

文章编号 1004-924X(2018)07-1794-08

## 基于 3-CCD 显微视觉的高精度靶位姿控制

宋 薇\*, 宋志杰, 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:**针对高功率激光物理装置中的靶自动准直实验平台,提出了一种基于三路显微视觉的高精度靶位姿控制方法。该方法采用基于图像的显微视觉控制策略,通过对送靶机构的主动运动控制,实现了图像雅可比矩阵的在线自标定;利用增量式 PI 控制方法对送靶机构进行控制,实现靶的快速定位及姿态调整。本文对比了基于图像的显微视觉控制和之前研究中所提出的基于位置的显微视觉控制两种方法。其中,基于图像的控制方法靶的定位误差为  $0.07\ \mu\text{m}$ ,姿态调整误差为  $0.02\ \mu\text{rad}$ ;而基于位置的控制方法靶的定位误差为  $0.16\ \mu\text{m}$ ,姿态调整误差为  $0.07\ \mu\text{rad}$ 。实验结果表明:基于图像的显微视觉控制方法对系统中的运动学误差、视觉标定误差等因素具有较好的鲁棒性,靶定位及姿态调整的精度高且稳定性好。

**关键词:**靶定位;姿态调整;图像雅可比矩阵;基于图像的视觉控制;显微视觉

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182607.1794

## High-precision target pose adjustment based on 3-CCD microscope vision system

SONG Wei\*, SONG Zhi-jie, 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 3-CCD microscope vision system is established to realize micro-target pose adjustment in a high-power laser device with high precision. Image-based visual control method is performed, and the image Jacobian matrix is derived online by using the active movement of the micro-target. The PI controller is used to adjust the micro-target's pose so that the image features are close to the objective position. In the experiments, we compare the image-based visual control method with the position-based visual control method, which was proposed in our previous research by using a 3D posture description algorithm to control the micro-target to the desired pose. The precision of target positioning and orientation error for the image-based visual control method are  $0.07\ \mu\text{m}$  and  $0.02\ \mu\text{rad}$ , respectively, whereas the precision of target positioning and orientation error values for the position-based visual control method are  $0.16\ \mu\text{m}$  and  $0.07\ \mu\text{rad}$ , respectively. The experimental results show that the image-based visual control method is robust for system errors such as kinematic and visual calibration errors. Thus, it possesses better precision and stability for target pose adjustment.

收稿日期:2017-11-20;修订日期:2018-01-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61105029)

**Key words:** target positioning; pose adjustment; image Jacobian; image-based visual control; microscope vision

## 1 引言

高功率激光物理实验装置中的靶自动准直系统由基于光学共轭原理设计的3路CCD显微视觉传感器组成,通过提取多路图像中靶的几何特征对目标靶进行定位及姿态调整,使其保持在一个最有利于多束激光引导的位置上,以实现较高效率的束靶耦合<sup>[1-2]</sup>。

本文作者在研究<sup>[3]</sup>中提出了一种基于位置的显微视觉控制方法,通过提取3路图像中靶的几何特征推算出靶在笛卡尔坐标系中的位姿偏差,反馈给送靶机构将靶调至目标位姿。在系统各标定误差较小的情况下,该方法的靶定位精度可满足高功率激光打靶的要求。但由于3-CCD传感器的装校误差以及送靶机构的运动学误差等因素的影响,这种包含多坐标变换及多姿态角计算的基于位置的空间位姿调整方法,在实际工程中调试起来过程繁琐,且精度不高、稳定性较差。

针对基于位置的显微视觉控制方法容易受到系统误差影响的这一问题,相关研究提出了一些解决方案:如胡浩等人<sup>[4]</sup>利用光刻法制作了显微立体视觉的标定参照物,对显微立体视觉系统进行标定以减少误差干扰。但是高功率激光物理实验中的靶尺寸非常小(一般不大于 $800\ \mu\text{m}$ ),利用光刻法制作小尺寸、高精度的标定物价格昂贵,且标定过程复杂、耗时;胡小平等人<sup>[5]</sup>通过空间位置已知的3个控制点对手眼微操作系统进行了参数标定,在解决了微操作系统空间狭小问题的同时简化了标定过程。但激光物理实验装置的靶场内部是真空暗室,无法通过在特定位置上设置控制点进行标定。

因此,本文讨论采用基于图像的显微视觉控制方法来提高靶定位的精度和稳定性。与基于位置的显微视觉控制方法不同,基于图像的控制方法将视觉伺服中的偏差信号定义在图像空间,不需要进行三维测量,因此检测的精度和稳定性也不依赖于系统的标定误差,理论上可实现更高的检测精度。该方法的难点是需要计算出图像的雅可比矩阵,而且在伺服控制中要避免陷入雅可比矩阵的奇异点,否则会影响控制稳定性。在相关

研究中,王敏等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于图像雅可比模型辨识的无标定视觉伺服方法,解决了微装配系统标定困难的问题,获得了较高的检测精度。史亚莉等人<sup>[7]</sup>采用显微镜高低倍数转换的方式,用于实现毫米级到微米级的微管微球跨尺度的零件特征的检测和装配,解决了视觉伺服控制中为避免陷入雅可比矩阵的奇异点而限制检测范围的技术问题,有效提高了显微视觉的灵活性。

本文按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显微视觉靶定位实验平台,将基于图像的显微视觉控制同基于位置的显微视觉控制这两种方法进行对比分析,其结果将为实际工程中的靶定位及姿态调整控制方案的确立提供重要依据。

## 2 靶检测装置及图像特征提取

图1为靶自动准直系统中的检测装置,3路CCD传感器基于光学共轭原理设计,在空间中近似于正交排布。其中,A-CCD与B-CCD位于竖直方向,光轴重合,分别获取靶的上端面和下端面的图像,C-CCD位于水平方向,光轴与A、B的光轴垂直相交,用来获取靶侧面的轮廓图像。

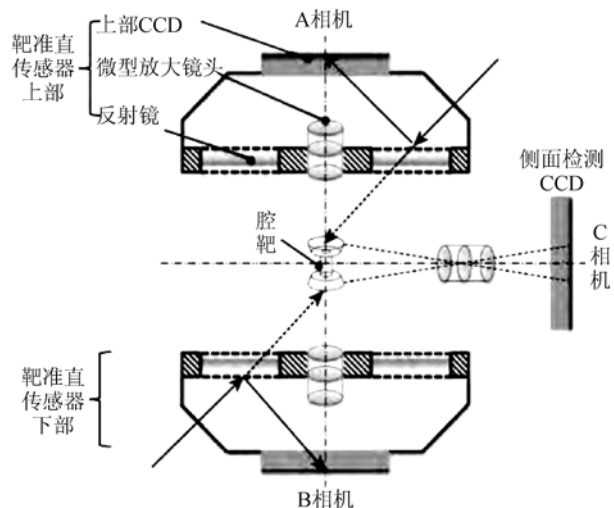
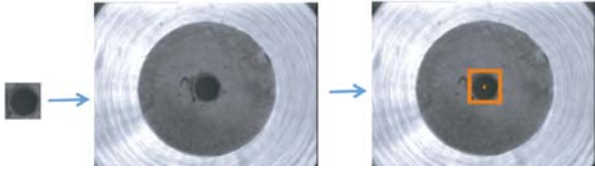


图1 微小靶位姿调整系统相机与靶的位置  
Fig. 1 Position of 3-CCD and micro-target

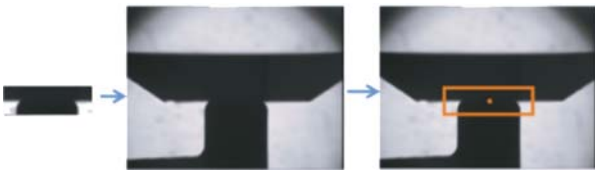
高功率激光物理实验中靶的尺寸非常小,以上图中的腔靶为例,其直径为 $2\ \text{mm}$ ,腔内装有一个豌豆粒大小的氙气气体胶囊,激光光束经由两

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>[8]</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。



(a) A、B 相机特征检测采用的模板、原图像和检测结果

(a) Template, original image and result of feature detection for camera A and B



(b) C 相机特征检测采用的模板、原图像和检测结果

(b) Template, original image and result of feature detection for camera C

图 2 CCD 相机靶特征检测结果

Fig. 2 Detect result of micro-target feature

图像特征点的选取应对靶的运动敏感,本文选取的图像特征点分别为靶上端面的中心点、靶下端面的中心点和靶上端面与中间圆柱的结合处中心点,采用图像处理技术中模板匹配的方法对特征点进行提取<sup>[9]</sup>,并采用双立方插值的方法进行靶特征点的亚像素匹配。特征点的提取结果如图 2 所示。

### 3 基于图像的视觉伺服

#### 3.1 图像雅可比矩阵标定

图像雅可比矩阵描述了图像特征空间中图像特征变化和送靶机构末端执行器变化之间的微分映射关系<sup>[10-11]</sup>,其可表示为:

$$\Delta f = J \Delta p, \quad (1)$$

式中: $\Delta f$  是图像特征位置变化量, $\Delta p$  是送靶机构末端执行器在三维空间中的实际位姿变化量, $J$  为图像雅可比矩阵。

图像特征变化要对靶的运动敏感,本文将靶在图像空间中的图像特征点的变化量定义为:

$$\Delta f = [\Delta f_{uc1}, \Delta f_{uc1}, \Delta f_{uc2}, \Delta f_{uc2}, \Delta f_{uc3}, \Delta f_{uc3}]^T, \quad (2)$$

式中: $(\Delta f_{uc1}, \Delta f_{uc1})$ 、 $(\Delta f_{uc3}, \Delta f_{uc3})$ ,为靶上、下端面在 A、B 相机中所成图像中椭圆中心位置变化量, $(\Delta f_{uc2}, \Delta f_{uc2})$ 为靶在 C 相机中所成图像的特征位置变化量。

送靶机构的位姿变化量定义为:

$$\Delta p = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \varphi, \Delta \psi]^T, \quad (3)$$

其中: $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 为送靶机构末端执行器在沿着各坐标轴方向位置变化量, $(\Delta \varphi, \Delta \psi)$ 为绕  $x$ 、 $z$  坐标轴旋转的角度变化量。由于本文的控制对象为柱腔靶,绕  $y$  轴对称,因此  $\Delta p$  的定义为 5 自由度。

由式(1)的映射关系可知,已知图像特征的位置偏差,由图像雅可比矩阵即可计算出送靶机构末端执行器的位姿偏移量。因此,需要对图像雅可比矩阵进行标定。

通过控制送靶机构在各个方向上做线性无关的主动运动,可以实现图像雅可比矩阵的在线估计<sup>[12]</sup>。具体标定方法为:

(1)控制送靶机构在基座坐标系  $x$  方向上移动  $\Delta x$ ,移动后对图像进行特征检测可得到靶的图像特征位置变化矩阵  $\Delta f_1 = [\Delta f_{uc11}, \Delta f_{uc11}, \Delta f_{uc21}, \Delta f_{uc21}, \Delta f_{uc31}, \Delta f_{uc31}]^T$ ;

(2)按同样方法,控制送靶机构在基座坐标系  $y$ 、 $z$  方向上分别移动  $\Delta y$ 、 $\Delta z$ ,然后分别绕  $x$  轴和  $z$  轴旋转  $\Delta \varphi$ 、 $\Delta \psi$ ,移动后对图像进行特征检测可分别得到靶的图像特征位置变化矩阵: $\Delta f_2, \Delta f_3, \Delta f_4, \Delta f_5$ 。

这里,定义  $\Delta p'$  为送靶机构位姿变化矩阵,则:

$$\Delta p' = [\Delta p_1 \quad \Delta p_2 \quad \Delta p_3 \quad \Delta p_4 \quad \Delta p_5] = \begin{bmatrix} \Delta x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta \psi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

定义  $\Delta f'$  为图像特征位置变化矩阵,在上述送靶机构的主动运动中通过图像特征检测可得到图像特征位置变化矩阵  $\Delta f'$  为:

$$\Delta f' = [\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \quad \Delta f_3 \quad \Delta f_4 \quad \Delta f_5] = \begin{bmatrix} \Delta f_{uc11} & \Delta f_{uc12} & \Delta f_{uc13} & \Delta f_{uc14} & \Delta f_{uc15} \\ \Delta f_{uc11} & \Delta f_{uc12} & \Delta f_{uc13} & \Delta f_{uc14} & \Delta f_{uc15} \\ \Delta f_{uc21} & \Delta f_{uc22} & \Delta f_{uc23} & \Delta f_{uc24} & \Delta f_{uc25} \\ \Delta f_{uc21} & \Delta f_{uc22} & \Delta f_{uc23} & \Delta f_{uc24} & \Delta f_{uc25} \\ \Delta f_{uc31} & \Delta f_{uc32} & \Delta f_{uc33} & \Delta f_{uc34} & \Delta f_{uc35} \\ \Delta f_{uc31} & \Delta f_{uc32} & \Delta f_{uc33} & \Delta f_{uc34} & \Delta f_{uc35} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

由式(1)可得:

$$\Delta f' = J \Delta p'. \quad (6)$$

将式(4)的  $\Delta p'$  和式(5)的  $\Delta f'$  代入上式即可求得图像雅可比矩阵  $J$ :

$$J = \Delta f' (\Delta p')^{-1}, \quad (7)$$

即:

$$\begin{bmatrix} J_{11} & \cdots & J_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ J_{61} & \cdots & J_{65} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta \psi \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta f_{uc11} & \cdots & \Delta f_{uc15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta f_{uc31} & \cdots & \Delta f_{uc35} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

### 3.2 基于图像的视觉伺服控制策略

根据 3.1 节所述图像雅可比矩阵的标定方法可得图像雅可比矩阵  $J$ , 又由式(1)变换得到:

$$\Delta p = J^+ \Delta f, \quad (9)$$

式中  $J^+ = [J^T, J]^{-1} J^T$  是雅可比矩阵的伪逆解。

基于图像的视觉伺服控制框图如图 3 所示, 经过图像特征检测得到当前靶在图像空间中的特征位置, 将其与图像特征目标的位置进行比较获得图像特征位置偏差  $\Delta f_k$ , 将  $\Delta f_k$  代入式(9)得到送靶机构末端执行器所需调整的偏差向量  $\Delta p_k$ , 即:

$$\Delta p_k = J^+ \Delta f_k. \quad (10)$$

在显微视觉控制中, 运动轴可以建模为一阶惯性环节和一阶积分环节的串联环节。采用增量式 PI 控制器, 对于由一阶惯性环节和积分环节构成的二阶系统, 通过适当选择 PI 控制器的参数, 如比例系数和积分时间常数等, 能够实现系统的稳定性。

由于图像雅可比矩阵的标定以及图像特征的检测都存在误差, 所以本文采用增量式 PI 控制算法, 以提高系统的稳定性。增量式 PI 控制策略为:

$$\Delta R_k = K_p J^+ (\Delta f_k - \Delta f_{k-1}) + K_i J^+ \Delta f_k, \quad (11)$$

其中  $K_p$ 、 $K_i$  分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。

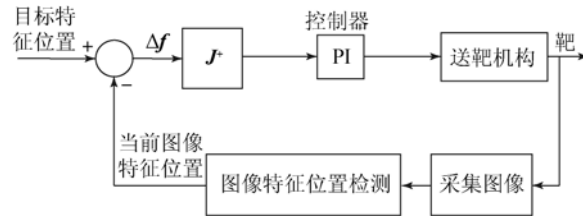


图 3 基于图像的视觉伺服控制框图

Fig. 3 Block diagram of IBVS

## 4 靶定位与姿态调整实验与结果

### 4.1 微小靶位姿调整实验平台

本文按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 显微视觉靶定位实验平台, 如图 4 所示。该实验平台由 3-CCD 显微视觉检测装置和靶位姿调整装置两部分组成, 其中 A、B、C 3 路 CCD 相机采集到的图像尺寸均为  $768 \times 576$  pixel, 相机的相元大小为  $8.4 \mu\text{m}$ , 相机 A、B 之间的距离为 30 mm, C 相机光轴与 A、B 相机光轴垂直相交于 A、B 相机连线的中点, C 相机到 A、B 相机光轴距离为 20 mm。该系统中的送靶机构为德国 PI 公司生产的 M-810 微型并联机器人, 靶通过靶杆与机器人末端基座固接, 通过控制机器人末端运动来移动靶到达目标位置。

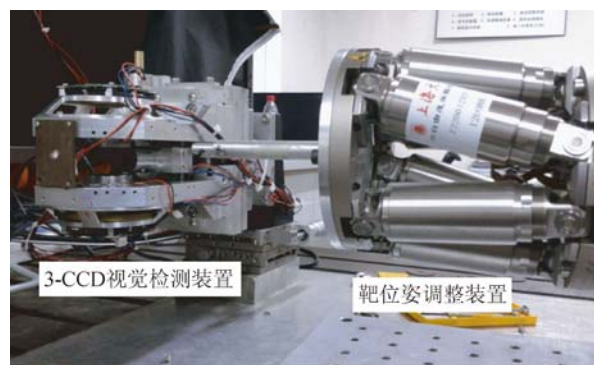


图 4 微小靶位姿调整实验平台

Fig. 4 Experiment platform of micro-target posture adjustment

### 4.2 靶位姿调整实验

为了有效地评价靶定位及姿态调整的精度和动态性能, 本文将基于图像的显微视觉控制和之前研究中所用的基于位置的显微视觉控制这两种

方法进行对比。

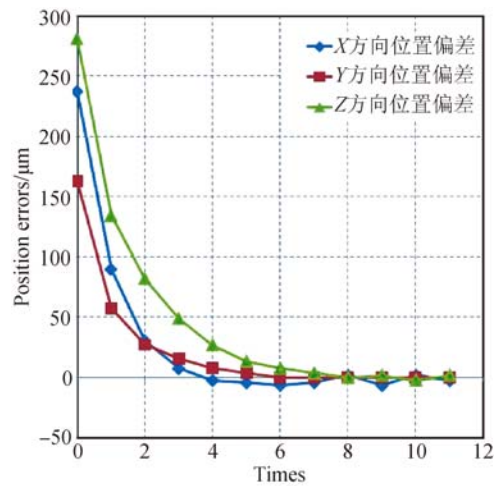
在基于位置的控制方法当中,通过三维位姿计算获得微小靶在笛卡尔坐标系中的位姿偏差,采用增量式 PI 控制方式控制送靶机构将靶调至目标位姿(具体实现方法请参阅文献<sup>[3]</sup>)。给定靶的目标位姿为  $[x^*, y^*, z^*, \varphi^*, \psi^*]^T = [0, 0, 0, 0, 0]^T$ , 即靶坐标系与世界坐标系重合时到达目标位置。需要说明的是:在靶定位过程中需要将靶杆长度考虑到机构的运动学分析中,通过几何关系计算出由姿态角旋转引起的位置偏移量,并在送靶机构的位姿调整算法中给予补偿。因此,靶杆长度的标定误差作为系统误差的一个因素会影响实验精度。基于位置的显微视觉位姿调整的实验数据如表 1 所示:

表 1 基于位置的视觉伺服位姿调整实验结果

Tab.1 Micro-target posture adjustment experiments

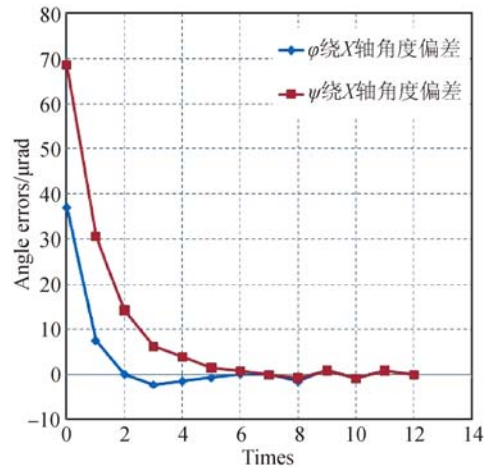
次数	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$	$\varphi/\mu\text{rad}$	$\psi/\mu\text{rad}$
0	237.51	162.83	281.12	37.019	68.547
1	90.32	57.62	134.01	7.509	30.494
2	31.034	27.21	82.28	0.017	14.251
3	7.86	15.50	49.07	-2.406	6.184
4	-2.04	7.66	27.41	-1.535	3.976
5	-3.92	3.85	13.66	-0.776	1.535
6	-5.99	-0.08	7.88	0.017	0.793
7	-3.87	0.04	3.91	-0.008	-0.017
8	2.15	0.03	-0.08	-1.638	-0.811
9	-6.27	0.02	2.09	0.889	0.854
10	2.32	-0.01	-2.13	-0.872	-0.863
11	0.11	0.01	-0.11	-0.043	-0.043

表 1 中行数据为每次调整前进行位姿计算得到的靶与目标的偏差值,其中次数为 0 的一行数据表示靶的初始位姿。该调整过程中靶与目标位置的偏差变化如图 5 所示。由图可以看出靶与目标位姿的偏差在前 6 次调整过程中迅速收敛,在第 8 次位姿调整后位姿偏差趋于稳定,无明显波动。



(a)位置偏差

(a) Position errors



(b)角度偏差

(b) Angle errors

图 5 基于位置的视觉伺服微小靶位姿偏差

Fig.5 Pose errors of micro-target adjustment based on PBVS

根据第 11 次位姿调整后的数据可计算出:基于位置的位姿调整实验的残留位置误差和角度误差分别为:

$$\begin{cases} \Delta t_p = \sqrt{0.11^2 + 0.01^2 + (-0.11)^2} \approx 0.16 \mu\text{m} \\ \Delta r_p = \sqrt{(-0.043)^2 + (-0.043)^2} \approx 0.07 \mu\text{rad} \end{cases} \quad (12)$$

在基于图像的视觉伺服调整当中,给定的目标图像特征位置为  $[f_{uc1}^*, f_{vc1}^*, f_{uc2}^*, f_{vc2}^*, f_{uc3}^*, f_{vc3}^*]^T = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , 即当 3 个相机中靶的图像特征位置均处于图像中心时完成靶的位姿调整。式(11)增量式 PI 控制器中比例系数和积分系数分别设为:  $K_p = 0.015, K_i = 0.82$ 。但不同于基于位

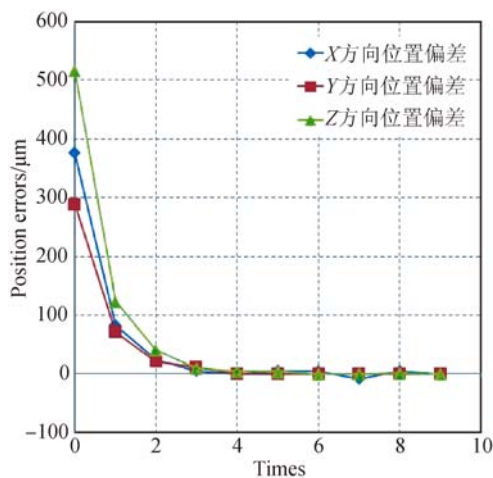
置的控制方法,在基于图像的伺服控制方法中,送靶机构和前端固接的靶杆看作一个整体,因此图像雅克比矩阵  $J$  的标定中已包含靶杆长度对靶姿态的影响。基于图像的显微视觉位姿调整实验结果如表 2 所示。

表 2 中行数据为每次调整前进行位姿计算得到的靶与目标的偏差值,其中次数为 0 的一行数据即表示靶的初始位姿。该调整过程中靶与目标位置的偏差变化如图 6 所示。可以看出靶的位置偏差在第 3 次调整后达到收敛,姿态偏差在第五次调整后也收敛,调整过程快速平稳,没有较大波动。

表 2 基于图像的视觉伺服位姿调整实验结果

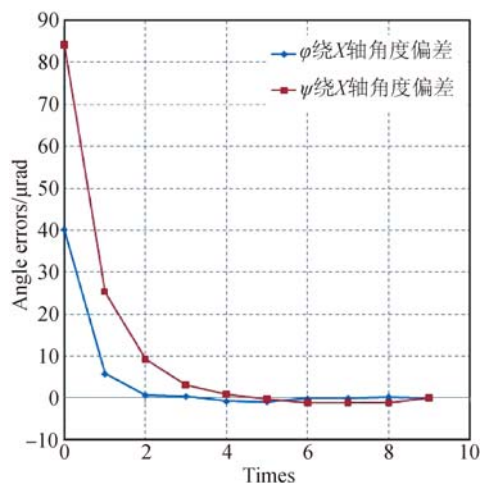
Tab. 2 Micro-target posture adjustment experiments of IBVS

次数	$x/\mu\text{m}$	$y/\mu\text{m}$	$z/\mu\text{m}$	$\varphi/\mu\text{rad}$	$\psi/\mu\text{rad}$
0	376.07	289.13	516.04	40.084	84.336
1	82.55	71.59	122.74	5.695	25.377
2	24.59	20.49	40.83	0.635	9.354
3	4.82	10.82	9.30	0.354	3.164
4	0.38	-0.29	4.21	-0.816	0.944
5	4.64	-0.22	3.51	-0.968	-0.121
6	4.14	-0.07	-0.82	-0.153	-1.093
7	-4.54	0.29	-0.13	-0.033	-1.089
8	2.39	-0.22	0.91	0.203	-1.055
9	-0.06	0.01	-0.01	-0.002	0.013



(a)位置偏差

(a)Position errors



(b)角度偏差

(b)Angle errors

图 6 基于图像的视觉伺服微小靶位姿偏差

Fig. 6 Pose errors of micro-target adjustment based on IBVS

根据第 9 次位姿调整后的数据可计算出:基于图像的位姿调整实验的残留位置误差和角度误差为:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = \sqrt{(-0.06)^2 + (0.01)^2 + (-0.01)^2} \approx 0.07 \mu\text{m} \\ \Delta r_1 = \sqrt{(-0.002)^2 + (-0.013)^2} \approx 0.02 \mu\text{rad} \end{cases} \quad (13)$$

对比两种位姿调整方法的实验数据可知:基于位置的显微视觉控制和基于图像的显微视觉控制这两种位姿调整方法都可以将靶较快速地调整到目标的位置姿态,但相比基于位置的位姿调整方法,基于图像的位姿调整方法的调整过程更加平稳,收敛速度更快,最终的调整精度也较高。

这里,将本文的定位精度与相关研究进行对比,如:文献[12]通过在线自标定技术实现了对图像雅可比矩阵的标定,从而对微零件硅臂和套筒进行运动控制,可实现的姿态误差范围为  $0.2^\circ$ ,位置误差范围为  $5 \mu\text{m}$ ;文献[13]所述的 ICF 靶装配系统也是基于 3 路显微视觉系统定位来实现的,在视觉检测下实现了充气管与靶丸注入孔的对准,可实现的位置定位精度为  $2 \mu\text{m}$ ,角度定位精度为  $0.5^\circ$ 。通过对比可知,本文所提出的基于图像的位姿调整方法不仅优于作者在之前研究中提出的基于位置的位姿调整方法,而且与他人的研究相比,也具有较高的定位精度。

### 4.3 靶定位控制对模型参数变化的适应性分析

高功率激光物理实验装置中,由于送靶机构与 3-CCD 视觉系统间相对坐标关系的标定比较

繁琐,标定后的误差也较大,因此靶的定位控制需要对系统模型的坐标参数变化具有适应性。

实验中,模拟在高功率激光物理实验中送靶机构坐标系与 3-CCD 视觉坐标系存在标定误差的情况,改变送靶机构的基座位置,使之产生微小位移。这样每变动一次,进行一组靶定位及姿态调整的实验。在每组实验中,对比分析基于位置的显微视觉控制和基于图像的显微视觉控制这两种方法。

为确保两种位姿调整方法的实验环境一致,同一组实验中的送靶机构的位置是相同的,记录完两种方法的实验数据后,再移动送靶机构,进行下一组实验。基于图像的伺服调整方法和基于位置的伺服调整方法的实验结果如表 3 所示。

表 3 不同初始条件下靶位姿调整实验结果

Tab. 3 Results of target adjustment in different initial condition

序号	基于位置的视觉伺服控制		基于图像的视觉伺服控制	
	残留位置	残留角度	位置	角度
	误差/ $\mu\text{m}$	误差/ $\mu\text{rad}$	误差/ $\mu\text{m}$	误差/ $\mu\text{rad}$
1	0.89	0.32	0.08	0.03
2	0.41	0.25	0.13	0.01
3	0.16	0.07	0.07	0.02
4	0.65	0.12	0.09	0.02
5	0.92	0.28	0.11	0.09
均值	0.606	0.208	0.096	0.034

表 3 中的行数据为每次变动位置后的最终定位结果。可以看出,基于图像的控制方法能够实现更精确的位姿调整,其多次实验的位置残留误差的最大值为  $0.11 \mu\text{m}$ 、角度残留误差的最大值为  $0.09 \mu\text{rad}$ ,远小于基于位置的控制方法的定位误差。分析造成这种差异的主要原因是:基于位置的视觉伺服方法的调整精度受系统运动学参数的影响较大,当送靶机构坐标系与相机坐标系的

相对位置变化时,靶在笛卡尔坐标系中的位姿偏差也随之变化,位姿调整的准确度和稳定性就会受到影响;而基于图像的视觉伺服采用在线估计图像雅克比矩阵的方法,运动学参数的误差产生的影响已包含在图像雅克比矩阵中,因此不需要进行精密地系统标定仍然可以实现较高精度的位姿调整。

## 5 结 论

本文针对高功率激光物理装置中的靶自动准直实验平台,提出了一种基于三路显微视觉的高精度靶位姿控制方法。该方法采用基于图像的显微视觉控制策略,通过控制送靶机构末端执行器的自主运动实现了图像雅可比矩阵的在线自标定,从而得到了图像特征变化和送靶机构末端执行器变化之间的映射关系,并通过增量式 PI 控制器控制送靶机构将靶调至目标位姿。

本文对比了基于图像的显微视觉控制和之前研究中所提出的基于位置的显微视觉控制两种方法。在基于位置的视觉伺服控制中,根据视觉模型和靶在图像空间的特征信息计算出了靶在三维笛卡尔坐标系中的位姿偏差,从而控制送靶机构将靶调至目标位姿。实验结果表明,基于图像的伺服控制方法可以获得更高的位姿调整精度,位姿调整过程也更加平稳。基于位置的位姿调整实验中靶的最终定位误差为  $0.16 \mu\text{m}$ ,角度误差为  $0.07 \mu\text{rad}$ ,而基于图像的位姿调整实验中靶的最终定位误差为  $0.07 \mu\text{m}$  角度误差为  $0.02 \mu\text{rad}$ 。

当送靶机构基座位置发生变化或系统的标定误差较大时,基于位置的视觉控制方法的调整精度受系统运动学参数的影响较大;而基于图像的控制方法采用在线估计图像雅克比矩阵的方法,对系统中的运动学误差、视觉标定误差等因素具有较好的鲁棒性,靶定位及姿态调整的精度高、稳定性好。

## 参考文献:

[1] 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.  
ZHAO D F, HUA N, ZHANG Y N, et al.. Develop-

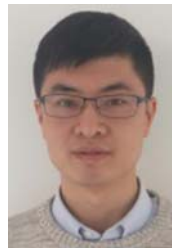
ment of final optics assembly for additional beamline ‘Shenguang-II’ laser facility [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19 (2): 245-24. (in Chinese)  
[2] DLINDL J, ATHERTON L J, AMEDNT P A, et al.. Progress towards ignition on the national Ignition facility [J]. *Nuclear Fusion*, 2011, 51 (9):094024.

- [3] 宋薇,张亚男,沈林勇. 高功率激光装置中靶的定位调试[J]. 光学精密工程, 2015, 24(2): 520-527.  
SONG W, ZHANG Y N, SHEN L Y. Target positioning in high power laser device [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 520-527. (in Chinese)
- [4] 胡浩,梁晋,唐正宗,等. 显微立体视觉小尺度测量系统的标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 1985-1991.  
HU H, LIANG J, TANG ZH Z. Calibration of stereo microscope measurement systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 1985-1991. (in Chinese)
- [5] 胡小平,左富勇,谢珂. 微装配机器人手眼标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1521-1526.  
HU X P, ZUO F Y, XIE K. Research on hand-eye calibration method for micro-assembly robot [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(7): 1521-1526. (in Chinese)
- [6] 王敏,黄心汉,吕退东. 微装配机器人无标定视觉伺服[J]. 华中科技大学学报, 2011, 39(S2): 60-63.  
WANG M, HUANG X H, LU X D. Un-calibrated vision servoing for micro-assembly robots based on image Jacobian model recognition [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2011, 29(S2): 60-63. (in Chinese)
- [7] 史亚莉,张正涛,徐德. 跨尺度微管微球三维半自动装配点胶系统[J]. 光学精密工程, 2014, 23(11): 3121-3128.  
SHI Y L, ZHANG ZH T, XU D. 3D semi-automatic assembly and dispensing system for trans-scale parts of micro-tube and micro-sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3121-3128. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] LING CHEN, HONG MAN, HUADING JIA. 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.
- [10] LIU S Q, LIU S Y. Online-estimation of image-jacobian based on adaptive kalman filter [C]. *Proceeding of the 34th Chinese Control Conference*, Hangzhou, P. R. China, 2015: 6016-6019.
- [11] PENGCHENG C ZH, DE X, WEI Z, et al.. Positioning cylindrical target based on three-microscope vision system [J]. *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, 2014, 19(5): 1612-1624.
- [12] 张娟,徐德,张正涛,等. 基于多路显微视觉的微零件自动对准策略[J]. 机器人, 2014, 36(1): 69-75.  
ZHANG J, XU D, ZHANG ZH T, et al.. An automatic alignment strategy of micro parts based on microscope vision systems [J]. *ROBOT*, 2014, 36(1): 69-75.
- [13] 杨永猛. 基于机器视觉的ICF靶精密装配技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2015.  
YANG Y M. *Research on Technology of ICF Target Precision Assembly Based on Machine Vision* [D]. Harbin Institute of Technology, 2015. (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



宋志杰(1991—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,2014年于烟台大学获得学士学位,2017年于上海大学获得硕士学位,主要从事机器视觉方面的研究。  
E-mail: song\_zhi\_jie@163.com