

# 基于空间光调制的光束聚焦实时反馈控制方法及系统

谢志坤, 钱伟岸, 张金辉, 李少锋, 卫冠, 张冰志, 陈志峰

广州大学物理与电子工程学院, 广东 广州 510006

**摘要** 提出一种基于空间光调制的光束聚焦控制方法,利用液晶空间光调制器产生动态的多元菲涅耳透镜相位结构,以实现对光束焦斑的轴向与横向偏移的快速精确调节。采用面阵探测器检测光斑大小与位置信息,结合反馈控制机制可实现对光束聚焦点三维位置的自动校准及稳定性控制。该方法在调节过程中不同偏移量之间不存在耦合影响,且横向偏移调节对光传输距离不敏感。进一步介绍了基于该方法搭建的光束聚焦实时反馈控制系统。实验表明,光束焦斑的轴向校准能做到精确快速的收敛。横向偏移校准方面,在较短焦距的情况下能做到单步收敛,而在较长焦距的情况下需要结合比例积分微分控制算法进行调节,如利用数据拟合对调节误差进行经验修正,也可做到单步收敛。

**关键词** 光学设计; 聚焦控制; 实时反馈调节; 空间光调制器

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.072201

## Real-Time Feedback Control Method and System of Beam Focusing Based on Spatial Light Modulation

Xie Zhikun, Qian Weian, Zhang Jinhui, Li Shaofeng, Wei Guan, Zhang Bingzhi, Chen Zhifeng

*School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China*

**Abstract** A method of beam focusing control based on the spatial light modulation is proposed. In order to realize the rapid and precise adjustment on the axial and transverse deviations of the beam focusing, the liquid crystal spatial light modulator is adopted to produce the dynamic phase structure of binary Fresnel lens. An area array detector is used to detect the size and position of the light spot. And combining the feedback control mechanism, the automatic calibration and stability control on the beam focus point of three-dimensional position can be realized. In the adjustment process of this method, there is no coupling among different deviations, and the transverse deviation adjustments are insensitive to the propagation distance. Furthermore, the real-time feedback control system of beam focusing based on this method is introduced. The experiment results show that the axial calibration of the beam focal spot can converge precisely and rapidly. The transverse deviation calibration can converge with single step in the case of short focal length. In the case of long focal length, the combination of proportion-integration-differentiation algorithm is need to adjust. The convergence with single step can be also realized if an experiential correction on the adjustment errors based on the data fitting are corrected experimentally.

**Key words** optical design; focus control; real-time feedback adjustment; spatial light modulator

**OCIS codes** 220.1140; 120.5060; 080.2740; 220.4830

## 1 引言

随着对激光技术的不断深入研究,激光被广泛地用于光通信、工业测量以及其他科研领域。应用于光通

**收稿日期:** 2017-02-28; **收到修改稿日期:** 2017-03-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(11204044,11404071)、广东省自然科学基金(2014A030313523)、广东省大学生创新训练项目(201611078076)

**作者简介:** 谢志坤(1995—),男,本科生,主要从事光束调控、测量技术方面的研究。E-mail: xie@e.gzhu.edu.cn

**导师简介:** 陈志峰(1982—),男,博士,副教授,主要从事超快光电子学以及光束调控技术方面的研究。

E-mail: chenzf@gzhu.edu.cn(通信联系人)

信、激光精密测量等方面,对激光光束指向或焦斑的空间稳定性通常有很高的要求;而应用于激光跟踪、扫描等方面,则需要精确的光束指向或聚焦控制。因此,研究光束指向和聚焦的控制、及校准技术等对于激光技术的应用具有重要意义。

在光束指向控制方面,国内外的学者提出了很多方案,主要包括干涉/衍射法<sup>[1-2]</sup>、单模光纤法<sup>[3]</sup>与反馈控制法<sup>[4-7]</sup>等。干涉/衍射法和单模光纤法一般只用于提高光束的指向稳定性,其中前者利用的是光学条纹,后者对光源具有选择性,这些特点限制了上述两类方法的应用范围。结合了光束偏移调节技术与光电检测技术的反馈控制法,既可用于提高光束的指向稳定性,又可用于实时控制的场合。有学者提出利用透镜聚焦和平行镜对光束的平行偏移量进行独立检测和调节,以用于抑制光束方位的漂移<sup>[4-5]</sup>。还有学者提出基于偏转平移光路的光束方位校准方法,以实现光束二维角偏、平偏量的实时控制<sup>[7]</sup>。但以上方法属于机械控制方式,其效果依赖于机械器件的控制精度和响应速度,且控制系统较复杂,不利于将来的功能集成等,因此研究非机械式的实时控制方法具有重要的意义与应用前景。

在非机械式控制方面,目前多是利用液晶进行光学相位控制<sup>[8-15]</sup>。赵祥杰等<sup>[8]</sup>根据二元光学理论和液晶空间光调制器(LCSLM)的电控相位延迟特性,设计了周期台阶相位模式的闪耀光栅,实现了对入射光束的电控偏转,但未设计闭环控制。张彩等<sup>[9]</sup>设计了基于阶梯型闪耀光栅的光束偏转闭环系统,能有效地抑制光束抖动,但横向的二维偏转存在一定耦合,角度偏移不连续。师宇斌<sup>[10]</sup>基于多孔干涉原理以及模式法实现光束角度连续偏转,但算法复杂,系统收敛较慢。此外在光束的聚焦控制方面,陈怀新等<sup>[14]</sup>通过在LCSLM上加载阵列数与焦长可调控的阵列菲涅耳波带片图像使光束会聚;邹丽敏等<sup>[15]</sup>在聚焦控制的基础上,利用闪耀光栅法加上横向的偏转扫描。但这些工作都缺乏闭环控制方面的设计和研究。

本文提出一种采用LCSLM的光束聚焦控制方法。该方法基于动态的二元菲涅耳透镜相位结构,实现对光束焦斑的轴向与横向偏移的快速精确调节,在调节过程中不同偏移量间不存在耦合影响。结合面阵探测器可进一步实现对光束聚焦点三维位置的自动校准及稳定性控制。此外,介绍了基于该方法搭建的控制系统,并对实验结果进行了分析讨论。

## 2 实验原理

通过在LCSLM上加载具有二元菲涅耳透镜结构的动态相位图,以实现光束聚焦的轴向和横向偏移控制。二元菲涅耳透镜具有同心圆环状的波带结构,其径向的相位结构如图1所示。设波带数为 $N$ ,每个波带划分 $L$ 个台阶,则其中第 $k$ 个台阶调制的相位为<sup>[16]</sup>:

$$\phi = 2\pi \frac{(L - k + 1)}{L}, \quad (1)$$

第 $j$ 个波带的半径为:

$$r_j = \sqrt{j\lambda f_z}, \quad (2)$$

式中 $\lambda$ 为入射光波长, $f_z$ 为焦距。通过改变波带分布,即可在轴向控制聚焦点的位置。

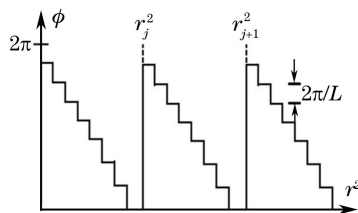


图1 二元菲涅耳透镜径向相位结构

Fig. 1 Radial phase structure of binary Fresnel lens

光束聚焦的横向偏移控制采用偏心透镜的方法。因为如果透镜的光心偏离光轴,平行光束的焦点仍会落在透镜的光轴上,故如图2所示,当圆环波带中心在垂直光轴的平面上发生平移,光束焦点也会同向平移相同的距离,而焦点位置坐标的轴向分量不变。因此可以在LCSLM上加载偏心菲涅耳透镜精确控制光束焦点的横向偏移量。

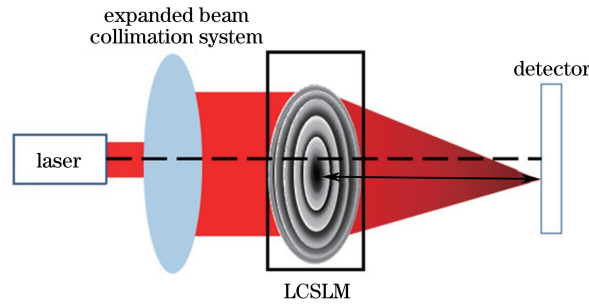


图2 光束横向偏移原理图

Fig. 2 Schematic diagram of beam transverse deviation

只有获知探测面上光斑的大小及中心坐标,才能检测光束焦点的三维位置信息,因此采用面阵探测器对光斑进行测量。光斑中心的横向偏移坐标可以通过一阶矩法<sup>[17-18]</sup>获得,此方法是利用面阵探测器获得的光强分布信息,对光斑落在感光面上的任意位置给出精确的光斑中心坐标 $(\bar{x}, \bar{y})$ 。一阶矩计算表达式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) x_i}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) y_i}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad (3)$$

式中 $(x_i, y_i)$ 为探测器任意像素元的位置坐标, $I$ 为该像素元测得的光强度。焦斑的轴向偏移通过测量探测面上的光斑大小进行间接判断,利用二阶矩法<sup>[19]</sup>可以计算光斑的二维半径 $(\omega_x, \omega_y)$ 。二阶矩计算表达式为:

$$\omega_x^2 = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) (x_i - \bar{x})^2}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad \omega_y^2 = \frac{\sum_i I(x_i, y_i) (y_i - \bar{y})^2}{\sum_i I(x_i, y_i)}, \quad (4)$$

光斑的平均半径为 $R = (\omega_x + \omega_y) / 2$ ,其反映了轴向的离焦程度; $R$ 越大,表明实际焦面距离探测面越远。

在实际的聚焦校准或稳定性控制应用中,焦点的轴向目标位置一般对应 $R$ 取极小的值,而横向的二维目标位置一般由后端系统决定,也可由控制程序初始设定。通过上述方法测量得到光斑中心坐标及半径参数,判断焦点的实时位置与目标位置间的偏离程度,得出新的相位结构,进而形成闭环控制,达到对光束聚焦焦点三维位置进行自动校准或稳定性控制的目的。

### 3 系统设计

基于上述方法,设计搭建了光束聚焦实时反馈控制系统,系统光路如图3所示。激光经过扩束准直后,有效光斑直径约9 mm,而后经偏振片入射 LCSLM。调制后的聚焦光束通过第二块偏振片,由分光器分成两束,一束激光经过衰减片被互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器接收,另一束激光用于后续的工作系统。其中,偏振片用于调节光束偏振方向,使其和调制器的液晶主轴方向一致。考虑到系统的响应速度、控

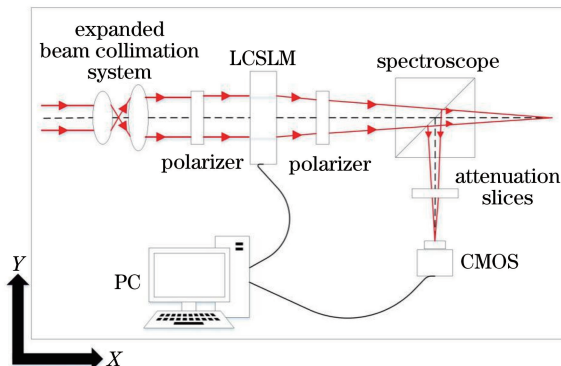


图3 系统光路图

Fig. 3 Light path diagram of the system

制精度以及可扩展性,目前采用睿光科技的 RL-SLM-T1 型透射式 LCSLM,其像素元尺寸为  $19\ \mu\text{m}$ ,分辨率为  $1024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$ ,刷新频率为  $60\ \text{Hz}$ ;RL-CM01 型 CMOS 探测器,其像素元尺寸为  $3.6\ \mu\text{m}$ ,分辨率为  $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ ,帧频为  $60\ \text{Hz}$ 。后端实验系统要求焦斑的横向偏移小于  $20\ \mu\text{m}$ ,目前采用的器件可以满足要求。对于精度调节要求更高的应用,可置换分辨率更高的器件。

PC 上搭载基于 C++ 自行开发的图形化控制软件,可以控制 LCSLM 中相位图的载入,监测分析光斑大小与偏移信息,并可运行反馈控制算法。通过上述计算方法得出动态的相位结构分布,并将其转化为灰度图加载到空间光调制器的控制单元,该控制单元将灰度值转化为对应的电压值,并寻址加到相应的液晶像素元。由此利用液晶相位调制使激光聚焦,并在后续光路中通过分光器分出一路聚焦光束入射到 CMOS 上以建立反馈。

对于成像质量良好的光斑,经过基本的阈值处理后运用一阶矩法和二阶矩法便可获得较准确的光斑中心坐标  $(\bar{x}, \bar{y})$  和半径  $R$ 。但考虑到较多应用场合中环境光噪声、探测器椒盐噪声以及高级衍射光会对光斑信息的探测分析有一定影响,因此在阈值处理之前设置了多贝西小波去噪算法。经测试,对于噪声较大的情况,这种优化处理能够显著改善光斑图像质量,对原光斑特征并无影响。

系统中采用如图 4 所示的比例积分微分(PID)控制算法。其中  $\Delta e_n$  为实际值与目标值之间的差值,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别为比例、积分、微分系数,针对反馈控制中的不同环节调节各个系数,可使实际值快速收敛到目标值附近,并最终达到稳定。应用 PID 算法有利于协调系统的调控精度和速度,改善调控性能。图 4 中也描述了整体的控制流程:首先 CMOS 采集光斑信息,程序根据计算分析得到的光斑半径以及中心位置,调整动态二元菲涅耳透镜相位结构并加载至 LCSLM 以控制光束焦点的轴向或横向偏移,后续测量分析新的光斑信息并进入到下一步调节,如此循环进行实时检测和反馈调节,直至光斑半径  $R$  以及光斑中心的水平偏离量  $\Delta x$  和竖直偏离量  $\Delta y$  降至最小或低于误差上限。

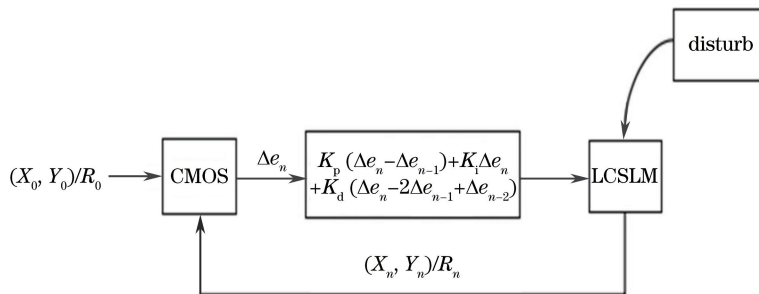


图 4 闭环控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of the closed loop control system

## 4 实验测试及分析

首先测试轴向的聚焦控制。令 CMOS 探测器与 LCSLM 距离为  $0.4\ \text{m}$ ,调整 LCSLM 上的相位结构,令初始焦距为  $0.01\ \text{m}$ 。启动程序自动反馈调节,经历一定时间后光斑像收敛至最小值,实际焦平面与 CMOS 感光面重合。此过程由图 5 表示,图中纵坐标的焦距是根据生成的动态波带图参数通过(2)式计算得到。可以看到,实时的焦距经约  $2\ \text{s}$  后收敛到目标焦距附近,并最终达到稳定。对于较远距离的轴向自动聚焦,所用时间较长,系统需要多次反馈才能调节菲涅耳透镜焦距至目标距离,若对此先进行手动粗调,系统后续只需进行精细收敛,调节时间可大幅缩至  $0.5\ \text{s}$  以下。

接着测试焦斑的横向偏移控制。经上述轴向调节后,焦斑落在 CMOS 探测面上,定义此时的焦斑位置偏移量为零。对焦斑引入随机方向的任意偏移后,启动程序自动反馈调节。理论上 LCSLM 上二元菲涅耳透镜的偏心距离应等于焦斑的实际平移距离,系统可根据测量得到的焦斑偏移量直接调节透镜偏心距离,实现横向偏移的单步收敛。

实验测量单步收敛的耗时约为  $90\ \text{ms}$ 。单步调节耗时可以分为  $T_1 \sim T_4$  部分。 $T_1$  是指控制信号传输驱动液晶延时,约需  $11\ \text{ms}$ 。 $T_2$  是指液晶屏刷新时间,它受像素单元数及液晶响应速度的影响,本系统所使

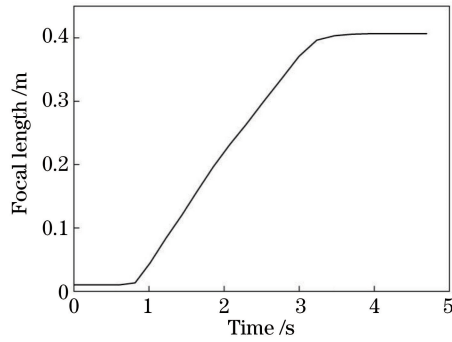


图5 轴向聚焦控制过程

Fig. 5 Axial focusing-control process

用 LCSLM 刷新频率为 60 Hz, 对应时间约 17 ms。  $T_3$  是指 CMOS 的图像采集时间, 此处 CMOS 帧频为 60 Hz, 对应时间约 17 ms。  $T_4$  是指程序运算耗时, 控制算法运行耗时少于 1 ms, 但是生成相位分布图的耗时较长, 对应于时间共约 63 ms。 从以上分析可知, 通过更换器件, 改善信号传输和计算机性能可以进一步提高控制速度, 但液晶的响应速度与液晶材料的特性有关, 这是影响系统耗时并制约液晶用于高速控制系统的一个重要因素。

对于较长焦距的情形, 光路的准直误差会被逐渐放大, 导致二元菲涅耳透镜的偏心距离与焦斑的实际平移距离存在偏差。 实验发现, 本系统在焦距大于 0.5 m 时的偏差不可忽略, 此时可采用 PID 控制算法进行调控。 令 CMOS 探测器与 LCSLM 的距离为 2.7 m, 横向偏移调节过程如图 6 所示。 首先对焦斑引入随机的水平偏移量, 在 CMOS 上检测到的水平及竖直偏移量随时间的变化分别如图 6(a) 和 (b) 所示。 由图 6 可见, 焦斑中心的水平坐标在经过一段调节后向零偏移位置逼近, 随后稳定在零偏移附近; 焦斑中心的竖直坐标在校准过程中基本无变化, 显示出水平偏移调节与竖直偏移调节之间的独立性。 接着对焦斑同时引入随机的水平偏移和竖直偏移, 调节过程中水平及竖直方向的焦斑偏移量变化分别如图 6(c) 和 (d) 所示。 由图 6 可见, 水平方向和竖直方向的调节过程相似, 均经历了一个快速调节过程和一个稳定收敛过程, 且调节所需时间与单维度的调节时间相近, 约为 3.2 s。 系统横向偏移调节的最小分辨距离约为  $5\ \mu\text{m}$  (由于生成离散化相位结构的过程本身具有模糊特性, 此值可小于 LCSLM 的像素元尺寸), 对应此焦距下的角度分辨率为  $1.85\ \mu\text{rad}$ 。

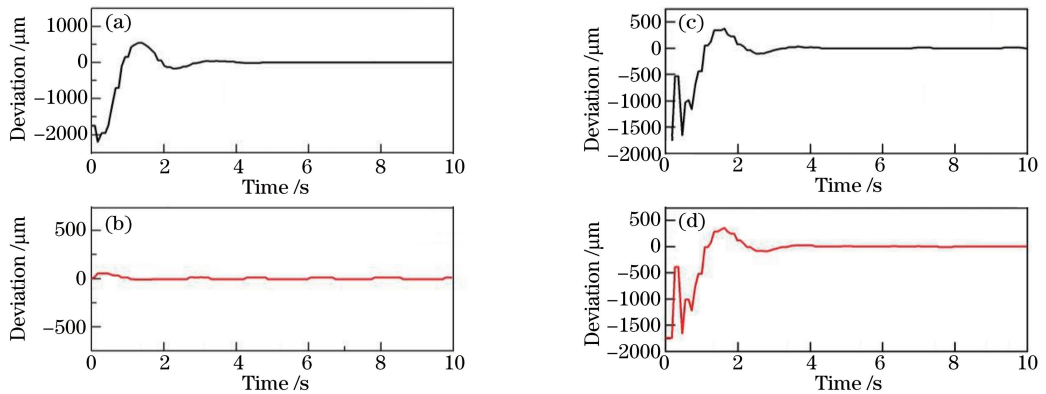


图6 焦斑横向偏移的PID调节过程。只引入水平偏移时光斑的(a)水平和(b)竖直位置的变化;

引入二维偏移时光斑的(c)水平和(d)竖直位置的变化

Fig. 6 PID adjustment process of focal-spot transverse deviation. Changes in (a) horizontal and (b) vertical positions of the focal spot when only horizontal deviation is introduced; changes in (c) horizontal and (d) vertical positions of the focal spot when two-dimensional deviations are introduced

此外, 可以利用数据拟合对较长焦距情形的调节误差进行经验修正。 图 7 中横坐标为 LCSLM 上二元菲涅耳透镜的偏移量, 纵坐标为焦斑平移量。 理论上两者一致, 其函数关系应是通过原点的直线(图中黑色直线)。 而红色圆点是焦距为 2.7 m 时实验采集的实际数据, 对其进行线性拟合(图中红色直线)可以得到实际的偏移量关系, 将其应用于调节控制, 即可实现单步收敛, 过程如图 8 所示。 与图 6 相似, 首先只引入随机

的水平偏移量[图 8(a)和 8(b)],水平方向经约 90 ms 的单步调节后即收敛到零偏移位置附近,而垂直方向的焦斑中心坐标基本不变,显示出两个方向偏移调节的相互独立性。接着引入随机的水平偏移和垂直偏移,两方向均经单步调节后收敛。由于光学系统中存在激光器谐振腔温度形变、传输路径上光学元件的不稳定性等各种不可控因素,收敛后所引起的激光束的角度偏移虽然较小(如谐振腔温度形变所致的角度偏移量一般小于毫弧度量级),但其影响会随传输距离的增加而增大,造成的误差在 PID 中积累,导致周期性的偏移。如图 8 所示,其绝对误差小于 $\pm 10 \mu\text{m}$ ,相对误差小于 $\pm 1.15\%$ ,满足后续系统的需求。

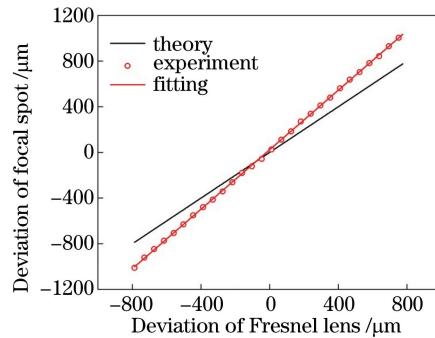


图 7 菲涅耳透镜偏移量与焦斑偏移量之间的关系

Fig. 7 Relationship between the deviations of Fresnel lens and focal spot

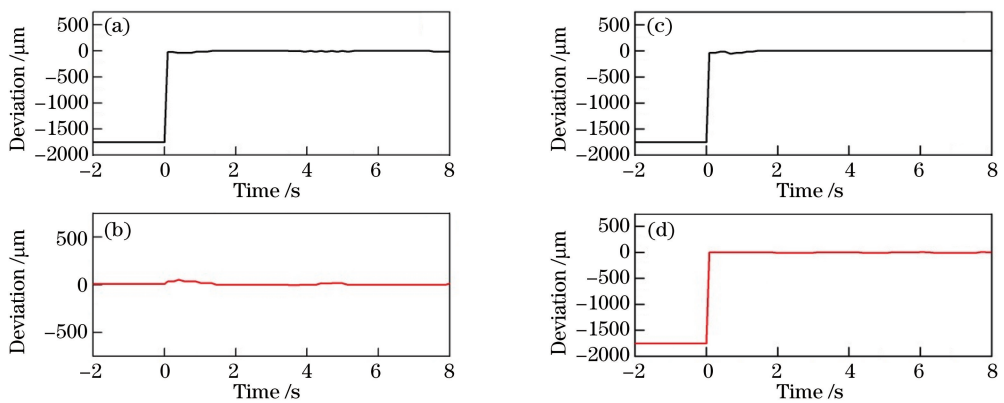


图 8 经验修正后的焦斑横向偏移调节过程。只引入水平偏移时光斑的(a)水平和(b)竖直位置变化;引入二维偏移时光斑的(c)水平和(d)竖直位置变化

Fig. 8 Adjustment process of the focal-spot transverse deviation after experiential correction. Changes in (a) horizontal and (b) vertical positions of the focal spot when only horizontal deviation is introduced; changes in (c) horizontal and (d) vertical positions of the focal spot when two-dimensional deviations are introduced

## 5 结 论

本文提出了一种基于空间光调制的光束聚焦控制方法。采用 LCSLM 产生动态的二元菲涅耳透镜相位结构,实现对光束焦斑的轴向与横向偏移的快速精确调节;采用面阵探测器检测光斑大小与位置信息,结合反馈控制机制可进一步实现对光束聚焦点三维位置的自动校准及稳定性控制。该方法在调节过程中不同偏移量之间不存在耦合影响,且横向偏移调节对光传输距离不敏感。介绍了基于该方法搭建的控制系统并进行实验测试,实验表明,对光束焦斑的轴向校准能实现精确快速的收敛。横向偏移校准过程中二维偏移量独立可控,在较短焦距的情况下可实现单步收敛,而在较长焦距的情况下可运用 PID 算法调控,或利用数据拟合修正误差以实现单步收敛。

## 参 考 文 献

- [1] Hao Q, Li D C, Wang Y T. High-accuracy long distance alignment using single-mode optical fiber and phase plate[J].

- Optics & Laser Technology, 2002, 34(4): 287-292.
- [2] Luo D, Kuang C F, Hao X, *et al.* High-precision laser alignment technique based on spiral phase plate[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 944-949.
- [3] Feng Q B, Zhang B, Kuang C F. A straightness measurement system using a single-mode fiber-coupled laser module [J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(4): 279-283.
- [4] Zhao Weiqian, Tan Jiubin, Ma Hongwen, *et al.* Laser collimation method based on the drift feedback control[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 373-377.  
赵维谦, 谭久彬, 马洪文, 等. 漂移量反馈控制式激光准直方法[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 373-377.
- [5] Zhao W Q, Tan J B, Qiu L R, *et al.* Enhancing laser beam directional stability by single-mode optical fiber and feedback control of drifts[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(3): 036101.
- [6] Li Yao, Wang Ding, Guo Xiaoyang, *et al.* Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on CMOS sensor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0916002.  
李耀, 王丁, 郭晓杨, 等. 基于 CMOS 传感器的高速高精度激光光束自动准直系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0916002.
- [7] Chen Zhifeng, Li Dayu, Wu Zhuoqi, *et al.* Automatic calibration method and system of laser beam orientation based on deflection and translation of optical paths[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722003.  
陈志峰, 黎达宇, 吴卓麒, 等. 基于偏转平移光路的激光束方位自动校准方法及系统[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722003.
- [8] Zhao Xiangjie, Zhang Dayong, Luo Yongquan. Elector-controllable optical beam deflection employing reflective liquid crystal spatial light modulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1324-1328.  
赵祥杰, 张大勇, 骆永全. 反射式液晶空间光调制器电控光束偏转[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1324-1328.
- [9] Zhang Cai, Huang Yongmei, Qi Bo, *et al.* Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0905005.  
张彩, 黄永梅, 齐波, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905005.
- [10] Shi Yubin. Study on beam directing, tracking and aiming technique based on liquid crystal phased array[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2013: 11-33.  
师宇斌. 基于液晶相控阵的光束定向跟瞄技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013: 11-33.
- [11] Wang Xinghua, Wang Bin, Bos P J, *et al.* Modeling and design of an optimized liquid-crystal optical phased array[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(7): 073101.
- [12] Xu Lin, Huang Ziqiang, Yang Ruofu. Programmable agile beam steering based on a liquid crystal prism[J]. Chinese Phys B, 2011, 20(11): 114216.
- [13] Xu Jianhua, Wang Xiangru, Huang Ziqiang, *et al.* PID tracking method of space laser communication based on liquid crystal optical phased array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 021202.  
许剑华, 汪相如, 黄子强, 等. 基于液晶光学相控阵的空间激光通信 PID 跟踪方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021202.
- [14] Chen Huaixin, Wei Honggang, Chen Zhenpei, *et al.* A controllable array Fresnel zone plates using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(5): 562-566.  
陈怀新, 魏宏刚, 陈赓培, 等. 采用液晶空间光调制器的可控性阵列菲涅耳波带片[J]. 光子学报, 2001, 30(5): 562-566.
- [15] Zou Limin, Pang Mingshu, Zhou Mengjiao, *et al.* Research of confocal 3D scanning method based on phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2014, 25(12): 2329-2335.  
邹丽敏, 庞明珠, 周梦皎, 等. 基于纯相位液晶空间光调制器的共焦三维扫描方法研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(12): 2329-2335.
- [16] Ji Xianming, Mu Renwang, Han Liangkai. A binary Fresnel lens used as light splitting element[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(6): 4-7.  
纪宪明, 沐仁旺, 韩良恺. 可用作分光元件的二元菲涅耳透镜[J]. 光电工程, 2003, 30(6): 4-7.
- [17] Wang Chunyang, Li Jinshi. Detection of laser spot drift[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(2): 205-208.  
王春阳, 李金石. 激光光斑漂移的检测[J]. 应用光学, 2007, 28(2): 205-208.

- [18] Zeng Peiying, 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.
- [19] Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643-1653.  
冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1653.