

用于2D/3D可切换显示的柱状液体透镜阵列

赵悟翔 王琼华* 李磊

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 提出一种用于二维(2D)/三维(3D)可切换显示的可变焦的柱状液体透镜阵列,主要包含两种不同折射率的透明液体:液体1和液体2,液体1和液体2被透明的弹性薄膜隔离开,弹性薄膜由微支板阵列来支撑。通过外力驱动两种液体在器件内的流动来实现并调节弹性薄膜的形变,弹性薄膜形变有平面形态和可变柱面形态两种,实现该柱状液体透镜阵列焦距从无穷大到有限正焦距的大范围的变焦。实验制作出适用于2D/3D切换显示器的样品,实验结果验证了其变焦性能,该样品与匹配的平板显示器能进自由立体3D显示,而且弹性薄膜能变为平面形态用于普通的2D显示,实现了2D/3D切换显示。

关键词 光学器件; 透镜阵列; 液体透镜; 变焦; 三维显示

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0823001

Tunable Cylindrical Liquid Lens Array for 2D/3D Switchable Display

Zhao Wuxiang Wang Qionghua Li Lei

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract A tunable cylindrical liquid lens array for two dimensional (2D)/three dimensional (3D) switchable display is proposed. It mainly contains two transparent liquids of different refractive index: liquid 1 and liquid 2. Liquid 1 and liquid 2 are divided by a transparent elastic membrane. The elastic membrane is supported by a micro-clapboard array. Driving these two liquids to flow and the support of micro-clapboard array can change the shape of the elastic membrane, then, the membrane has two shapes as flat shape and tunable cylindrical shape. The focal length of tunable cylindrical liquid lens array extensively adaptive from infinity to a certain positive value is realized. A tunable cylindrical liquid lens array prototype for 2D/3D switchable display is developed. The experimental result proves the prototype's tunable focus length ability. The prototype with a matched flat display panel realizes autostereoscopic 3D display, moreover, the elastic membrane can change to flat for regular 2D display. Therefore, 2D/3D switchable display is realized.

Key words optical devices; lens array; liquid lens; tunable focus length; three-dimensional display

OCIS codes 230.3990; 110.1080; 080.3620

1 引言

可调透镜近来受到了视觉应用、图像处理、光束控制和便携式电子设备领域的青睐^[1-6]。小型且可变焦的透镜—可变焦微透镜已有一些研究成果。可变焦微透镜主要包括液晶透镜^[7]和液体透镜。对于液晶透镜,其成本非常高,且调制偏振光,需要将光源的非偏振光先转换成线偏振光,该转换过程至少损失50%的光。

相比与液晶透镜,可调液体透镜是基于自身结构形状的变化,其光程变化的长度可以达到毫米级别,比液晶透镜大接近一个数量级,因此,液体透镜具备更大尺寸的孔径和更强的聚焦能力的潜能。根据操控机理,液体透镜常分为四类:电湿润、介电力、流体压力和热效应液体透镜。其中,热效应液体透镜容易受到温

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(61320106015)、四川省青年科技创新研究团队专项计划项目(2013TD0002)、四川省应用基础研究计划项目(2015JY0243)

作者简介: 赵悟翔(1983—),男,博士,副教授,主要从事信息显示方面的研究。E-mail: zhaowuxiang@scu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: qhwang@scu.edu.cn

度的影响,应用相对较少。电湿润和介电力液体透镜有一些相似特征,比如相似的透镜结构、电驱动、较大的变焦能力和快速响应时间。然而,由于自由电荷的移动和变化往往会导致电场、蒸发、高电压、电解、焦耳热、微气泡的出现。如果制造成透镜阵列,液体不均匀、不规律和重力效应等影响会使电湿润和介电力液体透镜阵列很难实现^[8]。

相比之下,结合光学和微流体技术的填充式液体透镜具有一些独特的优点:1)制作过程相对简单;2)常用的薄膜材料为聚二甲基硅氧烷(PDMS),PDMS在宽光谱范围具有良好的光学传输特性^[9];3)表面轮廓以及焦距可以动态调整,可简单采用液泵来制成紧凑的系统。目前国际上已成功研制出一些焦距可调的微透镜^[10-12]。

对于填充式液体微透镜阵列,需要建立一个微流体网络连接各微透镜单元。一般通过液压驱动来调节透镜的轮廓和焦距^[13-14],这些微流体网络结构较为复杂,加工成本高,且较易受到重力效应的影响。本文针对这些问题研究了一种填充式液体透镜阵列。况且,在裸眼三维(3D)显示领域^[15-19],所提出的液体透镜阵列可用于实现2D/3D切换显示的功能。

2 结构原理

为了研制能克服重力效应的液体透镜阵列,采用了两种密度相近的透明液体—液体1和液体2,液体1折射率明显高于液体2的折射率。图1为该透镜阵列的基本结构。在透明的盒状容器内,一块无色透明的弹性薄膜将盒状容器分成两个腔室,分别充满液体1和液体2,且液体1和液体2不相混溶。弹性薄膜由多个平行等间距的支撑板来支撑。注入口1为液体1的进出口,注入口2为液体2的进出口,通过这两个注入口可以使液体1和液体2流动,来改变弹性薄膜的形状。该柱状液体透镜阵列内部的两种液体具有一定深度,所以选用密度近似的两种液体可以有效减小或消除重力效应,使透明弹性薄膜在不同深度的形变近似一致。

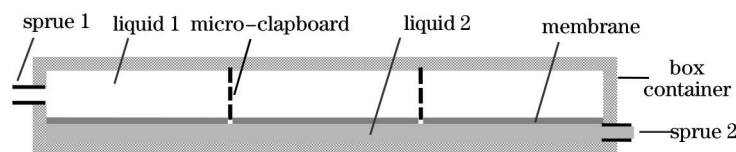


图1 弹性薄膜处于平面形态时的柱状液体透镜阵列

Fig.1 Cylindrical liquid lens array with flat elastic membrane

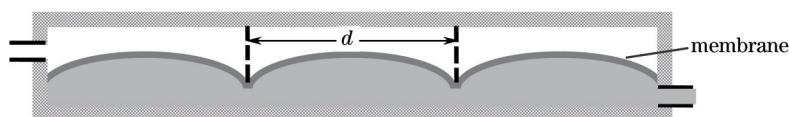


图2 弹性薄膜处于柱面形态时的柱状液体透镜阵列

Fig.2 Cylindrical liquid lens array with cylindrical elastic membrane

2D/3D可切换显示装置需要柱状液体透镜阵列来实现其2D/3D可切换显示功能。初始状态,该柱状液体透镜阵列内部的弹性薄膜处于平面形态,此时,该柱状液体透镜阵列无透镜作用,可用于2D/3D可切换显示的2D显示模式,如图1所示;使液体1和液体2流动改变第一容器内两个腔室的容积,进而使弹性薄膜发生柱面形态的形变,此时,该柱状液体透镜阵列有透镜作用,用于2D/3D可切换显示的3D显示模式,如图2所示。

为制作用于2D/3D可切换显示的柱状液体透镜阵列,需要使液体透镜阵列的周期截距 d 与2D显示器的子像素相匹配,在图2中, d 与2D显示器的子像素水平宽度 w 及其他参量的关系为

$$d = n \cdot w \cdot e / (w + e), \quad (1)$$

式中 n 为3D显示模式时视点数, e 为人双眼瞳距。

从结构来看,该柱状液体透镜阵列的透镜面由液体压力形成且制造成本低,而且不需要施加专门的电场和安装相应的驱动电路。此外,由于微支板很薄,挡光的面积很少,所以该柱状液体透镜阵列具有大开口率,相比于液晶透镜阵列,省去了转化成线偏振光的光损失,提升了光的利用率。

3 实验及结果

为制作用于2D/3D可切换显示的柱状液体透镜阵列,首先采用激光雕刻制作了微支板的模具,并在玻璃

基板上制作出微支板阵列,如图3所示。

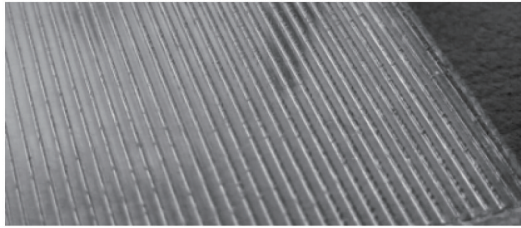


图3 微支板阵列

Fig.3 Micro-clapboard array

研制了一块柱状液体透镜阵列的样品,其幅面为70 mm×80 mm。选用30 μm厚度的PDMS材料作为弹性薄膜。液体1选用一种氟硅油(折射率1.3723,密度1.274 g/cm³);液体2选用甘油(折射率1.4709,密度1.260 g/cm³),所形成的液体透镜为正透镜。周期截距为 $d=0.926$ mm,针对21.5英寸(54.61 cm)的液晶平板显示器,样品与竖直方向的夹角等于 $\arctan(1/3)$,如图4所示,其中驱动柄1用于驱动液体1,驱动柄2用于驱动液体2。显示普通2D图像,透过样品时的显示效果如图4所示。

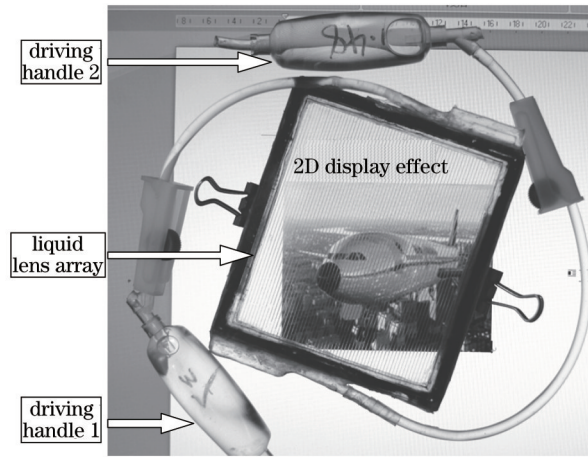


图4 二维显示模式时的柱状液体透镜阵列

Fig.4 Cylindrical liquid lens array in two-dimensional display mode

对样品进行了变焦验证实验。样品被竖直放置,其表面并被想垂直的平行光照射,承接幕用于观察聚焦情况,如图5(a)所示。初始状态时,弹性薄膜处于平面状态,此时样品无透镜作用;驱动驱动柄1和2使液体1和液体2流动,使弹性薄膜发生如图2所示的柱面形态形变,此时的样品有透镜作用,移动承接幕测得其焦距为15 mm,承接幕处于后焦面接收光如图5(b)所示。因此,样品实现了其后焦距从 $+\infty$ 到15 mm范围内的变焦。将后焦距为15 mm时的样品与平板显示器匹配放置,恰使显示面板像素表面正处于其后焦面上,进行3D显示测试。进行数字测试合成图像的3D显示测试,数字测试合成图像是由6张数字图像合成得到的。

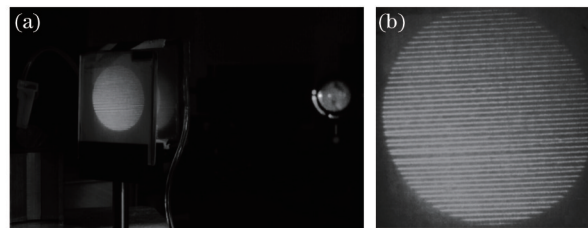


图5 变焦验证实验.(a) 实验装置图;(b) 变焦后,承接幕在15 mm后焦面接收的光

Fig.5 Experiment for adjusting focus length. (a) Experimental setup; (b) focus screen photo of 15 mm back focus plane after adjusting focus length

图6为不同角度拍摄的安装样品的数字测试合成图像。可以从不同的方向看到不同的数字,基本上实现了空间分方向的多视点自由立体显示,但存在一定的视点间串扰和3D图像的不均匀现象。这一现象说明样品形成柱状透镜阵列时的形状有瑕疵,主要是由于制作的微支柱不平整不均匀造成的,降低了3D图像质量。

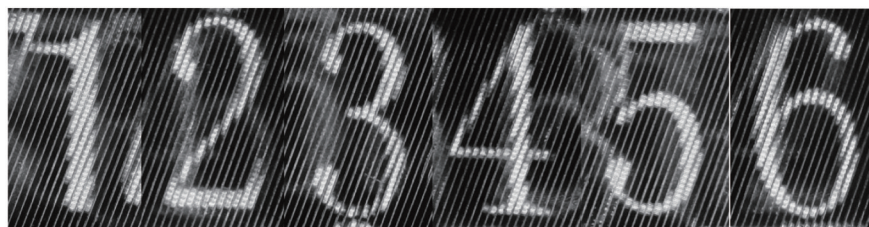


图6 数字测试合成图像的不同角度显示效果

Fig.6 Display effect of synthetic image of number test under different angles

图7是由6张飞机视差图像所合成,安装后焦距为15 mm的样品后,显示效果如图8所示,在不同方向显示的两张不同的视差图像,实现了自由立体3D显示。



图7 合成图像

Fig.7 Synthetic image

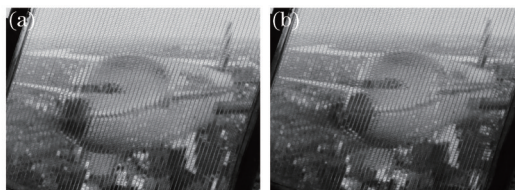


图8 自由立体3D显示效果.(a)显示的视差图像1;(b)显示的视差图像5

Fig.8 3D display effect picture of the autostereoscopic . (a) Parallax image 1 on display; (b) parallax image 5 on display

4 结 论

提出一种用于2D/3D可切换显示的可变焦的柱状液体透镜阵列,主要由两种不同折射率的透明液体、一片透明的弹性薄膜和微支柱阵列板组成。通过外力驱动两种液体在器件内的流动来实现并调节弹性薄膜的形变,弹性薄膜形变有平面形态和可变柱面形态两种,实现该柱状液体透镜阵列焦距从无穷大到有限正焦距的大范围的变焦。实验制作出适用于2D/3D切换显示器的样品,实验验证了该样品与匹配的平板显示器能进自由立体3D显示,而且弹性薄膜能变为平面形态用于普通的2D显示,从而实现了2D/3D切换显示。

参 考 文 献

- 1 L Dong, A K Agarwal, D J Beebe, *et al.*. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels[J]. *Nature*, 2006, 442(7102): 551-554.
- 2 H W Ren, S T Wu. Variable-focus liquid lens[J]. *Opt Express*, 2006,15(10): 5931-5936.
- 3 S Reza, N A Riza. A liquid lens-based broadband variable fiber optical attenuator[J]. *Opt Commun*, 2006, 282(7): 1298-1303.
- 4 S Murali, K P Thompson, J P Rolland. Three-dimensional adaptive microscopy using embedded liquid lens[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(2): 145-147.
- 5 C A López, C C Lee, A H Hirsra. Electrochemically activated adaptive liquid lens[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 87(13): 134102-134104.
- 6 L Miccio, A Finizio, S Grilli, *et al.*. Tunable liquid microlens arrays in electrode-less configuration and their accurate characterization by interference microscopy[J]. *Opt Express*, 2009, 17(4): 2487-2499.
- 7 S Kuiper, B H W Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(7): 1128-1130.
- 8 H B Yu, G Y Zhou, F S Chau, *et al.*. Optofluidic variable aperture[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(6): 548-550.
- 9 H B Yu, G Y Zhou, F S Chau, *et al.*. A variable optical attenuator based on optofluidic technology[J]. *Journal of Micromechanics and Micro Engineering*, 2008, 18(11): 115016.

- 10 D Y Zhang, N Justis, Y H Lo. Fluidic adaptive lens of transformable lens type[J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(21): 4194–4196.
- 11 H Yang, C Y Yang, M S Yeh. Miniaturized variable-focus lens fabrication using liquid filling technique[J]. Microsyst Technol, 2008, 14(7): 1067–1072.
- 12 H W Ren, S T Wu. Variable-focus liquid lens[J]. Opt Express, 2007, 15(10): 5931–5936.
- 13 N Chronis, G L Liu, K H Jeong, *et al.*. Tunable liquid-filled microlens array integrated with microfluidic network[J]. Opt Express, 2003, 11(19): 2370–2378.
- 14 K H Jeong, G L Liu, N Chronis, *et al.*. Tunable microdoublet lens array[J]. Opt Express, 2004, 12(11): 2494–2500.
- 15 Wang Shulu, Ming Hai, Wang Anting, *et al.*. Three-dimensional display based on human visual perception[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209007.
王书路, 明海, 王安廷, 等. 基于人眼视觉特性的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209007.
- 16 Wei Xie, Yazhou Wang, Huan Deng, *et al.*. Viewing angle-enhanced integral imaging system using three lens arrays[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 011101.
- 17 Yazhou Wang, Qionghua Wang, Dahai Li, *et al.*. Crosstalk-free integral imaging display based on double plano-convex micro-lens array[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(6): 061101.
- 18 Sang Xinzhu, Yu Xunbo, Zhao Tianqi, *et al.*. Three-dimensional display with smooth motion parallax[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209011.
桑新柱, 于迅博, 赵天奇, 等. 具有平滑运动视差的三维显示技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209011.
- 19 Xunbo Yu, Xinzhu Sang, Duo Chen, *et al.*. Autostereoscopic three-dimensional display with high dense views and the narrow structure pitch[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(6): 060008.

栏目编辑: 苏 岑