

# 基于液晶电控可调夏克-哈特曼波前传感器的研究

李 晖<sup>1,2</sup> 吴云韬<sup>1,2</sup> 潘 凡<sup>3</sup> 蔡敦波<sup>1,2</sup> 张彦铎<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430073  
<sup>2</sup> 湖北省智能机器人重点实验室, 湖北 武汉 430073  
<sup>3</sup> 武汉工程大学邮电与信息工程学院, 湖北 武汉 430073

**摘要** 提出使用  $128 \times 128$  元液晶微透镜阵列取代传统固定焦距的微透镜阵列, 实现了一种可电控自适应调节的夏克-哈特曼波前传感器。该传感器克服了传统波前传感器无法兼顾测量范围与测量精度的缺点, 可工作在大测量范围/短焦距与高测量精度/长焦距两种模式下, 并可自由切换。通过实验测量, 该波前传感器调至短焦距工作模式时其焦距调谐范围为  $86 \sim 400 \mu\text{m}$ , 调至长焦距工作模式时其调制传递函数在 0.46 以上。并通过对焦点落于 CCD 有效区域外的极端情况进行实验验证, 表明该波前传感器具有一定电控自适应调节能力, 在自适应光学系统中具有较大的应用潜力。

**关键词** 传感器; 自适应波前传感器; 夏克-哈特曼方法; 液晶; 焦点跟踪

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1228002

## Study on Electrically Tunable Shack-Hartmann Wavefront Sensor Based on Liquid Crystal

Li Hui<sup>1,2</sup> Wu Yuntao<sup>1,2</sup> Pan Fan<sup>3</sup> Cai Dunbo<sup>1,2</sup> Zhang Yanduo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China  
<sup>2</sup> Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan, Hubei 430073, China  
<sup>3</sup> College of Post and Telecommunication, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430073, China

**Abstract** A  $128 \times 128$  elements liquid crystal (LC) microlens array, instead of the conventional microlens array with a fixed focal length, is proposed to achieve an electrically controlled adaptive tunable Shack-Hartmann wavefront sensor. The sensor can overcome the shortcomings of the traditional wavefront sensor, which can not take both measurement range and measurement accuracy into account, and it can work either in a large measuring range/short focal length, or high measurement accuracy/long focal length modes. It is also free to switch between the two modes. Through experimental measurements, when the operation mode of the wavefront sensor is on the short focal length, it has tunable focal length range of  $86 \sim 400 \mu\text{m}$ . While the operating mode is on the focal length, its modulation transfer function is more than 0.46. The extreme experiment is used to verify its feasibility, which is about the focus falling outside the effective region of the CCD. The studies show that the wavefront sensor has a certain electronically controlled adaptive tunable ability. The potential application perspective of this design in an adaptive optics system is also presented.

**Key words** sensors; adaptive wavefront sensor; Shack-Hartmann method; liquid crystal; focus tracking

**OCIS codes** 280.4788; 160.3710; 120.3620

## 1 引 言

波前传感器是一种用于获得入射光波波前信息

的器件, 广泛地应用于光学元件质量的评估, 也应用于高能激光评估系统<sup>[1]</sup>、激光整形系统<sup>[2-3]</sup>、自适应

收稿日期: 2013-05-31; 收到修改稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61172150, 61103136)、湖北省高等学校项目(413010702)、武汉大学科学研究基金(12126051)、武汉大学青年科学基金(Q201303)

作者简介: 李 晖(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事液晶器件及光电图像处理等方面的研究。

E-mail: lihui00317@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticajournal.net

天文观测系统<sup>[4-5]</sup>以及眼科疾病分析系统<sup>[6]</sup>等。随着自适应光学领域的快速发展,波前传感器也突显出其重要性,已经成为自适应光学系统中不可或缺的重要元件。在现有的各类波前探测技术中,夏克-哈特曼方法是最为有效、最具稳健性的技术。

典型的夏克-哈特曼波前探测器由单个微透镜阵列与单个 CCD 组合而成。其中,微透镜阵列是将入射波前分解成微光束阵列,每束微光聚焦至 CCD 上(放置于微透镜阵列的焦平面处)。若是均匀平面波前入射到夏克-哈特曼传感器上,每个微透镜沿其光轴形成一个光斑,这将在 CCD 上产生规则的光斑阵列,此时光斑阵列可作为标定位置。然而,若是畸变波前入射,将会引起焦平面上聚焦光斑的偏移,该类偏移会使光斑偏离微透镜的光轴方向,甚至缺失。

在夏克-哈特曼波前传感器中,根据焦平面上光斑相对标定位置的偏移量,可获得每个微透镜对应子波前在  $x$  和  $y$  轴方向上的波前斜率,再经过波前复原算法便可重构出入射波前信息。因此,在 CCD 上对焦点偏移位置的测量是最为核心、也是必须解决的问题。然而,焦点的最大偏移量由微透镜阵列的焦距所决定。根据以往的研究可知:微透镜阵列为长焦距时可进行高精度的测量,但是会导致动态测量范围偏小;而微透镜阵列为短焦距时则可增大测量的动态范围,但是会降低测量的精度。在一个典型的夏克-哈特曼波前传感器中,微透镜阵列一般都是固定的焦长。这使得在传统的波前探测系统中,选取微透镜阵列须在系统的测量精度与测量范围之间进行折中。如此一来,会大幅度限制波前探测系统的应用范围、并降低系统的性能。

为解决此问题,国内外研究人员进行了深入的研究,解决的方法主要分为两类:一是通过提出相应的算法来解决<sup>[7-9]</sup>;另外,则是通过提升夏克-哈特曼传感器性能来解决。Seifert 等<sup>[10]</sup>采用可调谐的非涅耳微透镜阵列来取代传统固定焦距的微透镜阵列,该传感器使用的非涅耳微透镜阵列后可自适应匹配波前信息,其主要参数如焦距、通光孔径、位置与微透镜数量都可快速进行调节。Choo 等<sup>[11]</sup>采用  $5 \times 5$  元寻址微透镜阵列作为夏克-哈特曼波前传感器,该微透镜可通过改变机械共振频率的方式进行寻址,采用此方式可明显提升传感器的动态测量范围。Yu 等<sup>[12]</sup>采用  $6 \times 5$  元液体微透镜阵列取代传统固定焦距的微透镜阵列,应用外界压力控制焦距,使得该传感器同时具有大动态测量范围与高测量精度,但是仍旧存在制作繁琐、控制复杂等问题。

本文提出了一种新方法来解决上述问题,该方法采用液晶微透镜阵列取代传统固定焦距微透镜阵列。近年来,基于液晶材料的透镜及微透镜阵列技术发展迅速,已经发展到可取代传统光学元件的地步<sup>[13-14]</sup>。本课题组也提出了多种类型电控可聚焦的液晶透镜及微透镜阵列<sup>[15-17]</sup>。由于采用液晶材料,使得液晶微透镜阵列在外加电场作用下焦距可自由、快速地进行调节。若将该液晶微透镜阵列技术应用于波前测量系统中,则在外加电场作用下,可根据外界条件的改变,自由、快速地在长焦距、短焦距工作模式进行切换,即可将传统系统改造为具有自适应调节能力的系统,可同时拥有较大测量范围与较高测量精度。本文所提出的液晶微透镜阵列方法相对于其他硬件解决方法具有成本低廉、制作简便、控制便捷等优点,这使得该方法可成为取代传统波前探测方法的一条有效的技术途径。

## 2 设计与制作

根据上述原理,可设计出  $128 \times 128$  元电控液晶(LC)微透镜阵列,该器件结构如图 1 所示,由上而下依次为:石英上衬底、ITO 膜上电极、上衬底聚酰亚胺取向层、液晶、下衬底聚酰亚胺取向层、ITO 膜下电极和石英下衬底。其中上电极有  $128 \times 128$  元圆孔阵列图案,单个单元圆孔直径  $\phi$  为  $50 \mu\text{m}$ ,两个单元圆孔圆心的间距为  $100 \mu\text{m}$ ;液晶采用的是德国 Merck 公司的 E44,其厚度为  $20 \mu\text{m}$ ;上、下衬底的取向层摩擦方向如图 1 所示。

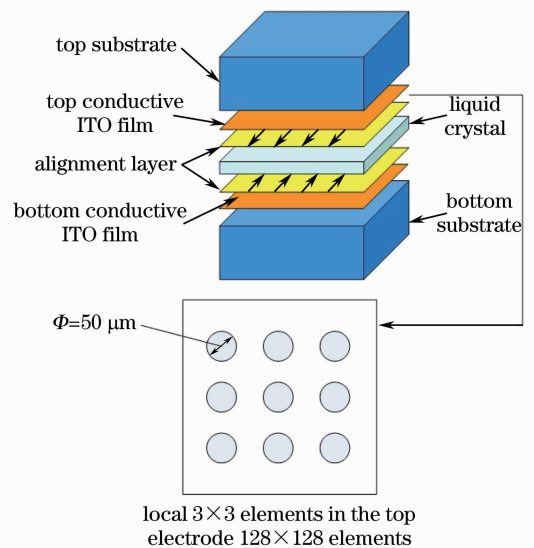


图 1  $128 \times 128$  元电控液晶微透镜阵列的结构示意图

Fig. 1  $128 \times 128$  elements electronically controlled LC microlens array structure

该液晶器件的具体制作工艺为：1)通过紫外光刻和盐酸腐蚀法刻蚀得到上电极图案；2)使用聚酰亚胺旋转涂抹法，制备出聚酰亚胺层，再通过退火，得到稳定的聚酰亚胺层；3)使用摩擦法制作出取向层，将具有阵列电极图案的上衬底与下衬底组装成液晶盒，两者之间加入  $20\ \mu\text{m}$  的玻璃微球作为间隔子；4)利用毛细现象灌入液晶，并使用 AB 胶水封口，制备出待测的液晶器件。

### 3 理论模型

#### 3.1 液晶微透镜阵列理论模型

基于液晶的微透镜阵列工作原理为：通过在液晶结构上施加与液晶材料属性相匹配的空间分布状态可调的电场，以电偶极矩为典型作用因子的液晶指向矢，将随着电场强度和方向的改变作同步变化，呈现与电场空间分布状态相协调的折射率形态。

由于上电极单个单元采用的是圆孔形，液晶在该电极图案作用下会形成梯度折射率分布，整个液晶微透镜阵列对外表征出凸微透镜阵列的特性<sup>[15]</sup>。根据液晶折射率椭圆球，并结合几何光学，可推出该液晶微透镜阵列的焦距<sup>[15]</sup>

$$f = \frac{r^2}{2[n_{\max} - n(r)]d_{\text{LC}}}, \quad (1)$$

式中  $r$  为液晶微透镜阵列中单个单元孔径的半径

值， $n_{\max}$  为液晶折射率最大值， $n(r)$  为液晶层内在外加电场作用下形成的液晶折射率分布函数， $d_{\text{LC}}$  为液晶层的厚度。

#### 3.2 基于液晶微透镜阵列的夏克-哈特曼波前探测器理论模型

液晶微透镜阵列具有电控可调节焦距的特点，可将其应用于夏克-哈特曼波前探测中，因此，该系统将有长焦距与短焦距两种工作模式，这两种模式相应的工作原理示意图如图 2 所示。图 2(a) 为短焦距工作模式。在外加电场作用下，液晶微透镜阵列的焦距由 1 处调至 2 处，使得原先在传感器上缺失的光斑重新获得，原先在传感器上偏移的光斑由边缘处移动至中心区域，即扩大了传感器的动态测量范围；图 2(b) 为长焦距模式，在外加电场作用下，液晶微透镜阵列的焦距由 1 处调至 2 处，使得原先在传感器上偏移光斑与标定光斑基本分辨不开的情况得以改善，偏移光斑与标定光斑能够分辨，即提高了传感器的分辨率。

对于夏克-哈特曼波前探测器，波前重建最为关键的参数是每个单元对应的焦点相对标定位置的偏移量：

$$\Delta x_i (\Delta y_i) \propto f \times S_{x_i(y_i)}, \quad (2)$$

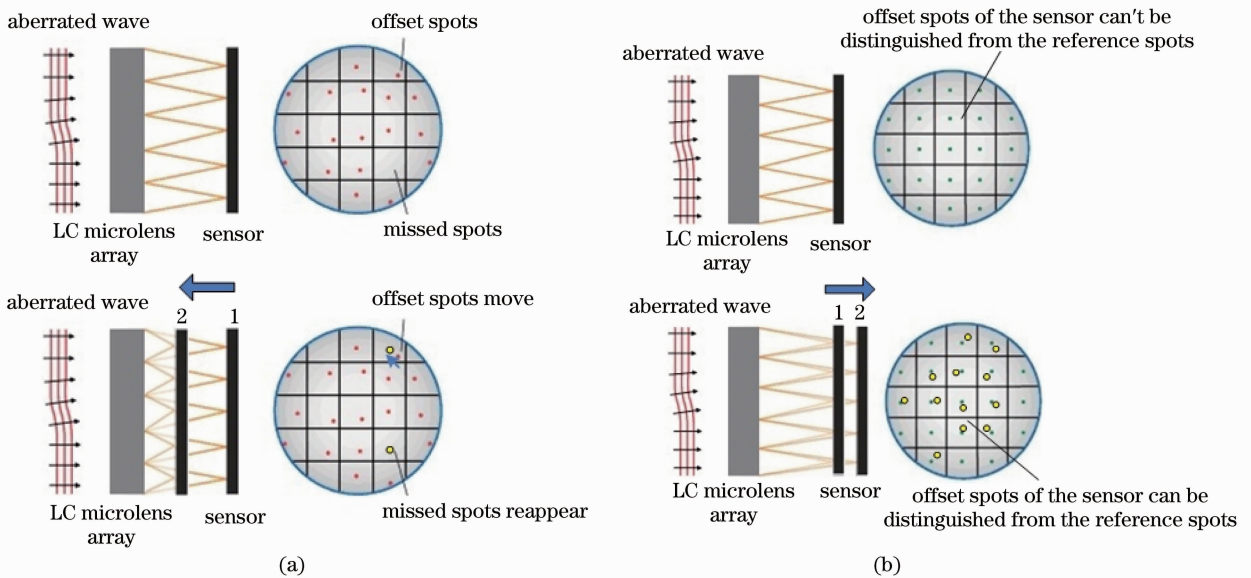


图 2 基于液晶微透镜阵列的夏克-哈特曼波前传感器工作原理图。(a)短焦距模式；(b)长焦距模式

Fig. 2 Working principle diagram of LC microlens array based Shack-Hartmann wavefront sensor. (a) Short focal length mode; (b) long focal length mode

式中  $\Delta x_i$  和  $\Delta y_i$  分别为第  $i$  个单元微透镜(此时该微透镜的焦距为  $f$ ) 对应的焦点相对标定位置沿着  $x$  与  $y$  轴方向的偏移分量, 而  $S_{x_i(y_i)}$  为第  $i$  个单元微透镜对应于波前的斜率值。(2)式可大致表示出畸变波前对应焦点相对标定位置的偏移量。

## 4 实验结果

### 4.1 液晶微透镜阵列

图 3 中显示了所制备的液晶微透镜阵列的典型光学特性, 该实验结果是在平行白光作为光源条件下测试得到的, 测试中一直保持液晶微透镜阵列与 CCD 之间的距离为  $86 \mu\text{m}$ 。在电压  $V_{\text{RMS}}$  为  $0.2 \text{ V}$

时, 可清晰分辨出此时为尚未聚焦的状态; 当电压为  $1.8 \text{ V}$  时, 此时明显为完全聚焦状态, 可清晰分辨出焦点; 而当电压为  $3.5 \text{ V}$  时, 出现了焦点发散现象, 具体结果依次从左到右如图 3(a) 所示。该结果表明, 液晶微透镜阵列在外加电场作用下焦距发生了改变。对图 3(a) 中间的图进行进一步的数据分析, 可获得水平与垂直方向的光强度分布曲线, 即为该器件的点扩展函数<sup>[17]</sup> (PSF)。而各个单元之间的光学性能一致性为  $9\%$ , 这表明该液晶器件每个单元之间光学聚焦性能的一致性较好; 该器件的填充因子为  $0.46$ , 这表明该器件对光能量利用率较高。

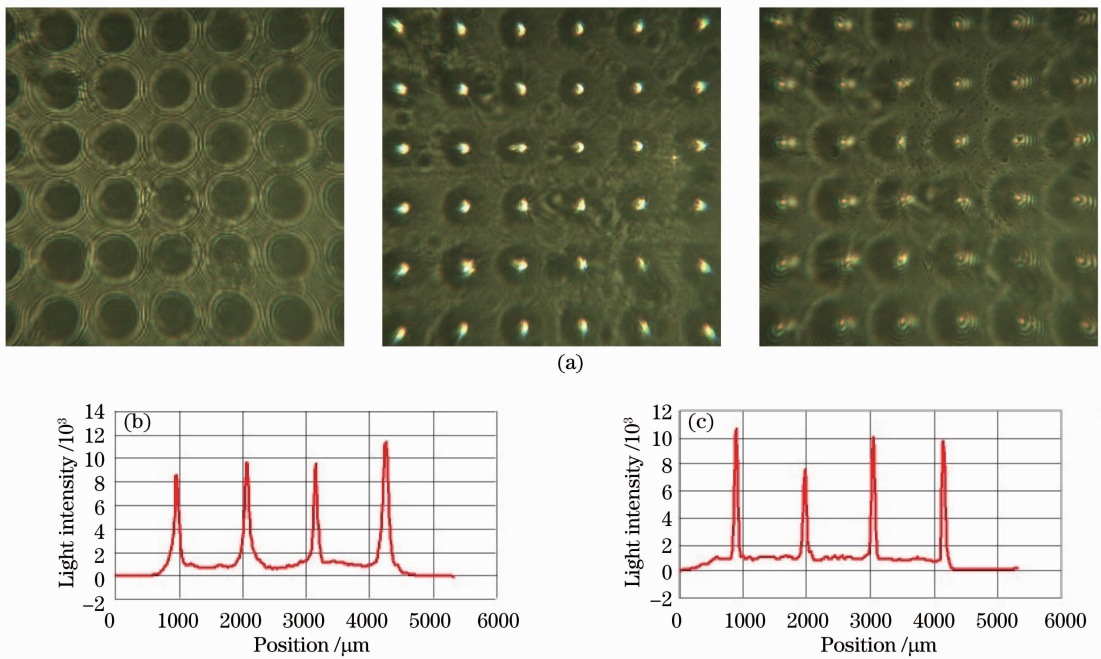


图 3 白光测试液晶微透镜阵列的光学性能。(a) 聚焦过程; (b) 四个单元沿水平方向的点扩展函数; (c) 四个单元沿垂直方向的点扩展函数

Fig. 3 Typical optical performance results of the LC microlens array measured by the white light. (a) Focusing procedure; (b) horizontal direction PSF of four elements; (c) vertical direction PSF of four elements

图 4 为基于平行白光源测试得到的该液晶器件电压与焦距之间的关系曲线。测试当中, 分别多次测量同一电压下的器件焦距, 再通过二次函数拟合得到电压与焦距之间的曲线。从获得的曲线数据可知, 该器件的焦距与外加的电压是呈反比例关系; 其次, 可发现该器件最低工作电压为  $0.2 \text{ V}$ , 远低于现有的液晶器件。该器件工作电压降低的原因在于: 采用了聚酰亚胺取代玻璃作为绝缘层, 相应加载在 ITO 膜上的电场损耗可降低, 并有效减少了电场与液晶层之间的距离, 使得电场更强的加载在液晶层上, 可使得工作电压明显下降。从图 4 可知,  $V_{\text{RMS}} =$

$1.8 \text{ V}$  时测量的焦距数值为  $86 \mu\text{m}$ , 而使用(1)式计算得到的理论上焦距数值为  $78 \mu\text{m}$ , 与实际测量数值非常接近。这表明, 理论推导的焦距公式可有效表征该液晶器件的光学特性。

### 4.2 波前探测验证系统

基于所研制的液晶微透镜阵列搭建的波前探测验证系统如图 5 所示。其中, 光源采用平行白光先通过空间滤波器, 再经过扩束镜放大通过光阑限制, 最后经由电控液晶微透镜阵列到达 CCD。在该验证系统中, CCD 是放置在一个可手动精密调节的位移平台上, 即 CCD 可沿着光轴方向以  $1 \mu\text{m}$  精度进

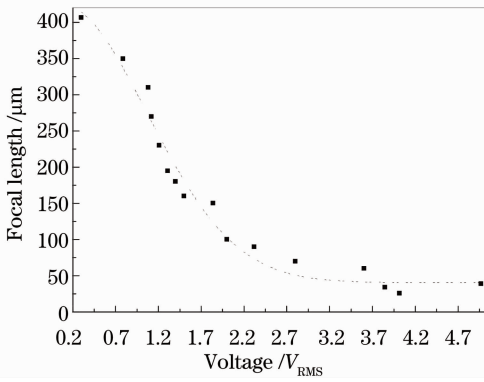


图 4 焦距与电压的关系曲线

Fig. 4 Focal length versus voltage

行范围为 25 mm 的高精确前、后向平行移动。在开展验证实验之前,需要获得电控液晶微透镜阵列焦点阵列的标定位置,即在电压为 1.8 V 时平行白光通过上述实验装置在焦平面上得到的焦点阵列。其中,为方便分析问题只将微透镜阵列中心位置  $6 \times 6$  元的结果进行了展示,如图 6 所示。为了模拟畸变波前,在图 5 所示的实验装置中,引入一个凹透镜,该透镜放置于电控液晶微透镜阵列之前,作为对入射平面波前的干扰源。该凹透镜引入后,将会使得平行入射至液晶微透镜阵列的波前畸变为发散球面波前,该波前的畸变将会导致焦平面上的焦点相对标定位置发生偏移。在图 6 中,用红色箭头给出了焦点偏移的方向。

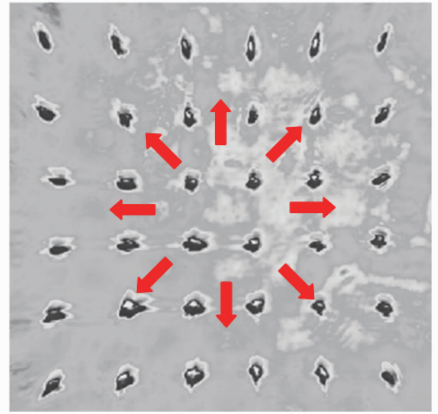


图 6 器件焦点阵列的参考位置,其中红色箭头为当畸变波前引入后焦点移动的方向

Fig. 6 Reference position of LC microlens array's focusing spots array, where the red arrows represent the focusing movement directions when the distorted wavefront is introduced

效区域的上方与右侧两部分均缺失了部分焦点。如果此情况下仍旧采用的是固定焦距的微透镜阵列,则无法进行任何的调节,也无法获得波前信息。但是若采用电控液晶微透镜阵列,则此时可通过改变外加电场电压来调节器件的焦距,使得偏移出 CCD 有效区域的焦点重新落在 CCD 有效区域内,便可获得相应的波前信息。通过实验验证,发现当外加电压调节至 1.8 V,即焦距为  $86 \mu\text{m}$  时,位于 CCD 有效区域的上方与右侧缺失的焦点则会重新出现,如图 7(b)所示。这是因为:当液晶微透镜阵列的焦距由短焦距调节至长焦距时,液晶微透镜阵列的聚焦能力也由强变弱,相应 CCD 上偏移的焦点将根据液晶器件聚焦能力变化,由远离单元透镜光轴位置变为靠近单元透镜光轴,相应的焦点便会重新出现在 CCD 有效区域上。通过该极端实验,可发现通过采用电控液晶微透镜阵列后,能够有效解决此类极端情况下测量失效的问题。

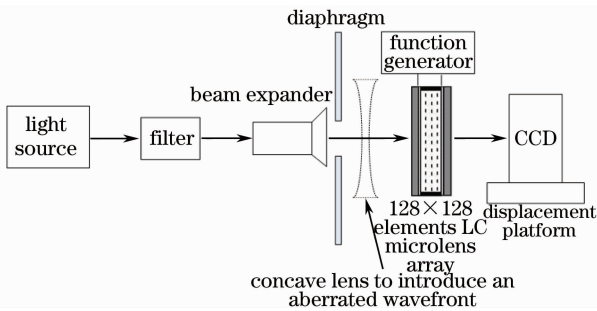


图 5 波前探测验证系统光路示意图

Fig. 5 Optical schematic diagram of wavefront sensing verification system

为了验证所提出系统的性能,在由于畸变波前的引入使得一些焦点偏移出 CCD 有效区域这一极端的情况下,进行如下的实验。此极端情况下,波前探测器等同于失效状态,无法获得此时的波前信息。在图 5 中,由于凹透镜的引入,在电压为 3.0 V,焦距为  $51 \mu\text{m}$  时,测量结果如图 7(a)所示,发生了明显的变换。分析该测量结果,可发现在此时 CCD 有

再根据获得的斜率进行波前重建,可获得此时的二维、三维波前信息,如图 8 所示。重建过程中,需要每个单元沿着  $x$  与  $y$  轴方向上的偏移量,以及每个焦点对应的标定位置信息。从图 8(b)中,可发现重建的波前近似为发散球面波,这与图 5 中引入干扰源(凹透镜)所带来的畸变波前信息基本一致。通过上述实验结果可知,采用所研制的液晶微透镜阵列可成功地获得在传统固定焦距微透镜阵列所不能获得的波前信息。

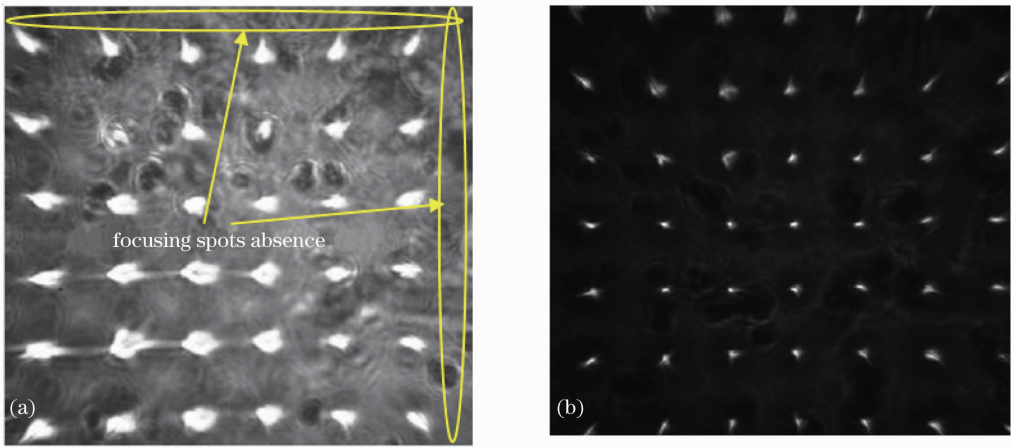


图 7 验证系统测试结果。(a)液晶微透镜阵列为短焦距状态下的焦点缺失现象；  
(b)液晶微透镜阵列为长焦距状态下焦点重新出现

Fig. 7 Test results of verification system. (a) Focusing spots absence on the short focal length state;  
(b) focusing spots reappearance on the long focal length state

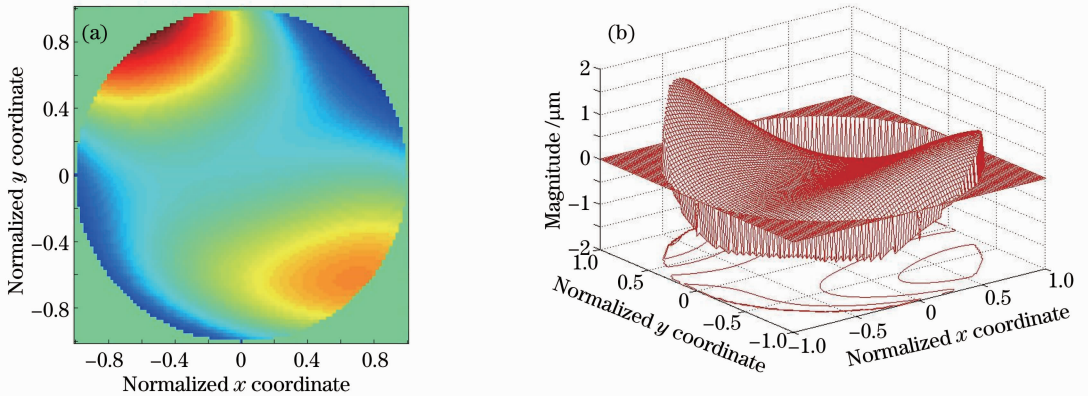


图 8 经过斜率数据重建获得的畸变波前信息。(a)二维波前；(b)三维波前

Fig. 8 Distorted wavefront informations obtained by the slope data reconstruction algorithm. (a) Two-dimensional wavefront; (b) three-dimensional wavefront

## 5 讨论与分析

### 5.1 焦点跟踪

由于采用夏克-哈特曼方法进行波前测量,则需要焦平面上每个焦点相对于标定位置的偏移量来重建波前信息。当采用传统的固定焦距微透镜阵列测量时,传感器则只能兼顾一方面的特性,如较大测量范围或者较高测量精度;另外,在一些极端情况下,如部分子波前信息进入至相邻区域时,将无法获得此时的波前信息。对于此类问题,若采用本课题组所提出的原型系统则可顺利解决。然而,采用电控液晶微透镜阵列测量波前时,需要研究相应的焦点跟踪算法,用来跟踪液晶微透镜阵列焦距发生改变后焦平面上焦点的位置。

经过测试发现:将液晶微透镜阵列电控调节至

短焦距工作模式,即小于 1.8 V 电压的情况,此时该液晶器件的焦距可调节范围为  $86 \sim 400 \mu\text{m}$ ,具有较大的动态调节范围(经过测量其波前动态范围可达  $600\lambda$ ,如表 1 所示);而将液晶微透镜阵列电控调节至长焦距工作模式,即大于 1.8 V 电压的情况,此时该液晶器件的调制传递函数(MTF)数值均大于 0.46,具有较高测量精度(经过测量其波前测量精度为 8 nm,如表 1 所示)。MTF 测量结果图 9 所示,其中,通过刀刃法可得到在 1.8、2.8、3.8 V 下的 MTF 曲线。由于液晶微透镜阵列可电控变焦的特性,使得其在 1.8、2.8、3.8 V 电压下于零频处 MTF 数值不全为 1,分别为 1、0.71、0.46,与一般光学镜头情况有所不同。相应还可发现不同电压下液晶微透镜阵列光学成像能力有所不同:1.8 V 时较为优良,2.8 V 时较好,3.8 V 时一般。

表 1 基于液晶微透镜阵列的波前传感器参数( $\lambda=633\text{ nm}$ )

Table 1 Specifications of wavefront sensor based on LC microlens array ( $\lambda=633\text{ nm}$ )

	Long focal length mode	Short focal length mode
Wavefront accuracy	8 nm, $\lambda/75$	40 nm, $\lambda/15$
Wavefront sensitivity	6 nm, $\lambda/100$	30 nm, $\lambda/20$
Wavefront dynamic range	$>150\lambda$	$>600\lambda$

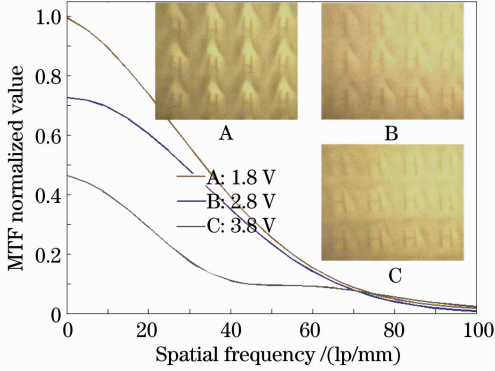


图 9 长焦距工作模式下不同电压下测量得到的图像以及对应的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of the long focal length mode at different voltages

相应的液晶器件有效的焦点跟踪算法为：1) 将液晶微透镜阵列调至短焦距工作模式，若此时每个

子区域均可获得焦平面上焦点与标定位置之间的偏移量，便可重建获得相应的波前信息；2) 若出现焦平面上焦点偏移至相邻子区域的极端情况，根据(2)式可知焦点的偏移量与器件的焦距成呈比例关系，故可将液晶微透镜阵列调至长焦距工作模式，将落在子区域外的焦点重新调节回到相应的子区域内，再根据标定位置信息，预测出调节至长焦距工作模式后液晶器件焦点移动的大致方位，从而达到跟踪焦点的目的。

### 5.2 应用前景

将所提出的方法应用于自适应光学校正系统中，图 10 为光路示意图：入射光(畸变点光源)首先通过可变形微透镜，随后经过反射的光通过分光器分成两部分，一部分到达 CCD，另外一部分则通过会聚透镜组落在电控液晶微透镜阵列上。该校正系统波前测量与补偿的工作流程如下：1) 将液晶微透

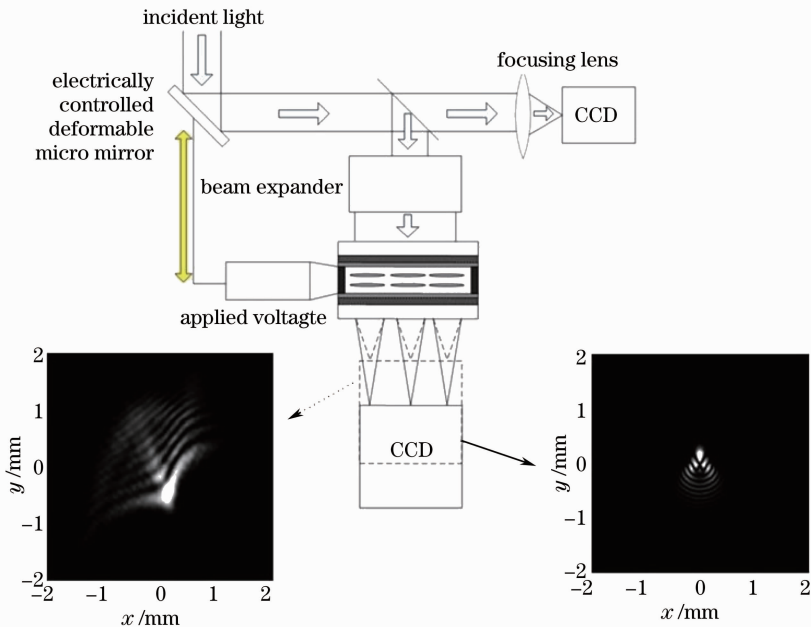


图 10 基于液晶微透镜阵列的夏克-哈特曼测量波前的方法应用于自适应光学系统的光路示意图。图中下方的虚线代表的是短焦距工作模式及相应结果、实线代表的是长焦距工作模式及相应结果；淡蓝色箭头代表的是光信号、黄色箭头代表的是控制信号

Fig. 10 Shack-Hartmann wavefront measuring method based on the LC microlens array is applied to the adaptive optics system. In the optical path diagram, the dotted line represents a short focal length mode and the corresponding results, while the real line represents a long focal length and the corresponding mode of operation results; pale blue arrows represent the optical signal, and the yellow arrow represents the control signal

镜阵列电控调节至短焦距工作模式,此时该工作模式的特点是具有较大测量范围,可捕获目标的较大波前畸变信息;2)通过相应的数据处理,并控制可变形微镜,可进行基于闭环控制算法的初步校正;3)在初步校正完成后,将液晶微透镜阵列电控调至长焦距工作模式,仍通过上述相同的工作流程,便可获得目标较高精度的进一步波前校正。通过采用液晶微透镜阵列后,该自适应光学校正系统可提升成为同时具有大测量范围与高精度测量特性的波前探测与校正系统。

需要说明的是,在所提出的系统中,为了匹配液晶微透镜阵列的焦距变化 CCD 需要在测量过程中进行前后调节,为方便测量采用的是手动调节的位移平台。但是为了获得更高精度尤其是在实际的自适应光学系统中,则应采用电机驱动 CCD 进行前后移动,这样系统将会具有更高的精度,更适合自适应光学系统的校正。

## 6 结 论

提出了使用可变焦的液晶微透镜阵列取代传统固定焦距的微透镜阵列的方法,实现了新型的夏克-哈特曼波前传感器。由于可电控变焦,使得液晶微透镜阵列可自由地在短焦距、长焦距工作模式下进行快速切换。为了验证所提出的方法,引入一个极端的传统固定焦距微透镜阵列无法解决的畸变波前(会使焦平面上一些焦点偏移出 CCD 有效区域),通过电控调整液晶微透镜阵列的焦距,可将偏移出 CCD 有效区域的焦点重新落于 CCD 有效区域内,再通过重建获得此时的畸变波前的信息。如此一来,使得所提出的传感器可同时具有较大测量范围与高精度测量的特性,相应也提出了有效的焦点跟踪算法。本原型系统的提出,为在实际自适应光学系统中应用提供了很好的理论依据。

## 参 考 文 献

- Zhang Xiang, Su Likun, Cai Qing. Analysis of thermal effect and experimental test of beam wavefront aberration in all solid-state Nd:YAG laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 802-807.  
张翔, 苏礼坤, 蔡青. 全固态 Nd:YAG 激光器热效应及输出光束波前像差分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 802-807.
- Ma Haotong, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. Near-field beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2032-2036.  
马浩统, 周朴, 王小林, 等. 基于液晶空间光调制器的激光光束近场整形[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2032-2036.
- Yu Xiaochen, Hu Jiasheng, Wang Lianbao. Laser beam shaping based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.  
于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. *光学学报*, 2013, 32(5): 0514001.
- Bai Fuzhong, Rao Changhui. Effect of pinhole diameter on correction accuracy of closed-loop adaptive optics system using self-referencing interferometer wavefront sensor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 59(11): 8280-8286.  
白福忠, 饶长辉. 自参考干涉波前传感器中针孔直径对闭环自适应光学系统校正精度的影响[J]. *物理学报*, 2011, 59(11): 8280-8286.
- Qi Yue, Kong Ningning, Li Dayu, *et al.*. High resolution open-loop adaptive optics system for retinal imaging based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1011003.  
齐岳, 孔宁宁, 李大禹, 等. 高分辨率开环液晶自适应光学视网膜成像系统[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1011003.
- Cheng Shaoyuan, Cao Zhaoliang, Hu Lifa, *et al.*. Measurement of wavefront aberrations of human eyes with Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1060-1067.  
程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 用夏克-哈特曼探测器测量人眼波前像差[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(5): 1060-1067.
- J Vargas, L Gonzalez Fernandez, J A Quiroga, *et al.*. Shack-Hartmann centroid detection method based on high dynamic range imaging and normalization techniques [J]. *Appl Opt*, 2010, 49(13): 2409-2416.
- S Erkin, J G Joseph, M M Rhonda, *et al.*. Adaptive cross-correlation algorithm for extended scene Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(3): 213-215.
- Zou Weiyao, Zhang Zhenchao. Generalized wavefront reconstruction algorithm applied in a Shack-Hartmann test [J]. *Appl Opt*, 2000, 39(2): 250-268.
- L Seifert, J Liesener, H J Tiziani. The adaptive Shack-Hartmann sensor [J]. *Opt Commun*, 2003, 216(4-6): 313-319.
- H Choo, R S Muller. Addressable microlens array to improve dynamic range of Shack-Hartmann sensors [J]. *J Microelectromech Syst*, 2006, 15(6): 1555-1567.
- Yu Hongbin, Zhou Guangya, F S Chau, *et al.*. A tunable Shack-Hartmann wavefront sensor based on a liquid-filled microlens array [J]. *J Micromech Microeng*, 2008, 18(10): 105017.
- Ren Hongwen, Xu Su, Y J Lin, *et al.*. Adaptive focus lenses [J]. *Opt Photon News*, 2008, 19(10): 42-47.
- Zhang Menghua, Zheng Jihong, Tang Pingyu, *et al.*. High efficiency nano-silver-doped holographic polymer dispersed liquid crystal grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0105002.  
张梦华, 郑继红, 唐平玉, 等. 纳米银掺杂的高效率全息聚合物分散液晶光栅制备[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0105002.
- Li Hui, Zhang Xinyu, Zhang Tianxu, *et al.*. Optical imaging characteristics of a new liquid crystal lens [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2009, 28(6): 428-431.  
李晖, 张新宇, 张天序, 等. 一种新型液晶透镜的光学成像特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(6): 428-431.
- Li Hui, Liu Kan, Zhang Xinyu, *et al.*. 128 × 128 elements frequency driven liquid crystal lens array with tunable focal length [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 218-223.  
李晖, 刘侃, 张新宇, 等. 128 × 128 元频率驱动变焦液晶透镜阵列[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 218-223.
- Li Hui, Zhang Xinyu, Zhang Tianxu, *et al.*. Electrically driving and controlling adaptive 128 element × 128 element liquid crystal micro-lens array with tunable focal length [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(10): 2351-2358.  
李晖, 张新宇, 张天序, 等. 电控可变焦 128 元 × 128 元自适应液晶透镜阵列[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2351-2358.