

## 液体透镜在变焦系统中的应用

张 鹰<sup>1</sup>, 张 新<sup>1\*</sup>, 史广维<sup>1</sup>, 王 超<sup>1,2</sup>, 王 钰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**利用液体透镜进行变焦系统设计可以大幅降低系统的复杂程度, 本文介绍和讨论了该项技术的研究和应用现状。首先, 基于液体透镜的分类即渐变折射率透镜和变曲率透镜介绍了几种主要液体透镜的原理和特点, 给出了具有代表性的 ARCTIC 透镜系列和 Optotune 透镜系列的设计参数和优点。然后, 对液体透镜技术在变焦系统中的应用进行了分析, 描述了其在变焦眼镜、手机相机、内窥镜和显微镜等诸多领域中应用现状和优势。最后, 利用液体透镜设计了一种长焦距变焦系统, 该系统可实现 2.5 倍的可见光变焦。

**关键词:**光学设计; 液体透镜; 变焦系统; 焦距可调透镜

中图分类号: O439; TH703 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20130601.0046

## Applications of liquid lenses in zoom systems

ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1\*</sup>, SHI Guang-wei<sup>1</sup>, WANG Chao<sup>1,2</sup>, WANG Yu<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

\* *Corresponding author, E-mail: optlab@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** Zoom lens design with liquid lenses is a novel method to greatly reduce the complication of the whole system. This paper reviews the research situation and applications of the technology. Firstly, the principles and characteristics of the some types of liquid lenses are introduced according to the lens classifications on gradient refractive index lenses and variable curvature lenses. The specifications and advantages of several typical lens series such as ARCTIC lens series and Optotune lens series are given. Then, applications of liquid lens in zoom systems are analyzed, and their advantages in focus-tunable glasses, cell phone camera lenses, endoscopes and several types of microscopies are described. Finally, based on a liquid lens, a long focus zoom system with a high zoom ratio of 2.5 is designed for visible light.

**Key words:** optical design; liquid lens; zoom system; focus tunable lens

## 1 引 言

变焦系统是指焦距在一定范围内变化,而像面位置保持不变或基本不变的系统。与定焦镜头相比,变焦镜头的放大倍率可变,无需调整光学系统的位置即可以不同的分辨率对目标成像,能有效提高探测效率,所以具有广泛的应用范围和良好的应用前景。

变焦距光学系统在各种成像系统(如照相机)中扮演着重要角色<sup>[1-2]</sup>。传统变焦距光学系统通常由几个光学组件组成,依靠组件的前后移动来调整焦距或放大率,这种系统的缺点是独立元件(或组件)必须沿着精确计算的轨迹移动,必须采用特殊的驱动电机对独立组件的机械位置提供精准的控制,而且多个组件的动作必须保证同步,这些均对系统的机械结构提出了苛刻的要求,使得传统变焦系统结构复杂,而且成本较高。当今变焦技术对变焦镜头的成像质量和功能提出了更加苛刻的要求,简单、轻小、紧凑以及高速变焦的需求急速上升,因此,寻求取代系统机械动作的途径,从而降低系统复杂程度目前在成像系统设计中备受关注。

与传统变焦系统相比,低成本、低复杂度、易于微型化、牢固性好、可快速调整光学参数的新型变焦系统的设计更具吸引力。这种新型变焦系统可以是基于某种可以调整光学参数的主动光学组件,比如能够自主变焦的透镜。自主变焦透镜的发展对于一系列实际应用—无论是矫正视力的主动调焦眼镜<sup>[3]</sup>,还是各种照相机、便携摄像机和手机摄像头<sup>[4-6]</sup>中的快速非动力学变焦装置,都起到了重要作用。可以想象,如果有一种可调节透镜能够通过改变其形状或者折射率的分布而不是依靠移动部件实现焦距的连续变化,变焦系统的设计将会出现根本性的改变。

液体透镜是近年来提出的一种新型光学元件,它是利用某种控制方法改变镜头的折射率或形状来调整焦距,实现变焦功能的,是一种全新的变焦方式。液体透镜的变焦响应速度快、功耗低、无噪声等诸多特点完全不同于传统镜片,透镜参

数的可调性为光学设计过程提供了一个全新的自由度,必将会使现有的诸多变焦系统得到大幅度的简化。如果能将液体透镜应用于变焦系统的设计而不需要引入任何机械运动部件,将会给变焦距光学系统的发展带来革命性的变化。因此,利用液体透镜获得高成像质量的变焦距光学系统是一个非常具有吸引力的研究方向。

## 2 液体透镜的分类

到目前为止,有关液体透镜的研究可归结为两大类:一类是渐变折射率透镜,另一类是曲率变化的透镜,本节简要分析和说明了它们的原理和特点。

### 2.1 渐变折射率透镜

渐变折射率透镜主要用到的材料是液晶。液晶具有双折射效应,对不同的偏振光具有不同的折射率,通过控制液晶分子的方向可以控制材料的折射率,也就是说,液晶分子以某种方式排列晶向时,就形成了折射率的渐变,从而产生了透镜效应。

控制液晶材料折射率渐变的方法是目前的研究热点方向之一。它是通过电场的设计将电极巧妙地设置在特殊的位置,通过控制电压,在液晶中形成一个轴对称的不均匀电场,通常使用切片电极施加不同的电压来实现<sup>[7-9]</sup>。另一种产生渐变折射率的方法是在液晶中混入聚合物。当聚合物聚合时,即使施加电压,它也会将液晶锁定在原来的晶向而不会发生改变,这也会导致透镜在整个孔径范围内具有不同的折射率,

这类透镜已经商品化的代表是 LensVector 公司的自聚焦透镜(LVAF),通过在透明的氧化铟锡(ITO)电极之间放入特殊的隐藏物质层(Hidden Layer)改变折射率,该项技术已经获得专利。隐藏层由两种折射率完全相同而介电属性不同的材料构成,材料光学透明,可以产生动态可调、形状可变的电场(如图1所示),从而精确控制液晶分子的旋转方向。LensVector 公司的液体透镜口径只有1.49 mm,号称世界最小的自聚焦透镜,焦距范围为 $\infty \sim +10$  cm,相比较而言焦距范围较

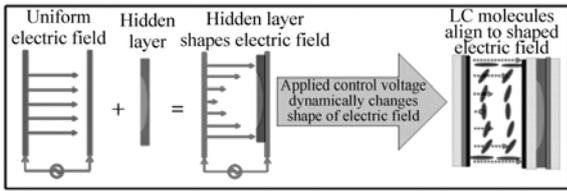


图1 通过隐藏层物质控制电场分布

Fig. 1 Electric field distribution controlled by hidden layer

小,而且,

由于液晶在电场中的非均匀性造成光学失真,能量损失较大。

### 2.2 变曲率液体透镜

另一类液体透镜是通过调节自身曲率半径来改变焦距,曲率的改变可以根据不同的物理机制控制,比如电润湿效应和液体填充式。

电润湿效应是通过调节液滴与固体的接触面施加电压来改变液滴与固体介质间的接触角<sup>[10-12]</sup>,其原理示意图如图2。

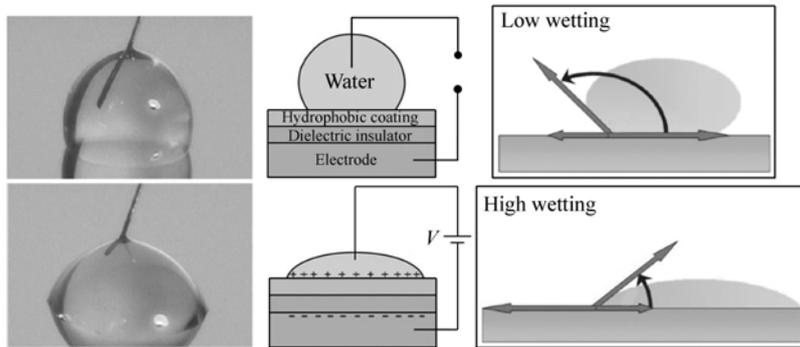


图2 电润湿效应原理

Fig. 2 Schematic diagram of electrowetting effect

电润湿效应的物理机制可以归结为杨氏(Lippman-Young)方程:

$$\cos(\theta) = \cos(\theta_0) + \frac{\epsilon\epsilon_0}{2\gamma_{LG}d}V^2, \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为接触角, $\theta_0$ 为没有施加电压时的初始接触角, $\epsilon$ 为介质层的介电常数, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\gamma_{LG}$ 为固体与接触环境(固体介质)的界面张

力, $d$ 是介质层厚度, $V$ 是施加在固体介质与液滴之间的电压。当电压发生变化时,固-液之间的接触角发生变化,透镜的曲率也随之改变。这类透镜的特点是口径较小,一般小于3 mm,很难实现较大口径变焦透镜;响应时间快,变焦范围广,但控制电压较高,应用受到限制。具有代表性的是Varioptic公司和飞利浦公司研制的液体透镜。

表1 ARCTIC系列透镜参数  
Tab. 1 Specifications for ARCTIC series of lenses

	ARCTIC 314	ARCTIC 416	ARCTIC 316	ARCTIC 617
Focus range	Supports from 10 cm to infinity		Supports from 5 cm to infinity	
Aperture size/mm	2.5	2.3	2.5	2.5
Low optical power/ $m^{-1}$	-2	-5	-5	-5
High optical power/ $m^{-1}$	+10	+13	+13	+15
Wave front error/nm(rms)	120	90	85	50
Transmission@587nm/%	97	97	97	97
Power consumption/mW	0.1	1	/	/
Long life	>1 000 000 cycles	>1 000 000 cycles	/	/
Storage temperature/ $^{\circ}C$	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85
Operating temperature/ $^{\circ}C$	-20 ~ 60	-20 ~ 60	-20 ~ 60	-20 ~ 60

Varioptic 公司于 2004 年首次推出了基于电润湿效应的液体透镜—ARCTIC 系列,各指标参数详见表 1,可用于数码成像、条形码识别和工业数据获取等领域<sup>[13-15]</sup>。

飞利浦研究实验室在德国汉诺威博览会上展示了可变焦镜头系统,这款被称之为 FluidFocus 的流体镜头直径只有 3 mm,长 2.2 mm,如图 3 所示。



图 3 飞利浦流体镜头

Fig. 3 Philips' FluidFocus

微小的体积使其可以方便地植入微型光学设备。飞利浦研究人员表示他们的这种液体镜片耐冲击性好,因此,特别适合如手机之类的便携式装置;此外液体镜头完全不包含可动机械零件的特性,也可以大幅提升这种镜片的寿命。他们希望在不久的将来可以大量生产使用液体镜头技术的相机组件。

另一种改变液体透镜曲率的方法是使用光学透明的弹性薄膜将液体限制在腔体当中<sup>[16]</sup>,通过液体的压力控制薄膜面形的变化,这是目前众多方法中最具吸引力的一个研究方向。该方法的原

理示意图如图 4,当光学液体被注入到液体腔时将产生一个正压力,弹性薄膜受到压力差作用将向外凸起,形成凸透镜;相反地,当光学液体从液体腔被抽出时,将产生负压力形成凹透镜,通过液体的进出控制腔内的压力,从而可以对焦距进行调节。

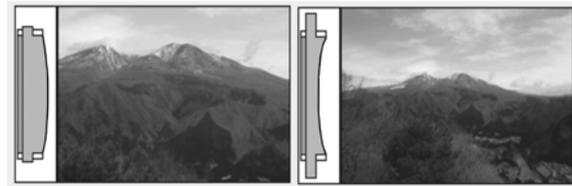
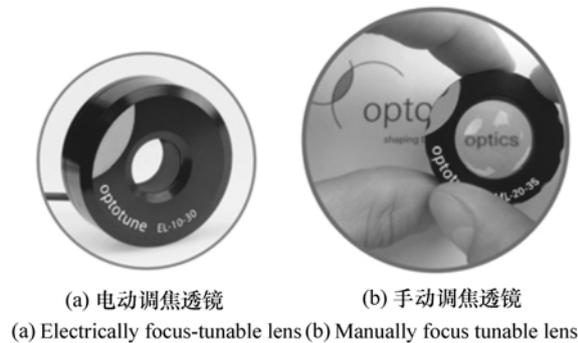


图 4 液体填充式透镜原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of liquid-filled lens



(a) 电动调焦透镜

(b) 手动调焦透镜

(a) Electrically focus-tunable lens (b) Manually focus tunable lens

图 5 Optotune 公司液体镜头实物图

Fig. 5 Pictures of liquid lenses from Optotune Inc.

这种方法的优点是镜头的外形仅由薄膜的力学性能决定,而与填充的液体无关,它的特点是:驱动功耗小,控制简便,变焦范围较大,透镜口径大小灵活。应用该原理最具代表性的是 Optotune

表 2 Optotune 公司透镜系列参数

Tab. 2 Specifications for series of lenses from Optotune Inc.

	ML-20-35	LD Version( OL1024)	HR Version( OL0901)
Aperture diameter/mm		20	20
Focus range(back focal length BFL)/mm		- 60... infinity... + 60	- 30... infinity... + 30
Refractive index(587 nm, 20 °C)		1.300 12	1.558 72
Abbe number(587 nm, 20 °C)		100.177	30.276
Current dependant central deflection range		- 33%... 0... 33%	- 33%... 0... 33%
Variable zone of lens material/mm		~ 0 - 4.7	~ 0 - 4.7
Outer mechanical diameter/mm		35	35
Total thickness/mm		8	8

公司的液体镜头,如图5所示,产品指标参数如表2所示,其口径最大达到了20 mm,是目前口径最大的液体透镜。

其它改变曲率半径的方法还包括利用表面张力改变液体透镜曲率、通过介电电泳的物理现象,通过超小型的微流体活塞控制液体表面面形的方法等等,在此不做过多介绍。

### 3 液体透镜技术在变焦系统中的应用

#### 3.1 液体变焦眼镜

最简单的液体透镜用于变焦系统的实例是液体变焦眼镜。随着年龄的增长,人眼睛的外层会逐渐失去弹性,此时,人眼不能从远端物体向近处物体进行变焦,最常见的补救方法是佩戴分区双光眼镜。使用者可以从这种镜片的上部看远处,从下部看近处,但在远近物体之间进行转换时,目光需要在上下镜片之间移动。目前市场上一种由上而下缓慢过渡变焦的眼镜受到很多人的青睐,但这仍需要目光上下游动。双光眼镜的视野有限,使用者如果想看到附近物体,便需要向下看,在某些情况下,这可能还会引起眩晕和不适感。对全球无数的眼镜族来说,美国洛杉矶科学家斯蒂芬·库尔汀(Stephen Kurtin)发明的可调焦距眼镜,也许会成为一种全新利器<sup>[17]</sup>。

这种被称之为“TruFocals”的眼镜由4片透镜组成<sup>[18]</sup>,对每只眼睛都有3个光学表面,如图6所示。最外层的透镜固定,可根据使用者的视距

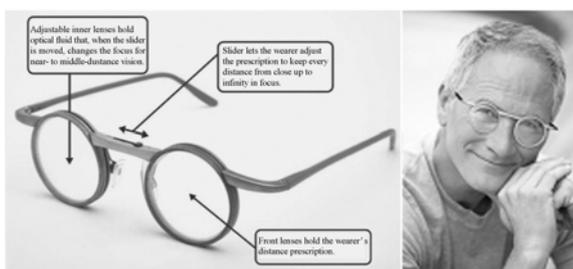


图6 液体变焦眼镜

Fig. 6 Adjustable liquid focusing eyeglasses

要求确定;里侧靠近眼睛的透镜可调,由光学透明的可伸展性薄膜附着于外侧刚性的透明表面上,二者之间的空腔内填满光学透明的液体。使用

时,可以根据当前的动作来调整焦距—通过推动眼镜横梁上滑动操纵杆来控制液体的流入或流出,改变薄膜的面形。

不管是近视眼,还是远视眼,或是老花眼,戴上这种眼镜,只需要轻轻拨弄鼻梁上的小滑块,即可清楚看到报纸上的小字、街角熟人,甚至是远处高山上的树枝。美国宇航局(NASA)在已有技术的基础上,推出了太空版可变焦眼镜,宇航员可根据手头要进行的工作自由选择变焦的距离。

#### 3.2 手机相机

手机拍照功能一直都受限于手机的体积,以前解决这个问题只有增大体积,像三星的M709之类,虽然有了3倍光学变焦功能,体积却相当于原来的2倍。而像夏普903这样的2倍变焦手机,体积也不小,同时变焦只能停在两档上,功能上的限制确实比较多,不过这一切将在“液体镜头”上市的时候完全改变。

图7显示了Philips公司设计的手机相机模

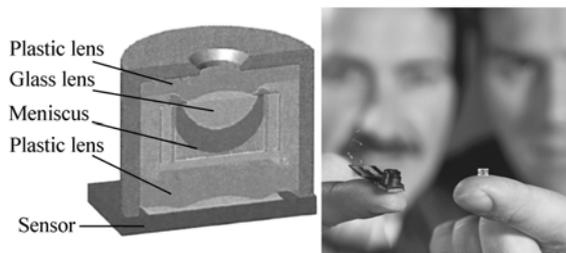


图7 Philips相机模块结构图和外形图

Fig. 7 Structure and profile diagrams of Philips lens module

块结构剖面图和外形图。电润湿元件被放置在两片注塑成型的塑料透镜之间<sup>[19]</sup>,在圆柱腔内靠近油的一侧放置平板玻璃,而在靠近盐水溶液的一侧则放置一块平凸玻璃透镜和薄的金属光圈。圆柱体外直径为4 mm,内径为3 mm,高为2.2 mm,该结构不但解决了色差问题,还具有很高的光学质量,变焦速度超过了CMOS传感器的刷新率。包括传感器在内整个镜头模型的高度为5.5 mm,相对孔径为2.5:1,视场角为60°。采用商业VGA CMOS传感器(Philips OM6802),640 pixel × 480 pixel,像素尺寸为5.0 × 5.0 μm<sup>2</sup>。此外,入瞳直径为1.43 mm,焦距从2.85 mm至3.55 mm可

调,可以对 2 cm 到无穷远距离的物体成像。拍摄效果如图 8 所示,对 50 cm 处的物体,测试的 MTF 值在 25 lp/mm 达到 70%,对 2 cm 远的物体经重新聚焦后仍有较高的分辨率,甚至可以看清物体上的毛发。测试表明:镜头的耐用性很好,即使调焦 100 万次也不会降低光学性能。

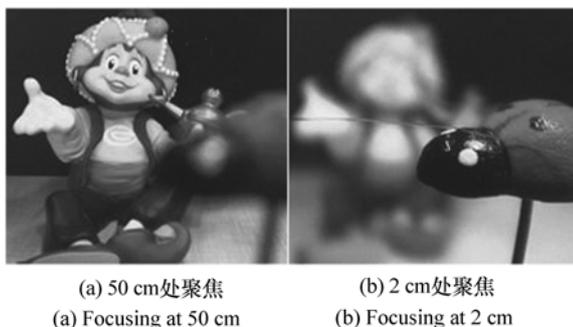


图 8 相机模块拍摄效果

Fig. 8 Pictures taken from the lens module

法国 Varioptic 公司和新加坡材料研究与工程研究院 (IMRE) 对液体镜头技术应用于拍照手机领域同样表示了极大的热情。图 9 为 Varioptic 公司产品应用于手机相机的例子。据称,由于使用了液体镜头该相机模块可以做得更薄<sup>[20]</sup>,厚度只增加了 2 mm;而且镜头不需要做物理运动,支持 5 cm ~ ∞ 聚焦;采用这种镜头的模块驱动电压为 0 ~ 40 V,可以大大减少耗电量。



图 9 液体透镜应用于手机

Fig. 9 Liquid lens in mobile phone

### 3.3 内窥镜

医用内窥镜技术是无创、微创治疗的重要手段,可以在最大程度减小病人痛苦的前提下深入脏器,观察病灶,因而在临床中的应用越来越普及,且诊断范围逐步扩大,治疗功能不断丰富。

由于医用内窥镜光学系统要求的物距范围非常广(3 ~ 100 mm),普通光学系统在这样大景深范围内实现清晰成像难度较大,这就使得内窥镜在使用状态下的成像质量受到一定限制;同时,如何在物距不变的情况下实现局部范围内病灶的图像放大,也是使用者希望实现的功能。因此,在医用内窥镜中实现调焦、变焦功能是使用者对设计者提出的新要求。然而,内窥镜光学系统对系统尺寸及镜片数目的要求非常严格,难以利用传统方法实现光学变焦。

美国加利福尼亚大学的研究人员开展了液体透镜在医学领域的应用研究,比如腹腔镜,视网膜照相机等,并将其成功应用于胆囊切除手术<sup>[21-22]</sup>。图 10 为他们设计的变焦镜头结构示意图,为使结构简单,该系统只采用两片液体透镜以保证变焦过程像面稳定;为使轴上获得最佳像质,并未对全视场进行优化,短焦时存在较大的像散。镜头对可见光成像,焦距从 4.97 mm 至 13.23 mm 两档变焦,光学总长仅 17 mm;采用 0.8 cm (1/3 in) COMS 传感器,像素尺寸为 3.18 μm × 3.18 μm。图 11 为将该镜头用于猪活体实验,在猪腹腔内拍摄的照片。

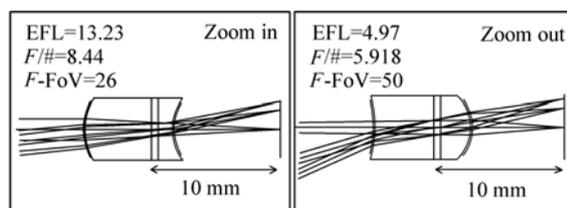
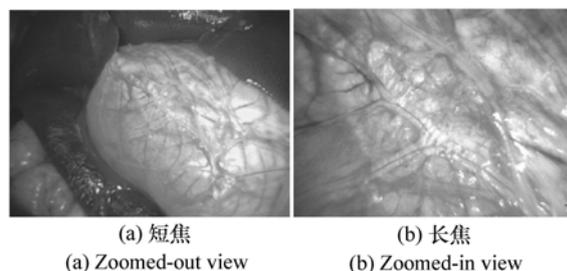


图 10 光学结构简图

Fig. 10 Schematic drawing of bifocal zoom lens



(a) 短焦

(b) 长焦

(a) Zoomed-out view

(b) Zoomed-in view

图 11 距离胃部 12 cm 处成像图

Fig. 11 Images taken at 12 cm away from stomach

由于上述的2片式系统无法控制系统像差,他们又对近红外波段(0.8,0.85,0.9  $\mu\text{m}$ )展开了复杂设计,增加额外的镜片进行像差补偿。光学系统仍用2片液体透镜提供光学变焦,在液体透镜间插入玻璃镜片校正像散和其它像差。设计的光学系统( $F/2.8\sim 4.45$ )如图12所示,系统光学总长22 mm,采用0.6 cm(1/4 in)光学传感器,长焦时物距为15 cm,短焦时物距为6.5 cm。图13为其调制传递函数(MTF)曲线,从MTF曲线中可以看出系统仍存在一定的像散,中间焦距(图13(b))由于系统整体的对称性好,所以像质最好。

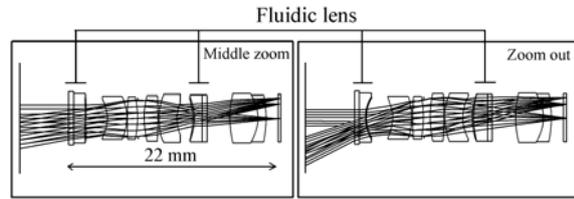


图12 光学结构简图( $F/2.8\sim 4.45$ )

Fig. 12 Schematic drawing of bifocal zoom lens ( $F/2.8\sim 4.45$ )

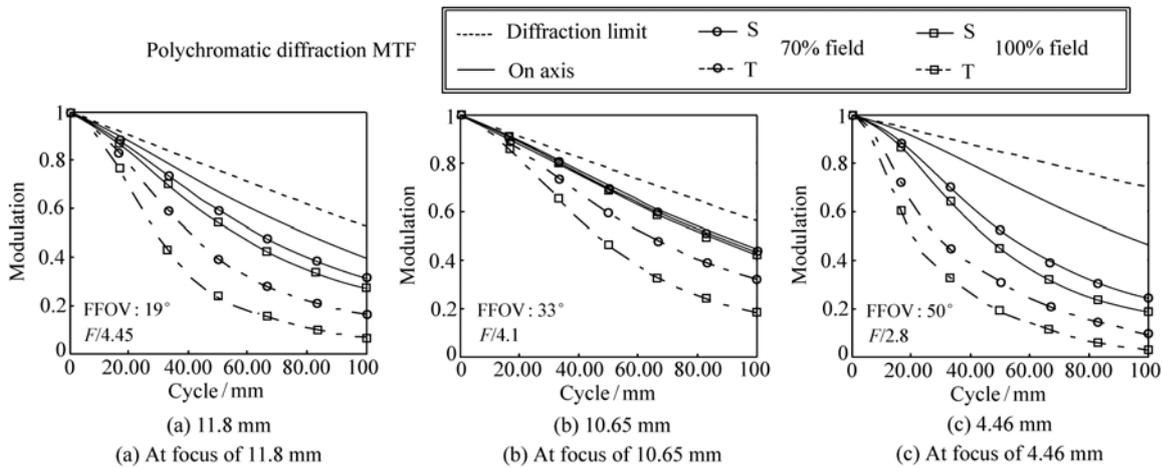


图13 不同焦距下的MTF曲线

Fig. 13 MTF plot at different focuses

### 3.4 显微镜

在光学显微镜中最常见的调焦方式是移动样品或物镜,这种方式严重地限制了对样品的扫描速度和深度。如果在光路中引入液体透镜,则可以轻松获得几百微米的轴向调焦而不需要任何移动部件,从而能够有效扩大景深。通过适当地控制和计算,可实现对样品或局部(表面形貌)的三维重构,目前已有多种显微镜,包括宽视场显微镜、共聚焦显微镜和双分子显微镜等应用了液体透镜<sup>[23-24]</sup>。

亚利桑那大学的 Sheng Liu 等人利用液体透镜实现了单次曝光下显微镜的景深扩展<sup>[25]</sup>。他们设计的快速变焦显微镜不仅可以获得宽视场,而且通过快速调整焦距可进行光学立体取样,利

用反卷积技术实现了厚样品的三维重构,而不像其它方式那样需要多幅图片的“细致重合”。

由于液体透镜变焦速度快,可以在一次曝光时间内完成对样品不同深度的采集,也因为液体透镜在变焦过程中是可寻址的,所以无论是不连续或者连续调焦,设计的系统均可以轻松获得所需焦距。试验中,他们采用 Varioptic 公司的 ARCTIC 系列产品,探测器选用黑白 CCD 传感器(Dragonfly2, Point Grey Research),1024 pixel  $\times$  768 pixel,帧频为 15 frame/s,样品为几根仙人掌的刺,所拍摄的照片如图14所示。

图14(a)是显微物镜对近距离对焦,只有前面的刺的尖端处于强聚焦,而其它的刺则因为离焦较大而变得模糊;图14(b)是经过物镜对相应

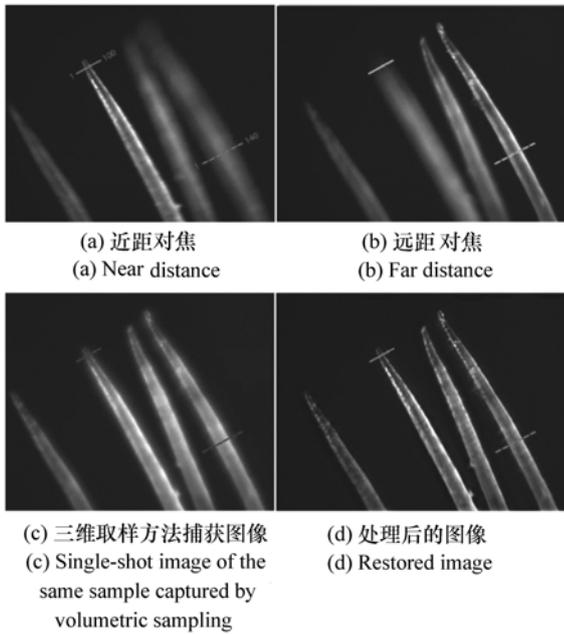


图 14 普通显微物镜在不同距离对焦情况下获得的图像

Fig. 14 Conventional microscopic images obtained as the objective focuses at different distances

距离调焦后对稍远的刺成的清晰图像;图 14(c)是在单次曝光时间内物镜快速变焦捕获的图像,在远近物体间以 7.5 Hz 切换以保证与探测器的帧频刷新率同步,所有的刺模糊程度接近;最后,经过反卷积技术处理恢复出清晰的图像,如图 14(d)所示,图像的景深得到了扩展。

#### 4 利用液体透镜进行长焦距变焦系统设计

以上所述的研究集中在微型变焦系统,其共同的特点是变焦过程对不同物距(调焦使用)或对有限物距(100 m 范围内)成像,焦距较短( $\leq 15$  mm)。虽然目前未见有液体镜头技术应用在或计划应用在空间成像的公开报道,但是已经能隐约看到这种应用的趋势<sup>[26]</sup>。与之相比,焦距较长的变焦系统由于口径相对较大,因而变焦元件的焦距范围相对较小;同时,随着系统焦距的增长,像差校正的难度也将增加,而对长焦距镜头的应用需求而言,对像质要求反而更高,因而设计难度更大。

双视场变焦系统可在最长最短焦距间切换而不经过程,因此是最简单的变焦系统,作为初步探索同时也为简化系统,本文从一实际应用出发,针对某双视场镜头进行设计。具体要求为:短焦焦距  $f'_s = 50$  mm,长焦焦距  $f'_l = 125$  mm,变倍比为 2.5;对可见光成像,物距无穷远;探测器像元数为  $1\,000 \times 1\,000$ ,像元尺寸为 0.007 4 mm;要求边缘视场的 MTF  $\geq 0.2$ 。

根据探测器的指标参数可以计算出特征频率为 68 lp/mm,半视场对角线像高为 5 mm。系统结构如图 15 所示,液体透镜选用 Optotune 公司的 ML-20-35,设计结果如表 3 所示。

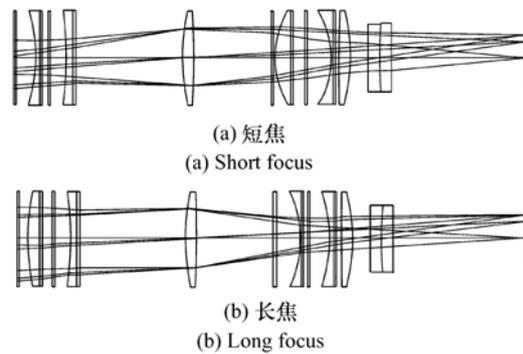


图 15 光学结构示意图

Fig. 15 Schematic drawings of designed bifocal zoom lenses

表 3 设计结果参数表

Tab. 3 Parameters of optical design

	Short focus	Long focus
Wave band	Visible	Visible
Focal length/mm	50	125
FOV( $2 \times \omega, (^{\circ})$ )	$2 \times 5.7$	$2 \times 2.3$
$F/\#$	6.5	9
BFL/mm	35.2	35.2
TOTR/mm	135	135

为了对系统消色差,变倍组和补偿组中各采用二片液体透镜,而为保证系统的变倍比,每组中又加入一片玻璃透镜,从系统的结构图中可以看到,变倍组的玻璃透镜从其中分离出来,这是为了尽量缩短系统总长进行的优化。各视场的 MTF 曲线和 MTF 的离焦曲线分别如图 16 和图 17 所示。

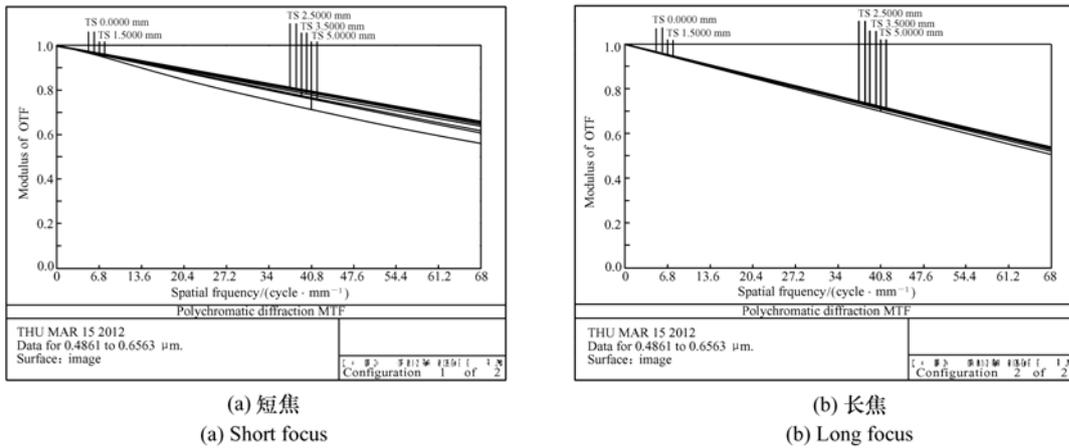


图 16 MTF 曲线图  
Fig. 16 MTF plots of the system

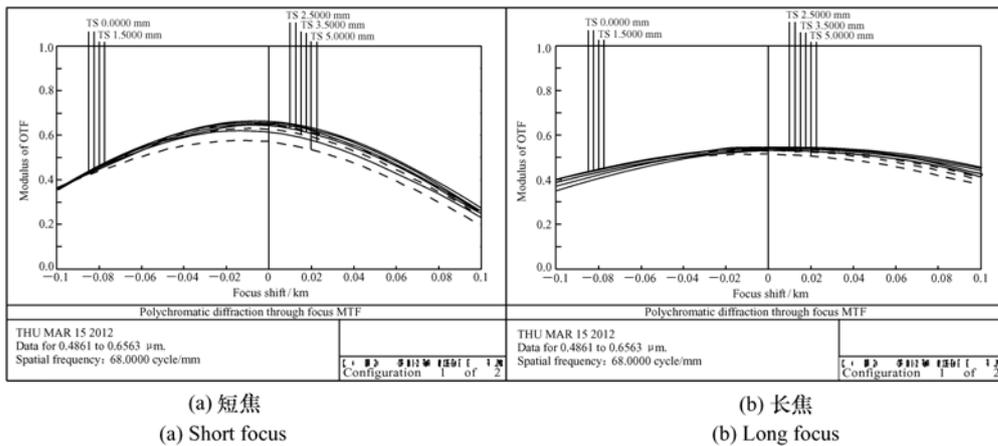


图 17 光学系统各视场 MTF 的离焦曲线  
Fig. 17 MTF plots for different focuses

### 5 结束语

液体透镜技术是当前的研究热点之一,利用液体透镜进行变焦系统设计可以有效降低系统复杂程度,是一种全新的变焦方式。伴随商业化产品的出现,液体透镜在变焦系统中的应用引起了广泛关注,其焦距可调、变焦迅速、低功耗、低成本

等诸多优点必将为变焦领域带来革命性的变化。虽然目前该技术还存在一些有待研究的问题,比如如何加大液体透镜的口径、液体材料的光学性能与光学元件相比的优缺点以及液体透镜的环境适应性等等,但从事物发展的客观规律来看,这些问题都将随着科技的发展而得到解决。可以预见,随着时间的推移,液体镜头一定会广泛地出现在我们的生活中。

### 参考文献:

[1] 贾庆莲,王春霞.连续变焦镜头焦距输出结构的设计[J].中国光学,2010,3(6):649-652.  
JIA Q L,WANG CH X. Mechanism design of focal output for zoom lens[J]. Chinese Optics,2010,3(6):649-652. (in Chinese)

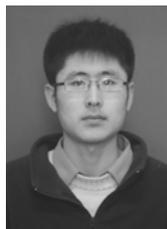
- [2] 杨为锦,孙强. 中波红外连续变焦系统设计[J]. 中国光学,2010,1(2):164-169.  
YANG W J,SUN Q. Design of middle infrared continuous zoom system[J]. *Chinese Optics*,2010,1(2):164-169. (in Chinese)
- [3] MARKS R,MATHINE D L,PEYMAN G,*et al.*. Adjustable fluidic lenses for ophthalmic corrections[J]. *Opt. Lett.*, 2009,34(4):515-517.
- [4] WIPPERMANN F C,SCHREIBER P,BR UER A,*et al.*. Bifocal liquid lens zoom objective for mobile phone applications [J]. *SPIE*,2007,6501:650109-1-650109-9.
- [5] TSAI F S,CHO S H,LO Y H,*et al.*. Miniaturized universal imaging device using fluidic lens[J]. *Opt. Lett.*,2008,33(3):291-293.
- [6] HENDRIKS B H W,KUIPER S,VANAS M A J,*et al.*. Variable liquid lenses for electronic products[J]. *SPIE*,2006,6034:603402-1-603402-9.
- [7] YE M,WANG B,SATO S. Liquid-crystal lens with a focal length that is variable in a wide angle[J]. *Appl. Optics*,2004,43(35):6407-6412.
- [8] YE M,WANG B,SATO S. Liquid crystal lens with focus movable in focal plane[J]. *Optics Commun.*,2006,259(2):710-722.
- [9] WANG B,YE M,SATO S. Liquid crystal lens with focal length variable from negative to positive values[J]. *Photonics Technology Letters,IEEE*,2006,18(1):79-81.
- [10] PARK J,LIU C X,CHOI JW. A planar liquid lens design based on electrowetting[C]//Sensors,2007 IEEE,Atlanta, GA,Oct. 28-31,2007:439-442.
- [11] KROGMANN F,SHAIK R,MONCH W,*et al.*. Repositionable liquid micro-lenses with variable focal length[C]//Micro Electro Mechanical Systems,2007. MEMS. IEEE 20th International Conference on, Kobe, Japan, Jan. 21-25, 2007:707-710.
- [12] LEE J H,LEE K H,WON J M,*et al.*. Mobile oscillating bubble actuated by AC-electrowetting-on-dielectric(EWOD) for microfluidic mixing enhancement[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,2012,182:153-162.
- [13] SIMON E,BERGE B,FILLIT F,*et al.*. Optical design rules of a camera module with a liquid lens and principle of command for AF and OIS functions[J]. *SPIE*,2010,7849:784903-1-784903-14.
- [14] MAILLARD M,LEGRAND J,BERGE B. Two liquids wetting and low hysteresis electrowetting on dielectric applications [J]. *Langmuir*,2009,25(11):6162-6167.
- [15] SHAMAI R,DAVID E,BERGE B,*et al.*. Water,electricity,and between on electrowetting and its applications[J]. *The Royal Society of Chemistry,Soft Matter*,2008,4:38-45.
- [16] BLUM M,B ELER M,GR TZEL C,*et al.*. Compact optical design solutions using focus tunable lenses[J]. *SPIE*,2011,8167:81670W-1-81670W-9.
- [17] 变焦眼镜让视力清晰更简单[EB/OL]. (2010-08-25)[2012-07-11]. <http://baike.keede.com/html/2010-08/486.html>.
- [18] Eyeglasses that mimic the human eye[EB/OL]. [2012-07-11]. <http://www.scariameledam.com/consumerview/eyeglasses%20that%20mimics.html>.
- [19] KUIPER S,HENDRIKS B H W. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2004,85(7):1128-1130.
- [20] 液体镜头[EB/OL]. [2012-07-11]. <http://baike.baidu.com/view/761463.htm>.
- [21] FRANK S T,CHO S H,LO Y H,*et al.*. Miniaturized universal imaging device using fluidic lens[J]. *Opt. Lett.*,2008,33(3):291-293.
- [22] FRANK S T,JOHNSON D,FRANCIS C S,*et al.*. Fluidic lens laparoscopic zoom camera for minimally invasive surgery [J]. *J. Biomedical Optics*,2010,15(3):030504-1-030504-3.
- [23] GREWE B F,VOIGT F F,HOFF M V,*et al.*. Fast two-layer two-photon imaging of neuronal cell populations using an electrically tunable lens[J]. *Biomedical Optics Express*,2011,2(7):2035-2046.

- [24] NOVAK P, NOVAK J, MIKS A. Analysis and application of refractive variable-focus lenses in optical microscopy[J]. *SPIE*, 2011, 8083:808316-1-808316-9.
- [25] LIU S, HUA H. Extended depth-of-field microscopic imaging with a variable focus microscope objective[J]. *Opt. Express*, 2011, 19(1):353-361.
- [26] 卢威, 傅丹鹰, 孙燕萍, 等. 液体镜头技术应用于空间探测的初步探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2007, 3(28):25-29.  
LU W, FU D Y, SUN Y P, *et al.*. Initial approach about application of liquid lens in space exploration[J]. *Spacecraft Recovery Remote Sensing*, 2007, 3(28):25-29. (in Chinese)

#### 作者简介:



张 鹰(1978—),男,吉林长春人,博士,副研究员,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事集成光学、光学设计及光学检测方面的研究。E-mail: eagle1978@sina.com。



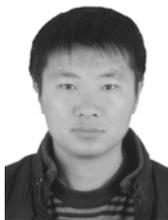
王 超(1986-),男,吉林大安人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事成像系统超分辨方面的研究工作。E-mail: wangchao32050609@163.com



张 新(1968—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,1991年于清华大学获得学士学位,1994年、2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事成像、非成像光学系统的总体设计方面的研究。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn



王 钰(1986—),辽宁辽阳人,博士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事光学系统的设计与装调方面的研究。E-mail: ygz119bear@163.com



史广维(1983—),男,黑龙江肇源人,博士,助理研究员,2006年于哈尔滨师范大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学系统设计方面的研究工作。E-mail: dqsgw@yahoo.cn