

## 柔性变焦透镜发展现状

贾书海\*, 唐振华, 董 君, 陈花玲  
(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 本文从基于力致变形(机械传动)驱动和基于电致变形(智能材料)驱动两方面分析了柔性变焦透镜(FVFL)的发展现状。通过归纳和分析发现:柔性变焦透镜均存在温度、重力对稳定性的影响。传统力致变形驱动的柔性变焦透镜变焦范围大,但响应速度慢,不易微型化设计;电致变形驱动的柔性变焦透镜响应速度快、结构紧凑。改善变焦透镜成像质量、降低驱动电压是目前柔性变焦透镜的研究热点。探索新颖的驱动方式,研究低功耗、智能化变焦系统将是柔性变焦透镜的主要发展趋势。

**关键词:** 自适应光学;变焦透镜;智能材料;弹性薄膜

**中图分类号:** TH74; O435 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150804.0535

## Recent advances in flexible variable-focus lens

JIA Shu-hai\*, TANG Zhen-hua, DONG Jun, CHEN Hua-ling  
(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

\* Corresponding author, E-mail: shjia@mail.xjtu.edu.cn

**Abstract:** In this paper, the flexible variable-focus lens(FVFLs) is reviewed from two aspects including mechanical variable-focus lenses and electrostrictive variable-focus lenses. The gravity effect and temperature change exist in most FVFLs. Mechanical variable-focus lenses exhibit very large focal length tunability, but their use is limited by their slow response speed. Electrostrictive variable-focus lenses have simple and compact structure, high response speed. Providing a solution for minimizing optical aberrations and maximizing the tunability of focal length or field of view has drawn much attention in recent years. Exploring new driving technology and developing intelligent focus tunable system with low power consumption will be the main focus of FVFLs in future.

**Key words:** adaptive optics; variable-focus lens; intelligent materials; elastic membrane

收稿日期:2015-05-13;修订日期:2015-06-10

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民航局联合资助项目(No. U1233116);陕西省工业攻关计划资助项目(No. 2014K07-02);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20120201110032)

## 1 引言

随着科技的发展,传统光学变焦成像系统由于存在结构复杂、体积笨重、机械磨损严重、加工难度大等缺点,已无法满足智能化光学设备对自动化、智能化、微型化光学变焦系统的要求<sup>[1]</sup>。近年来,柔性变焦透镜已引起国内外学者的广泛关注,柔性变焦透镜通常由透明弹性薄膜和透明流体介质等组成,无需机械移动即能实现焦距的调节,具有结构紧凑、控制灵活、制造成本低、无机械磨损、易于集成等诸多优点<sup>[2-6]</sup>,可望克服传统光学系统所面临的困难。

早在 1941 年,美国科学家 E. F. Flint 提出了柔性变焦透镜<sup>[7]</sup>,但此后并没有得到广泛关注。直至 20 世纪末才涌现出大量关于柔性变焦透镜的研究文献。美国“三大光学中心”之一的中佛罗里达大学光学与激光教育研究中心(CREOL)的 Shin-Tson Wu 团队研究了不同驱动机制的自适应光学变焦透镜,促进了该领域多项关键技术的突破<sup>[8-10]</sup>。瑞士洛桑联邦理工学院 Muhamed Niklaus 等人研究了快速响应的透明电活性聚合物驱动的弹性体透镜<sup>[11]</sup>。德国弗莱堡大学 Hans Zappe 团队在改善柔性变焦透镜成像质量方面进行了大量的研究<sup>[12-14]</sup>。美国加州大学圣地亚哥分校的 De-Ying Zhang 等在流体自适应透镜的变焦范围、性能等方面取得一定进展<sup>[15-16]</sup>。瑞士 Optotune 公司的 M. Blum 团队在电磁驱动和手动驱动柔性变焦透镜方面的研究取得了良好进展<sup>[17]</sup>。新加坡国立大学周光亚和余洪斌的团队从 2008 年开始对变焦透镜开展了大量研究<sup>[18-22]</sup>,并取得一定进展。目前柔性变焦液体透镜存在液体泄漏,温度、重力影响等问题<sup>[5,23]</sup>,基于智能材料的柔性变焦透镜面临着驱动电压较高的挑战<sup>[6]</sup>,严重限制其发展和应用。

柔性变焦透镜依据变焦驱动机制可分为力致变形驱动变焦透镜和电致变形驱动变焦透镜。本文将从力致变形变焦透镜和电致变形变焦透镜两个方面概括和分析柔性变焦透镜的发展现状。从变焦实现方式和主要性能参数进行分析,总结和

探讨柔性变焦透镜需要解决的主要难题和发展方向。

## 2 力致变形驱动的柔性变焦透镜

力致变形驱动变焦即是驱动源通过中间传动环节(如丝杆、流体等)将驱动力作用于液体透镜使透镜薄膜变形从而实现变焦,可划分为基于机械-力式驱动的变焦透镜、基于流体压力驱动的变焦透镜以及基于电磁力作用的变焦透镜等。

### 2.1 机械-力驱动的柔性变焦透镜

机械-力驱动主要是通过伺服电机等方式来驱动。2006 年,美国中佛罗里达大学 Shin-Tson Wu 团队的 Hongwen Ren 等人提出了采用伺服电机驱动的柔性变焦透镜,如图 1 所示,伺服电机旋转拉动绳子压缩橡皮薄膜 2,导致透镜薄膜 4 变形,实现焦距可调<sup>[24]</sup>。该透镜结构紧凑,成本低,但是结构受重力影响严重,不易微型化。2010 年该团队的 Su Xu 等人设计了如图 2 所示的力润湿透镜(Mechanical-wetting lens)结构,通过旋转螺纹帽,红色环形凸出结构驱动蓝色薄膜,从而实现手动驱动变焦,可以实现可见光和近红外成像<sup>[10]</sup>。

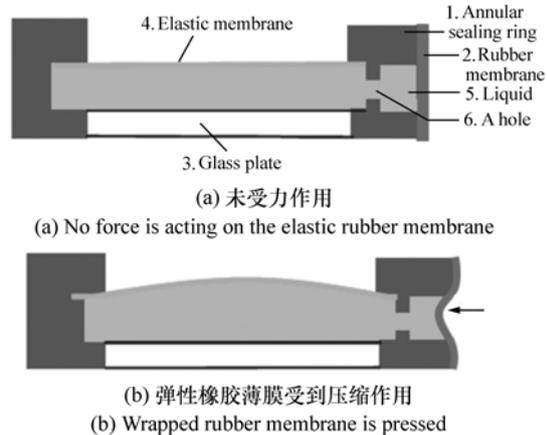


图 1 变焦透镜结构示意图

Fig. 1 Side view of the liquid lens cell

2011 年,瑞士 Optotune 公司的 M. Blum 等人提出了用旋转丝杆驱动的液体自适应透镜<sup>[17]</sup>。2013 年,德国弗莱堡大学的 Peter Liebraut 等人提出通过多个伺服驱动使透镜产生非对称变形,

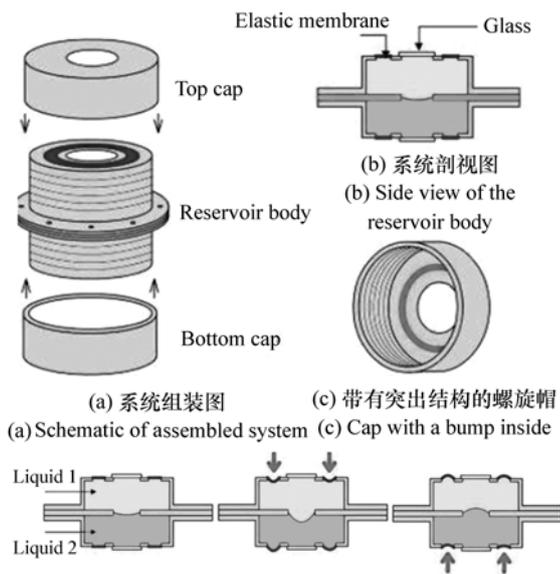


图 2 力润湿透镜及其工作原理

Fig. 2 Principle diagram of mechanical-wetting lens

从而实现变焦和像差的控制<sup>[25]</sup>,其结构如图 3 所示。该研究仿造人眼睫状肌通过悬韧带向晶状体提供径向应力的机制,结构较为复杂,对控制精度要求较高。

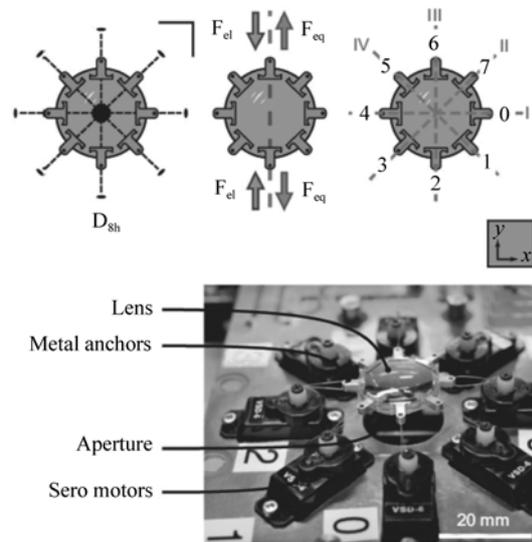


图 3 伺服驱动的弹性体变焦透镜

Fig. 3 Elastomeric lenses driven by servo motor

美国 Holochip 公司<sup>[26]</sup>和瑞士 Optotune 公司<sup>[27]</sup>分别在 2010 年提出了通过旋转透镜外圈压缩薄膜实现变焦的手动调焦透镜,表 1 是 Holochip 公司和 Optotune 公司手动可调变焦透镜的产

表 1 手动可调变焦透镜对比

Table 1 Comparison of commercially manually actuated tunable lenses

Company	Holochip (America)	Optotune (Switzerland)
Product	 APL-1050	 ML-20-35
Actuation principle	Mechanical Manually tunable	Mechanical Manually tunable
Aperture/mm	14.2	20
Tunable range/mm	+20— > +1 000	-40— +40

品对比。Holochip 公司 APL 系列变焦透镜具有数值孔径可调、焦距变化范围大、温度适应范围宽、低噪音以及光学性能良好等优点。Optotune 公司 ML 系列具有无色差、功耗低、操作容易等特点。

## 2.2 流体压力驱动的柔性变焦透镜

### 2.2.1 液压驱动柔性变焦透镜

美国加州大学圣地亚哥分校 De-Ying Zhang 等人<sup>[28]</sup>在 2003 年研究了液压驱动的柔性变焦透

镜的变焦范围,在校正像差方面并没有开展研究。2004 年,美国加州大学伯克利分校的 Ki-Hun Jeong 等人提出利用液压驱动的双胶合透镜阵列,双合透镜使光学畸变得得到抑制,并使焦距可调范围增大<sup>[29]</sup>。台湾中央大学 Yiin-Kuen Fu 等人对液压驱动的双凸柔性变焦微透镜的像差进行了研究,通过选择最优的膜厚比,球差得到改善<sup>[30]</sup>。2009 年,台湾中正大学 Guo-Hua Feng 等人针对变

焦透镜的像差缺陷提出了流控双凸变焦透镜系统<sup>[31]</sup>如图 4 所示,使像差得到了改善。2011 年,德国弗莱堡大学 Philipp Waibel 等人<sup>[32]</sup>提出了基于硅材料多腔的消色差变焦微透镜,结构如图 5 所示,比单腔透镜色差减小 30% 以上;并指出应用不同的液体和额外的腔体,可以校正高阶像差,获得更好的图像质量。

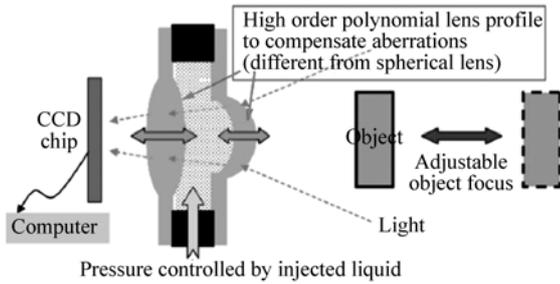


图 4 流控变焦透镜示意图

Fig. 4 Schematic of meniscus/Biconvex lens optical system

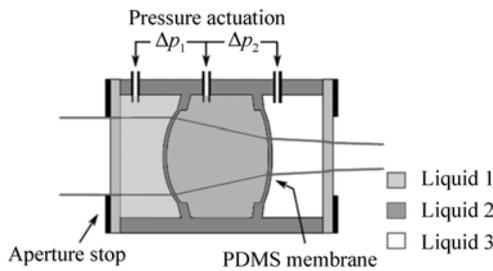


图 5 多腔变焦透镜结构示意图

Fig. 5 Schematic drawing of a three-chamber lens

2011 年,美国伊利诺大学香槟分校的 Inhwa Jung 等人对可调焦球面仿生电子眼进行了研究<sup>[33]</sup>,提出了如图 6 所示结构。在该仿生电子眼

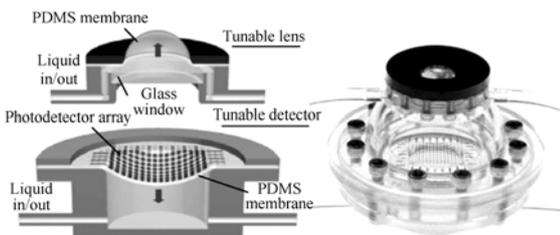


图 6 液压驱动仿生电子眼示意图及实物图

Fig. 6 Diagram of hydraulic drive bionic electronic eye

系统中,以透明薄弹性膜 (PDMS) 作为变形薄膜,

仿生视网膜的曲率和仿生晶状体的成像焦距由液压系统进行主动控制。可调仿生视网膜可以改善变焦透镜的成像质量。

### 2.2.2 气压驱动的柔性变焦透镜

气压驱动变焦透镜有普通气压和热气压驱动的变焦透镜。2009 年,新加坡国立大学的余洪斌团队提出了一种普通气压驱动的透镜结构<sup>[20]</sup>,如图 7 所示。通过适当调节两端气室的气压,可以任意改变透镜的凹凸形状,从而实现焦距可调。该结构复杂,同时重力效应、液体泄漏对透镜的稳定性均有不利的影响。

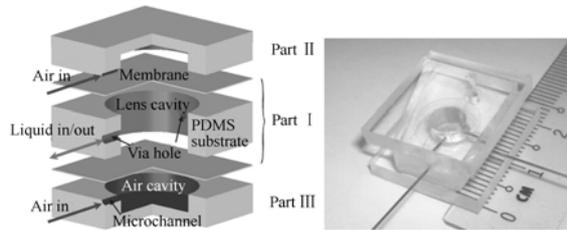


图 7 普通气压驱动透镜结构示意图及实物图

Fig. 7 Schematic drawing of pneumatic lens

2011 年,德国弗莱堡大学 Wei Zhang 等人<sup>[34]</sup>采用热压压力驱动进行变焦,提出如图 8 所示结构,该变焦透镜总功耗低于 250 mW。2012 年,韩国国立庆北大学 June Kyoo Lee 等人<sup>[35]</sup>提出如图 9 所示热压驱动变焦透镜,温度对介质折射率影响较小是该结构的优点。热压驱动的变焦透镜响应时间慢,且温度对介质折射率有影响,从而影响系统的稳定性。

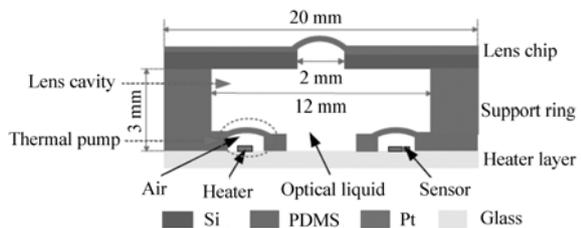


图 8 Wei Zhang 等提出的热气压变焦透镜示意图

Fig. 8 Schematic diagram of lens based on thermo-pneumatic actuator proposed by Wei Zhang

2015 年,新加坡南洋理工大学的 Q. H. Song 等人<sup>[36]</sup>提出了基于可重构的超材料可调太赫兹 (THz) 透镜阵列,输入气压使 PDMS 膨胀导致液

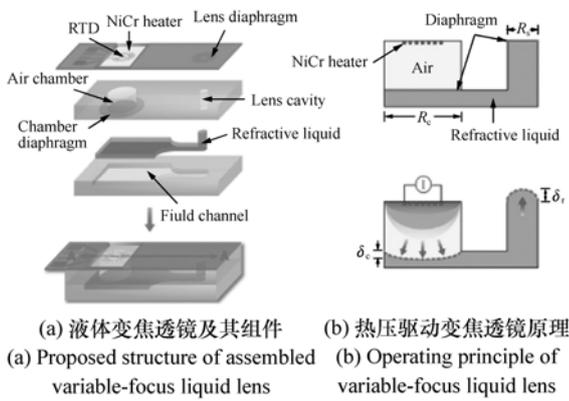


图 9 June Kyoo Lee 等人提出的热气压驱动变焦透镜  
Fig.9 Lens with thermopneumatic actuator proposed by June Kyoo Lee

滴高度增加,从而控制超材料透镜焦距的变化。结构及驱动原理如图 10 所示。

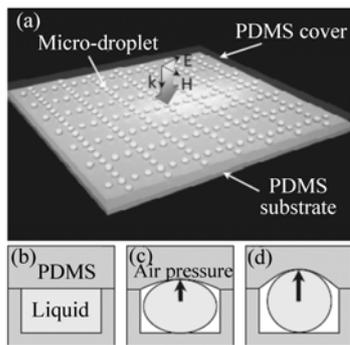


图 10 气压驱动超材料变焦透镜阵列  
Fig.10 Tunable metamaterial lens array

目前,普通气压驱动变焦透镜的研究较少,主要是由于气体泄漏、需额外提供气压泵等因素限制其发展。而热压压力驱动功耗低,不需额外的设备,但响应缓慢,液体介质折射率受温度影响较大。

### 2.3 电磁驱动变焦透镜

2010 年,德国弗莱堡大学的 Daniel Mader 等人<sup>[37]</sup>研究了电磁驱动的变焦透镜,能够校正低阶像差,如色差、球差。韩国先进科学技术研究所的 Seok Woo Lee 等人<sup>[38]</sup>研究了电磁驱动柔性变焦透镜的通电发热问题。2011 年,该所的 Hyunhwan Choi 等人<sup>[39]</sup>提出了电磁驱动的变焦透镜,两折射面弹性薄膜厚度不同,该透镜可以降低球差,结构如图 11 所示。该结构稍显复杂,存在重

力、温度、液体泄漏等问题,但在球差校正方面提出了一种有效的解决方案。2011 年新加坡国立大学余洪斌等人提出了电磁驱动的可变焦透镜<sup>[22]</sup>,如图 12 所示。控制薄膜变形实现焦距的正负可调。

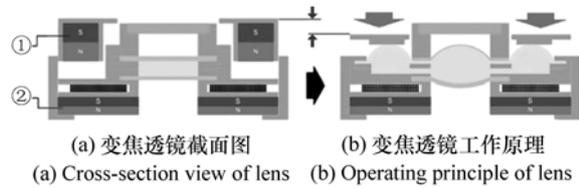


图 11 折射面膜厚不等的变焦透镜原理示意图  
Fig.11 Principle diagram of double-sided fluidic lens

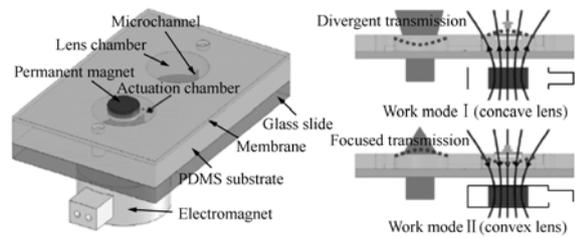


图 12 电磁驱动变焦透镜结构及其变焦原理  
Fig.12 Structure and principle diagram of electromagnetically actuated tunable lenses

浙江大学的 Dan Liang 等人<sup>[40]</sup>研究了基于聚合物透镜的仿人眼系统,如图 13 所示,由仿生角膜透镜,音圈马达,压缩环,仿生晶状体,基体,CCD 传感器组成。控制音圈电流,驱动压缩环改变晶状体曲率,从而实现变焦。

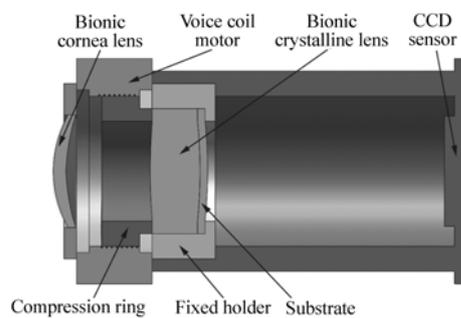


图 13 电磁驱动的仿生光学系统示意图  
Fig.13 Schematic of electromagnetically actuated bio-mimetic optical system

瑞士 Optotune 公司通过集成补偿透镜(Offset

Lens)的方法扩展电磁驱动变焦透镜的焦距变化范围(可获得负焦距),并采用温度传感器进行反馈调节克服了温度对介质折射率的影响<sup>[41]</sup>,已经取得了良好的商业应用<sup>[42]</sup>。

表2列出了力致变形驱动变焦透镜的主要参数。机械-力驱动的柔性变焦透镜变焦范围大,但结构不够紧凑,稳定性较差,适合于对结构和控制

精度要求不高的场合。流体压力驱动的变焦透镜结构紧凑,但存在液体泄漏等问题。电磁驱动变焦透镜响应非常快,变焦范围大,功耗低,易于控制,适合于控制精度要求高的场合。目前,温度对系统稳定性的影响可以通过温度传感器反馈得以改善,但是液体挥发、重力效应对液体透镜的光学性能和稳定性影响有待进一步的研究。

表2 力致变形驱动的柔性变焦透镜主要性能参数对比

Table 2 Main performance parameters comparison of mechanical variable-focus lenses

Ref. (type)	Tuning concept	Aperture/mm	Tunable range/mm	U/I	Response time/ms
10	Mechanical	—	$+\infty \sim +15$ or $-33 \sim -\infty$	—	—
25	Mechanical	20	$+32.6 \sim +34.9$	—	—
23	Hydraulic pressure	26	$+500 \sim +\infty$	—	—
30	Hydraulic pressure	1	$+35 \sim +250$	—	—
31	Hydraulic pressure	8	$+191 \sim +808$	—	—
32	Hydraulic pressure	—	$-40 \sim -5$ and $+5 \sim 40$	—	—
43	Hydraulic pressure	—	$+71.50 \sim +21.20$	—	—
44	Hydraulic pressure	—	$+17 \sim +1$	—	—
19	Pneumatic	—	$+10 \sim +58$	—	—
35	Thermo-pneumatic	2	$+\infty \sim 4$	12 mA	30
34	Thermo-pneumatic	2	$+15 \sim +3$	5 V	32
22	Electromagnetic	5	$-\infty \sim -130$ or $45 \sim +\infty$	—	$\sim 1.3$
39	Electromagnetic	5	$+5.35 \sim +22.73$	10 V	—
40	Electromagnetic	—	$+17.3 \sim +24.5$	35 mA	0.16
45	Electromagnetic	3	$+28.5 \sim +4.8$	3 A	—
42 (EL-10-30)	Electromagnetic	10	$+20 \sim +140$	5 V	$< 2.5$

### 3 电致变形驱动的柔性变焦透镜

随着智能材料的快速发展,电活性聚合物(Electroactive polymer, EAP)、压电材料等具有力电耦合特性的智能材料<sup>[46-47]</sup>由于其价格低廉,易于制作和实现等特点,在微光学驱动领域具有广阔的前景。近年来,人们利用智能材料的力电耦合特性进行驱动方面的研究<sup>[48-49]</sup>,已展现出良好的应用前景。

#### 3.1 基于压电驱动的柔性变焦系统

2004年,日本科学技术振兴机构的H. Oku等人<sup>[50]</sup>对压电驱动的变焦透镜进行了实验研究,通过压电泵的形式进行驱动。该透镜受重力影响严重,同时变焦范围小(驱动力小)。2009年,H. Oku为了解决压电驱动力小的问题提出了内置液

压放大器的压电堆栈式驱动的变焦透镜<sup>[51]</sup>。

德国弗莱堡大学的Jan Draheim研究团队从2009年开始研究了压电驱动的单腔自适应透镜<sup>[52]</sup>,双腔自适应透镜变焦透镜<sup>[53]</sup>,分别如图14、15所示。压电驱动变焦透镜变焦范围小,但具有结构紧凑、易于制造和驱动电压低等优点。

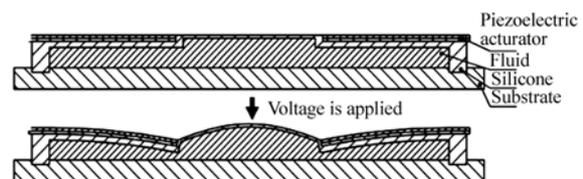


图14 压电驱动单腔变焦透镜

Fig. 14 Single lenses driven by piezoelectric actuator

#### 3.2 基于电活性聚合物的柔性变焦透镜

电活性聚合物(EAP)在外加电场作用下产生

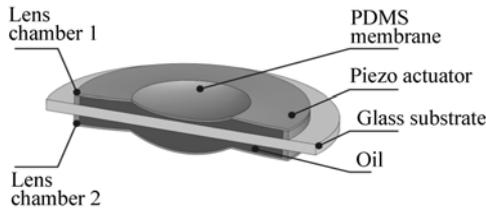


图 15 压电驱动双腔变焦透镜

Fig. 15 Double chamber varifocus lens driven by piezo-electric actuator

大变形,某些 EAP 材料的形变量可以达到 100%,且响应快,被广泛应用于可调光学、触觉系统、人工肌肉、压力传感和仿生机器人等领域<sup>[54-57]</sup>。常用的电活性聚合物可分为离子型和电子型电活性聚合物。

### 3.2.1 基于离子型电活性聚合物的变焦透镜

常用于微驱动离子型聚合物有 IPMC (Ionic Polymer Metal Composite, 离子聚合物复合材料)、水凝胶等。2009 年,日本的 Ipei SHIMIZU 等人<sup>[58]</sup>制备了一种 IPMC 驱动的微型变焦距透镜 (variable-focal length lens, VFLL),如图 16 所示。该设计充分利用 IPMC 驱动电压低的特性,变形薄膜选用 PDMS 薄膜,结构功耗低、可微型化。

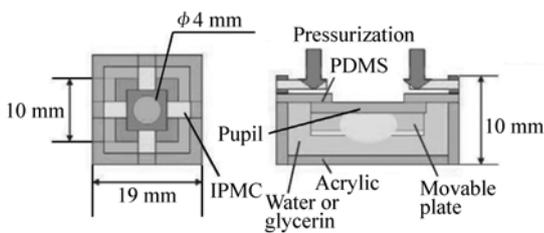


图 16 IPMC 驱动的变焦透镜原理

Fig. 16 Principle diagram of VFLL driven by IPMC

2012 年,西安交通大学王延杰等人<sup>[59]</sup>设计了花瓣状 IPMC 和环形 IPMC 驱动的变焦透镜,实验分析了不同尺寸 IPMC 的驱动性能,但没有在光学性能方面进行研究。

日本 Eamex 公司开发了基于硅胶的可变焦镜头,利用 IPMC 向中央开口部分挤压囊中的硅胶,使硅胶表面发生弯曲形成镜头,如图 17 所示。通过控制 IPMC 的运动来调节焦距。该变焦镜头零部件个数少、构造简单,尺寸较小,主要用于手

机的相机功能<sup>[60]</sup>。基于 IPMC 驱动的柔性变焦透镜的驱动电压低,结构简单,但是驱动力过小,严重缩小了透镜的变焦范围,因此限制了其发展和应用。

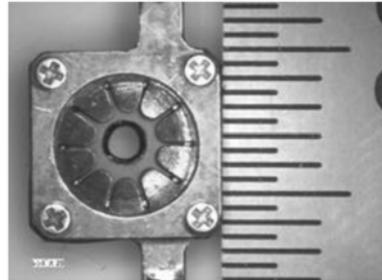


图 17 Eamex 公司 IPMC 驱动的变焦镜头

Fig. 17 Lenses driven by IPMC (Eamex)

2006 年,美国威斯康辛大学的 Liang Dong 等人通过热敏型水凝胶驱动液体与油形成的交界面实现变焦<sup>[61]</sup>,如图 18(a)图所示。温度变化导致液体微透镜焦距变化,从而实现变焦。该结构紧凑,利于与光电系统集成,但是水凝胶的响应较慢。2008 年,该团队 Xuefeng Zeng 等人<sup>[62]</sup>研究了红外光响应水凝胶驱动的变焦透镜,如图 18(b)所示。2010 年,他们又提出了热响应型水凝胶驱

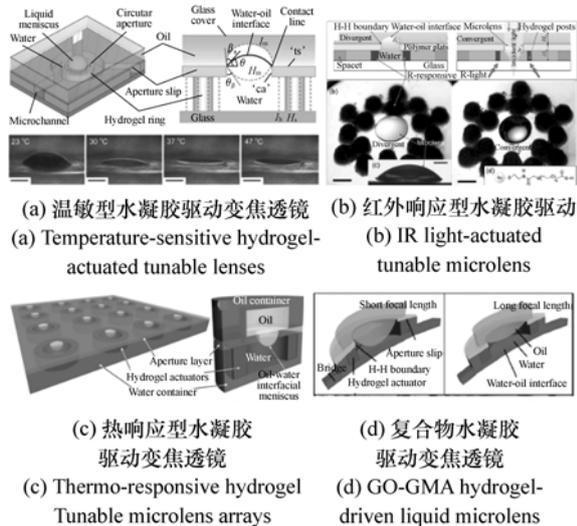


图 18 水凝胶驱动的变焦透镜

Fig. 18 Lenses driven by hydrogels

动的微透镜阵列<sup>[63]</sup>,如图 18(c)图所示,每个微透镜单元可以独立控制。2012 年,该团队的 Difeng Zhu 等人<sup>[64]</sup>研究了 GO-GMA 水凝胶驱动

的变焦液体微透镜阵列,响应速度较以前报道的更快,如图 18(d)所示,该研究采用温敏聚合物水凝胶参杂甲基丙烯酸缩水甘油酯(GMA)与功能化石墨烯氧化物(GO)用以提高响应时间,采用珀尔帖效应促进局部散热代替结构自发散热,同时变焦微透镜制作在半球壳上,获得更大的视场(Field of View, FOV)。但是液体泄漏、结构复杂、温度对折射率的影响、响应慢等是温敏水凝胶驱动变焦的缺陷。该团队在此基础上还进行了色差方面的研究。

### 3.2.2 基于电子型电活性聚合物的变焦透镜

常用于微驱动领域的电子型电活性聚合物有 DE (Dielectric Elastomer, 介电弹性体)、PDMS (Polydimethylsiloxane, 聚二甲基硅氧烷)等。2002 年,瑞士洛桑理工学院的 Muhamed Niklaus 等人<sup>[11]</sup>研究了基于 DE 驱动的变焦透镜,通过驱动单元与透镜变形薄膜分离以降低驱动电压,鲁棒性强,可实现微型化、阵列化,但是焦距变化范围小。

2011 年,意大利比萨大学的 Federico Carpi 等人<sup>[47]</sup>提出了介电弹性薄膜驱动的可调焦距透镜,用 DE 模拟人眼睫状肌的功能,结构如图 19 所示,该设计具有结构紧凑、重量轻、响应快、功耗低、成本低等优点。2013 年,西安交通大学的 Tongqing Lu 等人<sup>[65]</sup>建立了文献[47]的计算模型,分析了预拉伸、液体薄膜的尺寸等结构参数对透镜曲率半径的影响,为后续基于介电弹性薄膜的变焦透镜的设计提供了依据。

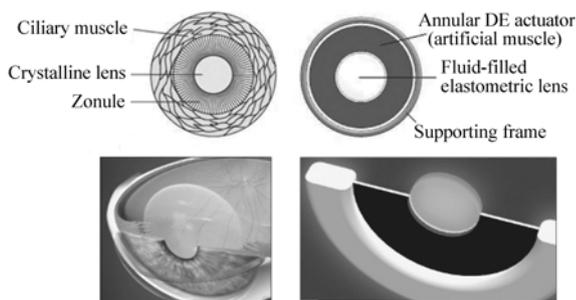


图 19 DEA 变焦透镜

Fig. 19 Lenses driven by DEA

2011 年,韩国三星先进技术研究院 Seung Tae Choi 等人<sup>[66]</sup>提出采用多个电活性聚合物驱动器以降低变焦透镜驱动电压,如图 20 所示。该研究

在降低驱动电压方面得到较大突破,但是该结构较为复杂,EAP 驱动器的一致性控制很难保证,稳定性较差。

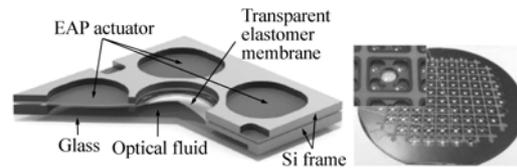


图 20 EAP 驱动的变焦透镜

Fig. 20 Lenses driven by EAP actuator

2013 年,美国哈佛大学 Samuel Shian 等人<sup>[67]</sup>研究了透明电活性聚合物弹性薄膜的透镜,焦距变化 3 倍需要提供驱动电压高达 4.5 kV。2013 年,韩国全北国立大学 Lichun Ren 等人<sup>[68]</sup>研究了基于 DE 气泡驱动器的变焦透镜,该透镜具有功耗低、稳定等特点。2014 年,美国俄亥俄州立大学 Kang Wei 等人<sup>[69]</sup>为了降低驱动电压,将透镜薄膜与驱动薄膜分离,将环形的 DE 作为驱动器,结构如图 21 所示。2014 年,新加坡的 Gih-Keong

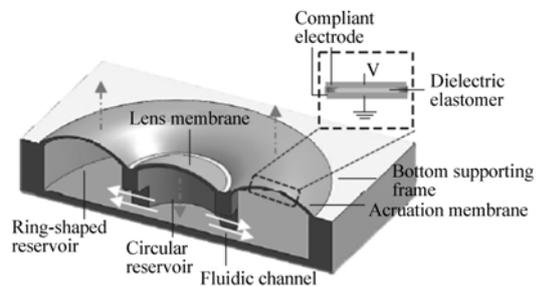


图 21 DE 驱动的变焦透镜

Fig. 21 Lenses driven by annular DE

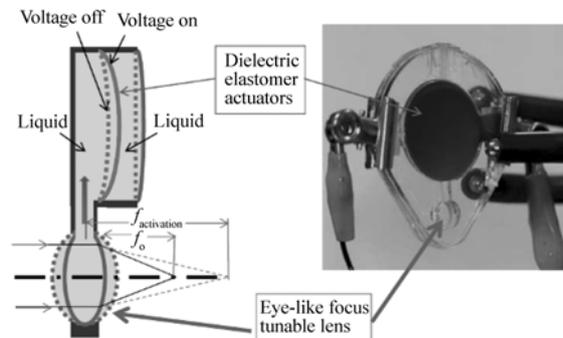


图 22 基于 DEA 泵的变焦透镜

Fig. 22 Liquid lens based on DEA

Lau 等人<sup>[70]</sup>分析了使用 DE 驱动调节液体薄膜透镜面临的问题,如驱动电压高、应力大、薄膜电击穿、液体介质泄漏、稳定性、焦距变化范围受限制等。同时提出了将 DEA 与透镜分离,采用隔膜泵调节透镜,如图 22 所示,从而可使 DEA 柔性变焦透镜驱动电压降低。

2014 年,台湾大学 Dao Liang 等人<sup>[71]</sup>提出基于离子电极的变焦透镜。驱动薄膜与变形薄膜未分离(同一 PDMS 薄膜),采用透明 NaCl 溶液作为液体介质,同时作为 PDMS 的一个电极。该研究采用离子电极,为结构简化提供一种新思路,但是变焦范围小,PDMS 的另一电极表面镀金影响薄膜透明度。

2015 年,瑞士洛桑联邦理工学院微系统空间

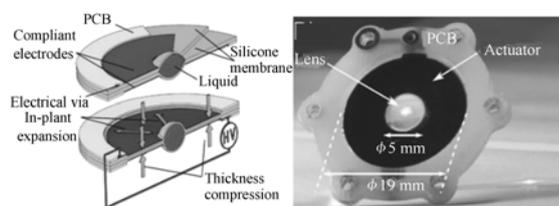


图 23 DE 驱动变焦透镜

Fig. 23 Liquid lens driven by DE

技术实验室 Luc Maffli 等人<sup>[72]</sup>设计如图 23 所示的驱动与变形薄膜分离的快速变焦透镜,变形薄膜采用低能耗有机硅弹性体,该变焦透镜在 175  $\mu\text{s}$  可以使焦距变化 20%。

表 3 列出了电致变形驱动的柔性变焦透镜的一些主要参数对比。电致变形驱动的柔性变焦透镜主要利用材料的电致动特性,将电能转化为机械能,使液体透镜的形状发生改变,从而实现焦距的可调。具有结构紧凑、变焦范围大、响应速度快及易于集成等特点,但是温度、重力等外部条件对其性能的影响较大。DE 驱动的变焦透镜的驱动电压高是限制其应用的主要因素,许多学者通过将驱动薄膜与透镜薄膜分离来降低驱动电压。IPMC 驱动变焦的特点是驱动电压低,但是输出力较小,响应较 DE 慢。随着智能材料的广泛研究,利用智能材料的力电耦合特性仍是微光学系统驱动力的合适之选。改善变焦透镜的成像质量,设计合理的结构降低变焦系统所需的驱动电压仍是当前研究的热点。如果基于智能材料的柔性变焦透镜得以实用,必将对光学成像领域产生巨大影响,同时也将促进相关联行业的进步。

表 3 电致变形驱动柔性变焦透镜的主要参数对比

Tab. 3 Main parameters comparison of electrostrictive variable-focus lenses

Ref.	Tuning concept	Aperture/mm	Tunable range/mm	U/I	Response time/ms
11	DEA	2	+4 ~ +8	1.7 kV	—
44	DEA	7.6	+22.73 ~ +16.72	4 kV	60
58	IPMC	4	—	4 V	8 000
62	Hydrogels	—	-17.4 ~ +8.0 $\pm$ 0.4	—	—
63	Hydrogels	2.4	+8 ~ +60	—	—
66	EAP	2.4	+ $\infty$ ~ +10 000	0.04 kV	20
69	DEA	5	+25.4 ~ +105.2	1.0 kV	—
70	DEA	8	15 000 ~ 50 000	1.8 kV	—
71	PDMS	4	+16.1 ~ +13.1	0.9 kV	—
72	DEA	5	20%	3.5 kV	0.175
73	Piezoelectric	5	+52.4 ~ -70.9	$\pm$ 40 V	24

## 4 存在的问题及发展趋势

### 4.1 存在的问题

随着新型驱动和智能材料的快速发展,人们

对柔性变焦透镜的研究和开发工作得到蓬勃发展和进步。柔性变焦透镜涉及机械、光学、材料等领域,距离广泛应用还有一定的差距,许多问题尚待进一步深入研究,目前存在的问题主要表现在以下方面:

(1)液体透镜蒸发泄漏现象严重,重力及温度的变化影响系统稳定性;

(2)目前对像差的校正的研究较少,总的成像效果不是很理想;

(3)介电弹性薄膜所需驱动电压较高,很难实现微型化、低功耗设计。IPMC、压电驱动所需电压不高,但是变焦范围小。同时变形薄膜的松弛现象,影响光学性能的稳定;

(4)焦变迟滞现象的研究很少,这对精确控制焦距变化至关重要;

(5)实现智能化变焦以及焦距的精确、快速控制仍是一难题。

#### 4.2 发展趋势

随着智能化、自动化时代的到来,智能化光学设备、先进医疗设备(如内窥镜)、自适应光学系统等对新型光学变焦器件的要求不断升级,柔性变焦透镜的低功耗、微型化、模块化、智能化发展将促使这些领域的快速变革。

(1)柔性变焦透镜的性能优化。降低重力、温度、泄漏等对柔性变焦透镜工作性能的影响,校正柔性变焦透镜的像差,提高系统的响应速度。

(2)进行系统的动力学研究。探明材料弹性模量、膜厚、变形等因素对系统整体性能的影响,为实际应用奠定理论基础。

(3)基于智能材料的柔性变焦透镜的研究。寻求和探索新型驱动方式一直是柔性光学乃至整

个驱动领域研究的热点之一。

## 5 结束语

本文从力致变形驱动和电致变形驱动的柔性变焦透镜两方面进行分析和总结。总的来说,液体变焦透镜均存在蒸发泄漏,重力、温度的影响等问题。力致变形柔性变焦透镜主要有机械-力驱动变焦透镜、流体压力驱动变焦透镜和电磁力驱动变焦透镜。机械-力、压力驱动的柔性变焦透镜变焦范围大,但整体系统复杂、系统稳定性较差、响应时间慢等严重制约其发展和应用,电磁力驱动的柔性变焦透镜具有响应速度快、变焦范围大及功耗低等优点已得到良好应用。电致变形(智能材料)驱动的柔性变焦透镜以介电弹性体(DE)驱动的变焦透镜的研究为主要方向,响应速度快、结构紧凑、功耗低,但驱动电压高这一难题使其距离实际应用还有一段距离。通过设计合理的透镜结构改善柔性变焦透镜成像质量,扩大变焦范围等是目前的主要研究热点。提高变焦透镜的稳定性以及低功耗智能化设计,基于智能材料驱动的柔性变焦透镜的研究等是未来的主要发展趋势。由于柔性变焦透镜具有控制灵活、制造成本低、无机械磨损、易于集成等诸多优点,有可能全面覆盖传统光学镜头的应用领域,将是以后光学发展的重要热点方向之一。

#### 参考文献:

- [1] SHI J, STRATTON Z, LIN S C S, *et al.*. Tunable optofluidic microlens through active pressure control of an air liquid interface[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 9(2-3): 313-318.
- [2] SCHUHLADEN S, PETSCH S, LIEBETRAUT P, *et al.*. Miniaturized tunable imaging system inspired by the human eye [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 3991-3994.
- [3] BEADIE G, SANDROCK M L, WIGGINS M J, *et al.*. Tunable polymer lens[J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 11847-11857.
- [4] REN H, WU S T. Variable-focus liquid lens[J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5931-5936.
- [5] NGUYEN N T. Micro-optofluidic lenses: a review[J]. *Biomicrofluidics*, 2010, 4(3): 031501.
- [6] SHIAN S, DIEBOLD R M, CLARKE D R. High-speed, compact, adaptive lenses using in-line transparent dielectric elastomer actuator membranes[J]. *SPIE*, 2013, 8687: 86872D-7.
- [7] FLINT E F. Variable focus lens; U. S. Patent 2,300,251[P]. 1942-10-27.
- [8] REN H, WU S T. Variable-focus liquid lens by changing aperture[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(21): 211107.
- [9] XU S, REN H, LIN Y J, *et al.*. Adaptive liquid lens actuated by photo-polymer[J]. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17590-17595.
- [10] XU S, LIU Y, REN H, *et al.*. A novel adaptive mechanical-wetting lens for visible and near infrared imaging[J]. *Optics*

- Express*, 2010, 18(12): 12430-12435.
- [11] NIKLAUS M, ROSSET S, SHEA H. Array of lenses with individually tunable focal-length based on transparent ion-implanted EAPs[J]. *SPIE*, 2010, 7642: 76422K-76422K-12.
- [12] WERBER A, ZAPPE H. Tunable microfluidic microlenses[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(16): 3238-3245.
- [13] REICHELT S, ZAPPE H. Design of spherically corrected, achromatic variable-focus liquid lenses[J]. *Optics Express*, 2007, 15(21): 14146-14154.
- [14] WAIBEL P, MADER D, LIEBETRAUT P, et al. Chromatic aberration control for tunable all-silicone membrane microlenses[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18584-18592.
- [15] ZHANG D Y, JUSTIS N, LO Y H. Fluidic adaptive zoom lens with high zoom ratio and widely tunable field of view[J]. *Optics Communications*, 2005, 249(1): 175-182.
- [16] JUSTIS N B, ZHANG D Y, LO Y. Fluidic adaptive lens systems with pumping systems: U. S. Patent 7,826,145 [P]. 2010-11-2.
- [17] BLUM M, B ELER M, GR TZEL C, et al. Compact optical design solutions using focus tunable lenses[J]. *SPIE*, 2011, 8167: 81670W-9.
- [18] HONGBIN Y, GUANGYA Z, SIONG C F, et al. Simple method for fabricating solid microlenses with different focal lengths[J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2008, 20(19): 1624-1626.
- [19] YU H B, ZHOU G Y, CHAU F S, et al. A liquid-filled tunable double-focus microlens [J]. *Optics Express*, 2009, 17(6): 4782-4790.
- [20] HONGBIN Y, GUANGYA Z, SIONG C F, et al. Lens with transformable-type and tunable-focal-length characteristics [J]. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE*, 2009, 15(5): 1317-1322.
- [21] YU H, ZHOU G, LEUNG H M, et al. Tunable liquid-filled lens integrated with aspherical surface for spherical aberration compensation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 9945-9954.
- [22] YU H, ZHOU G, CHAU F S, et al. Tunable electromagnetically actuated liquid-filled lens [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167(2): 602-607.
- [23] WANG L, OKU H, ISHIKAWA M. An improved low-optical-power variable focus lens with a large aperture[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19448-19456.
- [24] REN H, FOX D, ANDERSON P A, et al. Tunable-focus liquid lens controlled using a servo motor[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8031-8036.
- [25] LIEBETRAUT P, PETSCH S, LIEBESKIND J, et al. Elastomeric lenses with tunable astigmatism[J]. *Light: Science & Applications*, 2013, 2(9): e98.
- [26] HOLOCHIP. [EB/OL]. [2013-06-15]. <http://www.holochip.com/products/apl.html>.
- [27] OPTOTUNE[EB/OL]. [2013-02-21]. <http://www.optotune.com/technology/focus-tunable-lenses>.
- [28] ZHANG D Y, LIEN V, BERDICHEVSKY Y, et al. Fluidic adaptive lens with high focal length tunability[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3171-3172.
- [29] JEONG K H, LIU G, CHRONIS N, et al. Tunable microdoublet lens array [J]. *Optics Express*, 2004, 12(11): 2494-2500.
- [30] 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.
- [31] FENG G H, CHOU Y C. Flexible meniscus/biconvex lens system with fluidic-controlled tunable-focus applications[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(18): 3284-3290.
- [32] WAIBEL P, MADER D, LIEBETRAUT P, et al. Tunable all-silicone multi-chamber achromatic microlens [C]. IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Cancun, MEXICO, 2011: 728-731.
- [33] JUNG I, XIAO J, MALYARCHUK V, et al. Dynamically tunable hemispherical electronic eye camera system with adjustable zoom capability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(5): 1788-1793.
- [34] ZHANG W, ALJASEM K, ZAPPE H, et al. Completely integrated, thermo-pneumatically tunable microlens [J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 2347-2362.
- [35] LEE J K, PARK K W, LIM G B, et al. Variable-focus liquid lens based on a laterally-integrated thermopneumatic actua-

- tor[J]. *J. Optical Society of Korea*, 2012, 16(1): 22-28.
- [36] SONG Q H, ZHU W M, ZHANG W, *et al.* Tunable metamaterial lens array via metadroplets[C]. IEEE 28th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Estoril, Portugal, 2015: 960-963.
- [37] MADER D, MARHOFER M, WAIBEL P, *et al.* Tunable micro-fluidic multi-component micro-lens system with integrated actuator[C]. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE 23rd International Conference on, Wanchai, Hong Kong, China; IEEE, Jan 24-28, 2010: 799-802.
- [38] LEE S W, LEE S S. Focal tunable liquid lens integrated with an electromagnetic actuator[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(12): 121129.
- [39] CHOI H, HAN D S, WON Y H. Adaptive double-sided fluidic lens of polydimethylsiloxane membranes of matching thickness[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4701-4703.
- [40] LIANG D, XIANG K, DU J W, *et al.* Biomimetic optical system using polymer lenses with tunable focus[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(10): 105101-105101.
- [41] CASUTT S, BUEELER M, BLUM M, *et al.* Fast and precise continuous focusing with focus tunable lenses[J]. *SPIE*, 2014, 8982: 89820Y-7.
- [42] ODTOTUNE[EB/OL]. [2013-02-21]. <http://www.optotune.com/products/focus-tunable-lenses>.
- [43] KANG J, ZHOU G, YU H, *et al.* A tunable liquid lens with extended depth of focus[C]. Optical MEMS and Nanophotonics (OPT MEMS), 2010 International Conference on, Sapporo, Japan; IEEE, 2010: 89-90.
- [44] HIMURA Y, ONOE H, TESHIMA T, *et al.* Liquid-filled tunable lenticular lens[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(3): 035030.
- [45] LEE Y C, YANG H, LIU W L. Variable focus liquid lens module using direct current electromagnetic driving[C]. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2013 Symposium on, Barcelona, SPAIN; IEEE, APR 16-18, 2013: 1-5.
- [46] CARPI F, BAUER S, DE ROSSI D. Stretching dielectric elastomer performance[J]. *Science*, 2010, 330(24): 1759-1761.
- [47] CARPI F, FREDIANI G, TURCO S, *et al.* Bioinspired tunable lens with muscle-like electroactive elastomers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(21): 4152-4158.
- [48] HEYDT R, KORNBLUH R, ECKERLE J, *et al.* Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers[J]. *SPIE*, 2006, 6168: 61681M-8.
- [49] ROSSET S, SHEA H R. Towards fast, reliable, and manufacturable DEAs: miniaturized motor and Rupert the rolling robot[J]. *SPIE*, 2015, 9430: 943009-11.
- [50] OKU H, HASHIMOTO K, ISHIKAWA M. Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth[J]. *Optics Express*, 2004, 12(10): 2138-2149.
- [51] OKU H, ISHIKAWA M. High-speed liquid lens with 2 ms response and 80.3 nm root-mean-square wavefront error[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(22): 221108.
- [52] DRAHEIM J, SCHNEIDER F, BURGER T, *et al.* Single chamber adaptive membrane lens with integrated actuation[C]. 2010 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics, Sapporo, Japan; Aug 9-12, 2010: 15-16.
- [53] DRAHEIM J, BURGER T, SCHNEIDER F, *et al.* Fluidic zoom lens system using two single chamber adaptive lenses with integrated actuation[C]. Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE 24th International Conference on, Cancun, MEXICO; IEEE, JAN 23-27, 2011: 692-695.
- [54] MAHAPATRA S S, YADAV S K, YOO H J, *et al.* Highly stretchable, transparent and scalable elastomers with tunable dielectric permittivity[J]. *J. Materials Chemistry*, 2011, 21(21): 7686-7691.
- [55] MOLBERG M, LETERRIER Y, PLUMMER C J G, *et al.* Frequency dependent dielectric and mechanical behavior of elastomers for actuator applications[J]. *J. Applied Physics*, 2009, 106(5): 054112.
- [56] LEE S, JUNG K, KOO J, *et al.* Braille display device using soft actuator[J]. *SPIE*, 2004, 5385: 368-379.
- [57] XU D, TAIRYCH A, ANDERSON I A. Localised strain sensing of dielectric elastomers in a stretchable soft-touch musical keyboard[J]. *SPIE*, 2015, 9430: 943025-8.
- [58] SHIMIZU I, KIKUCHI K, TSUCHITANI S. Variable-focal length lens using IPMC[C]. ICCAS-SICE 2009, Fukuoka, Ja-

- pan; IEEE, 2009: 4752-4756.
- [59] WANG Y, CHEN H, LUO B, *et al.*. Design and optimization of small-sized actuators for driving optical lens with different shapes based on IPMCs[J]. *SPIE*, 2012, 8430: 83401I-7.
- [60] EAMEX[EB/OL]. [2013-08-18], <http://www.eamex.co.jp/features/koubunshi/ion/gel.html>.
- [61] DONG L, AGARWAL A K, BEEBE D J, *et al.*. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels[J]. *Nature*, 2006, 442(7102): 551-554.
- [62] ZENG X, JIANG H. Tunable liquid microlens actuated by infrared light-responsive hydrogel[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(15): 151101.
- [63] ZENG X, LI C, ZHU D, *et al.*. Tunable microlens arrays actuated by various thermo-responsive hydrogel structures[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(11): 115035.
- [64] ZHU D, LO C W, LI C, *et al.*. Hydrogel-based tunable-focus liquid microlens array with fast response time[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(5): 1146-1155.
- [65] LU T, CAI S, WANG H, *et al.*. Computational model of deformable lenses actuated by dielectric elastomers[J]. *J. Applied Physics*, 2013, 114(10): 104104.
- [66] CHOI S T, LEE J Y, KWON J O, *et al.*. Varifocal liquid-filled microlens operated by an electroactive polymer actuator[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(10): 1920-1922.
- [67] SHIAN S, DIEBOLD R M, CLARKE D R. High-speed, compact, adaptive lenses using in-line transparent dielectric elastomer actuator membranes[J]. *SPIE*, 2013, 8687: 86872D-7.
- [68] REN L, LEE R H, PARK H R, *et al.*. A liquid lens driven by bubble actuator[J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(5): 1222-1228.
- [69] WEI K, DOMICONE N W, ZHAO Y. Electroactive liquid lens driven by an annular membrane[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(5): 1318-1321.
- [70] LAU G K, LA T G, SHIAU L L, *et al.*. Challenges of using dielectric elastomer actuators to tune liquid lens[J]. *SPIE*, 2014, 9056: 90561J-1.
- [71] LIANG D, LIN Z F, HUANG C C, *et al.*. Tunable lens driven by dielectric elastomer actuator with ionic electrodes[J]. *Micro & Nano Letters*, 2014, 9(12): 869-873.
- [72] MAFFLI L, ROSSET S, GHILARDI M, *et al.*. Ultrafast all-polymer electrically tunable silicone lenses[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(21): 1656-1665.
- [73] DRAHEIM J, SCHNEIDER F, KAMBERGER R, *et al.*. Fabrication of a fluidic membrane lens system[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(9): 095013.

#### 作者简介:



贾书海(1969—),男,陕西咸阳人,博士,教授,博士生导师,2000年于西安交通大学获博士学位,主要从事智能光电传感技术、智能化光机电一体化技术等方面的研究。E-mail: shjia@mail.xjtu.edu.cn



董君(1991—),男,安徽安庆人,硕士研究生,2014年于四川大学获学士学位,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: 1531430253@qq.com



唐振华(1989—),男,重庆人,硕士研究生,2014年于重庆大学获学士学位,主要从事智能化光机电一体化技术研究。E-mail: zhtangy@163.com



陈花玲(1954—),女,陕西韩城人,博士,教授,博士生导师,1990年于西安交通大学获得博士学位,主要从事智能材料与结构、机械振动与噪声控制理论与技术等方面的研究。E-mail: hlchen@mail.xjtu.edu.cn