

doi: 10.3788/gzxb20144305.0512005

# 综合诊断光路快速自动准直系统设计与实现

王拯洲<sup>1,2</sup>, 王维<sup>1,2</sup>, 胡炳樑<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 曹世康<sup>1</sup>, 李东坚<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 为了实现综合诊断光路全程快速准直, 从并行处理、快速收敛电机运动模型和最小外切圆特征点提取三个方面对自动准直系统进行了总体设计. 首先, 对全部准直步骤采取并行、串并结合的方式执行, 并将关键准直任务归纳成单元准直模型; 其次, 使用准直数学模型, 实现单元准直模型中电机的快速收敛; 最后, 针对小孔图像灰度对比低、分布极不均匀、光斑很不完整的特点, 提出在最小外切圆的圆环上, 取两两距离最大的 100 个点为特征点, 使用最小二乘法进行圆拟合法计算小孔图像圆心. 研究表明优化后系统的准直时间从优化前 40 min 减少到 8 min, 小孔图像圆心误差在 2 个像素之内, 满足打靶实验的要求.

**关键词:** 快速准直; 电机运动模型; 最小外切圆; 特征点提取; 最小二乘法; 圆拟合

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)05-0512005-6

## Design and Implementation of Integrated Diagnostic Beam Fast Automatic Alignment System

WANG Zheng-zhou<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, HU Bing-liang<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, CAO Shi-Kang<sup>1</sup>, LI Dong-jian<sup>1</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** Parallel processing, fast convergent motor model and characteristic points extracted from the smallest outer circle were proposed to design the automatic alignment system, which can integrated diagnostic fast automatic alignment. First, all the alignment steps were executed in parallel and serial-parallel mode, and the important steps were reduced to unit alignment model. Second, the mathematical model for fast automatic alignment was used and the fast convergent algorithm of the unit alignment model was implemented. Finally, according to the characteristics of small laser spot, which contrast was low, distribution was asymmetrical, spot was not complete, the 100 characteristic points were extracted from the smallest outer circle and any two points distance was maximal, then a new method of circle fitting using least square method to calculate small laser spot center was proposed. Through the improvement of the above three aspects, alignment time reduced from 40 minutes to 8 minutes before the three aspects were optimized, the error of small laser spot centre is less than 2 pixels, and meet the experiment requirements.

**Key words:** Fast automatic alignment; Motor model; The smallest outer circle; Extract characteristic points; Least square method; Circle fitting

**OCIS Codes:** 120.1680; 120.2000; 120.4640; 120.4820; 130.3120

## 0 引言

在大型激光装置中, 为了对高通量下的关键光学

元器件、组件或系统的负载能力进行综合验证<sup>[1~3]</sup>. 需要建立一套激光参量综合诊断系统, 该系统是一个多功能、高准确度的激光参量诊断平台, 用来精密诊断装

基金项目: 国家(863)高技术研究发展计划(No. 051Z331BOA)资助

第一作者: 王拯洲(1976—), 男, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为信号与信息处理. Email: azhou\_china@126.com

导师(通讯作者): 胡炳樑(1973—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高速信号处理、数据压缩、光谱成像技术. Email: hbl@opt.ac.cn

收稿日期: 2013-09-04; 录用日期: 2013-10-31

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

置输出激光光束的特性,为研究频率转换组件<sup>[4]</sup>及相关科学技术问题提供全面、精确的激光参量.其中靶点的光斑形态分布测量尤其重要,为了提高测量的动态范围,一般采用纹影法测量<sup>[5]</sup>,即主瓣、旁瓣分开测量,用纹影挡光测旁瓣,主瓣放大,拼接实现高动态范围的焦斑测量的方法.要提高拼接的准确性,就需要保证主、旁瓣光路的同轴性.由于预发射阶段只有 30 min,在主发射前完成快速而准确的准直是打靶实验成功的关键.传统的自动准直只是针对准直数学模型进行研究<sup>[7]</sup>,而大型综合诊断系统的自动准直包括光学取样组件、探测元器件、伺服系统、监视系统、控制系统等,它们构成闭环的调控监视系统,通过软件系统进行全程控制<sup>[6]</sup>.本文在分析准直特点的基础上,采用并行处理、快速收敛的电机运动模型、最小外切圆特征点提取的图像快速处理算法实现综合诊断自动准直系统的快速准直.

## 1 自动准直原理

光路准直的基本原理是利用“两点一线”来确定一条光束,使激光弹着点与预设目标重合.对此需要测试光束的指向性和中心位置,它们靠远场 CCD 和近场 CCD 实现.如图 1 所示,光路的调整是通过调整伺服反射镜  $M_2$ 、 $M_3$  来实现的.

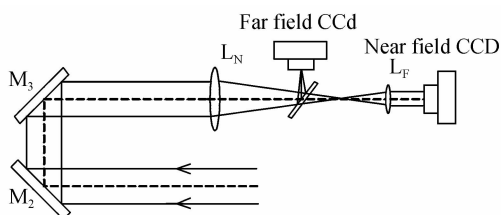


图 1 光路准直

Fig. 1 Optical schematic of beam alignment

在光路准直流程中,光束近场、远场光斑投射到相应的 CCD 上,利用图像软件对 CCD 获取的数据进行

动态域值法处理<sup>[8]</sup>,计算出激光近场和远场图像中心值,并与基准位置相比较,获得被调整光束的中心偏差量.然后将这些偏差量作为输入量,代入控制程序获得  $M_2$ 、 $M_3$  的方位、俯仰调整量,并驱动伺服反射镜上的步进电机调整光轴位置,迭代直至远、近场偏差在要求的误差范围内.

## 2 快速准直系统的设计和实现

光路自动系统包括模拟光源和接力光源的选取,光路准直参考基准的建立,采样光路的设计,通过图像处理对小孔基准和光斑中心的获取,电机控制程序和计算机集中控制软件的设计等.

激光参量综合诊断系统光路见图 2<sup>[10]</sup>,箭头  $\downarrow$  表示要推入推出光路的方向,符合右手螺旋定律.该系统位于装置的末端,是一个多功能、高准确度的激光参量诊断系统.准直主要分为两个区域:频率转换前的基频光准直和频率转换后的三倍频光准直;前者的目的是将抽样激光束准直到模拟靶点,后者的目的是将模拟靶点上的激光远场光斑准确成像到探测 CCD 上,以便获得焦斑的正确形态分布.对此将准直流程细分为基频准直、准直服务自检及准备、靶点基准建立、同轴偏差修正、三倍频基准对接、纹影准直、穿孔基准对接 7 个阶段,见图 3.全系统共有两个光源,在光路中的靶点前使用模拟光源,由于模拟光能量比较小,无法准确测量旁瓣和主瓣,所以靶点位置增加接力光源来替代模拟光源来完成三倍频组件光路的准直,这样就增加了光路准直的复杂度.

自动准直系统的特点:准直快速、准确度高、参量化,能够实现一键式准直.其中快速准直主要通过三个方面来实现:1)对准直步骤的并行处理;2)单元准直模型的快速收敛;3)图像的快速准确计算.

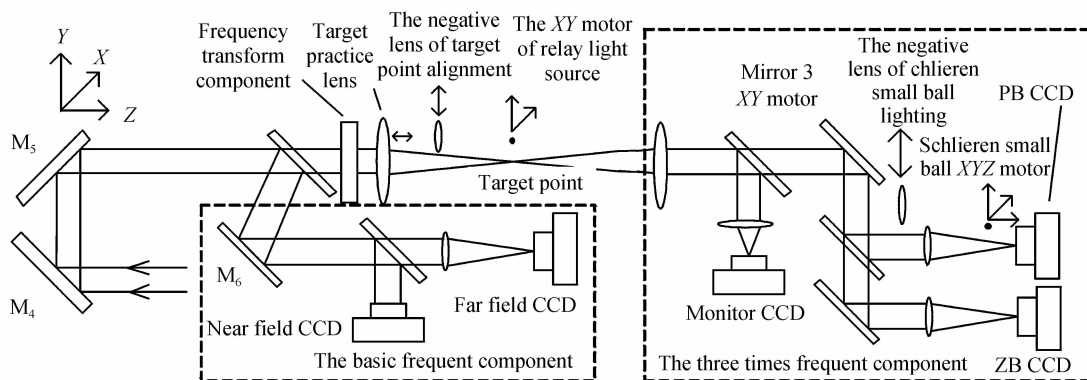


图 2 综合诊断光路

Fig. 2 Optical schematic of integrated diagnostic system

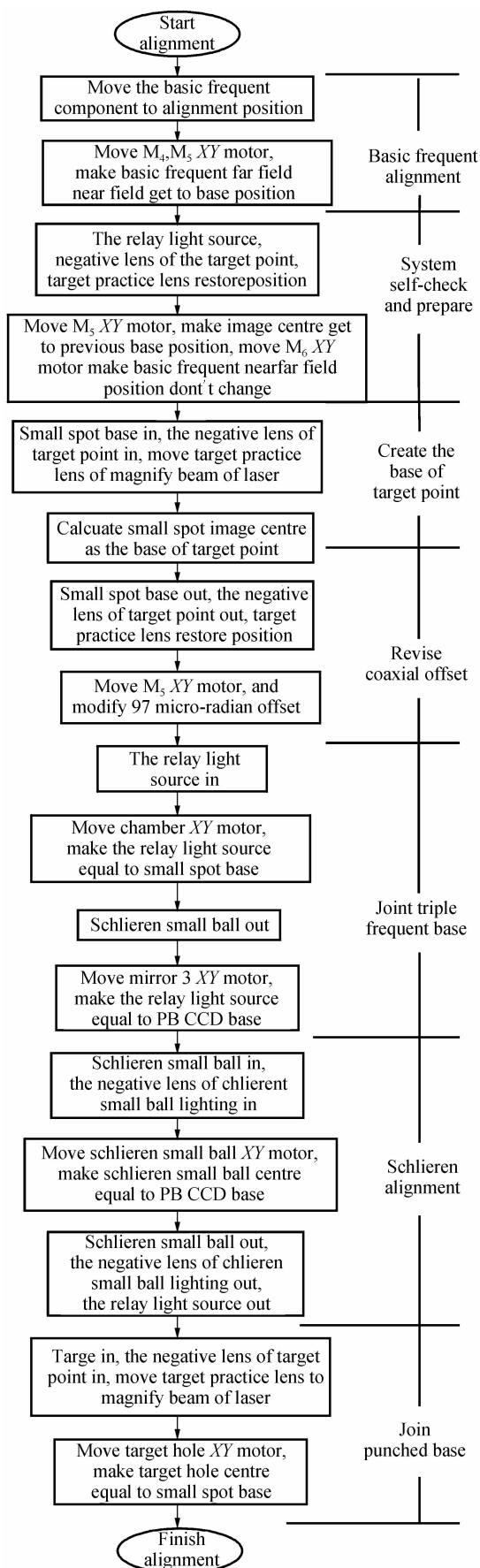


图3 综合诊断三倍频准直流程  
Fig. 3  $3\omega$  alignment flow of integrated diagnostic system

### 2.1 准直步骤的并行处理

为了实现并行准直, 将7个阶段的准直步骤细分为58个步骤, 将能够一起并行执行的步骤划分为1个包, 共22个包, 只有当前包中的步骤全部成功执行完毕才能执行下一包, 依次将所有22个包全部执行完毕, 则准直完成. 通过并行准直, 时间从串行准直所需40 min减少到8 min.

在准直过程中每步启动1个线程, 58步共58个线程, 另外启动1个后台监听线程和7采集图像求中心电机迭代线程, 全过程共66个线程. 在需要对光路进行修正时才启动采集图像求中心电机迭代线程, 这7个线程的成功执行是整个自动准直成功的关键. 全部并行准直流程如图4.

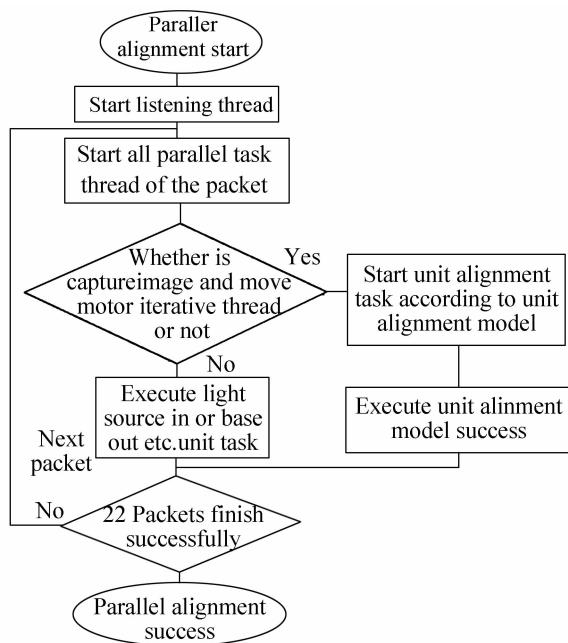


图4 并行准直流程  
Fig. 4 Parallel alignment flow

全系统共7个采集图像电机迭代线程, 在图3中用加粗的字体表示, 每个采集图像电机迭代线程可以看作一个单元准直, 整个准直过程中共有7个单元准直, 根据单元准直的特点, 构建了一个单元准直模型, 如图5.

7个单元准直模型可以划分为3类: 1) 基频准直, 近场远场同时调整, 准直模型运用式(3), 通过2个二维电动反射镜来调整光束; 2) 远场准直, 只是调整远场, 准直模型运用式(4), 通过1个二维电动反射镜来调整光束; 3) 纹影准直, 准直模型运用式(4), 调整的的不是光束, 而是调整目标纹影小球, 通过移动纹影XY电机, 使得纹影小球和基准重合.

对一个单元准直模型来说, 需要确定4个参量就能完成一个单元准直的过程, 这4个准直参量分别是: 近场远场基准  $B_xJ$ 、 $B_yJ$ 、 $B_xY$ 、 $B_yY$ , 近场远场准直

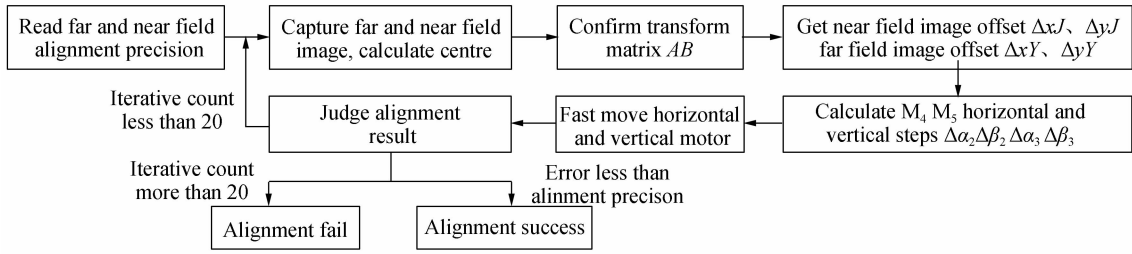


图5 单元准直模型

Fig. 5 The unit alignment model

准确度  $D_xJ, D_yJ, D_xY, D_yY$ ; 采集图像求中心; 计算电机水平俯仰调整量  $\Delta\alpha_2, \Delta\beta_2, \Delta\alpha_3, \Delta\beta_3$ ; 快速移动水平俯仰电机. 每个单元准直模型的基准和准直准确度肯定不同; 而采集的图像由于采集设备、准确度以及图像特征的不同求中心的算法不同; 电机水平俯仰移动步数要通过标定式(3)中的矩阵  $\mathbf{AB}$  来确定.

## 2.2 快速收敛电机运动模型

光路自动准直系统是一个闭环控制系统, 控制的输入误差量为图像传感器求解的光斑与基准的偏差, 控制的输出控制量为电动反射镜驱动步进电机的步数. 控制的偏差量包括远场 CCD 得到的光斑在  $X, Y$  方向的偏差  $\Delta xY, \Delta yY$ , 以及近场 CCD 得到光斑在  $X, Y$  方向的偏差  $\Delta xJ, \Delta yJ$ ; 控制的输出量为电动反射镜  $M_2, M_3$  方位、俯仰电机调整的角度(步数)  $\Delta\alpha_2, \Delta\beta_2, \Delta\alpha_3, \Delta\beta_3$ . 分析表明, 小角度调整范围内方位、俯仰的调整与光斑在 CCD 上的  $X, Y$  方向移动是独立的<sup>[7]</sup>, 即方位的移动只引起光斑在  $X$  方向的移动, 俯仰的移动只引起光斑在  $Y$  方向移动, 根据文献<sup>[7]</sup>的结果可用矩阵表达为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta_{xY} \\ \Delta_{xJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\alpha_2 \\ \Delta\alpha_3 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta_{yY} \\ \Delta_{yJ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

矩阵  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$  为输入  $\Delta x, \Delta y$

和输出量  $\Delta\alpha, \Delta\beta$  之间的转换矩阵, 其物理含义表示为光路准直系统硬件的设计关系, 求解过程如下:

在式(1)中, 令  $\Delta\alpha_2 = 1, \Delta\alpha_3 = 0$ , 则  $\Delta_{xY} = a_{11}$ ,  $\Delta_{xJ} = a_{21}$ ,  $a_{11}$  表示反射镜  $M_2$  方位的单位角度(步长)转动在远场 CCD 上引起的光斑横向移动量;  $a_{21}$  表示反射镜  $M_2$  方位的单位角度(步长)转动在近场 CCD 上引起的光斑横向移动量.

由于电机的转动有正负, 光斑的移动也有方向, 为便于计算机控制, 需规定控制的符号体系. 在 CCD 坐标系中规定偏差量按式(2)计算, 即

$$\begin{cases} \Delta_x = x_{\text{base}} - x_{\text{image}} \\ \Delta_y = y_{\text{base}} - y_{\text{image}} \end{cases} \quad (2)$$

$x_{\text{base}}$  表示基准的  $x$  坐标,  $x_{\text{image}}$  表示当前光斑的  $x$  坐标;

$y_{\text{base}}$  表示基准  $y$  坐标,  $y_{\text{image}}$  表示当前光斑的  $y$  坐标.

当  $A, B$  已知时, 根据传感器测量的  $\Delta X, \Delta Y$ , 由式

(1) 可得电动反射镜方位、俯仰的调整量为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\alpha_2 \\ \Delta\alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta_{xY} \\ \Delta_{xJ} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta\beta_2 \\ \Delta\beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \Delta_{yY} \\ \Delta_{yJ} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

在某些光路准直过程, 只需要对远场进行微调, 而近场移动很小, 可假设  $\Delta xJ = 0, \Delta yJ = 0$ , 则  $\Delta\alpha_3 = 0, \Delta\beta_3 = 0$ , 则公式可以简化为

$$\begin{cases} \Delta\alpha_2 = \Delta_{xY} / a_{11} \\ \Delta\beta_2 = \Delta_{yY} / b_{11} \end{cases} \quad (4)$$

在准直过程中主要是接力光源、小孔基准、负透镜、纹影小球的推入推出光路和大小视窗切换耗时最多. 为了提高准直收敛的速度, 缩短准直时间, 在第一次移动电机时, 先以较高的速度和加速度移动 90% 的偏差, 在剩余的 10% 偏差通过较低速度运动进行微调, 分析表明, 通过按阶段改变准直收敛速度, 单元准直模型的准直时间提高了 20%.

## 2.3 使用最小外切圆特征点提取法计算低对比度小孔图像圆心

综合诊断自动准直系统在 7 个步骤中需要通过判读激光光斑中心来移动电机使光斑或小孔中心到目标位置, 根据图像的特点可以划分为小孔基准、远场光斑、纹影小球 3 类图像, 如图 6.

其中图 6(b) 光斑中心用重心法实现, 图 6(c) 纹影小球中心要首先从背景中搜索出纹影小球图像后再求中心, 因为纹影小球光斑比较小, 而且灰度很高, 所以其本质也是用重心法计算纹影小球中心, 这两类图像求中心对误差准确度要求不高. 对于图 6(a) 小孔基准图像, 先对图像质量进行评价<sup>[11]</sup>, 对低对比度的小孔图像进行背景抑制<sup>[12]</sup>和图像增强<sup>[13-14]</sup>处理, 最后通过在最小外切圆上提取的特征点使用最小二乘法进行圆拟合法计算小孔图像圆心.

在自动准直过程中精确计算小孔基准, 即小孔图像圆心是关键的一步, 传统的圆拟合算法需要准确检测图像边缘, 但是由于模拟光源能量低, 经过发散的小孔图像灰度对比低、分布极不均匀、光斑很不完整的特

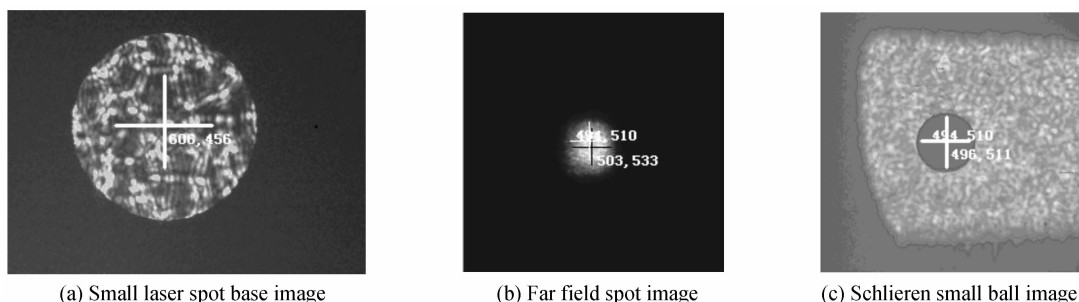


图 6 3 种图像

Fig. 6 Three images

点,本文提出了一种求取小孔基准的新方法:先计算小孔图像大致的圆心和半径;通过统计包含所有二值化图像的圆的概率,选择概率大于 0.999 半径最小外切圆的圆心为最佳的圆心;并以最佳圆心寻找宽度为 5 的圆环;在圆环上计算每两个像素之间的距离,取最大距离的 100 点为特征点;最后通过选择的特征点利用式(7)进行圆拟合得到最后真正的圆心.本方法的重点是寻找圆弧上的特征点,从图 7(b)可以看出,二值化

图像的边缘大多都不能作为特征点.因为在圆上距离最大的两个点之间的直线必定过圆心,根据这一特点,寻找二值化图像中距离两两最大的点必为特征点,为了减少计算量和缩小参与计算的点的范围,在宽度为 5 个像素的圆环内搜索特征点将大大减少运算量.在获得特征点后利用最小二乘法进行圆拟合,以提高拟合准确度.

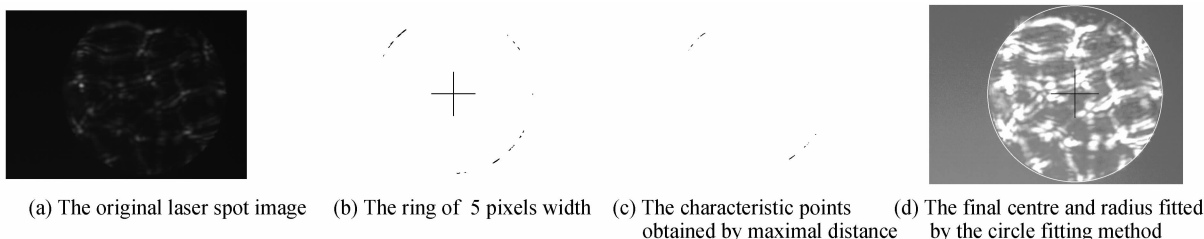


图 7 4 种图像

Fig. 7 Four images

设目标函数表示为

$$F(x_0, y_0, r) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} - r)^2 = \min \quad (5)$$

式中  $N$  为参与拟合计算的特征点的个数.这是一个非线性最小二乘问题,当点  $O(x_0, y_0)$  在坐标原点附近

时,常以式(6)代替,即

$$F'(x_0, y_0, r) = \sum_{i=1}^N (r^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2) = \min \quad (6)$$

假设所有边界的点个数为  $N$ ,  $(x_i, y_i)$  为图像的边界坐标,拟合出的圆心坐标  $x_0, y_0$  和半径  $r$  的表达式为<sup>[9]</sup>

$$\begin{cases} x_0 = \frac{(\overline{x^2 x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - (\overline{x^2 y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ y_0 = \frac{(\overline{x^2 y} + \overline{yy^2} - \overline{x^2 y} - \overline{y^3})(\overline{x^2} - \overline{x^2}) - (\overline{x^2 x} + \overline{xy^2} - \overline{x^3} - \overline{xy^2})(\overline{xy} - \overline{xy})}{2((\overline{x})^2 - \overline{x^2})(\overline{y^2} - \overline{y^2}) - 2(\overline{xy} - \overline{xy})^2} \\ r = \sqrt{\overline{x_0^2} - 2\overline{xx_0} + \overline{y_0^2} - 2\overline{yy_0} + \overline{x^2} + \overline{y^2}} \end{cases} \quad (7)$$

式中

$$\overline{x^m y^n} = \frac{1}{N} \sum_{i \in E} x_i^m y_i^n \quad (8)$$

具体算法步骤为:

1)先使用中值滤波<sup>[15]</sup>去噪,再使用大率津法对图像进行二值化.

2)计算小孔图像粗略的圆心和半径,通过在水平

和垂直方向分别获得最小和最大的 10 个点,然后计算平均值得到圆轮廓最左和最右的点  $X_1$  和  $X_2$ ,平均为  $X_0$ ,以及最上和最下的点  $Y_1$  和  $Y_2$ ,平均为  $Y_0$ ;  $(X_2 - X_1)/2$  为水平方向圆半径,  $(Y_2 - Y_1)/2$  为垂直方向圆半径,水平和垂直方向圆半径的平均为  $R_0$ ,则小孔图像大致的圆心和半径为  $(X_0, Y_0)$  和半径  $R_0$ .

3)将半径  $R_0$  逐渐增大为  $R_1$ ,直到二值化图像的

99.9%都在新的圆内为止。

4) 根据半径的先验知识,判断图像缺失的方向,图像上半部分缺失,则Y方向向上偏移 $(R_1 - R_0)/2$ ,X方向为0,调整新的圆心为 $(X_2, Y_2)$ ;

5) 增加半径 $R_0$ ,在 $(X_2, Y_2)$ 的 $40 \times 40$ 邻域内搜索包含99.9%二值化图像的最小半径的圆,即最小外切圆,则圆心 $(X_3, Y_3)$ 和半径 $R_3$ 为最佳的圆心和半径;

6) 为了减少特征点的搜索范围,在二值化图像上寻找以 $(X_3, Y_3)$ 为圆心宽度为5的近似圆环,如图7(b)。

7) 在圆环上计算每两个像素之间的距离,取最大欧氏距离的100个点为特征点,如图7(c)所示,运用公式(7)拟合圆心和半径。

将该方法应用于某大型激光装置的自动准直系统小孔基准计算中,取得了很好的效果。表1为10次准直实验的小孔基准图像中本文方法计算圆心和标定圆心之间的误差比较。从表1中可以看出,圆心误差XY方向都在2个像素之内,其中X方向误差均值0.54,Y方向误差均值0.72,满足综合诊断系统对小孔基准误差在3个像素之内的要求。而且本方法只是寻找特征点时计算量比较大,而进行圆拟合时只要对边界点循环一次就可以计算出各参量,时间复杂度为 $O(n)$ ,整个算法耗时为0.8s,这就为整个准直过程节约了时间,满足了快速准直的需要。

表1 本文方法计算圆心和真实圆心误差比较(单位:像素)

Table 1 The error comparison between fitted centre and true centre (unit: pixel)

No.	The fitted centre	The true centre	The centre error
a	X:611.16 Y:462.79	X:610.5 Y:462.5	X:0.66 Y:0.29
b	X:606.27 Y:466.13	X:607 Y:463.5	X:-0.73 Y:1.63
c	X:608.42 Y:467.92	X:608 Y:467	X:0.42 Y:0.92
d	X:611.36 Y:466.39	X:611 Y:465.5	X:0.36 Y:0.89
e	X:610.02 Y:463.61	X:609 Y:463	X:1.02 Y:0.61
f	X:614.51 Y:461	X:614 Y:461	X:0.51 Y:0
g	X:610.39 Y:463.07	X:610.5 Y:462.5	X:-0.11 Y:0.57
h	X:611.83 Y:461.84	X:611 Y:462	X:0.83 Y:-0.16
i	X:611.37 Y:466.39	X:610 Y:465	X:1.37 Y:1.39
j	X:608.11 Y:463.54	X:608 Y:463	X:0.11 Y:0.54

### 3 结论

本文在对自动准直原理分析的基础上,通过对准直步骤的并行处理减少了各步骤间空闲等待时间,通过快速收敛电机运动模型减少了单元准直模型的迭代时间,通过最小外切圆特征点提取法减少了计算小孔基准的时间,并提高了计算小孔基准的准确性。实验结果表明,通过以上三个方面措施的改进,准直时间从40min减小到了8min,小孔基准误差在2个像素之内,满足了综合诊断打靶实验的要求。

### 参考文献

- [1] HAYNAM C, WEGNER P, AUERBACH J, et al. National ignition facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(16): 112-115.
- [2] ZHANG Xiao-ming, ZHENG Wan-guo, WEI Xiao-feng, et al. Preliminary experimental results of Shenguang III technical integration experiment line[C]. SPIE, 2005, **56**(27): 6-12.
- [3] CHEN Qin-hao, XU Ren-fang, PENG Zheng-yun, et al. Automatic beam alignment for laser-fusion facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(5): 531-533.  
陈庆浩,徐仁芳,彭增云,等.用于激光核聚变的光路自动准直[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 531-533.
- [4] CONDER A, ALGER T, AZEVEDO S, et al. Final optics damage inspection(FODI)for the national ignition facility[C]. SPIE, 2007, **6720**.
- [5] CHENG Juan, QIN Xing-wu, CHEN Bo, et al. Experimental investigation on focal spot measurement by schlieren method[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 612-614.  
程娟,秦兴武,陈波,等.纹影法测量远场焦斑实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 612-614.
- [6] LIU Dai-zhong, XU Ren-fang, FAN Dian-yuan. Design and performance of a video-based laser beam automatic alignment system[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, **2**(2): 92-94.
- [7] DA Zheng-shang, LI Dong-jian, PENG Zhi-tao. Mathematical model for beam automatic fast alignment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2534-2538.  
达争尚,李东坚,彭志涛.光路自动准直快速调整数学模型研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2534-2538.
- [8] ZHAI Xue-feng, WANG Guo-fu, DA Zheng-shang. Design of ShengGuang III-3 $\omega$ beam automatic alignment system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(2): 177-180.  
翟学锋,王国富,达争尚.神光III-3 $\omega$ 光路自动准直系统设计[J]. *应用光学*, 2007, **28**(2): 177-180.
- [9] KONG Bing, WANG Zhao, TAN Yu-shan. Algorithm of laser spot detection based on circle fitting[J]. *The Infrared and Laser Engineering*, 2001, **31**(3): 275-279.  
孔兵,王昭,谭玉山.基于圆拟合的激光光斑中心检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2001, **31**(3): 275-279.
- [10] LIU Dai-zhong, ZHU Jian-qiang, XU Ren-fang, 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,朱键强,徐仁芳,等.四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.
- [11] TIAN Hao-nan, LI Su-mei. Objective evaluation method for image quality based on edge structure similarity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(1): 110-114.  
田浩南,李素梅.基于边缘的SSIM图像质量客观评价方法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(1): 110-114.
- [12] ZHANG Chang-jiang, FU Meng-yin, JIN Mei, et al. Approach to enhance contrast of infrared image based on wavelet transformation[J]. *Journal of Infrared and Millim Waves*, 2004, **23**(2): 120-124.  
张长江,付梦印,金梅,等.一种红外图像对比度增强的小波变换法[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(2): 120-124.
- [13] GONG Wu-peng, WANG Yong-Zhong. Contrast enhancement of infrared image via wavelet transform[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, **22**(6): 117-119.  
宫武鹏,王永仲.一种基于小波变换的红外图像对比度增强技术[J]. *国防科技大学学报*, 2000, **22**(6): 117-119.
- [14] SUN Li-hui, WANG Yong-zhong, ZHOU Bing. Self-adaptive infrared image background suppressed algorithm based on local statistical character[J]. *The Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 177-180.  
孙立辉,王永仲,周冰.基于局部统计特征的自适应红外背景抑制算法[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 177-180.
- [15] 章毓晋.图像工程图像分析(中册 第二版)[M].北京:清华大学出版社,2005: 222-223.