

文章编号:1007-2780(2020)07-0741-08

液晶偏振变焦透镜组合设计

魏如东^{1,2}, 穆全全^{1*}, 王启东¹, 陈 万^{1,2}, 赵志伟^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:具有可变焦能力的透镜在成像、传感和检测等领域扮演着重要角色。本文通过研究液晶偏振透镜的光学特性,设计出多点变焦的液晶偏振透镜变焦系统。液晶偏振透镜是一种利用液晶分子指向矢(光学各向异性轴)特定的空间排列,产生特定几何相位差从而达到波前控制效果的光学器件,对于左/右旋圆偏振光分别表现为正/负透镜效果。利用液晶偏振透镜的偏振特性及液晶分子受电场调制的性质,本文设计出由一片普通正透镜、一片可调谐液晶波片和两片液晶偏振透镜组成的液晶偏振变焦透镜组合,在特定的偏振入射光下,可以实现 7 个焦距的改变。同时,通过优化透镜焦距、间隔等参数,可以使变焦透镜组合实现等间隔变焦等功能。实验结果显示,在 633 nm 圆偏振光下,利用自主制备的液晶偏振透镜组成的液晶偏振变焦透镜组合系统成功实现了 7 个焦距的变焦功能,同时变焦距离基本符合预期且部分焦距(前 6 个)实现了等间隔分布,充分验证了利用液晶偏振透镜实现多点变焦的可行性。

关键词:液晶; 偏振透镜; 变焦

中图分类号:O753⁺.2; TP211⁺.6 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203507.0741

Design of liquid crystal polarization zoom lens

WEI Ru-dong^{1,2}, MU Quan-quan^{1*}, WANG Qi-dong¹, CHEN Wan^{1,2}, ZHAO zhi-wei^{1,2}(1. *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)*

Abstract: Lens with tunable focal length play an important roles in imaging, sensing and detection. In this paper, by studying the polarization characteristics of liquid crystal polarization lenses (LCPL), a zoom system that realizes multi-point zoom through a combination of multiple LCPL is designed. LCPL is an optical element that utilizes a specific spatial arrangement of liquid crystal molecular directors (Optical anisotropy axes) to produce a specific geometric phase difference to control wavefront. For left/right circularly polarized light, LCPL is equivalent to a positive/negative lens. By using the polarization characteristics of LCPL and the electro-optic characteristics of liquid crystal, a liquid crystal polarization zoom lens system consisting of a common positive lens, a liquid crystal wave plate and

收稿日期:2019-12-03; **修订日期:**2020-02-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.11604327, No.11174274, No.61475152, No.11174279, No.61377032, No.61205021, No.61378075, No.11204299, No.61405194)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.11604327, No.11174274, No.61475152, No.11174279, No.61377032, No.61205021, No.61378075, No.11204299, No.61405194)

* 通信联系人, E-mail: muquanquan@ciomp.ac

two LCPLs is designed. The system can achieve zooming of 7 focal lengths under circularly polarized incident light. At the same time, by optimizing the parameters of the LCPLs (such as focal length, spacing, *etc.*), the system can achieve effects such as equal interval zoom. The experimental results show that under the 633 nm circularly polarized light, the liquid crystal polarization zoom lens combining system (composed of a self-made LCPL) successfully realizes zooming of 7 focal lengths, and the zooming distance meets the expected requirements essentially. This experiment fully verified the feasibility of multi-point zoom in LCPLs system.

Key words: liquid crystal; polarization lenses; zoom

1 引言

透镜广泛应用于日常生活和科研工作中,是基础的光学器件之一。光在介质和空气中传播速度不同,传统的光学透镜利用该性质,控制光学材料的形状,通过光从不同路径造成的光程差来调制波前,实现光束偏折的效果。液晶是一种介于固态和液态之间的中间态,同时具有液体的流动性和晶体的各向异性^[1]。液晶分子会受到外界电场的调制作用,因此与固态透镜相比,液晶透镜^[2-7]可以根据使用需求,利用外界电场进行光学特性的调节。液晶偏振透镜是一种几何相位光学元件,它通过调制光学波前的几何相位差^[8-11],实现对偏振光束的聚焦控制。几何相位光学器件因该特性又被称为第四代光学器件^[12],具有体积小、重量轻、制作成本低、集成度高等优势,在 3 维显示、VR/AR^[13-15]等领域具有重要的应用潜力。

本文首先介绍了液晶偏振透镜光波调控光学原理及其光学偏振特性和电光特性,然后基于多级液晶偏振透镜组合设计并通过实验验证了其变焦光学性能,最后总结并指出该设计的改进方向

和未来应用场景。

2 理论设计

2.1 液晶偏振透镜原理和光学特性

液晶是一种双折射材料,液晶偏振透镜中不同位置的液晶分子指向矢排列如图 1 所示,在空间中长轴不断变化,因此,等效为在空间规则排布的一系列相位延迟单元,可以用波片理论,采用琼斯矩阵来分析其光调制特性。

如图 2 所示,相位差为 δ ,快轴与 x 轴成 θ 角的波片的琼斯矩阵^[16]为:

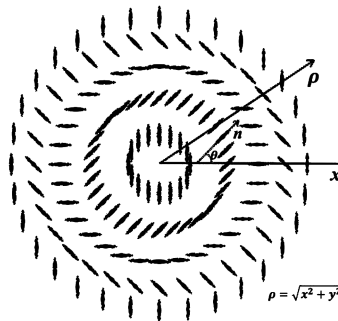


图 1 液晶偏振透镜中液晶取向示意图

Fig.1 Schematic diagram of liquid crystal molecular orientation in LPCL

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ -i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

将 $\sin 2\theta$ 和 $\cos 2\theta$ 分别改写成 $\frac{1}{2i}(e^{i2\theta} - e^{-i2\theta})$ 和 $\frac{1}{2}(e^{i2\theta} + e^{-i2\theta})$, 则式 (1) 可以改写为:

$$\mathbf{G} = \cos \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - i \sin \frac{\delta}{2} \left(\frac{1}{2} e^{i2\theta} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & -1 \end{bmatrix} + \frac{1}{2} e^{-i2\theta} \begin{bmatrix} 1 & i \\ i & -1 \end{bmatrix} \right), \quad (2)$$

若入射光为 $\mathbf{E}_{in}$, 出射光为 $\mathbf{E}_{out}$ 。则有^[17]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{out} = & \mathbf{G} \mathbf{E}_{in} = \cos \frac{\delta}{2} \mathbf{E}_{in} - \\ & i \sin \frac{\delta}{2} \left(\frac{1}{2} \langle \mathbf{E}_{in} | \mathbf{L} \rangle e^{i2\theta} | \mathbf{R} \rangle + \right. \\ & \left. \frac{1}{2} \langle \mathbf{E}_{in} | \mathbf{R} \rangle e^{-i2\theta} | \mathbf{L} \rangle \right), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $|\mathbf{R}\rangle$ 和 $|\mathbf{L}\rangle$ 分别表示右旋和左旋圆偏振光, $\langle \mathbf{E}_{in} | \mathbf{R} \rangle$ 和 $\langle \mathbf{E}_{in} | \mathbf{L} \rangle$ 分别表示入射光右旋和左旋圆偏振光的分量。由式(3)可知,对于入射光的左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,通过波片后,其分别附加了相位因子 $e^{i2\theta}$ 和 $e^{-i2\theta}$, 并且圆偏振态方向发生反转。如图2所示,在液晶偏振透镜中,液晶分子的指向矢 n 与 x 轴的夹角 $\theta = \frac{\pi \rho^2}{2\lambda f}$ ($\rho^2 = x^2 + y^2$), 此时附加相位因子 $e^{\pm i2\theta} = e^{\pm i \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\rho^2}{2f}}$, 液晶器件就表现为焦距为 $\pm f$ 的透镜效果。

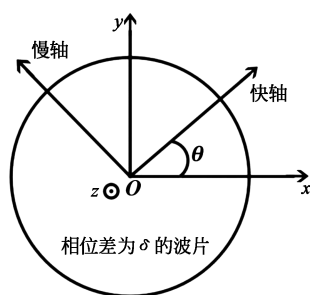


图2 波片琼斯矩阵的推导

Fig.2 Derivation of Jones matrix of wave plate

液晶偏振透镜中液晶分子的指向矢排列可以利用光控取向膜,通过干涉曝光的方式实现。原理如图3所示,利用一束球面波和一束平面波进行共轴干涉,两束光的偏振态分别为左右旋圆偏振态,所形成的干涉场即为如图2所示的空间线偏振态分布^[18-19],利用该光场辐照的光控取向膜即可对液晶分子产生图2所示的定向排列诱导,从而实现偏振透镜效果。

由式(3)可知,入射光经过液晶偏振透镜将被分为3束:0级透射光和 ± 1 级发散或会聚光,其衍射效率分别^[20-21]为:

$$\eta_0 = \cos^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda}, \quad (4)$$

$$\eta_{\pm 1} = \frac{(1 \mp S_3)}{2} \sin^2 \frac{\pi \Delta n d}{\lambda}, \quad (5)$$

其中 S_3 为归一化的斯托克斯参数,表征入射光偏

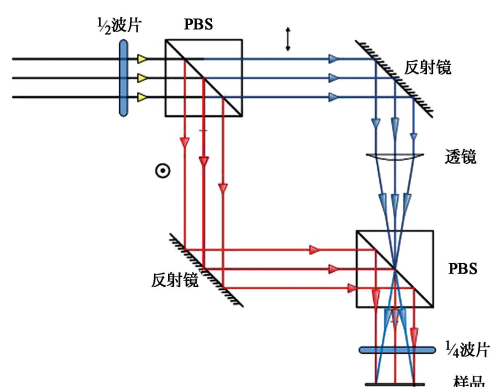


图3 液晶偏振透镜干涉曝光光路

Fig.3 Interference exposure optical set-up of LCPL

振形态。由上式可以发现,当光延迟 $\Delta n d$ 满足半波条件 ($\Delta n d = (m + 1/2)\lambda$) 时,有 $\eta_0 = 0$ 。特别地,当入射光为右旋或左旋圆偏振光时(如图4所示),器件将只有+1级或-1级衍射光,且衍射效率理论上可达到100%。

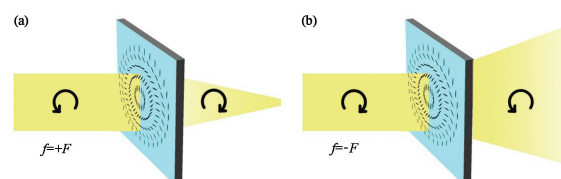


图4 不同偏振光下液晶偏振透镜的作用效果图

Fig.4 Optical effect of LCPL under different polarized light

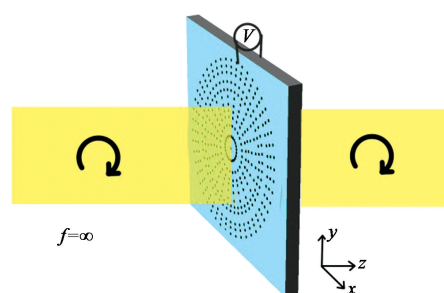


图5 电场作用下液晶偏振透镜光学效果

Fig.5 Optical effect of LCPL under electric field

利用液晶材料的电调谐特性,我们还可以通过加电使得液晶分子垂直于玻璃基板排列,如图5所示。此时,在 xy 平面内液晶将失去各向异性空间分布,即液晶偏振透镜结构消失,展现为焦距 $f = \infty$ 的平板器件。据此,即可以通过偏振控制和电场调谐共同作用,利用液晶偏振透镜器件实

现多焦点间的动态调谐。

为了实现对更多焦点的动态调谐,可以将多片液晶偏振透镜级联组合,如图 6 所示。若将 n 片液晶偏振透镜级联,理论上可以有 2^n 个焦点位置,这样就大大增加了变焦数目。

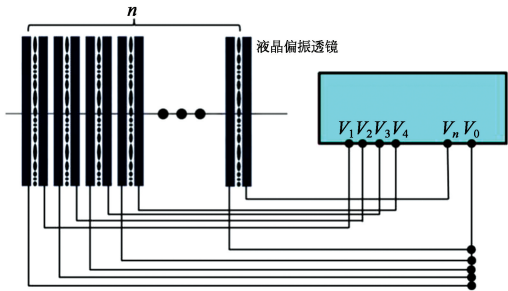


图 6 液晶偏振透镜串联变焦结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of liquid crystal polarizing

2.2 液晶偏振变焦组合设计

据此,本文设计了一种基于液晶偏振透镜的多焦点变焦光学系统,如图 7 所示。该结构主要由一片普通正透镜、一片可调液晶波片和两片液晶偏振透镜组成,其中液晶波片和液晶偏振透镜外接电极,可由外加电场调控。该变焦透镜组合在圆偏振光下工作。液晶波片的作用是控制入射光圆偏振态的旋转方向。在最前端放置正透镜的作用是保证变焦透镜组所有的焦距都为正焦距。整个液晶变焦组合理论上具有 $2^3 = 8$ 个焦距的变焦能力,但实际上当液晶偏振透镜都处于焦距 ∞ 时,液晶波片对透镜组焦距失去了变焦能力,所以最终该液晶偏振变焦透镜组的变焦数目为 7 个。

液晶偏振透镜本质是一层极薄的液晶层,因此可以在透镜组合焦距的计算中视为薄透镜(在最前端放置的正透镜也不妨视为薄透镜)。理想光组组合焦距计算方法一般有光焦度公式、

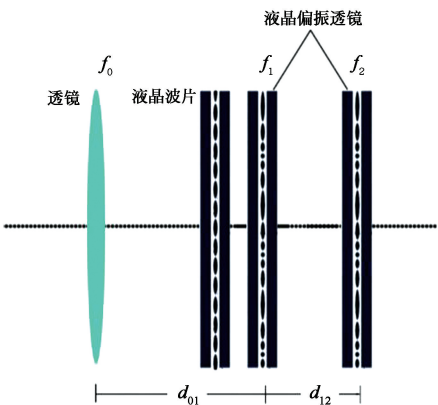


图 7 液晶偏振变焦透镜组结构示意图

Fig.7 Structure diagram of liquid crystal polarization zoom lens

正切法和截距法等^[22],本次设计是 3 个透镜组合,光组数目较少,因此可以采用光焦度公式进行计算。

双光组组合的光焦度公式为:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d_{01}\varphi_1\varphi_2 \quad , \quad (6)$$

那么,可以推出 3 光组组合的光焦度公式为:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 - d_{01}\varphi_0(\varphi_1 + \varphi_2) - d_{12}\varphi_2(\varphi_0 + \varphi_1) + d_{01}d_{12}\varphi_0\varphi_1\varphi_2 \quad , \quad (7)$$

式(7)中, φ_0 、 φ_1 和 φ_2 分别是 3 个光组的光焦度, d_{01} 和 d_{12} 分别是 3 个光组的空间间隔。这些参数要和图 7 中的对应起来。

利用式(7)即可算出图 7 透镜组所有焦距大小,得到表 1。其中 φ_{xxx} 中 x 为液晶透镜或液晶偏振透镜的两种状态,液晶波片为半波片或液晶偏振透镜焦距为 F 用 1 表示,液晶波片为全波片或液晶偏振透镜焦距为 ∞ 用 0 表示,从左到右依次为液晶波片、第一片液晶偏振透镜、第二片液晶偏振透镜。可以使 φ_0 比 φ_1 和 φ_2 较大些,使得 7 个焦距全为正焦距。

表 1 变焦系统 7 个焦距的计算公式

Tab.1 Formula for calculating 7 focal lengths of the zoom system

$\varphi_{000} = \varphi_{100} = \varphi_0$	$(\varphi_0 = 1/f_0, \varphi_1 = 1/f_1, \varphi_2 = 1/f_2)$
$\varphi_{010} = \varphi_0 + \varphi_1 - d_{01}\varphi_0\varphi_1$	$\varphi_{110} = \varphi_0 - \varphi_1 + d_{01}\varphi_0\varphi_1$
$\varphi_{001} = \varphi_0 + \varphi_2 - (d_{01} + d_{12})\varphi_0\varphi_2$	$\varphi_{101} = \varphi_0 - \varphi_2 + (d_{01} + d_{12})\varphi_0\varphi_2$
$\varphi_{011} = \varphi_0 + \varphi_1 - \varphi_2 - d_{01}\varphi_0(\varphi_1 - \varphi_2) + d_{12}\varphi_2(\varphi_0 + \varphi_1) - d_{01}d_{12}\varphi_0\varphi_1\varphi_2$	
$\varphi_{111} = \varphi_0 - \varphi_1 + \varphi_2 + d_{01}\varphi_0(\varphi_1 - \varphi_2) - d_{12}\varphi_2(\varphi_0 - \varphi_1) - d_{01}d_{12}\varphi_0\varphi_1\varphi_2$	

通常情况下,7个焦距的分布都是疏密不均的,但是可以通过优化参数 f_0 、 f_1 、 f_2 、 d_{01} 、 d_{12} 实现全部焦距或部分焦距均匀分布。为方便后续实验验证,在限定参数 f 和 d 的范围($100\text{ mm} < f < 200\text{ mm}$, $5\text{ mm} < d < 10\text{ mm}$)后,通过MATLAB计算,得到图7所示变焦系统的一种具体的设计方案,其参数数值由图8给出。图8中,纵坐标为变焦系统后焦点与系统最后一块偏振透镜的距离,7个坐标由小到大依次排列。同时对前6个焦点距离进行线性拟合,其相关度为0.90,那么可以将前6个焦点视为等间隔分布。

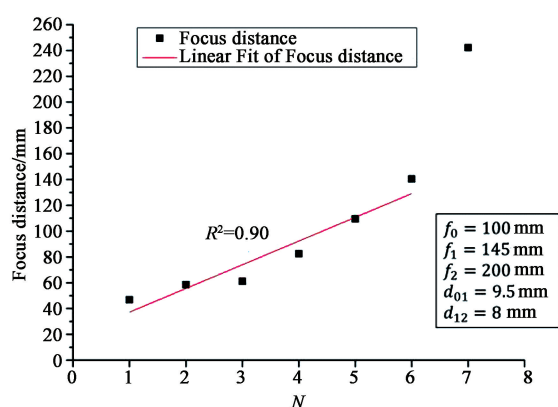


图8 LCPL变焦系统点距离分布图

Fig.8 Focus distance distribution of LCPL zoom system

3 实验结果与讨论

3.1 液晶偏振透镜的制备

液晶偏振透镜的制备采用的是如图3所示的马赫增德尔干涉光路,实物图如图9所示。325 nm紫外激光经过小孔滤波后,被准直透镜准直,然后通过PBS(偏振分光棱镜)被分成一束S光和一束P光。两束光分别经过反射镜反射后到达同一个PBS,实现双光束的叠加。其中在一光路上放置透镜,使得平面波变为球面波。在第一个PBS之前放置一个1/2波片,来调整激光的线偏方向间接调整两束光的分光比值。在后一个PBS前放置一个1/4波片将两束正交的线偏振光转换成两束正交的圆偏振光。不同相位差的左旋和右旋圆偏振光叠加而成的线偏振光的偏振方向是不同的,右旋圆偏振态的平面波和左旋圆偏振态的球面波干涉叠加后会得到特定空间分布的线偏振

光场(图2)。将ITO基板上旋涂有光控取向膜(ROP)的玻璃基片制成的空液晶盒放置于光场中进行曝光,即可将这种空间偏振分布“记录”在取向膜中。曝光时间为8 min,液晶盒层厚为5 μm 。曝光结束后,将液晶空盒放在120 $^{\circ}\text{C}$ 的加热平台上,注入向列相液晶5811,其双折射率 $\Delta n = 0.165(589\text{ nm}, 20\text{ }^{\circ}\text{C})$,即完成液晶偏振透镜的制备。图10给出了液晶偏振透镜在偏振光显微镜下的形貌图,一明一暗的圆环条纹表示液晶分子的方位角沿着径向方向连续旋转了180 $^{\circ}$,与图2相对应。

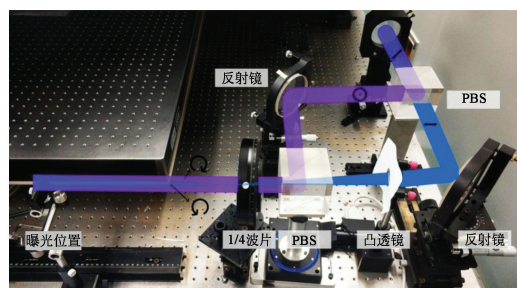


图9 液晶偏振透镜制备光路图

Fig.9 Photograph of exposed optical structure of LCPL

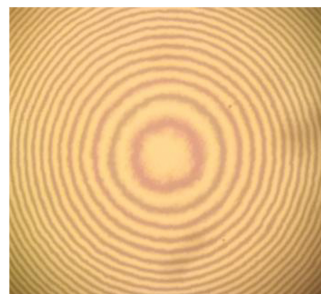


图10 偏振光显微镜下LCPL形貌图

Fig.10 LCPL morphology observed by polarized optic microscope

液晶偏振透镜的焦距与使用波长有关,关系为: $F = \frac{\lambda_0}{\lambda} z_0$ (F 、 λ 分别为使用焦距和波长, λ_0 为曝光波长, z_0 为从凸透镜后焦点起球面波的传播距离)。即通过控制曝光位置 z_0 ,就可以控制液晶偏振透镜的焦距。同时还需要调节1/2波片控制两束光的能量比,使得在曝光位置两束相干光的光强尽量一致,这样干涉光场才能是线偏振态或者椭圆度极小的椭圆偏振态。本次实验制作了一系列不同焦距液晶偏振透镜,在532 nm波长

光源下,焦距在 100~200 mm 范围内。图 11 为在 532 nm 波长圆偏振光下,液晶偏振透镜的外接电压与 0 级和 +1 级透射光的关系曲线。可以发现当外界电压为 5.3 V 左右时,0 级透射光最弱,+1 级衍射光最强。由式(4)可知,此时液晶层有效厚度应该满足半波条件: $\Delta nd = (m + 1/2)\lambda$,经计算,液晶偏振透镜 1 级的衍射效率达 96% 以上。

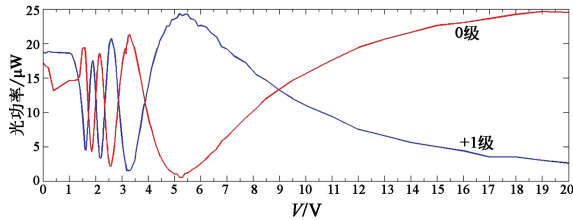


图 11 532 nm 圆偏振光下,液晶偏振透镜的电光特性曲线。

Fig.11 Electro-optic characteristic curves of LCPL under 532 nm circularly polarized light

3.2 液晶偏振变焦透镜组成像实验

为了验证图 8 液晶偏振透镜组合设计的可行性,利用液晶偏振透镜搭建了图 12 的成像系统。系统中光源采用的是波长 633 nm 的右旋圆偏振光,成像目标是一个透射式的分辨率板。光线从分辨率板发射出去,透过液晶偏振变焦透镜组变成平行光,传播一段距离后,通过一个成像透镜 L_1 ($f_1 = 40$ mm),汇聚到相机(相机位于成像透镜 L_1 的后焦距处)上,相机将会采集到分辨率板的清晰图像。液晶偏振变焦透镜组按照图 7 所示搭建,其中参数按照图 8 中的设计方案进行设置:普通透镜 L_0 的焦距为 100 mm,在 633 nm 波长光源下,两片液晶偏振透镜 L_1 和 L_2 的焦距 f_1 和 f_2

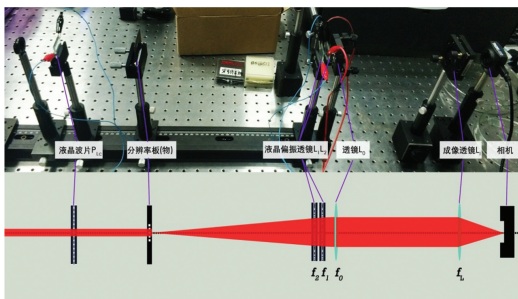


图 12 液晶偏振变焦透镜组成像实验光路图

Fig.12 Photograph of optical structure of liquid crystal polarization zoom lens imaging experiment

分别为 143 mm 和 196 mm(原设计 f_1 和 f_2 分别为 145 mm 和 200 mm,在实际制备液晶偏振透镜时难免有些偏差),有效口径皆为 18 mm,透镜之间间距 $d_{01} = 9.5$ mm, $d_{12} = 8$ mm,相机放置在成像透镜 L_1 的后焦面上。液晶波片 P_{LC} 的作用是仅改变光线的偏振态,只要放在液晶偏振透镜前即可,在本实验中,为了方便操作,把液晶波片放在了系统最前方。两个液晶偏振透镜和液晶波片外接电压,系统的变焦功能全部由 3 组电信号控制。利用液晶分子受电场调制的特性,通过电压控制液晶偏振透镜在焦距和 F 之间切换,或者控制液晶波片,使入射光在左旋圆偏振态和右旋圆偏振态之间切换。

由式(7)可知,这种液晶偏振变焦透镜组合共

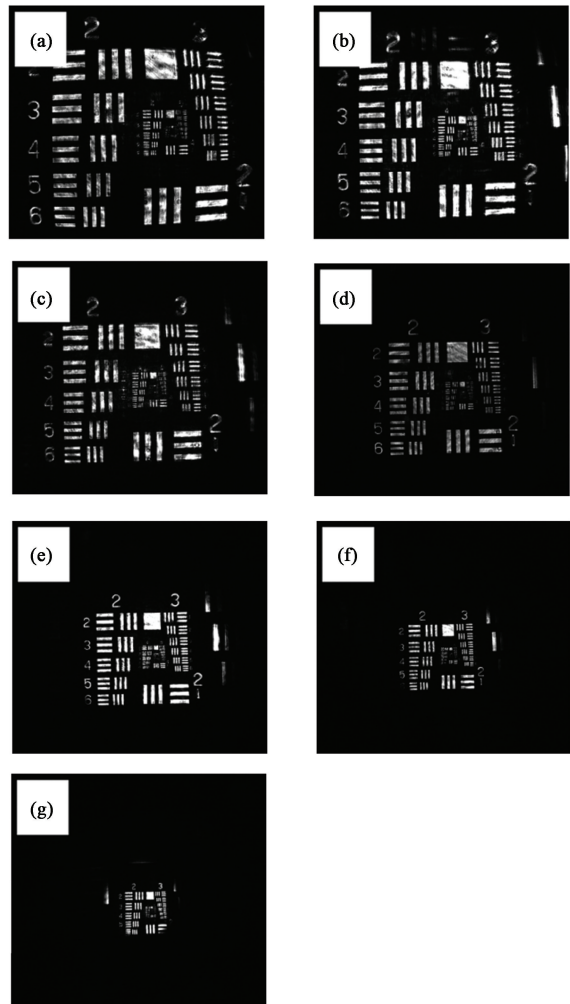


图 13 分辨率板在液晶偏振变焦透镜组不同焦距时的清晰成像图

Fig.13 Image of resolution plate at different focal lengths of liquid crystal polarization zoom lens

有7种焦距的选择,施加不同焦距的电信号,同时不断前后移动分辨率板,找到清晰的成像位置,得到图13(a)~(g),该位置也是液晶偏振变焦透镜组的前焦距处。图13(a)~(g)按照分辨率板成像的位置从右到左依次排列,其与液晶偏振透镜 L_2 距离分别为48.3, 59.4, 64.8, 83.8, 108.5, 145.3, 237.5 mm。显然随着成像位置距离的增大,也意味着液晶偏振变焦透镜组的焦距增大,横向放大率变小,图像也越来越小。实际观察中,图13(a)~(g)的亮度是越来越暗的,但是由于相机的动态范围有限,为了防止图像过曝,也为了使图像更清晰,图13(a)~(g)各幅图的曝光时间有所调整,所以各图的亮度大致相当,同时由于光源相干性较强,图像上出现许多干涉花纹。

图14给出了液晶偏振变焦成像系统的成像距离分布图,其中计算值是由实际的参数(f_0 、 f_1 、 f_2 、 d_{01} 、 d_{12})计算而来。由图14可以看出,成像距离的测量值和理论计算值基本完全一致,相

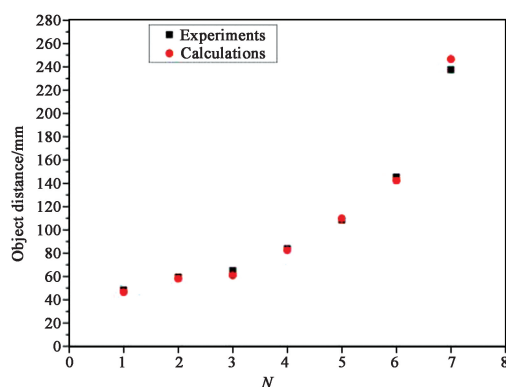


图14 成像距离分布图

Fig.14 Profile of imaging distance

对误差皆小于4%,除第7个焦点外,绝对误差小于3 mm。考虑到人为测量误差的影响:包括距离的测量、景深对焦点位置的影响等,该图基本有效证明了利用光焦度方法计算的正确性。据此,本次液晶偏振变焦透镜组成像实验,成功实现了电控调谐多点变焦的功能,同时实验数据也基本与理论计算结果相符,充分证明了利用液晶偏振透镜实现多点变焦功能的可行性。

4 总 结

本文主要针对利用液晶偏振透镜组实现多点变焦展开研究工作。首先分析了液晶偏振透镜的光学特性和电光特性,利用该特性可以控制入射光的偏振态和外界电压,使液晶偏振透镜的焦距能在 $\pm F$ 和 ∞ 之间切换,然后创新性提出串联多个液晶偏振透镜,并通过合理的优化透镜间距、焦距等参数,可以实现特定变焦效果(等间隔变焦)。同时,还给出了一个具体的液晶偏振变焦透镜组的结构设计可以实现7个位置的变焦效果。最后通过实验对该透镜组合进行测试,实验结果基本符合预期,7个变焦位置都可以有效实现,而且前6位变焦位置基本满足等间隔分布,证明了通过优化参数实现变焦位置特定化分布的可行性。通过进一步增加组合透镜的数量还可以使其变焦数目增多。液晶偏振透镜极薄、利于集成化的性质,使得液晶偏振变焦透镜组合在未来应用于AR、VR等高度集成化的设备中具有潜在的优势。当然,针对光学成像应用,液晶偏振透镜的其他性能仍然有待进一步研究与优化。

参 考 文 献:

- [1] 黄子强.液晶显示原理[M].北京:国防工业出版社,2006.
HUANG Z Q.Principle of Liquid Crystal Display [M]. Beijing: National Defend Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [2] LIN Y H, WANG Y J, RESHETNYAK V. Liquid crystal lenses with tunable focal length [J]. *Liquid Crystals Reviews*, 2017, 5(2): 111-143.
- [3] 王骁乾,沈冬,郑致刚,等.液晶光控取向技术进展[J].液晶与显示,2015,30(5):737-751.
WANG X Q, SHEN D, ZHENG Z G, et al. Review on liquid crystal photoalignment technologies [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)
- [4] WANG X Q, TAM A M W, JIA S Z, et al. Low-voltage-driven smart glass based on micro-patterned liquid crystal Fresnel lenses [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 1146-1151.
- [5] SRIVASTAVA A K, WANG X Q, GONG S Q, et al. Micro-patterned photo-aligned ferroelectric liquid crystal

- Fresnel zone lens [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1643-1646.
- [6] WANG X Q, YANG W Q, LIU Z, *et al.* Switchable Fresnel lens based on hybrid photo-aligned dual frequency nematic liquid crystal [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 8-15.
- [7] TABIRYAN N V, SERAK S V, ROBERTS D E, *et al.* Thin waveplate lenses of switchable focal length-new generation in optics [J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25783-25794.
- [8] PANCHARATNAM S. Generalized theory of interference, and its applications: Part I. Coherent pencils [J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*, 1956, 44(5): 247-262.
- [9] BERRY M V. The adiabatic phase and Pancharatnam's phase for polarized light [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(11): 1401-1407.
- [10] GUTIÉRREZ-VEGA J C. Pancharatnam-Berry phase of optical systems [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1143-1145.
- [11] BOMZON Z, BIENER G, KLEINER V, *et al.* Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1141-1143.
- [12] TABIRYAN N, ROBERTS D, SERABYN E, *et al.* Superlens in the skies: liquid-crystal-polymer technology for telescopes [EB/OL]. (2016-02-05) [2019-07-05]. <https://spie.org/news/6317-superlens-in-the-skies-liquid-crystal-polymer-technology-for-telescopes>.
- [13] LEE Y H, TAN G J, ZHAN T, *et al.* Recent progress in Pancharatnam-Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities [J]. *Optical Data Processing and Storage*, 2017, 3(1): 79-88.
- [14] JAMALI A, BRYANT D, ZHANG Y L, *et al.* Design investigation of tunable liquid crystal lens for virtual reality displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1057-1060.
- [15] LU L, PENG F L, WANG M F, *et al.* Liquid crystal technology for solving key optical challenges in virtual and augmented realities [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 826-829.
- [16] 沈常宇, 金尚忠. 光学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- SHEN C Y, JIN S Z. *Principles of Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [17] GAO K, MCGINTY C, PAYSON H, *et al.* High-efficiency large-angle Pancharatnam phase deflector based on dual-twist design [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6283-6293.
- [18] CINCOTTI G. Design of geometric phase holograms with arbitrary polarization states and waveforms [C]//*Proceedings of the 2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks*. Girona, Spain: IEEE, 2017.
- [19] KIM J. *Liquid crystal geometric phase holograms for efficient beam steering and imaging spectropolarimetry* [D]. Raleigh, North Carolina: North Carolina State University, 2011.
- [20] NIKOLOVA L, TODOROV T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1984, 31(5): 579-588.
- [21] TERVO J, TURUNEN J. Paraxial-domain diffractive elements with 100% efficiency based on polarization gratings [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 785-786.
- [22] 石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.
- SHI S X, ZHANG H X, LIU J S. *Physical Optics and Wave Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2000. (in Chinese)

作者简介:



魏如东(1995—),男,山东聊城人,硕士研究生,2017年于山东大学(威海)获得学士学位,主要从事液晶偏振透镜制备的研究。E-mail: weirudong17@mails.ucas.ac.cn



穆全全(1980—),男,山西吕梁人,博士,研究员,2010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,主要从事液晶光学调控技术、自适应光学技术和智能光学成像等领域的研究。E-mail: muquanquan@ciomp.ac