系统的 CCD 光轴对打靶目标的准直, 通过径向误差补偿以及连续的视觉系统光轴准直, 最终实现诊断设备对打靶目标的精确准直。令公式(8)中, 搭载平台的微动步长 Δstep 中的 $\Delta\gamma_{\text{pitch}}=1''$, $\Delta\Psi_{\text{yaw}}=1''$, $\Delta z=1\ \mu\text{m}$ (硬件的功能允许设置到这样的细分)。则平台微动一次, 依据公式(12), 输出一次 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。基于准直向量与姿态调节模型, 搭载平台的视觉伺服准直控制器设计如图 5 所示。 S_0 为期望的准直向量(由离线标定得到), 当靶进入到精准直 CCD 视场时, 产生投影图像, 在外层伺服环中提取靶形心 T_0 坐标, 经公式(1)构造出准直向量 S_a , S_a 与 S_0 的差值输入到控制算法中。控制算法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, 而是在控制算法中, 产生一个中间层^[7-8], 输出微动步数, 由公式(1), (6), (7)以及步长的设定, 可得微动步数为:

$$N_{\text{steps}} = S_a L = [n_1 \ n_2 \ n_3] \quad (13)$$

依据公式(12), (13), 一个外层图像伺服周期内产生的三自由度运动机构的运动量为:

$$\Delta l = [\sum_{i=1}^{n_1} \Delta l_{1i}, \sum_{i=1}^{n_2} \Delta l_{2i}, n_3 \Delta l_{3i}] \quad (14)$$

基于公式(14), 一个内层伺服周期产生一组三自由度运动机构的微动组合, 形成了标定点 T 到靶 T_0 的一段空间直线差补运动, 微动步长越小准直精度越高。当搭载平台一次性摆动角度较大(大于 1°)时, 姿态调节机构在运动过程中会对靶室产生较大的弯扭作用力, 破坏球型靶室。而基于微动组合的运动控制方式, 能够保证在任意瞬时 JA, JB 两关节的位置是匹配的, 此时的位置可保证 JA, JB 连线平行于球型靶室的赤道面, 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。当前图像产生的准直向量与期望准直向量的偏差落在设定的误差容限范围内时, 准直完成。此时 T 与 T_0 重合。

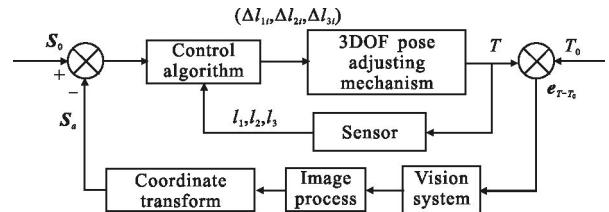


图 5 视觉伺服控制器

Fig.5 Visual servo controller

2 打靶准直实验

选择一个直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的金球靶作为打靶目标。用靶室上的靶投送器与靶准直器将金球靶送入到靶室的中心位置上。诊断设备的目标点(离线标定)与金球靶的球心重合时, 诊断设备对金球靶完成准直。标定点与金球靶球心在 x, y 方向上的偏差代表物理诊断设备的准直偏差。

以分幅相机作为诊断设备, 将多 CCD 视觉系统通过转接环安装到分幅相机前端, 按图 2 所示过程进行离线目标标定, 标定完成后, 将诊断设备与多 CCD 视觉系统一起放置到搭载平台的径向伸缩机构上。搭载平台将分幅相机送入靶室内, 并对靶进行

自动准直,拍摄的准直结果如图 6 所示,图(a)为分幅相机对靶进行准直时的状态。图(b)为视觉系统中精准直 CCD 拍摄的准直结果图,图中的水平十字交叉线为离线标定点的坐标标记,倾斜十字交叉线为金球靶球心的坐标标记,球心坐标由圆检测算法求出。左右两 CCD 图像中,水平十字线中心与倾斜十字线中心完全重合时,表明诊断设备对球靶完成准直。实际使用时,由于机械抖动与硬件精度的原因,左右 CCD 图像中的两十字线中心不会完全重合,其偏差代表了诊断设备的准直精度。

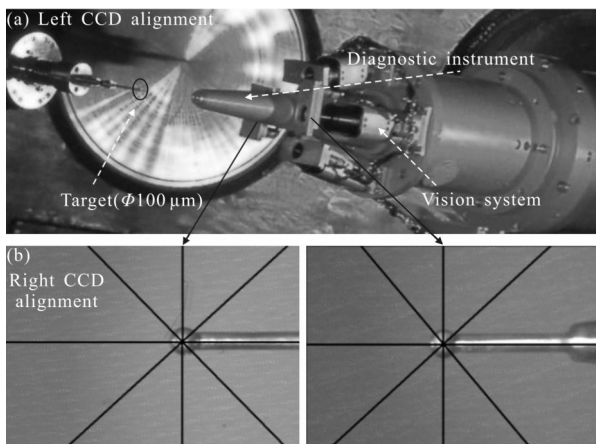


图 6 靶准直实验

Fig.6 Target alignment test

当金球靶球心的十字线与左右 CCD 图像中的标定十字线同时接近重合时,可用左 CCD 的准直偏差来计算诊断设备的最终准直偏差。表 1 为左 CCD 光轴对靶的 9 次准直实验数据,第 1 列为离线标定点的

表 1 9 次准直实验测量的准直偏差

Tab.1 Deviation of 9 times alignment test

No.	Calibration cross center	Tilt cross cross center	Deviation /pixel	Deviation / μm
1	(624.90,487.67)	(633.32,480.20)	(8.42, 7.47)	(14, 12)
2	(745.52,502.46)	(752.45,496.34)	(6.93, 6.10)	(11, 10)
3	(723.33, 650.78)	(728.84, 642.24)	(5.51, 8.54)	(9, 14)
4	(587.19, 546.82)	(580.93, 553.53)	(6.26, 6.71)	(10, 11)
5	(600.40, 670.71)	(594.91, 665.22)	(5.49, 5.48)	(9, 9)
6	(658.64, 597.32)	(652.54, 602.81)	(6.10, 5.49)	(11, 9)
7	(675.58, 610.39)	(668.87, 618.32)	(6.71, 7.93)	(11, 13)
8	(591.57, 605.82)	(598.89, 611.92)	(7.32, 6.10)	(12, 11)
9	(583.77, 525.18)	(590.48, 530.67)	(6.71, 5.49)	(11, 9)

的坐标,第 2 列为金球靶的球心坐标。根据光学镜头参数与 CCD 像元大小,由第 3 列的坐标差可计算出准直偏差(RMS)为: x 指向为 $11 \mu\text{m}$, y 指向为 $12 \mu\text{m}$ 。激光打靶实验结束后,分幅相机得到了物理实验过程的 X 光焦斑图像,表明准直精度满足工程要求。

3 结 论

提出了一种物理诊断设备精确自动准直的方法,方法利用构建的准直向量与运动模型,实现了诊断设备只需一次离线目标标定即进行可快速精确准直。实验结果表明,准直精度优于物理诊断实验中严格的准直参数要求,且可保持误差在要求的精度范围内,不随时间产生误差漂移。此方法也可以应用于三维定位技术中,实现精确微操作。

参考文献:

- [1] Kalantar D H, Nicola P Di, Shingleton N, et al. An overview of target and diagnostic alignment at the National Ignition Facility [C]//SPIE, 2012, 8505: 850509.
- [2] Nicola P Di, Kalantar D, Mccarville T, et al. Beam and target alignment at the National Ignition Facility using the Target Alignment Sensor(TAS)[C]//SPIE, 2012, 8505: 85050B.
- [3] 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: 85050A.
- [4] 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.
- [5] Robert Plummer. 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: 885005.
- [6] Chaumette F, Hutchinson S. Visual servo control-partII: advanced approach [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2007, 14(1): 109-118.
- [7] Pomares 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.