

## 激光与光电子学进展

## 液晶微透镜阵列直接成像

刘天, 刘志强, 叶茂\*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

**摘要** 针对传统显微镜结构复杂且视场角小等问题, 提出一种两路低电压驱动的液晶微透镜阵列结构, 透镜的焦距由 3 个电极控制, 中间电极为圆孔阵列图案电极, 作为孔径光阑以阻止微透镜外的杂散光。对该阵列的波前和光焦度进行了测试, 搭建了一套简易液晶微透镜阵列直接成像系统, 每个微透镜都对待观察物体的不同区域成像, 通过近平行光照明显减小相邻微透镜间的串扰, 拼接所有单元图像得到完整图像。该系统无需额外的光学器件, 结构简单紧凑。液晶微透镜阵列具有大视场, 成像区域具备可扩展性, 为实现大视场下的简易显微成像提供了新思路。

**关键词** 液晶微透镜阵列; 电控调焦; 直接成像; 图像拼接

中图分类号 TN141.9

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221273

## Direct Imaging with Liquid Crystal Microlens Array

Liu Tian, Liu Zhiqiang, Ye Mao\*

School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

**Abstract** A two-channel low-voltage driving liquid crystal microlens array structure is proposed to solve the complex structure and narrow field of view of conventional microscopes. The focal length of the lens is controlled by three electrodes, and the middle electrode has a circular hole array pattern, which acts as an aperture stop to block stray light. The wavefront and optical power of the array are measured. A simple direct imaging system of the liquid crystal microlens array is developed. Each part of the object is imaged by the corresponding microlens. The crosstalk between adjacent microlenses is reduced via near-parallel light illumination, and the subimages are combined to obtain the complete image. The system requires no additional optics and has a simple, compact structure. The liquid crystal microlens array has a broad field of view, and the imaging area is scalable. This study provides a new technique for achieving simple microscopic imaging in a broad field of view.

**Key words** liquid crystal microlens array; electronically controlled focusing; direct imaging; image stitching

## 1 引言

传统的微透镜阵列作为光学系统中的核心元件<sup>[1]</sup>, 在不同领域有着广泛的应用, 而液晶微透镜阵列是近年来出现的一种基于液晶材料的微透镜阵列。液晶透镜是一种电控调焦光学透镜, 具有小型化、低功耗和易于集成等优点<sup>[2]</sup>, 已被广泛用于显微镜<sup>[3]</sup>、光学变焦<sup>[4]</sup>、自动对焦<sup>[5-6]</sup>、增强现实<sup>[7]</sup>、虚拟现实<sup>[8]</sup>、景深扩展<sup>[9-10]</sup>、景深采集<sup>[11]</sup>、无偏振成像<sup>[12]</sup>和光场相机<sup>[13-14]</sup>等方面。

1979 年 Sato<sup>[15]</sup>提出了可变焦距的液晶透镜, 随后 Nose 和 Sato<sup>[16]</sup>提出了改进的圆孔图案电极的液晶透镜, 使其产生径向非均匀电场, 可以进行聚焦操作。

随后, 具有多环电极<sup>[17]</sup>、层叠电极<sup>[18]</sup>、大范围调焦<sup>[19]</sup>、低驱动电压<sup>[20]</sup>、从负焦距到正焦距调焦<sup>[21]</sup>等不同特性的液晶透镜相继被研制。不同类型的液晶微透镜阵列也在发展<sup>[22-26]</sup>, 但相关的研究大多集中于电极结构和材料上, 在不同应用场景的探索较少。

本文提出了一种具有 3 个电极的液晶微透镜阵列, 中间的小尺寸圆孔电极阵列作为孔径光阑以减少圆孔外杂散光。传统的显微镜系统体积大、结构复杂、成本高且视场有限, 为此搭建了一套液晶微透镜阵列直接成像系统, 仅使用液晶微透镜阵列采集图像, 物体的每个部分由相应的微透镜成像, 拼接所有单元图像得到完整图像。该系统优势在于能够通过电控的方式

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-02-14; 录用日期: 2022-02-18; 网络首发日期: 2022-02-28

基金项目: 四川省科技计划(2021YJ0102)

通信作者: \*mao\_ye@uestc.edu.cn

实现对焦和离焦,获取不同深度下的图像信息,通过单次曝光即可实现大视场下的显微成像,成像区域可扩展,结构简单、紧凑且成本低。

## 2 液晶微透镜阵列结构与测试

所提的液晶微透镜阵列尺寸为  $9\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ,其中的微透镜单元为  $75 \times 66$  个,其结构如图 1 所示。由图 1 可知,此透镜由上下玻璃基板、氧化铟锡(ITO)层、取向层、绝缘层、黑色金属层和液晶层所构成。对黑色金属层电极进行刻蚀,刻蚀图案如图 1 所示,黑色部分为电极区域,空白部分为通光圆孔。通光圆孔的直径为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,孔心间距为  $120\text{ }\mu\text{m}$ ,整体分布呈六边

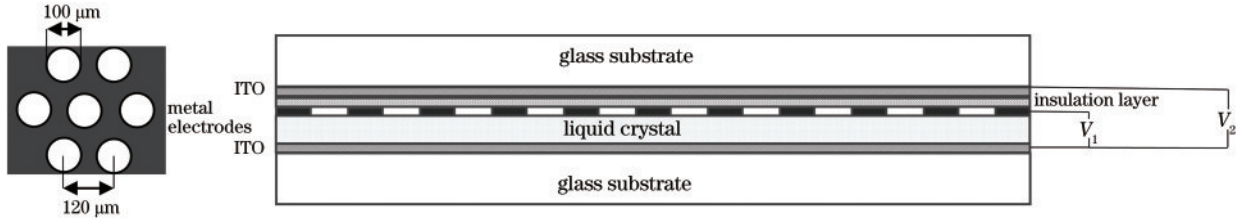


图 1 液晶微透镜阵列结构

Fig. 1 Liquid crystal microlens array structure

通过干涉光路来记录光束经过液晶微透镜阵列的波前情况,所用的激光波长为  $457\text{ nm}$ 。图 2(a)~图 2(b)分别为通电前后微透镜阵列波前干涉图,可以看出,微透镜阵列对通光圆孔内的光进行调制,并对孔外杂散光进行过滤。选取框内的干涉圆环对单个微透

形交错排列,圆孔作为孔径光阑,在一定程度上阻止微透镜外杂散光。液晶层(Jiangsu Hecheng Display Technology Co., Ltd., 137700-100 HTW,  $\Delta n=0.25$ ,  $n_o=1.513$ ,  $n_e=1.774$ )厚度为  $30\text{ }\mu\text{m}$ 。将下基板 ITO 电极接地,使中间圆孔电极与下基板电极之间形成电压  $V_1$ ,上基板 ITO 电极与下基板电极之间形成  $V_2$ ,并用  $V_1$ 、 $V_2$  两个电压来驱动,液晶重新分布,由于液晶的各向异性,非寻常光的梯度折射率曲线就会形成,从中心到边缘呈现抛物线状分布,产生透镜效果:液晶层的折射率从边界到中心递增,透镜工作在正透镜状态;液晶层的折射率从边界到中心递减,透镜工作在负透镜状态。

镜进行分析;保持  $V_2=2.1V_{rms}$  ( $V_{rms}$  为有效电压),连续改变  $V_1$ ,图 3(a)为其中 3 组电压下的波前特性,根据原始数据点散布情况得到相应拟合曲线,可以看出,液晶的相位呈抛物线分布;图 3(b)为光焦度随  $V_1$  变化曲线。

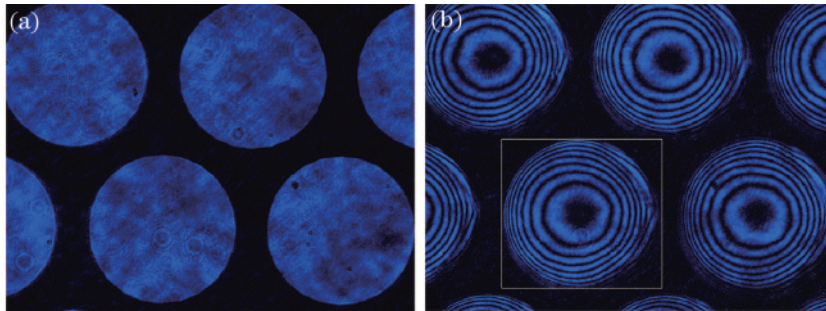


图 2 液晶微透镜阵列波前干涉图。(a)未加电;(b)  $V_1=3.8V_{rms}$ 、 $V_2=2.1V_{rms}$

Fig. 2 Wavefront interferograms of liquid crystal microlens array. (a) Unpowered state; (b)  $V_1=3.8V_{rms}$ ,  $V_2=2.1V_{rms}$

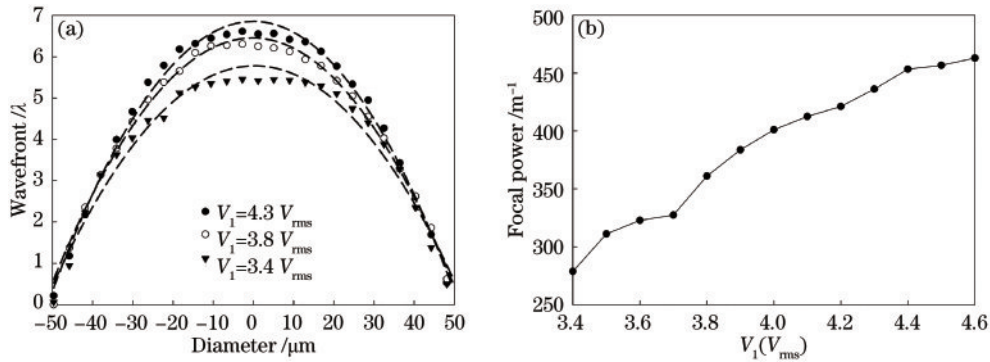


图 3 液晶微透镜阵列特性。(a)波前;(b)光焦度

Fig. 3 Characteristics of liquid crystal microlens array. (a) Wavefront; (b) focal power



### 3 成像实验和结果

#### 3.1 图像采集

液晶微透镜阵列直接成像系统如图 4 所示。包括黑白 CMOS 相机、液晶微透镜阵列、待观察物体、偏振片、平行照明光源。黑白 CMOS 相机的分辨率为  $3840 \text{ pixel} \times 2748 \text{ pixel}$ , 尺寸为  $1/2.3'$ , 像元尺寸为  $1.67 \mu\text{m}$ 。液晶微透镜阵列由许多完全相同的微透镜组成, 这些微透镜被称为单元透镜, 单元透镜产生物体的图像阵列, 即单元图像。单元图像被 CMOS 记录和存储, 通过应用数字图像处理技术, 实现对物体的场景重建。

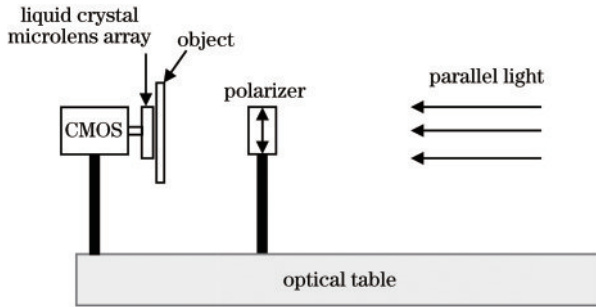


图 4 液晶微透镜阵列直接成像系统

Fig. 4 Liquid crystal microlens array direct imaging system

使用近平行光照明, 调整相机、液晶微透镜阵列和标定板三者的间距, 以减小相邻单元图像间的串扰。串扰是指在图像传感器上, 单元图像之间相互重叠。改变电压  $V_1$  和  $V_2$  调节微透镜阵列的焦距, 以此从每个微透

镜中观察到对焦图像。同时, 待观察物体处于同一平面, 无需考虑不同深度下的对焦和图像重建。给液晶微透镜阵列施加电压前后对 USAF1951 标定板的成像效果如图 5 所示。图 5(a) 为透镜阵列不工作时的成像效果, 此时无法对标定板清晰对焦。图 5(b) 为施加合适电压下液晶微透镜阵列的整体成像效果, 此时透镜阵列工作在正透镜状态下, 系统对标定板清晰对焦, 物距为  $8.2 \text{ mm}$ , 其中每个单元图像为标定板的不同区域。

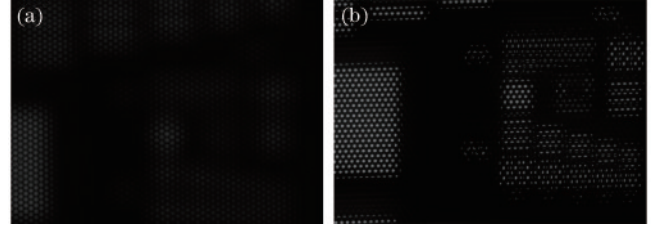


图 5 USAF1951 标定板成像结果。(a) 未加电; (b)  $V_1=3.8V_{\text{rms}}, V_2=2.1V_{\text{rms}}$

Fig. 5 USAF1951 resolution target imaging results. (a) Unpowered state; (b)  $V_1=3.8V_{\text{rms}}, V_2=2.1V_{\text{rms}}$

#### 3.2 图像重建

获取原始图像后, 通过计算对场景进行重建, 使用了基于光场的图像拼接算法<sup>[27-28]</sup>, 其核心是标定每个单元透镜的位置并截取每个单元图像, 再将其排列在一起还原场景。图 6 展示了在保持  $V_2=2.1V_{\text{rms}}$ 、改变  $V_1$  的情况下微透镜阵列变焦过程中标定板的重建图像, 其中图 6(b) 为对焦图像, 可以看出, 通过调焦可以获取不同深度下的图像信息。

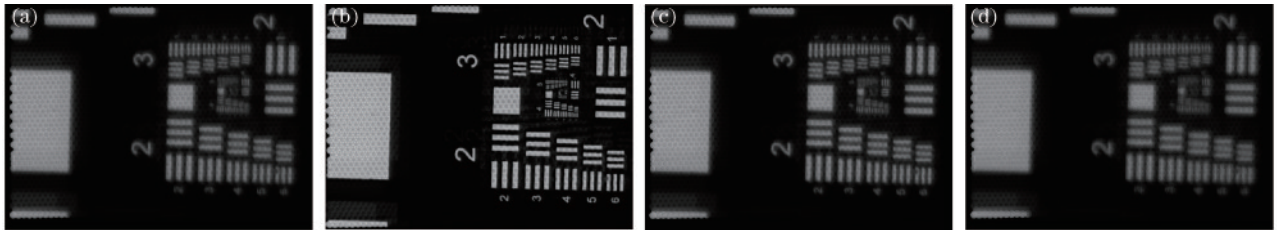


图 6 重建结果。(a)  $V_1=3.4V_{\text{rms}}$ ; (b)  $V_1=3.8V_{\text{rms}}$ ; (c)  $V_1=4.3V_{\text{rms}}$ ; (d)  $V_1=4.6V_{\text{rms}}$

Fig. 6 Results of reconstruction. (a)  $V_1=3.4V_{\text{rms}}$ ; (b)  $V_1=3.8V_{\text{rms}}$ ; (c)  $V_1=4.3V_{\text{rms}}$ ; (d)  $V_1=4.6V_{\text{rms}}$

使用液晶微透镜阵列观察直径约为  $4 \text{ mm}$  的松雄球果生物样本, 原始图像如图 7(a) 所示, 此时电压为  $V_1=3.7V_{\text{rms}}, V_2=2.1V_{\text{rms}}$ ; 重建后的样本图像如图 7(b) 所示, 可以观察到松果的整体轮廓和内部结构

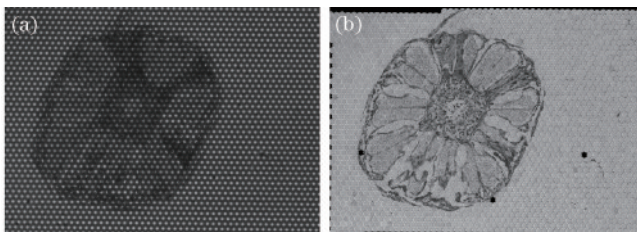


图 7 松果生物样本图像。(a) 原图; (b) 重建结果

Fig. 7 Pine cone biological sample images. (a) Raw image; (b) reconstruction result

细节。

## 4 结 论

对液晶微透镜阵列的结构和光学特性进行了说明, 利用液晶微透镜阵列的大光焦度和电控调焦能力, 搭建了直接成像系统, 仅使用液晶微透镜阵列作为光学元件来采集图像, 每个单元透镜对物体的不同区域成像, 拼接所有单元图像得到完整图像。传统显微镜体积大且成本高, 观察物体时呈放大的像, 视场有限, 而液晶微透镜阵列可以通过电控调焦获取不同深度下的图像信息, 在观察微小物体的同时保证了大视场。液晶微透镜阵列的成像区域具备可扩展性, 其大小受液晶微透镜阵列尺寸和相机传感器大小的限制, 更大

尺寸的液晶微透镜阵列和相机传感器可以采集更大范围的目标物体,整个系统成本低,结构简单紧凑。

### 参 考 文 献

- [1] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2100001.  
Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2100001.
- [2] Xu S, Li Y, Liu Y F, et al. Fast-response liquid crystal microlens[J]. Micromachines, 2014, 5(2): 300-324.
- [3] Hsieh P Y, Chou P Y, Lin H A, et al. Long working range light field microscope with fast scanning multifocal liquid crystal microlens array[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10981-10996.
- [4] Chen M S, Chen P J, Chen M, et al. An electrically tunable imaging system with separable focus and zoom functions using composite liquid crystal lenses[J]. Optics Express, 2014, 22(10): 11427-11435.
- [5] Galstian T, Sova O, Asatryan K, et al. Optical camera with liquid crystal autofocus lens[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 29945-29964.
- [6] 兰天成, 兰荣华, 陈晓西, 等. 液晶透镜爬山自动对焦算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1411003.  
Lan T C, Lan R H, Chen X X, et al. Research on liquid crystal lens hill climbing autofocus algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1411003.
- [7] Chen H S, Wang Y J, Chen P J, et al. Electrically adjustable location of a projected image in augmented reality via a liquid-crystal lens[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28154-28162.
- [8] Jamali A, Bryant D, Zhang Y L, et al. 72-3: design investigation of tunable liquid crystal lens for virtual reality displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 1057-1060.
- [9] Ye M, Chen X X, Li Q C, et al. Depth from defocus measurement method based on liquid crystal lens[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28413-28420.
- [10] 刘志强, 胡轶瑶, 叶茂. 液晶轴棱锥[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0823001.  
Liu Z Q, Hu Y Y, Ye M. Liquid crystal axicon[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0823001.
- [11] Bai Y C, Chen X X, Ma J C, et al. Transient property of liquid crystal lens and its application in extended depth of field imaging[J]. Optics Communications, 2020, 473: 125974.
- [12] 李鹏伟, 陈信慈, 陈晓西, 等. 用 90° 扭曲向列相液晶盒代替偏振片的液晶透镜成像方法[J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0711004.  
Li P W, Chen X C, Chen X X, et al. Liquid crystal lens imaging method using 90° twisted nematic liquid crystal cell instead of polarizer[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(7): 0711004.
- [13] Kwon H, Kizu Y, Kizaki Y, et al. A gradient index liquid crystal microlens array for light-field camera applications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 836-839.
- [14] Chen M C, He W D, Wei D, et al. Depth-of-field-extended plenoptic camera based on tunable multi-focus liquid-crystal microlens array[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4142.
- [15] Sato S. Liquid-crystal lens-cells with variable focal length [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1979, 18(9): 1679-1684.
- [16] Nose T, Sato S. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field[J]. Liquid Crystals, 1989, 5(5): 1425-1433.
- [17] Kao Y Y, Chao P C P, Hsueh C W. A new low-voltage-driven GRIN liquid crystal lens with multiple ring electrodes in unequal widths[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 18506-18518.
- [18] Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with stacked structure of liquid-crystal layers[J]. Optics Communications, 2005, 250(4/5/6): 266-273.
- [19] Ye M, Wang B, Sato S. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide range[J]. Applied Optics, 2004, 43(35): 6407-6412.
- [20] Chen X X, Bai Y C, Chao C, et al. Driving liquid crystal lens to extend focus range[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2018, 57(7): 072601.
- [21] Wang B, Ye M, Sato S. Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 79-81.
- [22] Kim J H, Kumar S. Fabrication of electrically controllable microlens array using liquid crystals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(2): 628-632.
- [23] Han X J, Dai W W, Meng J J, et al. Electrically controlled liquid-crystal microlens arrays based on plane nonuniform spiral microcoils[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10964: 109641T.
- [24] Han X J, Dai W W, Li D P, et al. Design and fabrication of electronically controlled liquid crystal microlens arrays with non-uniform coil electrode arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10607: 1060709.
- [25] Chen M C, Shao Q, He W D, et al. Electrically controlled liquid crystal microlens array based on single-crystal graphene coupling alignment for plenoptic imaging [J]. Micromachines, 2020, 11(12): 1039.
- [26] Li Z B, Lu H B, Ding Y S, et al. Low voltage liquid crystal microlens array based on polyvinyl alcohol convex induced vertical alignment[J]. Liquid Crystals, 2021, 48(2): 248-254.
- [27] Georgiev T G, Lumsdaine A. Focused plenoptic camera and rendering[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(2): 021106.
- [28] Varjo S, Hannuksela J, Silvén O. Direct imaging with printed microlens arrays[C]//Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012), November 11-15, 2012, Tsukuba, Japan. New York: IEEE Press, 2012: 1355-1358.