

文章编号:1007-2780(2015)03-0375-06

# 基于液晶透镜的电控式光学影像缩放系统

陈明璿, 陈柏儒, 林怡欣

(台湾交通大学 光电工程研究所液晶实验室, 台湾 新竹 30010)

**摘要:**为了在便携式设备上实现光学影像缩放, 不包含机械式移动的光学系统开发是必要的, 因此, 我们对可电控改变焦距的液晶透镜所组成的光学系统进行研究, 研究内容包含液晶透镜焦距对于放大率、变焦比以及对焦范围的关系。由于单片液晶透镜仅能达到对焦功能, 因此我们首先利用两片液晶透镜组成的系统来计算不同物体距离的影像缩放条件。接着, 我们利用三片液晶透镜, 做到与机械式系统相同, 可单独控制清楚物体平面距离以及控制影像大小的系统。实验结果表明: 利用三片透镜屈光率从  $-11.3\text{ m}^{-1}$  连续电控调整至  $24.9\text{ m}^{-1}$  的液晶透镜, 可实现清楚物体平面距离由 10 cm 连续调整至 100 cm 且缩放比为 6.5 : 1 的光学缩放系统。我们利用不同调焦范围的液晶透镜, 根据设计原理, 来达成不同对焦范围与不同缩放比的电控光学缩放系统。

**关键词:**液晶透镜; 光学影像缩放系统; 对焦功能

**中图分类号:** TN141    **文献标识码:** A    **doi:** 10.3788/YJYXS20153003.0375

## Electrically tunable optical zoom system based on liquid crystal lenses

CHEN Ming-syuan, CHEN Po-ju, LIN Yi-sxin

(Laboratory of Liquid Crystal, Department of Photonics, Taiwan Chiao Tung University,  
Hsinchu 30010, China)

**Abstract:** In order to realize optical zoom system on the portable devices, the optical system without any mechanical moving part is necessary. Therefore, we established the electrically tunable optical zoom system using liquid crystal(LC) lenses and investigated the relation between the focal length of the LC lens, magnification of images, zoom ratio and the object distance. One LC lens can only have the function of focusing, therefore, first, we utilized two LC lenses to design the optical system and figure out the zoom ratio at different object distance. Second, we used three LC lenses to establish the system that the function of focusing and zooming can be controlled independently and it is similar with the mechanically tunable system. Experimental results indicate that by using three LC lenses with tunable lens power ranging from  $-11.3\text{ m}^{-1}$  to  $24.9\text{ m}^{-1}$ , we can achieve electrically tunable optical zoom system. The object distance of the system can be changed form 10 cm to 100 cm continuously and the zoom ratio is 6.5 : 1. According to the principles, we can achieve electrically tunable optical zoom system with different range of object distance and different zoom ratio by LC lenses with

收稿日期:2014-12-08; 修订日期:2015-01-09.

\* 通信联系人, E-mail: yilin@mail.nctu.edu.tw

different tunable lens power range.

**Key words:** liquid crystal lens; optical zoom system; focusing function

1 引言

便携式装置的发展,使得机械式的光学系统不符时宜,光学缩放系统也难以在便携式装置上实现,举例来说:手机相机、网络摄像头、微型投影机、全像投影机与内视镜等等<sup>[1-10]</sup>,目前的缩放功能都是利用数字缩放,藉由牺牲影像分辨率的方式做到影像放大。传统上,光学缩放系统包含许多固态透镜并使用音圈马达来控制透镜移动。而系统中,可以分成两种镜组,一是对焦镜组,二是缩放镜组。前者功能在于调整拍摄物体的距离,使物体能在 CCD 传感器上清晰成像,后者功能则是改变物体成像大小。两个镜组可分别控制达到各自的功能。然而为了在便携式装置上使用,透镜必须在影像缩放时,固定在相同的位置上,我们藉由可电控调焦的透镜取代传统固态透镜,达到重量轻以及体积小的设计。可以电控调焦的主动组件主要分为 3 种:液晶透镜、液体透镜以及可变形反射镜<sup>[1,11-16]</sup>。其中又以液晶透镜重量最轻,体积最小,为穿透式组件且同时可以克服接口反射的问题。本文将先从两片电控调焦的透镜作探讨,接着利用三片透镜设计对焦与缩放可分开控制的系统。并利用三片液晶透镜实验证明其理论分析,并达成 6.5 : 1 的系统缩放比。

2 液晶透镜的操作原理

透镜的焦距,根据光程差原理,与其空间光程差  $\Delta\delta$  的分布有关,光程  $\delta = n \times d$ , 其中  $n$  为折射率,  $d$  则为光经过的距离。光程差  $\Delta\delta$  是透镜中心与边界之光程的差值。因此,光程差与透镜厚度分布以及折射率分布相关,假设透镜的光程差分布在空间中是完美的二次曲线,则透镜焦距  $f$  与光程差的公式可表示成:

$$\frac{1}{f} = \frac{8 \times \Delta\delta}{D^2} = \phi, \tag{1}$$

其中:  $D$  代表透镜直径,  $\phi$  则代表透镜的屈光率。

一般透镜主要利用透镜厚度  $d$  的差异,  $\Delta d = d_c - d_b$  达成光程差的分布,而液晶透镜则是利用

液晶指向矢在空间中的分布,以及液晶双折射性造成的等效折射率差异  $\Delta n = n_{\text{effc}} - n_{\text{effb}}$ , 达到光程差的分布,如图 1 所示。液晶的等效折射率  $n_{\text{eff}}$  可简单表示成:

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{n_e^2 n_o^2}{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}, \tag{2}$$

其中:  $\theta$  为液晶长轴与入射光行进方向的夹角,  $n_o$  为液晶的寻常折射率,  $n_e$  则为液晶的非寻常折射率。

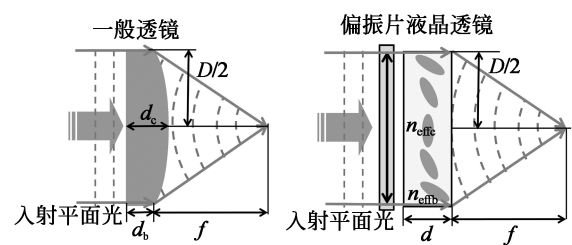


图 1 一般透镜与液晶透镜原理图  
Fig. 1 Principle of solid lens and LC lens

3 电控光学缩放系统的设计

3.1 利用两片液晶透镜的设计

利用两片液晶透镜设计的缩放系统,包含液晶物镜(焦距为  $f_o$ )、液晶目镜(焦距为  $f_e$ )、以及一台相机。相机包含镜头以及 CCD(影像传感器),相机的镜头设定在当物体距离为无限远时才能清楚成像,也就是当光线为平行光入射时,才有办法在影像传感器上成像。如图 2 所示。

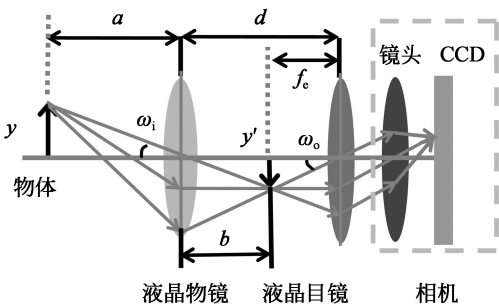


图 2 两片液晶透镜的光学缩放系统原理图  
Fig. 2 Principle of optical zoom system with two LC lenses

图 2 中的  $a$  是物体到液晶物镜的长度,  $b$  是液晶物镜与其成像的长度。根据光学系统的定义,在物空间的长度为正,在像空间的长度则为负。 $d$  为液晶物镜与液晶目镜的距离。光学成像系统,若要将物体成像在影像传感器上,必须符合透镜公式:

$$\begin{cases} \frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f_o} = \phi_o \\ \frac{1}{d+b} - \frac{1}{\infty} = \frac{1}{f_e} = \phi_e \end{cases} \quad (3)$$

$\phi_o$  与  $\phi_e$  为液晶物镜以及液晶目镜的屈光率。在得知系统的成像条件之后,我们可以依据图 2 计算得到系统的角放大率  $M$  为:

$$M = \frac{\tan \omega_o}{\tan \omega_i} \approx \frac{\omega_o}{\omega_i} = \frac{y' \times a}{y \times f_e} = \frac{\phi_e \times a}{1 - a \times \phi_o} \quad (4)$$

当  $M$  为正值时,成像为正立成像,  $M$  为负值时则为倒立成像。 $M$  的绝对值大小代表影像的缩小或放大,影像缩小时  $|M| < 1$ ,影像放大时  $|M| > 1$ 。影像大小与物体距离  $a$ 、两液晶透镜间距离  $d$  以及两液晶透镜的屈光率  $\phi_o$  与  $\phi_e$  相关。我们可以根据式(3)与式(4),将影像放大率表示成与  $\phi_o$  与  $\phi_e$  相关的函数:

$$M(\phi_o) = \frac{a}{d + a - d \times a \times \phi_o}, \quad (5)$$

$$M(\phi_e) = 1 - d \times \phi_e. \quad (6)$$

根据式(5)与式(6),我们可以整理出得到不同影像条件时,液晶物镜与液晶目镜所需要的屈光率范围,如表 1。

表 1 成像与透镜屈光率的关系  
Tab. 1 Relation between the images and the lens power of liquid crystal lens

|                     | 成像不变                               | 缩小                                   | 放大                                                          |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                     |                                    | (zoom out)                           | (zoom in)                                                   |
| 正立成像<br>( $M > 0$ ) | $\phi_o = \frac{1}{a}$             | $\phi_o < \frac{1}{a}$               | $\frac{1}{a} < \phi_o < \frac{d+a}{d \times a}$             |
|                     | $\phi_e = 0$                       | $0 < \phi_e < \frac{1}{d}$           | $\phi_e < 0$                                                |
| 倒立成像<br>( $M < 0$ ) | $\phi_o = \frac{d+2a}{d \times a}$ | $\frac{d+2a}{d \times a} < \phi_o$   | $\frac{d+a}{d \times a} < \phi_o < \frac{d+2a}{d \times a}$ |
|                     | $\phi_e = \frac{2}{d}$             | $\frac{1}{d} < \phi_e < \frac{2}{d}$ | $\frac{2}{d} < \phi_e$                                      |

根据式(5)、式(6)以及表 1,在已知物体距离以及两透镜间的距离后,便可以根据系统需求来

设计液晶透镜的屈光率调控范围,举例来说,如果要设计一个影像大小可从 0.5 倍变化至 2 倍,缩放比 4 : 1 的影像缩放系统,液晶透镜屈光率需要至少包含表 2 的范围:

表 2 缩放比为 4 : 1 的光学缩放系统的液晶透镜屈光率需求  
Tab. 2 Requirements of the lens power of LC lenses for optical zoom system with zoom ratio 4 : 1

| 放大率 $0.5 <  M  < 2$ 的液晶透镜屈光率范围 |                                                                  |                                        |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 正立成像<br>( $M > 0$ )            | $\frac{2d-2a}{2d \times a} < \phi_o < \frac{2d+a}{2d \times a}$  | $\frac{1}{2d} > \phi_e > \frac{-1}{d}$ |
| 倒立成像<br>( $M < 0$ )            | $\frac{2d+6a}{2d \times a} > \phi_o > \frac{2d+3a}{2d \times a}$ | $\frac{3}{2d} < \phi_e < \frac{3}{d}$  |

由表 2 可观察到:(1)要达成相同的影像放大率,液晶物镜与液晶目镜所需的屈光率范围是不同的。(2)物体距离的改变会影响到系统所需的液晶物镜屈光率,但不会对液晶目镜造成影响。(3)相同的影像放大率,倒立成像的透镜屈光率绝对值较大,在液晶透镜的设计上会相对比较困难。由以上 3 点可知,若想利用两片液晶透镜,达到不同物体距离的对焦功能,会造成系统的放大率范围改变,因此我们必须额外设计对焦系统,使  $a$  值在不同物体距离下固定不变。另外,正立成像的系统设计比倒立成像容易实现。

3.2 利用三片液晶透镜设计拥有独立对焦的系统

我们基于两片液晶透镜的结构,在镜组前方额外加上一片液晶透镜,将光学系统的对焦镜组以及缩放镜组分开,如图 3 所示。对焦镜组包含一片液晶对焦镜(焦距为  $f_t$ ),其位置贴近液晶物镜,我们此处假设液晶对焦镜与液晶物镜之间的距离可忽略。在 3 片液晶透镜的系统中,我们将物体距离改设为  $p$ ,液晶对焦镜成像的距离,同时也是对于液晶物镜的物体距离则为  $a$ 。前面提到,  $a$  的变动会造成液晶透镜屈光率对应关系改变,因此液晶对焦镜的功能就是在物体距离改变时,维持  $a$  不变,根据透镜公式,可以得到:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f_t} = \phi_t, \quad (6)$$

其中:  $\phi_t$  为液晶对焦镜的屈光率。由式(6)发现,当物体距离  $p$  大于  $a$  时,液晶对焦镜必须是负透

镜操作,反之当距离  $p$  小于  $a$  时,液晶对焦镜则必须为正透镜操作。在  $p=a$  时,液晶对焦镜屈光率则为 0。

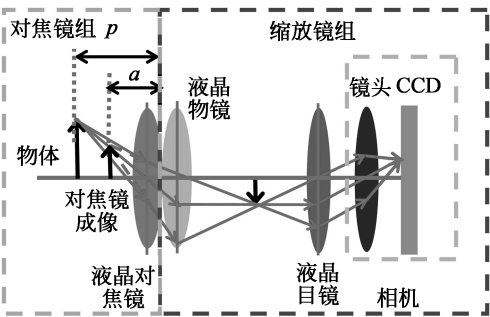


图 3 三片液晶透镜的光学缩放系统原理图

Fig. 3 Principle of optical zoom system with three LC lenses

4 实验结果与讨论

在系统的实现上,我们利用三片包含液晶聚合物薄膜的复合式液晶透镜来设计光学缩放系统<sup>[4]</sup>。如图 4 所示。液晶聚合物薄膜为由液晶与高分子单体经由相分离后形成的薄膜。

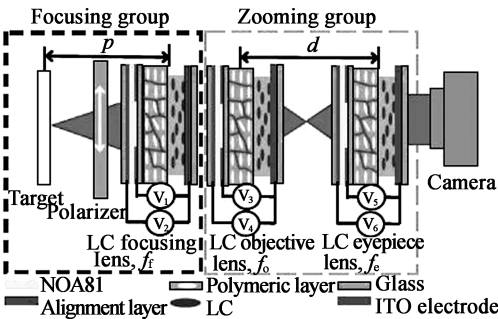


图 4 光学缩放系统结构图,此图引用自本实验室发表 ref[4]

Fig. 4 Structure of electrically tunable optical zoom system, since we published reference [4]

每一片复合式液晶透镜的结构包含 3 片含有 ITO 氧化铟锡电极的玻璃基板,每片厚度为 0.7 mm。其中有一层为绝缘层是以 NOA81 (Norland Optical Adhesive)做成,接下来是厚 35  $\mu\text{m}$  的液晶聚合物薄膜,以及一层厚 50  $\mu\text{m}$  的液晶层 (MLC-2144, Merck, 折射率差  $\Delta n=0.249\ 3$ ,波长为 589.3 nm 20  $^{\circ}\text{C}$ )。中间的 ITO 层以蚀刻的

方式在中间刻出一个直径 1 mm 的圆孔型电极,而液晶聚合薄膜的成份为向列行液晶 (MLC2144)、高分子单体 reactive mesogen (RM257, Merck) 与光起始剂 photoinitiator (IRG-184, Merck),质量分数比例为 30 : 69 : 1。在聚合物薄膜固化的过程中一边施加不均匀电场,使液晶分子指向矢在空间中不均匀分布,同时具有折射率的分布,等固化完成后液晶分子会使薄膜具有固定屈光率  $\phi_p \sim -2.5\ \text{m}^{-1}$ 。而在聚合物薄膜下的液晶层可透过施加在 2 个不同电极上的电压( $V_1$ 与 $V_2$ )来操作其屈光率,如图 4 所示。当透镜边界电压大于中心时( $V_1 > V_2$ ),透镜边界液晶站直,边界的光程较小,透镜为正透镜。当透镜边界电压小于中心时( $V_1 < V_2$ ),透镜中心液晶站直,中心的光程较小,透镜为负透镜,使透镜可以在正负透镜之间切换。因此复合式液晶透镜整体之聚光率为  $\phi_{\text{LC lens}}(V_1, V_2) = \phi_p + \phi_{\text{LC}}(V_1, V_2)$ 。实作出来的三片液晶透镜其调焦范围是液晶目镜与物镜为  $-11.3\ \text{m}^{-1} \sim 24.3\ \text{m}^{-1}$  而液晶对焦镜为  $-11.3\ \text{m}^{-1} \sim 24.9\ \text{m}^{-1}$ 。

我们将图 2 中的  $a$  设定为 11 cm 以及  $d$  设定为 10 cm,利用式(5)以及式(6)计算得到,  $M(\phi_o) \leq -1.72$  或  $0.33 \leq M(\phi_o)$ ,  $-1.49 \leq M(\phi_e) \leq 2.13$ ,而系统的放大率,液晶物镜与液晶目镜都必须都能达成,因此取其交集,可以得到系统的放大率范围为  $0.33 \leq M \leq 2.13$ 。当  $a$  设定为 11 cm 之后,根据式(6),可以计算出系统的对焦范围可从无限远至 3 cm。

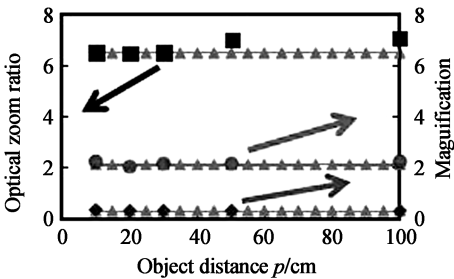


图 5 系统缩放比,最大与最小影像放大率与物距的关系图,此图引用自本实验室发表 ref[4]

Fig. 5 Zoom ratio, maximum magnification and minimum magnification as a function of object distance, since we published reference [4]

我们拍摄不同物体距离的影像,并作放大率分析,得到最大最小放大率以及系统缩放比与物

体距离的关系图,如图 5 所示。图中三角是计算值,连线的部分是实验值。方块代表缩放比,圆圈为最大放大率,绿色菱形则是最小放大率。可以

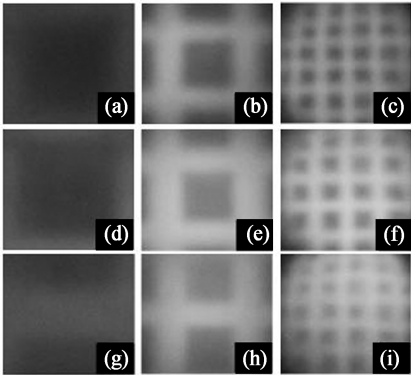


图 6 放大、不变以及缩小的影像。(a)(b)(c)物距为 20 cm,(d)(e)(f)物距为 50 cm,(g)(h)(i)物距为 100 cm,此图引用自本实验室发表 ref[4]

Fig. 6 Magnified, maintained and reduced images, (a) (b)(c) object distance is 20 cm, (d)(e)(f) object distance is 50 cm, (g)(h)(i) object distance is 100 cm, since we published reference [4]

发现,根据原理计算出来的结果,与实验结果是接近的。

图 6 为实际拍摄的影像,在不同的物体距离下,系统都能利用电控的方式,使影像放大以及缩小。观察成像结果能发现成像质量有改善空间,成像质量会受到以下几项影响,其一是液晶材料造成色散,其二是透镜孔径小。解决方法是使用低色散液晶材料以及增加液晶透镜孔径<sup>[17]</sup>。

5 结 论

本文利用液晶透镜焦距电控可调的特性,提出不需机械式移动组件,即可将影像放大缩小,且使不同物体距离的物体清楚成像的光学缩放系统。然后我们计算出不同的影像大小所需的液晶透镜屈光率,最后利用三片复合式液晶透镜实现此系统。实验结果证明,利用屈光率调整范围  $11.3\text{ m}^{-1} \sim 24.9\text{ m}^{-1}$  的液晶透镜,可以实现对焦范围包含  $10 \sim 100\text{ cm}$ , 缩放比为  $6.5 : 1$  的电控光学缩放系统。

参 考 文 献:

[1] Ren H, Wu S T. *Introduction to Adaptive Lenses* [M]. John Wiley & Sons, 2012.

[2] Lin H C, Chen M S, Lin Y H. A review of electrically tunable focusing liquid crystal lenses [J]. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2011, 12(6): 234-240.

[3] Lin Y H, Chen M S, Lin H C. An electrically tunable optical zoom system using two composite liquid crystal lenses with a large zoom ratio [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5):4714-4721.

[4] Chen M S, Chen P J, Chen M, et al. An electrically tunable optical image system using composite liquid crystal lenses within separable focus and zoom functions [J]. *Optics Express*, 2014, 22(10):11427-11435.

[5] Lin H C, Lin Y H. An electrically tunable focusing pico projector [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49:102502.

[6] Lin Y H, Chen M S. A pico projection system with electrically tunable optical zoom ratio adopting two liquid crystal lenses [J]. *Journal of Display Technology*, 2012, 8(7):401-404.

[7] Lin H C, Collings N, Chen M S, et al. A holographic projection system with an electrically tuning and continuously adjustable optical zoom [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25):27222-27229.

[8] Chen M S, Collings N, Lin H C, et al. A holographic projection system with an electrically adjustable optical zoom and a fixed location of zeroth-order diffraction [J]. *Journal of Display Technology*, 2014 (6):450-455.

[9] Chen H S, Lin Y H. An endoscopic system adopting a liquid crystal lens with an electrically tunable depth-of-field [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15):18079-18088.

[10] Tremblay E J, Stamenov I, Beer R D, et al. Switchable telescopic contact lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (13):15980-15986.

[11] Peng R, Chen J, Zhuang S. Electrowetting-actuated zoom lens with spherical-interface liquid lens [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2008, 25(11):2644-2650.

[12] Lee S, Choi M, Jung K D, et al. Zoom lens design liquid using liquid lens for laparoscope [J]. *Optics Express*,

2013, 21(2):1751-1761.

[13] Xu S, Ren H, Wu S T. Dielectrophoretically tunable optofluidic devices [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(48):483001.

[14] Seidl K, Knobbe J, Gru G H. Design of an all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21):4097-4107.

[15] Tam E C. Smart electro-optical zoom lens [J]. *Optics Letter*, 1992, 17(5):4097-4107.

[16] Ye M, Noguchi M, Wang B, *et al.* Zoom lens system without moving elements realized using liquid crystal lenses [J]. *Electronics Letter*, 2009, 45(12):646-648.

[17] Lin Y H, Chen H S. Electrically tunable-focusing and polarizer-free liquid crystal lenses for ophthalmic applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8):9428-9436.

**作者介绍:**陈明璿(1988—), 男, 台湾台北人, 硕士, 博士生, 主要从事液晶物理与相关应用开发的研究。

陈柏儒(1990—), 男, 台湾台中人, 硕士, 研究助理员, 主要从事液晶物理与相关应用开发的研究。

林怡欣(1976—), 女, 台湾桃园人, 博士, 副教授, 主要从事液晶物理与相关应用开发的研究。E-mail:yilin@mail.nctu.edu.tw