

基于前馈-反馈综合控制的SG-II升级装置腔空间滤波器远场串并行自动准直

刘代金¹ 邹伟¹ 张峰¹ 李红² 林强² 高妍琦² 刘代中²

¹中国科学院自动化研究所精密感知与控制中心, 北京 100190

²中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 结合神光II升级装置腔空间滤波器远场准直的特点,通过建立孔间耦合模型,提出了一种孔间前馈补偿和孔内反馈调节相结合的多孔串并行综合准直控制方法。该方法通过位置预估和局部极值搜索来实现所有基准中心的提取,并依据图像Jacobian矩阵,计算各反射镜电机的反馈控制量。将前孔准直调节量作为后孔准直扰动,并利用孔间耦合模型计算出后孔准直所需的前馈扰动补偿控制量,综合反馈控制量和前馈补偿量实现多孔的串并行准直调节。实验结果表明,基准中心的识别准确率达到97%以上,准直时间由约1 min缩短至30 s左右,在很大程度上提高了准直效率。

关键词 成像系统;腔空间滤波器;基准提取;前馈补偿;并行准直;图像Jacobian矩阵

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0102003

Serial-Parallel CSF Far Field Auto Alignment Based on Combination of Feed forward and Feedback Control for SG-II-Up Device

Liu Daijin¹ Zou Wei¹ Zhang Feng¹ Li Hong² Lin Qiang² Gao Yanqi² Liu Daizhong²

¹*Institute of Automation of Precision Sensing and Control Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

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

Abstract In combination with characteristics of cavity spatial filter far-field alignment on SG-II-Up facility, a serial-parallel alignment control method based on combination of feed forward compensation and feedback regulation is presented by establishing coupling models between pinholes. The reference centers are stable and reliable extracted out by position predication and gray gradient extremum search. The feedback regulation quantity is determined by image Jacobian matrix for each pinhole. Regulation of previous pinhole is regarded as disturbance to the next one, and the feed forward compensation control quantity is calculated according to the established coupling model between pinholes. The serial-parallel alignment controls for multi-pinholes are implemented simultaneously by synthesizing the feedback and feed forward control quantities. Experimental results show that the reference center extraction accuracy reaches above 97%, collimating time reduces from 1 min to 30 s, and the collimating efficiency improves greatly.

Key words imaging systems; cavity spatial filter; reference extraction; feed forward compensation; parallel alignment; image Jacobian matrix

OCIS codes 110.2970; 150.5495; 100.2000

1 引言

激光聚变研究的不断深入对高功率固体激光驱动器提出了越来越高的要求,新一代激光驱动器,如美

收稿日期: 2015-04-08; 收到修改稿日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61403378)

作者简介: 刘代金(1989—),男,硕士研究生,主要从事图像处理与电机控制方面的研究。E-mail: coolliudaijin@126.com

导师简介: 邹伟(1974—),男,研究员,博士生导师,主要从事机器人视觉和智能控制方面的研究。E-mail: wei.zou@ia.ac.cn

国的 OMEGA-EP^[1]和国家点火装置^[2]、法国的兆焦耳级激光装置^[3]、中国的神光 II 升级装置^[4-6]和神光 III 装置^[7],正在向模块化、自动化和智能化的方向发展。对于已调好的高功率激光装置光路,由于温度变化、反射镜机械结构蠕变、地基和支撑框架微振动、振荡器输出光束方向漂移和其他随机因素的影响,通常会造成光束偏离原定光路^[7]。光路自动准直的任务就是通过逐段检测光束的位置和方向误差,由前向后依次调整光路中的反射镜,直至各路光束恢复到原定光路上。因此,自动准直系统^[8]是保证高功率固体激光驱动器正常运行的关键所在,不但能够为打靶精度提供保障,而且能够防止激光堵孔、提高近远场光束质量、保证系统安全。

神光 II 升级装置自动准直系统的结构原理如文献[9]所述,每个环节的近场和远场均利用光栅衍射特性实现了相应的基准光栅,并依据光斑中心与基准中心的偏差、通过调节相应的二维反射镜步进电机使光斑中心与基准中心重合。采用该准直系统可实现整体光路的一键准直到底的功能,并且 8 路预放光路准直时间小于 3 min,主放准直时间小于 7 min。本文针对采用上述准直系统进行腔空间滤波器(CSF)远场准直时所存在的问题,对其基准提取算法和准直控制策略进行了改进,以提高准直稳定性和对光栅更换和光照变化的适应性,并进一步缩短准直周期。

2 CSF 远场准直及其存在问题

神光 II 升级装置 CSF 远场环节的准直光路如图 1 所示,光束经传输空间滤波器(TSF)注入腔空间滤波器,在 CSF 中 4 次经过放大器进行四程放大,并依次注入小孔板上的 4 个小孔进行滤波;准直基准放置于小孔后侧,由 16 个黑斑基准点构成,四孔的基准中心分别为 4 个局部基准点的对角连线交点,如图 2 所示^[10]。准直过程可描述为:调节反射镜 PM₁,使图像中的 1[#]孔光斑中心同 1[#]孔基准中心重合,保证光束注入到滤波小孔 1[#];调节反射镜 CM₂,使图像中的 2[#]孔光斑中心同 2[#]孔基准中心重合,保证光束返回至 2[#]滤波小孔;调整反射镜 CM₁,使图像中的 3[#]孔光斑中心同 3[#]孔基准中心重合,保证光束返回至 3[#]滤波小孔;之后光束由 CM₂再次反射并经放大后,由偏振反射镜 PM₂反射至 TSF 中的 4[#]孔,并输出到终端光学系统。

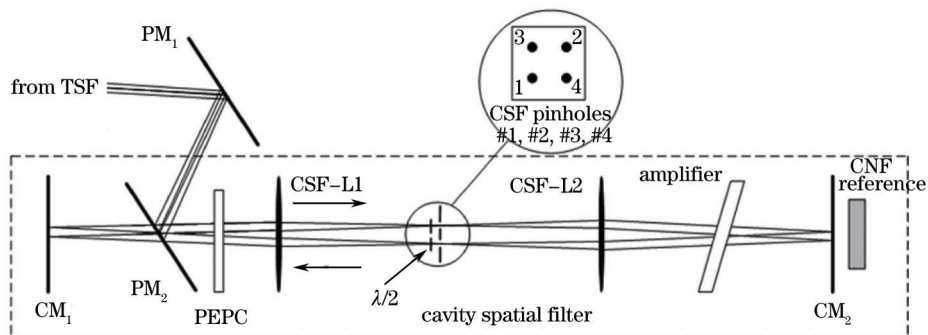


图 1 神光 II 升级装置 CSF 远场光路图

Fig.1 CSF far field optical path diagram for SG-II-UP

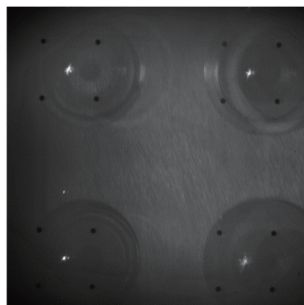


图 2 神光 II 升级装置主放 CSF 远场准直图像

Fig.2 CSF far-field alignment image for SG-II-UP

目前 CSF 远场准直所存在的问题主要有两方面:

1) 采用简单局部统计方法获取各孔附近的图像背景阈值,利用该阈值对图像进行二值化处理,进而确定出各基准的黑斑中心。由图 2 可知,CCD 需要对四孔基准同时成像,因此图像视场较大且光照不均,导致

某些基准点比较模糊,单纯采用阈值方法很难较为可靠和稳定地实现所有基准点的高精度稳定可靠提取,且对于光栅基准更换和光照动态变化的适应性较差。

2) 各孔之间的准直过程是串行的,即在保持其他各孔准直反射镜不动的情况下,依次对1#孔、2#孔和3#孔光斑进行调节,从而导致耗时较长,准直效率较低。

针对上述两个问题,利用位置预估和灰度梯度极值搜索算法实现了4个基准点中心的高精度可靠提取和计算,并以此为基础提出了一种基于孔间前馈补偿和孔内反馈调节相结合的四孔串并行准直控制方法,该方法可在很大程度上降低准直耗时,提高准直效率。

3 CSF 远场基准提取

针对图2中CSF远场图像的特点,采用如图3所示流程实现基准特征的可靠提取和基准中心的实时计算,其中主要包括显著圆点轮廓提取、模糊圆点轮廓提取、边缘微调 and 基准计算四部分^[11]。

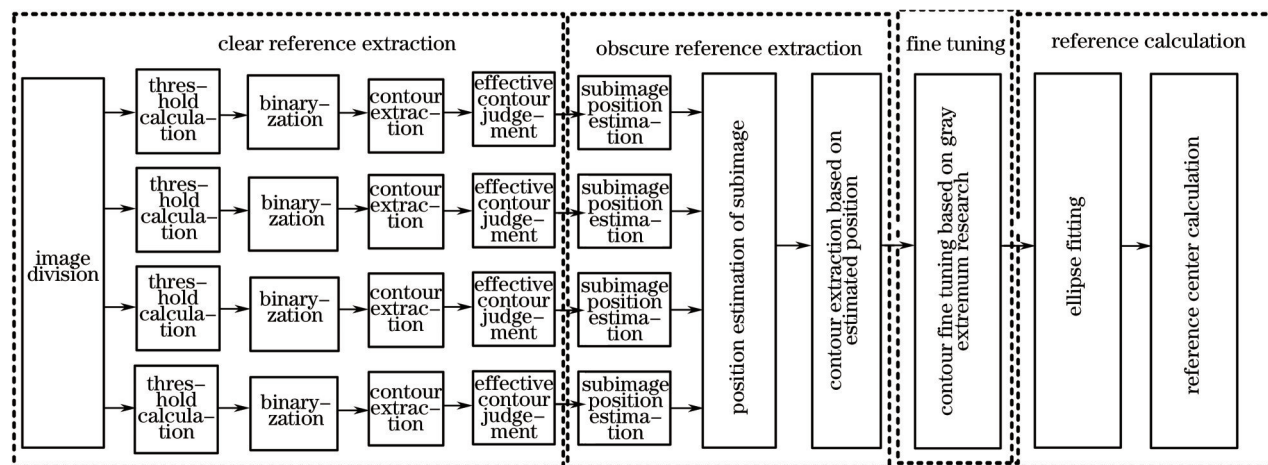


图3 CSF远场准直基准中心提取整体流程

Fig.3 Reference centers extraction flowchart for CSF far-field alignment

1) 显著圆点轮廓提取:将图像划分为容纳4个小孔基准的上、下、左、右四个子图像;对每个子图像统计灰度信息获取二值化阈值,并据此对图像进行二值化处理,得到灰度值较低的区域轮廓;基于先验知识对区域轮廓进行滤除和筛选,保证剩余轮廓均为基准圆点区域轮廓。

2) 模糊圆点轮廓提取:根据基准圆点的分布先验信息和提取到的显著基准圆点,采用位置预估策略(包括子图像内预估和子图像间预估)对没有提取到的模糊圆点的大致位置进行估计;以预估位置为中心确定一局部区域,进一步依据该区域图像的直方图分布选取二值化阈值,利用该阈值对该区域图像进行二值化处理,实现模糊圆点轮廓的提取。

3) 边缘微调:对所有提取到的显著圆点和模糊圆点,以其几何中心为始点,以45°为间隔在8个不同的射线方向上搜索灰度梯度极值点,并将其作为最终用于形心计算的精确边缘轮廓点。

4) 基准计算:利用边缘微调得到的精确边缘轮廓点对圆点进行椭圆拟合,得到椭圆圆心;建立经过对角椭圆圆心的两条直线方程,联立两方程求解出两直线交点,将该交点作为对应孔的准直基准中心。

采用上述方法进行基准提取的一个示例如图4所示,其中图4(a)为原始图像;图4(b)是利用初步统计阈值得到的显著圆点轮廓;图4(c)中的黑色矩形框为以预测位置为中心的模糊圆点局部区域,区域内的白色部分是利用局部区域直方图得到的阈值进行二值化处理得到的模糊点轮廓;图4(d)中给出了每个圆点利用梯度极值搜索得到的8个边缘极值点;图4(e)为椭圆拟合结果;图4(f)为最终计算得到的所有基准中心示意图。

4 前馈-反馈串并行综合准直控制

4.1 控制模型

提出一种基于孔间前馈补偿和孔内反馈调节的控制方法实现CSF远场的自动并行准直。控制模型如

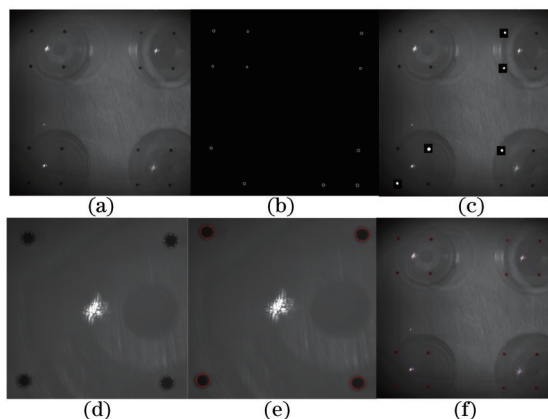


图4 CSF远场基准中心提取。(a)原始图像;(b)清晰点轮廓;(c)预估点位置局部处理图像;(d)梯度极值点图像;(e)椭圆拟合图像;(f)最终基准中心

Fig.4 Reference center extraction for CSF far-field. (a) Original image; (b) clear points contour; (c) prediction of obscure points region; (d) gray gradient extremum search; (e) ellipse fitting; (f) final reference center

图5所示,在每个准直周期内,通过图像处理同时得到4个孔的基准点中心和光斑中心坐标,并分别计算出它们之间的坐标偏差;依据各自偏差,利用图像 Jacobian 矩阵计算出各孔反射镜的位姿调节反馈控制量;分别将计算得到的1#孔、2#孔反射镜反馈调节量作为扰动输入至2#孔和3#孔,并利用1#-2#孔耦合模型和2#-3#孔耦合模型计算出用以对扰动进行补偿的前馈控制量;综合反馈控制量和前馈补偿量确定出2#孔和3#孔反射镜电机的最终控制量;输出所有控制量,同时调节1#孔、2#孔和3#孔反射镜电机,实现三孔的同步并行调节。

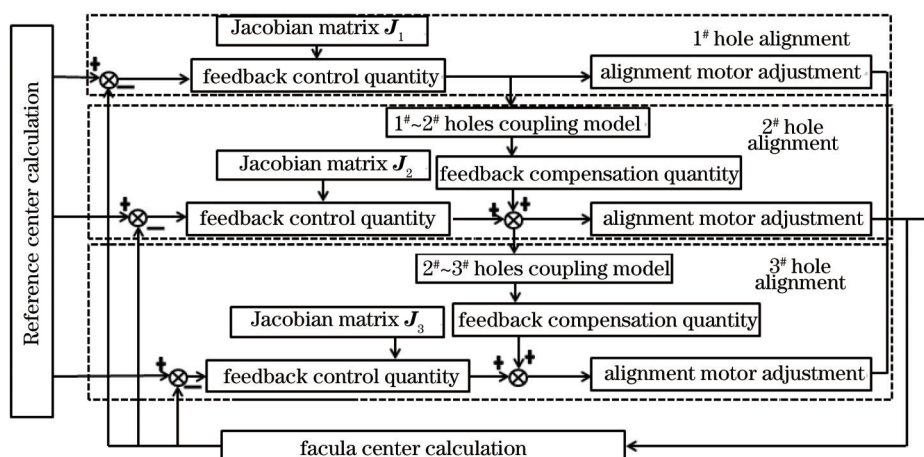


图5 基于前馈补偿和反馈调节的CSF并行准直控制模型

Fig.5 CSF parallel alignment control model based on feed forward compensation and feedback adjustment

4.2 基于图像 Jacobin 矩阵的反馈控制

各孔均需依据光斑中心与基准中心之间的偏差确定出各反射镜电机的反馈控制量,可利用基于图像 Jacobin 矩阵的视觉伺服控制技术实现。图像 Jacobian 矩阵描述了图像中光斑中心变化量同准直反射镜二维运动量之间的关系。对于每个准直环节而言,由于反射镜运动参数、CCD 成像参数以及二者之间的相对位置关系等固定不变,所以图像 Jacobian 矩阵也固定不变,可离线标定得到。具体标定步骤如下:控制第 m 孔反射镜执行 N 次二维运动,设每次运动中 X 方向和 Y 方向上的电机运动量分别为 Δx_{mn} 和 Δy_{mn} ,与之相应的第 m 孔光斑中心在图像中的坐标变化量分别为 Δu_{mn} 和 Δv_{mn} ,其中 $1 \leq n \leq N$, $1 \leq m \leq 3$;设第 m 孔准直环节的图像 Jacobian 矩阵为 $J_m \in R^{2 \times 2}$ 。则有如下关系成立:

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{m1} & \Delta u_{m2} & \cdots & \Delta u_{mN} \\ \Delta v_{m1} & \Delta v_{m1} & \cdots & \Delta v_{mN} \end{bmatrix} = J_m \begin{bmatrix} \Delta x_{m1} & \Delta x_{m2} & \cdots & \Delta x_{mN} \\ \Delta y_{m1} & \Delta y_{m1} & \cdots & \Delta y_{m1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

简记为

$$U = J_m X, \quad (2)$$

则第 m 孔图像 Jacobian 矩阵 J_m 可离线计算为

$$J_m = UX^T(XX^T)^{-1}. \quad (3)$$

设在第 k 个准直周期,第 m 孔光斑中心同其基准中心之间的偏差向量为 $[\Delta u_m(k), \Delta v_m(k)]^T$, 则该孔两反射电机的反馈调节量 $[\Delta x_m(k), \Delta y_m(k)]^T$ 可计算为

$$\Delta P_m^c = \begin{bmatrix} \Delta x_m(k) \\ \Delta y_m(k) \end{bmatrix} = -J_m^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_m(k) \\ \Delta v_m(k) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

4.3 基于耦合矩阵的前馈补偿

CSF 远场准直光路的数学模型如图 6 所示^[12], 设反光镜 RM_1 的初始角为 θ_1 , 反射镜 RM_2 的初始角为 θ_2 , 偏振反射镜的初始角为 θ_3 , RM_1 与 RM_2 之间的距离为 d_1 , RM_2 与偏振反射镜之间的距离为 d_2 , 初始入射角为 α 。 (r_i, φ_i) , $0 \leq i \leq 3$, 分别表示图中所示位置处, 激光在二维空间中相对于水平基准线的位置和出射角度。依据四程放大系统的设计原理和上述模型, 有如下关系成立^[12]:

$$r_1 = f\varphi_0, \quad (5)$$

$$r_2 = -r_1 + 2f\phi_2, \quad (6)$$

$$r_3 = -r_2 + 2f\phi_1, \quad (7)$$

式中 f 为透镜焦距, ϕ_1 和 ϕ_2 分别为反射镜 CM_1 与 CM_2 相应于垂直放置时的偏转角度。由反射镜原理可得:

$$\beta = \alpha + \theta_1 + \theta_2, \quad (8)$$

$$\varphi_0 = 2\theta_3 - \beta - \theta_2, \quad (9)$$

当反光镜 RM_1 旋转角度 $\Delta\theta_1$ 时:

$$\beta = \alpha + \theta_1 + \theta_2 + 2\Delta\theta_1, \quad (10)$$

$$\varphi_0 = 2\theta_3 - 2\theta_2 - \theta_1 - \alpha - 2\Delta\theta_1, \quad (11)$$

将(11)式代入(6)式有:

$$r_2 = -f(2\theta_3 - 2\theta_2 - \theta_1 - \alpha - 2\Delta\theta_1) + 2f\phi_2. \quad (12)$$

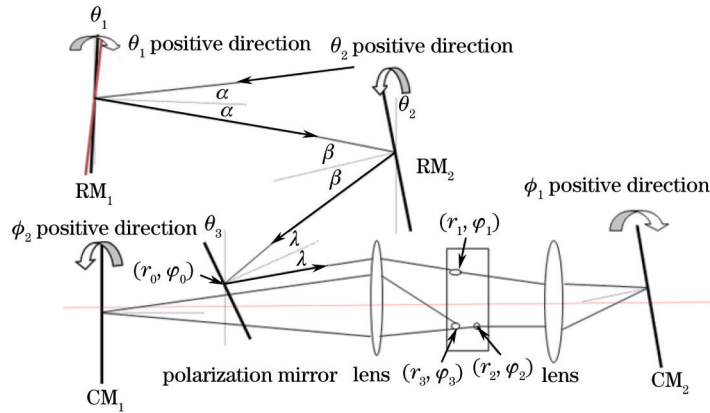


图 6 CSF 远场准直光路数学模型

Fig.6 Light path mathematical model of CSF far field alignment

由(12)式可以看出,当 1[#]孔准直反射镜 RM_1 调整时,2[#]孔光斑位置也会发生变化,可以将其视为来自 1[#]孔准直调节的扰动。为补偿这种扰动,2[#]孔反射镜 CM_2 需旋转角度 $\Delta\phi_2$ 以使下式成立:

$$-f(2\theta_3 - 2\theta_2 - \theta_1 - \alpha - 2\Delta\theta_1) + 2f(\phi_2 + \Delta\phi_2) = -f(2\theta_3 - 2\theta_2 - \theta_1 - \alpha) + 2f\phi_2, \quad (13)$$

由此可得:

$$\Delta\phi_2 = -\Delta\theta_1, \quad (14)$$

在准直过程中考虑反射镜的二维运动,并结合(4)式有如下关系成立:

$$\Delta\Theta_1(k) = \begin{bmatrix} \Delta\theta_{x1}(k) \\ \Delta\theta_{y1}(k) \end{bmatrix} = K_1 J_1^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta v_1(k) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

根据(14)式可计算出2#孔反射镜 CM₂ 准直电机的补偿控制量:

$$\Delta P_2^c(k) = K_2^{-1} \Delta \Phi_2(k) = K_2^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \phi_{x_2}(k) \\ \Delta \phi_{y_2}(k) \end{bmatrix} = -K_2^{-1} K_1 J_1^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta v_1(k) \end{bmatrix}, \quad (16)$$

式中 $\Delta \theta_{x_2}$ 、 $\Delta \theta_{y_2}$ 、 $\Delta \phi_{x_2}$ 和 $\Delta \phi_{y_2}$ 分别为反射镜 RM₁ 和 CM₂ 在 X 方向和 Y 方向上的旋转角度, $K_1 = \begin{bmatrix} k_{x1} & 0 \\ 0 & k_{y1} \end{bmatrix}$ 、 $K_2 = \begin{bmatrix} k_{x2} & 0 \\ 0 & k_{y2} \end{bmatrix}$ 分别为 RM₁ 和 CM₂ 各轴电机运动量同旋转角度之间的关系矩阵,由运动机构参数决定,可离线标定得到。

对于3#孔准直而言,由于1#孔准直所产生的扰动已经由2#孔反射镜 CM₂ 补偿,因此仅需将2#孔准直的光斑偏差反馈控制量视为扰动即可。按照上述同样思路可确定出3#孔反射镜 CM₁ 准直电机的补偿控制量 $\Delta P_3^c(k)$ 为

$$\Delta P_3^c(k) = -K_3^{-1} K_2 J_2^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_2(k) \\ \Delta v_2(k) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

式中 $K_3 = \begin{bmatrix} k_{x3} & 0 \\ 0 & k_{y3} \end{bmatrix}$ 为反射镜 CM₁ 各轴电机运动量同旋转角度之间的线性关系矩阵,同样可离线标定得到。

4.4 控制量综合

依据上述两节所述的孔内反馈调节控制量和孔间前馈补偿量,采用三孔并行准直时,1#孔、2#孔和3#孔反射镜两自由度电机在第 k 个准直周期时的运动量 ΔP_1 、 ΔP_2 和 ΔP_3 可综合确定为

$$\Delta P_1 = \Delta P_1^c = J_m^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta v_1(k) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_2^c + \Delta P_2^c(k) = J_2^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_2(k) \\ \Delta v_2(k) \end{bmatrix} - K_2^{-1} K_1 J_1^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_1(k) \\ \Delta v_1(k) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_3^c + \Delta P_3^c(k) = J_3^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_3(k) \\ \Delta v_3(k) \end{bmatrix} - K_3^{-1} K_2 J_2^{-1} \begin{bmatrix} \Delta u_2(k) \\ \Delta v_2(k) \end{bmatrix}. \quad (20)$$

4.4 串并行准直控制流程

图5控制模型和(18)~(20)式为CSF远场的各孔自动并行准直提供了可能。但在实际应用过程中,必须考虑各孔之间的前后互联关系:只有当1#孔准直结束后2#孔才能结束;只有当1#孔和2#孔全部准直完成后3#孔才能结束。因此,采用如图7所示准直流程实现CSF远场各孔的串并行综合准直:首先进行1#孔、2#孔和3#孔的并行准直调节;当1#孔光斑中心和基准中心的X、Y坐标偏差均小于1 pixel后,1#孔准直结束,2#孔和3#孔并行准直;当2#孔光斑中心和基准中心的X、Y坐标偏差均小于1 pixel后,2#孔准直结束,3#孔独立准直。并行准直过程中各孔反射镜电机的运动控制量根据(18)~(20)式计算得到。

5 实验与结果分析

为验证所述控制方法的稳定性,在神光II升级装置第2路CSF远场进行实验,并将其同串行比例微分(PD)控制方法和基于图像Jacobian矩阵的串行控制方法进行对比。实验中,通过标定得到的3#孔Jacobian矩阵分别为

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.0193 & 0.00066 \\ 0.00067 & 0.0364 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} -0.0703 & -0.0113 \\ 0.0123 & 0.0573 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} -0.0243 & -0.0087 \\ -0.0013 & 0.056 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

由于各孔准直反射镜已安装固定,表征电机运动量和反射镜角度变化量之间关系的矩阵 K_1 、 K_2 和 K_3 已无法直接测量和标定得到,为此只能根据图像平面内的固定运动测量对矩阵 $K_2^{-1} K_1$ 和 $K_3^{-1} K_1$ 进行粗略估计,其中:

$$K_2^{-1} K_1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 \end{bmatrix}, K_3^{-1} K_1 = \begin{bmatrix} 2.2 & 0 \\ 0 & 1.0 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

将各孔光斑准直调节至各自基准中心后,分别将各孔反射镜电机固定运动如下步数:1#孔X电机运动

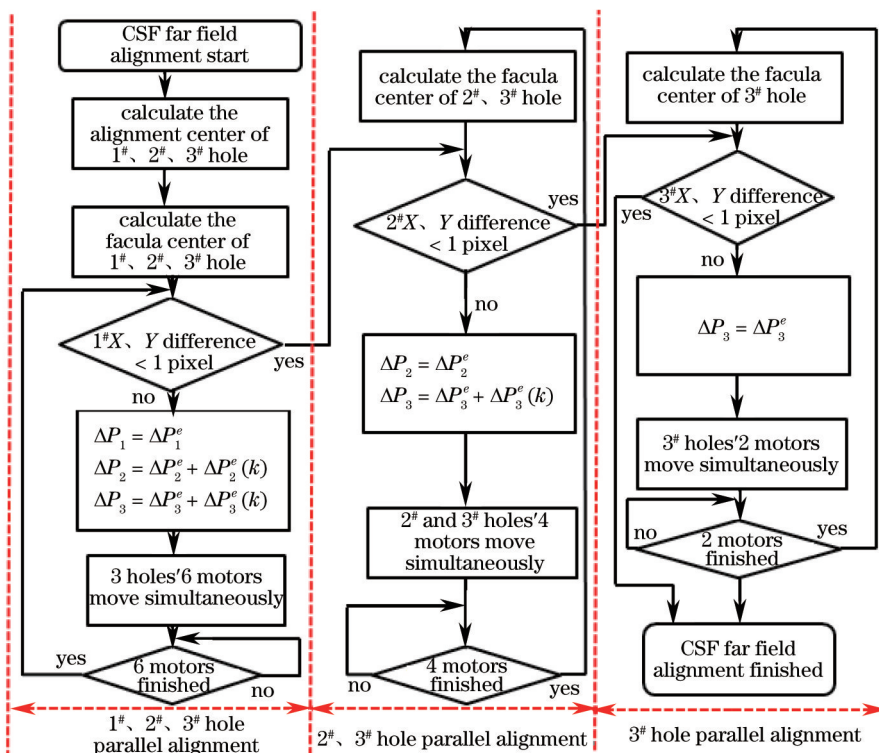


图7 CSF远场串并行准直控制流程

Fig.7 Flow chart of CSF far field serial-parallel alignment control

-600步, Y电机运动600步; 2#孔 X电机运动600步, Y电机运动600步; 3#孔 X电机运动900步, Y电机运动600步。将此时所对应的各孔光斑位置作为初始位置, 分别利用串行PD方法、串行图像Jacobian矩阵方法和本文方法进行准直调节, 准直调节终止条件为各孔两方向光斑偏差均小于1 pixel。采用三种方法进行准直时, 各孔光斑中心与基准中心之间的偏差变化曲线如图8所示, 其中1#孔、2#孔和3#孔分别由红色*标线、蓝色+标线和绿色o标线表示。

1) 由图8(a)可以看出: 采用串行PD方法进行准直时, 首先进行1#孔调节, 调节过程中导致2#孔和3#孔光斑位置发生随动, 调节11次后1#孔偏差满足小于1 pixel要求; 然后进行2#孔调节, 2#孔调节导致了3#孔光斑位置发生随动, 调节9次后满足要求; 最后进行3#孔调节, 调节9次后满足误差要求, 整体准直过程结束。整个过程迭代控制29次, 共耗时1 min56 s;

2) 由图8(b)可以看出: 采用基于图像Jacobian矩阵的串行调节控制方法, 其控制调节流程与串行PD方法类似, 但由于Jacobian矩阵对准直反射镜两运动电机之间的耦合性给与了一定考虑, 因此其效率较高, 整个过程仅需迭代控制16次, 总体耗时约58 s;

3) 由图8(c)可以看出: 采用所述串并行综合控制方法, 在1#孔准直调节过程中, 2#孔和3#孔同时进行反馈调节和随动扰动补偿, 尽管由于参数矩阵 K_1 、 K_2 和 K_3 标定较为粗略的缘故, 2#孔和3#孔光斑偏差有所震荡, 但在1#孔准直过程中很快就会收敛至较小偏差范围内, 从而保证其后续准直需要花费较少的迭代次数。整个过程迭代控制7次, 共耗时约43 s。

通过对神光II升级装置8路激光CSF远场进行大量准直实验, 结果表明所述方法能够可靠、准确、有效地完成整个准直调节过程: 对于不同光照下的远场基准图像, 基准中心正确识别率达97%以上, 很好地克服了以前所存在的、由于基准识别错误所导致的经常性准直失败问题; 平均耗时将以前的每路约73 s缩短至约32 s(实际准直过程中各孔初始偏差均比前面所述实验中的初始偏差要小的多), 大大提高了准直效率。

6 结论

采用位置预估和灰度梯度极值搜索算法实现了神光II升级装置CSF远场四个基准中心的高精度可靠提

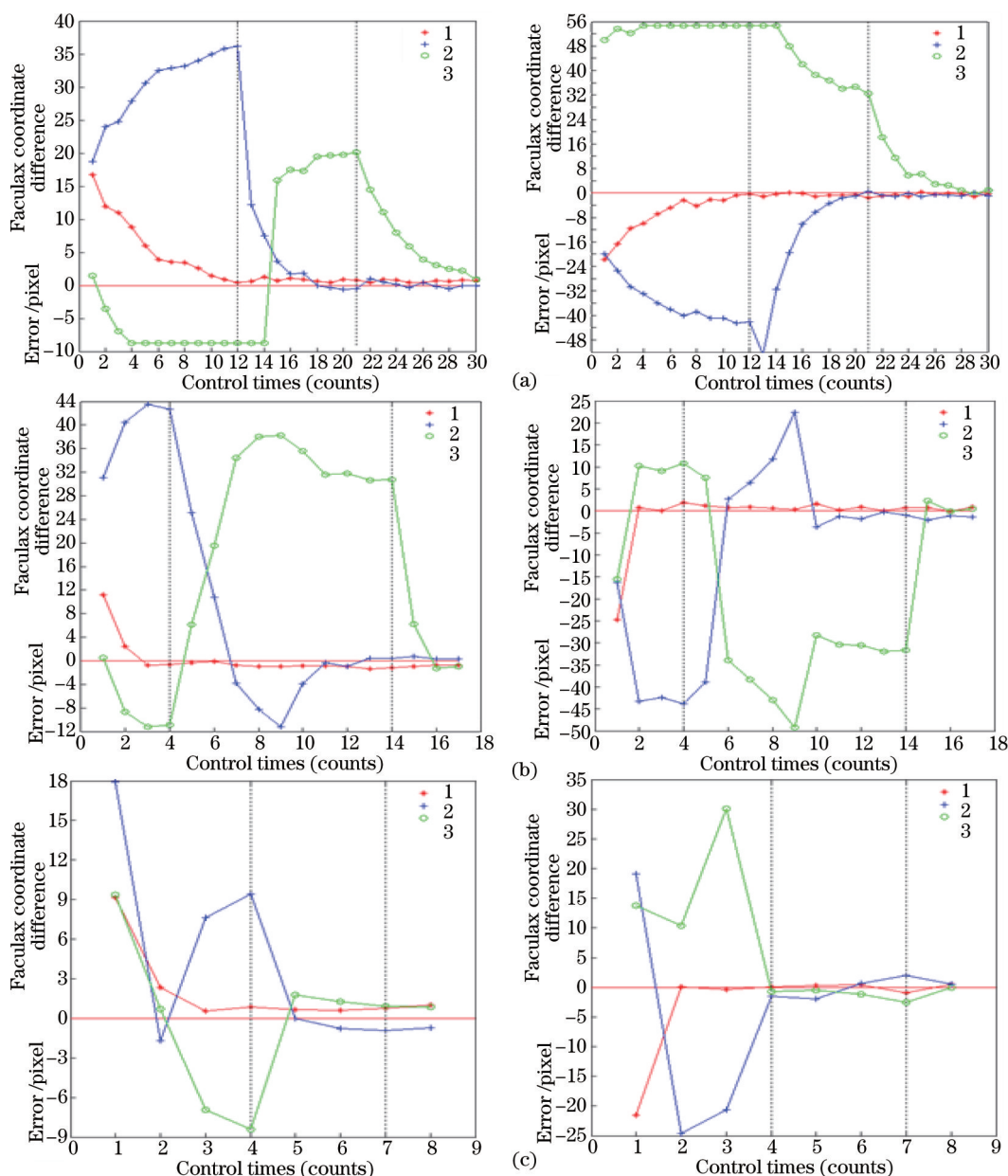


图8 光斑中心XY坐标偏差曲线。(a)串行PD控制方法;(b)图像Jacobian矩阵串行控制方法;(c)串并行控制方法

Fig.8 Deviation curves of spot center XY coordinate. (a) Serial control method based on PD; (b) serial control method based on image

Jacobian matrix; (c) serial-parallel control method

取,识别准确率为98%;并以此为基础提出了一种基于孔间前馈补偿和孔内反馈调节相结合的多孔串并行综合准直控制方法。通过在神光II升级装置上实际应用和对比验证得出:采用该方法能够将CSF远场准直由原来的1 min左右缩短至约30 s,大大提高了CSF远场环节的准直效率。以该方法为基础,通过以下几个方面的改善可进一步缩短准直时间:1)完善反射镜机构的结构设计,降低两自由度电机之间的耦合关联性;2)改善准直光源特性,增强光斑稳定性;3)离线精确计算和标定反射镜关系矩阵 K_1 、 K_2 和 K_3 。

参 考 文 献

1 L J Waxer, D N Maywar, J H Kelly, *et al.*. High-energy petawatt capability for the omega laser[J]. Optics and Photonic News, 2005, 16 (7): 30-36.
 2 F R Holdener, E Ables, E S Bliss, *et al.*. Beam control and diagnostic functions in the NIF transport spatial filter[C]. Proc of SPIE Paris, France, 1997: 692-699.
 3 N Fleurot, C Cavailler, J L Bourgade. The laser mégajoule (LMJ) Project dedicated to inertial confinement fusion: Development and

- construction status[J]. Fusion Engineering and Design, 2005, 74(1): 147-154.
- 4 Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, *et al.*. Far field auto-alignment system used in SG-II-UP system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 065204.
高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 神光II升级装置远场准直系统研究[J]. 物理学报, 2011, 60(6): 065204.
- 5 Liu Daizhong, Zhu Jianqiang, Xu Renfang, *et al.*. Study of beams automatic alignment in four-pass amplifiers[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(5): 582-586.
刘代中, 朱健强, 徐仁芳, 等. 4程放大光路自动准直系统研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(5): 582-586.
- 6 Lü Fengnian, Liu Daizhong, Xu Renfang, *et al.*. Performance of image processing in beams automatic alignment system[J]. Collection of theses on High Power Laser and Plasma Physics, 2005, 3(1): 72-74.
吕凤年, 刘代中, 徐仁芳, 等. 图像处理在光路自动准直系统中的应用[J]. 高功率激光及等离子体物理研究论文集(专题), 2005, 3(1): 72-74.
- 7 Zhai Xuefeng, Wang Guofu, Da Zhengshang. Design of SG-III 3ω laser beam auto-collimation system[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 0177.
翟学锋, 王国富, 达争尚. 神光-III 3ω 光路自动准直系统设计[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 0177.
- 8 Zhou Yang, Shao Ping, Zhao Dongfeng, *et al.*. Research on the system of the nanosecond target aiming and positioning of the SG-II updated laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1208002.
周 洋, 邵 平, 赵东峰, 等. 神光II升级装置纳秒靶瞄准定位技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1208002.
- 9 Li Hong, Wang Dongfang, Zou Wei, *et al.*. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1002003.
李 红, 王东方, 邹 伟, 等. 高功率激光装置光束自动准直系统设计[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002003.
- 10 Zeng Peiyong, Liu Daizhong, Peng Zengyun, *et al.*. Research of auto-alignment system based on ethernet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302009.
曾沛颖, 刘代中, 彭增云, 等. 基于以太网的自动准直系统研究[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302009.
- 11 D J Liu, W Zou, F Zhang, *et al.*. A reference center extraction method for SG- II -UP CSF alignment control[C]. The 11-th World Congresss on Intelligent Control and Automation, 2014: 69-73.
- 12 Gao Yanqi, Zhu Baoqiang, Liu Daizhong, *et al.*. Study of mathematical model for auto-alignment in four-pass amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(11): 6992-6997.
高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 等. 四程放大自动准直系统数学模型研究[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6992-6997.

栏目编辑: 苏 岑