

## 带像差校正功能的柔性变焦透镜

杨叶城, 张昕, 韩小帅, 梁丹, 马剑强\*

宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 为了校正柔性变焦透镜变焦过程中出现的光学像差, 提出了一种带校正像差功能的柔性变焦透镜。所提透镜由变焦模块和基于压电致动器的像差校正模块组成。制备了变焦透镜的原理样机并搭建实验光学系统对其进行了测试。测试结果表明, 所提透镜可实现  $-1\sim 5$  D 的屈光力变化; 像差校正模块可精确重构  $3\sim 9$  项 Zernike 多项式像差, 归一化残余误差小于  $4\%$ ; 对不同屈光力下的系统像差进行校正, 校正后系统的波前像差下降幅值均在  $76\%$  以上, 系统成像质量明显提升。

**关键词** 光学设计; 自适应光学; 变焦透镜; 弹性薄膜; 像差校正

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0422003

## Flexible Varifocal Lens with Aberration Correction Function

Yang Yecheng, Zhang Xin, Han Xiaoshuai, Liang Dan, Ma Jianqiang\*

Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** In order to correct the optical aberration in the varifocal process of flexible varifocal lens, a flexible varifocal lens with aberration correction function is proposed. The proposed lens consists of a varifocal module and an aberration correction module based on piezoelectric actuators. The principle prototype of the varifocal lens is fabricated and an experimental optical system is built to test it. The test results show that the proposed lens can achieve the refractive power variation of  $-1\sim 5$  D. The aberration correction module can accurately reconstruct  $3\sim 9$  Zernike polynomial aberrations, and the normalized residual error is less than  $4\%$ . The aberrations of the system under different refractive powers are corrected, the wavefront aberrations of the corrected system are all decreased by more than  $76\%$ , and the imaging quality of the system is significantly improved.

**Key words** optical design; adaptive optics; varifocal lens; elastic membrane; aberration correction

## 1 引言

变焦透镜是一种可以改变自身焦距的特殊透镜。与传统机械变焦系统相比, 变焦透镜具有结构简单、体积小和无机械磨损等优点, 在显微成像<sup>[1-2]</sup>、内窥镜<sup>[3]</sup>、手机镜头<sup>[4]</sup>等领域中有广泛的应用前景。变焦透镜大致可以分为基于电润湿效应的变焦透镜<sup>[5-6]</sup>、液晶变焦透镜<sup>[7]</sup>和柔性变焦透镜<sup>[8-9]</sup>。其中, 柔性变焦透镜通过改变弹性薄膜的表面曲率来改变焦距, 与前两类变焦透镜相比具有变焦范围较大、结

构简单和驱动方式多样等优点。在柔性变焦透镜变焦过程中, 弹性薄膜曲率的不均匀变化和折射率不匹配等问题会导致像差的产生, 且像差会随着变焦透镜屈光力的增大而增大<sup>[10]</sup>。此外, 液体的重力效应也会使柔性变焦透镜产生像差<sup>[11]</sup>。像差会使得光学系统的成像质量下降<sup>[12-13]</sup>, 进而限制了柔性变焦透镜的应用。Fuh 等<sup>[14]</sup>对双凸柔性变焦透镜在不同焦距下产生的像差进行了研究, 选择合适的薄膜厚度可以减小变焦过程中产生的球差。Liebraut 等<sup>[15]</sup>提出了一种由多个伺服致动器驱动

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-08-31

基金项目: 国家自然科学基金(51805280)、工业控制技术国家重点实验室开放课题(ICT2021B44)、浙江省航空发动机极端制造技术研究重点实验室开放基金

通信作者: \*majianqiang@nbu.edu.cn

的变焦透镜,可实现变焦和对像散像差的控制,但其结构较为复杂。Quintavalla 等<sup>[16]</sup>通过引入一套额外的自适应光学系统来校正变焦透镜中因液体重力效应引起的像差。总体来说,柔性变焦透镜变焦过程中的像差问题仍未得到很好的解决。本文提出了一种带像差校正功能的变焦透镜,其由变焦模块和像差校正模块组成,不仅可以减小变焦产生的像差,还具备 3~9 项 Zernike 多项式像差校正能力,进而可提升变焦系统的成像质量。

## 2 结构和工作原理

带像差校正功能的变焦透镜原理图如图 1 所示,变焦透镜由下方的变焦模块和上方的像差校正模块组成,两模块由平面玻璃隔开。变焦模块由平面玻璃、透明液体介质和弹性薄膜组成。通过注液孔向腔体中注入或从腔体中抽出液体的方式来改变腔体内的液体体积,使弹性薄膜的曲率发生改变,实现一定范围内的焦距变化<sup>[17]</sup>。像差校正模块为一种基于压电驱动的可变形透镜<sup>[18]</sup>,由带环形压电驱

动器的薄玻璃、透明液体介质和平面玻璃组成。带环形压电驱动器的薄玻璃由环形压电片和薄玻璃片粘接而成,并固定在玻璃圆环上。环形压电片外侧有两环各 16 个扇形的分立电极,与内侧整片电极层形成 32 个单压电致动器,可用于驱动薄玻璃片。当对单个致动器施加电压时,在压电效应的作用下,压电片会产生横向伸长或者收缩,从而导致薄玻璃片产生局部变形,如图 1(b)所示。其中,Act1 和 Act2 表示内圈和外圈的典型致动器。通过对各致动器上施加电压使薄玻璃片在工作口径的区域内产生变形,薄玻璃片挤压腔体内的透明介质使透镜厚度发生改变,这会引入通过的光束的波前发生改变,进而达到像差校正的目的,如图 1(c)所示。实验中将液体石蜡作为变焦透镜腔体的填充介质,其折射率( $n$ )为 1.476~1.483,与玻璃材料相匹配,且具有较高的透射率(大于 95%)。当变焦透镜在变焦过程中产生波前像差时,通过控制各致动器上的电压,使通过工作口径的光束产生与波前像差共轭的相位变化,便可实现对波前像差的校正。

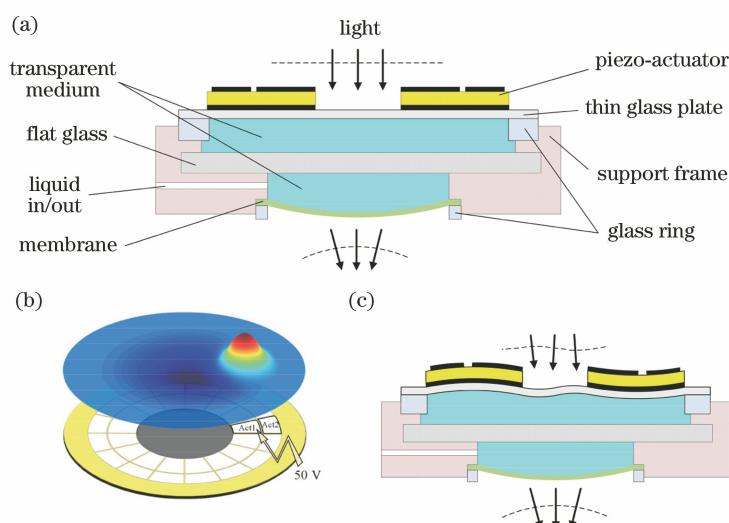


图 1 带像差校正功能的变焦透镜的结构与工作原理示意图。(a)变焦透镜结构示意图;(b)致动器工作原理;(c)利用变焦透镜补偿像差的过程

Fig. 1 Schematic diagrams of structure and working principle of varifocal lens with aberration correction function. (a) Structural diagram of varifocal lens; (b) working principle of actuator; (c) process of compensating aberration by varifocal lens

## 3 器件制备

带像差校正功能的变焦透镜的制备流程:1)使用纳秒脉冲激光打标机将两面镀有银电极层、厚度为 100  $\mu\text{m}$  的压电片切割成内径和外径分别为 10 mm 和 40 mm 的圆环。然后,在压电片上侧的银电极层中切割出两环扇形电极,内环电极的内径和外径分别为 10 mm 和 22 mm,外环电极的内径

和外径分别为 22 mm 和 30 mm,切割间隙约为 75  $\mu\text{m}$ ;2)使用环氧胶将切割好的压电片与厚度为 150  $\mu\text{m}$ 、直径为 40 mm 的薄玻璃片粘接起来,并将薄玻璃片固定在内径为 30 mm、外径为 40 mm 的石英玻璃环上,便可完成像差校正模块的制作;3)将直径为 28 mm 的弹性薄膜固定在内径为 20 mm、外径为 28 mm 的石英玻璃环上,便可完成变焦模块的制作;4)将上述完成的像差校正模块与变焦模块

分别嵌入支撑框架的两端,并利用硅橡胶密封石英玻璃环的边缘。将液体石蜡注入到支撑框架的两个独立腔体中,便可完成变焦透镜的本职工作;5)从压电片上各个致动器中引出电极线进行电气连接并封装。制备的变焦透镜实物图如图 2(a)所示,为与尺寸为 60 mm 的笼式光学系统配合,变焦透镜的整体尺寸设置为 80 mm×80 mm×20 mm。图 2(b)为在不同焦距下变焦透镜通光口径内的图像。

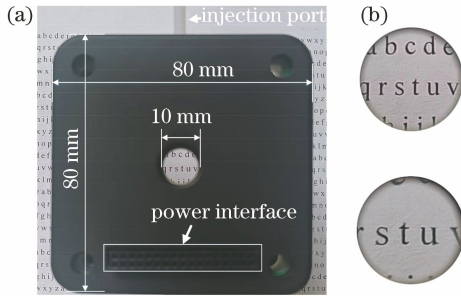


图 2 带像差校正功能的变焦透镜。(a)变焦透镜实物图; (b)不同焦距下变焦透镜通光口径内的图像

Fig. 2 Varifocal lens with aberration correction function.  
(a) Physical drawing of varifocal lens; (b) images in aperture of varifocal lens at different focal lengths

## 4 实验

### 4.1 实验装置

为了表征变焦透镜的性能,在光学隔振台上搭建了测试实验系统,如图 3 所示。来自单模光纤的波长为 635 nm 的激光束经过焦距为 125 mm 的平凸透镜 L1 准直,然后到达变焦透镜(AL)的工作区域。为了与波前传感器的测量口径相匹配,光束将经过焦距为 100 mm 的透镜 L2 和焦距为 40 mm 的透镜 L3 构成的缩束系统。经过缩束系统的光束传播至分光棱镜(BS),50%的反射光由 Thorlabs WFS30-7AR 哈特曼波前传感器(WFS)探测。WFS 实时测得光学系统的波前像差并反馈给控制系统,通过波前反馈和基于最速下降算法的控制算法<sup>[19]</sup>对波前像差进行校正。另外 50%的光束通过焦距为 200 mm 的透镜 L4 后由大恒 MER-125-30UM CCD 相机采集,其分辨率为 1292 pixel×964 pixel,像素尺寸为 3.75 μm×3.75 μm,并对远场焦斑光强分布进行了测量。根据凸透镜成像规律公式可推导出透镜组(透镜 AL 和透镜 L3)的后焦距  $F_L$  的计算公式为

$$F_L = f_2(d_1 - f_{AL})/[d_1 - (f_2 + f_{AL})], \quad (1)$$

式中: $d_1$  为变焦透镜和透镜 L2 之间的距离; $f_2$  为透镜 L2 的焦距; $f_{AL}$  为变焦透镜的焦距。当变焦透镜的焦距改变时,透镜组的后焦距也随之改变,移动透镜 L3 在光轴上的位置,使 WFS 接收到的光束恢复到准直状态。此时,透镜组的后焦距为

$$F_L = d_2 - f_3, \quad (2)$$

式中: $d_2$  为透镜 L2 与透镜 L3 之间的距离; $f_3$  为透镜 L3 的焦距。

由(1)式和(2)式可得变焦透镜的焦距为

$$f_{AL} = f_2(d_2 - f_3)/[f_2 - (d_2 - f_3)] + d_1. \quad (3)$$

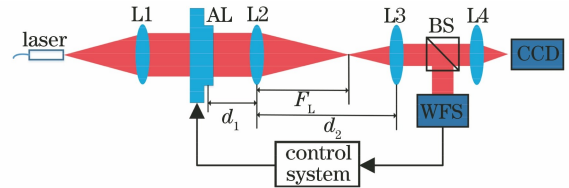


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental system

### 4.2 像差校正性能

为了表征该变焦透镜像差校正模块校正像差的能力,在光轴沿水平方向的光学平台上,变焦透镜在不施加任何力与载荷状态下,进行像差重构测试。在测试中,压电致动器工作在-50~50 V 的电压范围下。变焦透镜在初始面形的基础上依次重构 3~9 项 Zernike 多项式像差,使用前 65 项 Zernike 多项式拟合测得的波前数据。实验重构每一项 Zernike 多项式像差所测得的波前面形如图 4 所示,其中 PV 表示像差的峰谷值。通过计算实际重构 Zernike 多项式像差的均方根值(RMS)和残余误差(ER)来评估该变焦透镜校正像差的性能。重构像散像差( $Z_3$  和  $Z_5$ )后测得的波前 RMS 约为 1.0 μm,归一化残余误差(ER 除以 RMS)约为 1.6%;重构离焦像差( $Z_4$ )后测得的波前 RMS 约为 2.0 μm,归一化残余误差小于 1.0%;重构三叶草像差( $Z_6$ 、 $Z_9$ )后测得的波前 RMS 约为 0.6 μm,归一化残余误差约为 2.1%;重构彗形像差( $Z_7$  和  $Z_8$ )后测得的波前 RMS 约为 0.3 μm,归一化残余误差约为 3.7%。测试结果表明,该变焦透镜对 3~9 项 Zernike 多项式像差具有良好的重构能力。将像差校正模块重构的离焦项( $Z_4$ )换算成以 D 为单位的数值,离焦的换算公式为

$$M = 4\sqrt{3}a/r^2, \quad (4)$$

式中: $a$  为第 4 项 Zernike 多项式系数,单位为 μm; $r$  为变焦透镜通光孔半径,单位为 mm。换算得到

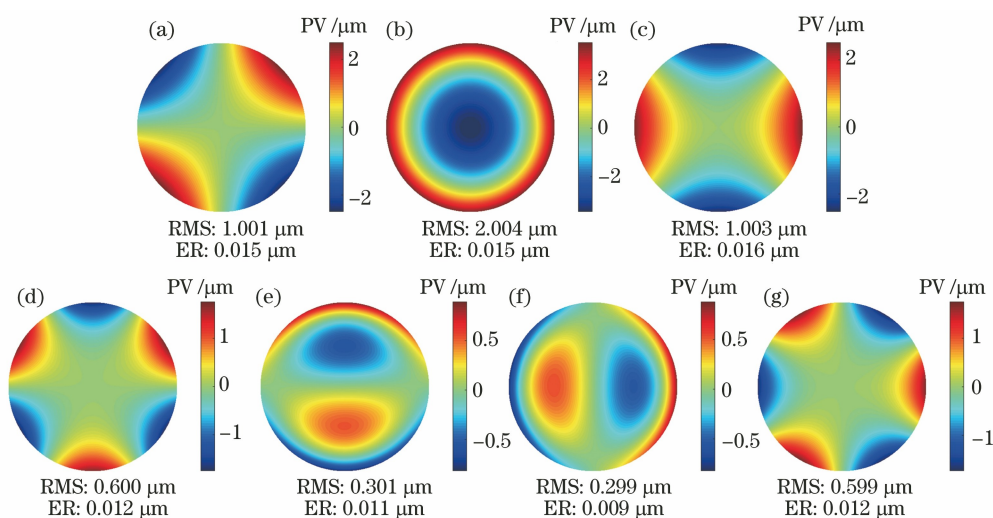


图 4 重构 Zernike 多项式像差。(a)  $Z_3$ ;(b)  $Z_4$ ;(c)  $Z_5$ ;(d)  $Z_6$ ;(e)  $Z_7$ ;(f)  $Z_8$ ;(g)  $Z_9$

Fig. 4 Reconstructed Zernike polynomial aberrations. (a)  $Z_3$ ; (b)  $Z_4$ ; (c)  $Z_5$ ;  
(d)  $Z_6$ ; (e)  $Z_7$ ; (f)  $Z_8$ ; (g)  $Z_9$

的数值大约为 0.55 D,说明像差校正模块也有一定的变焦能力,进而可辅助变焦。

### 4.3 变焦性能

为了研究变焦透镜在变焦过程中的像差变化以及变焦后像差的校正能力,在每次变焦后,利用波前传感器测量系统的波前像差,并对波前像差进行校正。同时,记录下校正前后波前像差的变化。测试系统在变焦透镜不同屈光力下的初始像差和校正后的残余像差如图 5(a)所示。可以看出,当变焦透镜的屈光力从-1 D 增加到 5 D 时,系统初始像差先是随着屈光力的增大而减小,在

1 D 状态下达到最小值,之后又随着屈光力的增大而增大。由于测试系统本身存在的像差抵消了一部分变焦透镜产生的像差,因此系统像差最小值并不是出现在屈光力为 0 的状态下而是在 1 D 状态下。校正后系统的波前像差 RMS 有了明显的下降,下降幅值均在 76% 以上,尤其在 0~3.5 D 的状态下,校正后系统的波前像差 RMS 均在 100 nm 以下。图 5(b)为在变焦透镜 1 D 屈光力下像差校正前后系统波前像差的 Zernike 系数分解图。可以看到,3~9 项的 Zernike 多项式像差都得到了很好的校正。

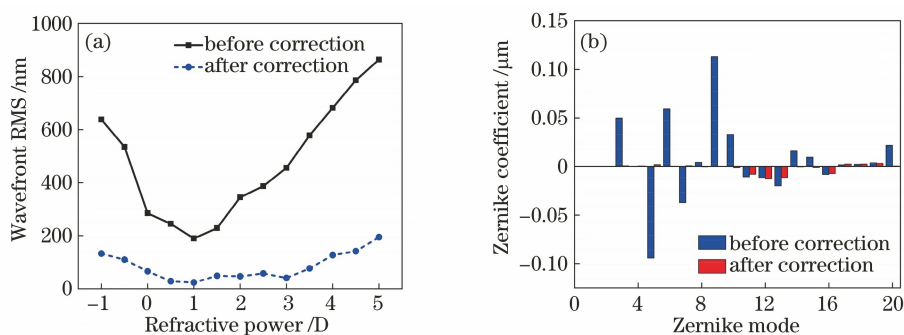


图 5 像差补偿前后的波前像差对比。(a)不同屈光力下的波前像差;(b)1 D 屈光力下波前的 Zernike 多项式系数分解

Fig. 5 Wavefront aberration comparison before and after aberration compensation. (a) Wavefront aberrations under different refractive powers; (b) Zernike polynomial coefficient decomposition of wavefront at refractive power of 1 D

图 6 为 CCD 相机在不同屈光力下采集到的焦斑图。通过对比像差校正前后的焦斑强度分布,可以直观地看出变焦透镜产生的像差对光学系统成像质量的影响。从图 6 中可知,校正前系统的波前像差比较大,焦斑能量分布发散;像差校正后的焦斑能

量分布集中,焦斑的质量明显提高。在屈光力为 0 的状态下,CCD 采集到的校正后的光斑直径为  $82.5 \mu\text{m}$ (约为 22 pixel)。通过艾里斑公式可计算出理想光斑直径约为  $77.5 \mu\text{m}$ (约为 20.6 pixel)。实验与理论吻合说明系统像差已得到了有效校正。

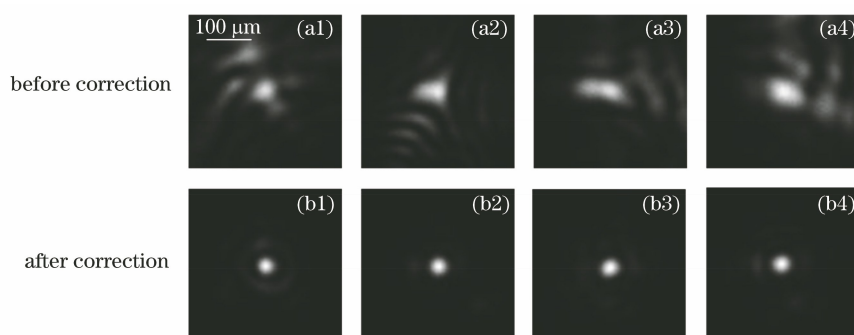


图 6 不同屈光力下焦斑的强度分布。(a1)(b1) 0; (a2)(b2) 1 D; (a3)(b3) 2 D; (a4)(b4) 3 D

Fig. 6 Intensity distribution of focal spot under different refractive powers. (a1)(b1) 0; (a2)(b2) 1 D; (a3)(b3) 2 D; (a4)(b4) 3 D

## 5 结 论

针对柔性变焦透镜因变焦产生的像差,提出了一种带校正像差功能的变焦透镜。该变焦透镜由变焦模块和像差校正模块组成。制备了样机,并搭建了实验系统对变焦透镜的性能进行了测试。测试结果表明,该变焦透镜可实现 $-1\sim 5$  D的屈光力变化,能精确重构 $3\sim 9$ 项 Zernike 多项式像差,归一化残余误差小于 $4\%$ 。所提透镜可以有效校正因变焦而产生的低阶像差,校正后系统的波前像差 RMS 明显减小,此时远场聚焦光斑能量集中,系统的成像质量明显提高。所提透镜结构紧凑,可直接嵌入光路中使用,对其他类型变焦透镜消除像差影响具有借鉴意义。

### 参 考 文 献

- [1] Qu Y F, Yang H J. Optical microscopy with flexible axial capabilities using a vari-focus liquid lens [J]. *Journal of Microscopy*, 2015, 258(3): 212-222.
- [2] Martínez-Corral M, Hsieh P Y, Doblaz A, et al. Fast axial-scanning widefield microscopy with constant magnification and resolution [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(11): 913-920.
- [3] Lee S, Choi M, Lee E, et al. Zoom lens design using liquid lens for laparoscope [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1751-1761.
- [4] Kuiper S, Hendriks B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(7): 1128-1130.
- [5] Luo Y Z, Peng R L, Yu Z J. Structure design and analysis of liquid lens with self-zoom-compensation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 122301.  
罗远智, 彭润玲, 喻治俊. 可变焦补偿的液体透镜结构设计与分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 122301.
- [6] Zhao R, Hua X G, Tian Z Q, et al. Electrowetting-based variable-focus double-liquid lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2592-2597.  
赵瑞, 华晓刚, 田志强, 等. 电润湿双液体变焦透镜 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2592-2597.
- [7] Yang L, Wang M S, Xu G Q, et al. Design and optimization of low voltage driving variable focal length liquid crystal lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0922003.  
杨兰, 王敏帅, 徐恭勤, 等. 低电压驱动液晶变焦透镜的设计与优化 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0922003.
- [8] Jia S H, Tang Z H, Dong J, et al. Recent advances in flexible variable-focus lens [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 535-547.  
贾书海, 唐振华, 董君, 等. 柔性变焦透镜发展现状 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 535-547.
- [9] Xu K, Li H, Mao T X. Mechanism of focus-variable liquid lens driven by bending vibration of thin films [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 092202.  
许珂, 李华, 茆廷学. 薄膜弯曲振动驱动液体变焦透镜的机理 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 092202.
- [10] Fuh Y K, Chen J K, Chen P W. Characterization of electrically tunable liquid lens and adaptive optics for aberration correction [J]. *Optik*, 2015, 126(24): 5456-5459.
- [11] Mishra K, van den Ende D, Mugele F. Recent developments in optofluidic lens technology [J]. *Micromachines*, 2016, 7(6): 102.
- [12] Savidis N, Peyman G, Peyghambarian N, et al. Nonmechanical zoom system through pressure-controlled tunable fluidic lenses [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2858-2865.
- [13] Fuh Y K, Huang C T. Characterization of a tunable astigmatic fluidic lens with adaptive optics correction

- for compact phoropter application [J]. *Optics Communications*, 2014, 323: 148-153.
- [14] Fuh Y K, Lin M X, Lee S. Characterizing aberration of a pressure-actuated tunable biconvex microlens with a simple spherically-corrected design[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 50 (12): 1677-1682.
- [15] Liebetaut P, Petsch S, Liebeskind J, et al. Elastomeric lenses with tunable astigmatism [J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(9): e98.
- [16] Quintavalla M, Santiago F, Bonora S, et al. Optical characterization and adaptive optics correction of polymer adaptive lens aberrations [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 158-163.
- [17] Yu H B, Zhou G Y, Siong C F, et al. Lens with transformable-type and tunable-focal-length characteristics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(5): 1317-1322.
- [18] Peng T R, Dai C Y, Lou J Q, et al. A low-cost deformable lens for correction of low-order aberrations[J]. *Optics Communications*, 2020, 460: 125209.
- [19] Zhu L, Sun P C, Bartsch D U, et al. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(1): 168-176.