文章编号:1002-2082(2010)03-0376-05

基于纯位相液晶空间光调制器的可变焦透镜的实现

林培秋，应朝福，徐展斌，庞 辉，楼 帆
(浙江师范大学 信息光学研究所，浙江 金华 321004)

摘 要：提出一种基于纯位相液晶空间光调制器（LC-SLM）实现变焦透镜的方法。根据液晶空间光调制器的位相调制原理，以相息图控制LC-SLM来调制入射光波，并衍射产生透镜波面，改变相息图的衍射距离，可实现变焦位相菲涅耳透镜的功能。分析衍射孔径、衍射距离、相息图位相阶数等参数对变焦位相菲涅耳透镜的影响，并以点光源相息图为例对该方法的可行性进行了实验验证。实验结果表明：通过改变计算衍射距离，提出的方法可得到焦距不同的透镜，且易于控制，为三维扫描显示的实现提供了可行性依据。

关键词：液晶空间光调制器；位相菲涅耳透镜；变焦透镜；相息图
中图分类号：TN942.2 **文献标志码**：A

Implementation of controllable zoom lens based on phase-only liquid crystal spatial light modulator

LIN Pei-qiu, YING Chao-fu, XU Zhan-bin, PANG Hui, LOU Fang
(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal Universty, Jinhua 321004, China)

Abstract: We present a method for zoom lens based on reflective phase-only liquid crystal spatial light modulator (LC-SLM). According to the principle of the phase modulation of LC-SLM, incident light waves are controlled by Kinoform, which is writen to LC-SLM. The wavefront of lens is achieved with diffraction. Therefore, the variable focal-length phase Fresnel lens is achieved by changing diffraction distance of calculated Kinoform. Some parameters, such as the diffraction aperture, the diffraction distance and phase levels of Kinoform, are discussed. They are key factors to the variable focal-length phase Fresnel lens. Experimental results and the Kinoform of a point light are given. Compared to traditional methods, this method features controllability and accuracy. It will provide a feasible approach for realizing 3D scan display.

Key words: phase-only liquid crystal spatial light modulator; Fresnel lens; zoom lens; Kinoform

引言

迄今为止，许多变焦距光学系统可以通过机械部件进行调整，然而基于变焦透镜大小、价格、反应速度等因素的考虑，迫切需要一种能够改变传统透镜缺陷的新型光学变焦器件。变焦的方法除了在工艺上制备，电控自动变焦液体光学透镜[1-2]外，还可利用菲涅耳波带片来[3]实现。菲涅耳波带片是一种应用广泛的衍射光学组件，尤其是位相菲涅耳波带片，具有很高的聚焦衍射效率。目前，可采用二元光学[4]或镀膜等方法制作菲涅耳波带片。然而，这些

收稿日期：2009-10-29； **修回日期**：2010-01-15
基金项目：浙江省自然科学基金重点项目(Z1080030)
作者简介：林培秋(1985—)，女，浙江乐靖人，硕士研究生，主要从事信息光学、纯位相空间光调制器应用的研究工作。
通信作者：应朝福，E-mail：ying@zjnu.cn

方法制作工艺较复杂,且制成以后其参量不能改变,因而在某些需要可控处理的场合难以胜任。

相息图[5]是计算全息图的一种类型,它仅编码了物光波的位相信息,具有很高的衍射效率,是光波重构的理想元件。根据菲涅耳近似,在平行光的调制下,相息图衍射分布为原物光波分布[6],因此它在光信息处理和光学测量等方面具有重要的应用价值[7-8]。纯位相型液晶空间光调制器(Phase-only LC-SLM)[9-10]在主动控制下,输入灰阶(gray-scale)图控制液晶的折射率变化,进而调制入射光的位相。利用液晶空间光调制器显示相息图是目前唯一一种能实现实时显示计算全息的方法,因此可以较方便地显示相息图。

本文根据美国BNS公司的Model PF512反射型纯位相LC-SLM的位相调制原理[11],由计算机制取相息图[12-13],绘制出类似菲涅耳波带片透镜的环带结构。通过改变相息图的非均匀透过率分布,改变衍射光学元件的参数,实现变焦透镜的目的。

1　基于纯位相液晶空间光调制器实现变焦透镜理论分析

1.1　实现可变焦位相菲涅尔透镜

根据LC-SLM的位相调制原理[14-15],当对液晶施加外部电场时,液晶分子发生倾斜,使得异常光(非常光)的折射率发生变化,进而导致异常光在液晶层中的位相延迟量随外加电场的改变而改变,而外加电压信号的变化由灰度信息控制,进而各像素通过对照射其上的光波进行位相调制,达到光波位相改变的目的。本文实现变焦是通过控制LC-SLM来调制入射光波,并衍射产生透镜波面。以单像素亮点物点为例,计算其相息图,用平行光照射,在设计衍射距离处再现原物体。即LC-SLM将平行光转换成汇聚的光波,并在计算衍射距离处聚焦,其效果等效于透镜的汇聚作用。通过改变相息图衍射距离,实现可变焦位相菲涅耳透镜。

1.2　相息图的制作和再现

从物体上某样点(x_s,y_s,z_s)发出的漫射光均匀地照射在整个相息图上,相息图内的光振幅近似为常数,则此物点的物光波在相息图平面的复振幅分布为

$$Us(m,n)=\begin{bmatrix} U_{00} & U_{01} & \cdots & U_{0(n-1)} \\ U_{10} & U_{11} & \cdots & U_{1(n-1)} \\ & & \vdots & \\ U_{(m-1)0} & U_{(m-1)1} & \cdots & U_{(m-1)(n-1)} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中:$U_{mn}=O_S\exp(\mathrm{j}kr_{mn}+\varphi_S)$;$O_S$为物点光波的振幅;$\varphi_S$为物点光波的随机初位相;$k$为空间角频率;$r_{mn}$为物光点至相息图样点$(m,n)$的距离。所有物点的光波在相息图平面上的复振幅叠加后,其位相分布可表示为

$$\Phi(m,n)=\begin{bmatrix} \Phi_{00} & \Phi_{01} & \cdots & \Phi_{0(n-1)} \\ \Phi_{10} & \Phi_{11} & \cdots & \Phi_{1(n-1)} \\ & & \vdots & \\ \Phi_{(m-1)0} & \Phi_{(m-1)1} & \cdots & \Phi_{(m-1)(n-1)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

(2)式中将计算结果Φ_{mn}取模数2π的余数,然后把余数值的位相量化为H个等级,即H级灰度。由此制成相息图,可表示成:

$$h(m,n)=\begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & \cdots & h_{0(n-1)} \\ h_{10} & h_{11} & \cdots & h_{1(n-1)} \\ & & \vdots & \\ h_{(m-1)0} & h_{(m-1)1} & \cdots & h_{(m-1)(n-1)} \end{bmatrix} \tag{3}$$

相息图的位相分布与物光波的复振幅分布有关,为了能够恢复原物光波信息,相息图的抽样必须满足抽样定理,即抽样频率必须大于光波频率的2倍。

对于一个点的球面波,设物点坐标为(x_{on},y_{on},z_{on}),在菲涅耳近似下,复振幅可以表示为

$$u_n(x,y)=Ca_n\exp\left\{\mathrm{j}\frac{k}{2z_{on}}[(x-x_{on})^2+(y-y_{on})^2]\right\} \tag{4}$$

任意一物点的复振幅空间频率可表达为

$$f_x=\frac{1}{2\pi}\frac{\partial\varphi}{\partial x}=\frac{1}{\lambda z_{on}}(x-x_{on})$$

$$f_y=\frac{1}{2\pi}\frac{\partial\varphi}{\partial y}=\frac{1}{\lambda z_{on}}(y-y_{on})$$

对于LC-SLM,X方向和Y方向的最大坐标分别是:$(N_xd_x)/2$和$(N_yd_y)/2$,则相息图的最高空间频率为

$$f_{x\max}=\frac{1}{2\lambda z_{on}}(N_{slm}d_{slm}),f_{y\max}=\frac{1}{2\lambda z_{on}}(N_{slm}d_{slm}) \tag{5}$$

根据抽样定理,相息图的抽样频率应该大于上述频率的2倍,因为对于基于LC-SLM显示相息图而言,抽样频率即是LC-SLM的像素间隔。所以

$$f_{\max}\leqslant\frac{1}{2d_{slm}}$$

或:

$$\frac{1}{2\lambda z_{on}}(N_{slm}d_{slm})\leqslant\frac{1}{2d_{slm}}$$

对于轴上物点,对物距的要求为

$$z_{on} \geqslant \frac{N_{slm} d_{slm}^2}{\lambda} \tag{6}$$

但是,因为相息图在一个周期内位相是从0～2π变化的,相息图的像素数必须能够较好地表达位相从0～2π的变化。也就是说,必须有足够的位相阶数反映0～2π的变化。在最高频率区域的一个周期内,假设位相阶数为M,则要求

$$f_{x\max} \leqslant \frac{1}{M d_{slm}}, f_{y\max} \leqslant \frac{1}{M d_{slm}}$$

也就是要求:

$$\frac{1}{2\lambda z_{on}}(N_{slm} d_{slm}) \leqslant \frac{1}{M d_{slm}} \tag{7}$$

$$z_{on} \geqslant \frac{M N_{slm} d_{slm}^2}{2\lambda} = \frac{L_{slm}}{2\lambda} M d_{slm} = z_{onc} \tag{8}$$

$L_{slm}=N_{slm}d_{slm}$是空间光调制器的通光孔径。z_{onc}实际上是物距的最小值,因为在这个平面上,只有轴上一个物点的光波才能满足LC-SLM的取样要求。我们知道,相息图的位相阶数取得越多,衍射效率就越高,点源的相息图就是我们通常所说的菲涅耳透镜。对于M阶K个波带的菲涅耳透镜,每个波带的位相周期为2π,根据菲涅耳波带理论,在其主轴的不同位置存在一系列的焦点,这一系列离散焦点的存在降低了$N=1$的主焦点的亮度及衍射效率。通过对主焦点$N=1$衍射效率计算,取3个位相台阶,衍射效率就可以达到80%以上[16]。考虑计算误差和LC-SLM的位相表达不一定理想等实际因素,实验表明取4个或5个位相台阶比较好,本文采用5个位相台阶。

2　实验结果

实验采用如图1所示光路,波长为632.8 nm的氦氖激光束经准直扩束后通过非偏振分束棱镜,以平行光入射到LC-SLM,LC-SLM的响应波长为635 nm,分辨率为512×512,通光孔径为7.68 mm×7.68 mm,像素间距为15.00 μm(该空间光调制器已附加起偏器P和检偏器A)。将相息图输入LC-SLM,当平行光光波入射到相息图上时,经过衍射形成原物光分布,得到的再现像被接收器(CCD)接收。

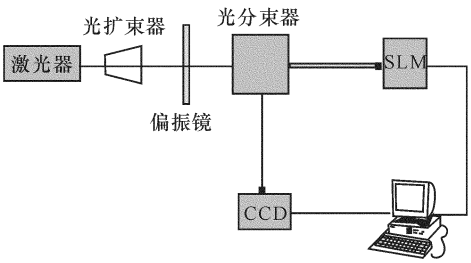
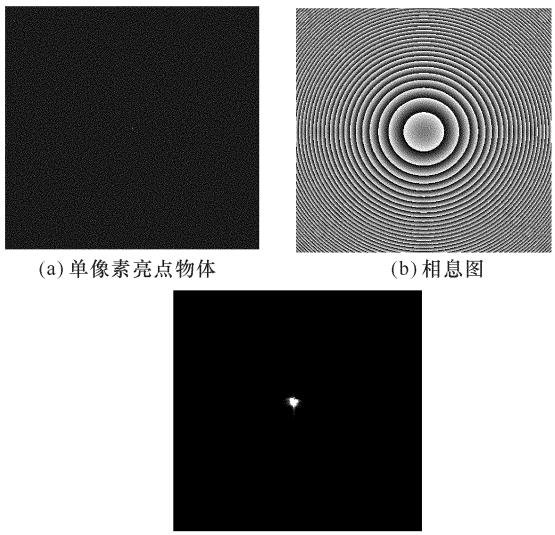


图1　实验光路

Fig. 1　Optical setup for experiment

如图2(a)所示,设物体仅在512×512像素的中心为单像素亮点。$N_{slm}=512$,LC-SLM通光孔径$L_{slm}=N_{slm}d_{slm}=7.68$ nm,像素间隔$d_{slm}=15$ μm,位相台阶$M=5$,根据公式(8)计算得到$z_{onc}=455$ mm,实际上是物距的最小值。实验中设计的衍射距离必须要大于455 mm。设定$z_{onc}=600$ mm,计算得到如图2(b)所示的相息图。采用图1所示光路,将图2(b)输入到LC-SLM,激光器扩束后形成的平行光经LC-SLM调制反射后被CCD接收。在相息图上计算衍射距离时CCD到纯位相LC-SLM距离600 mm,获得最清晰的亮点(零级衍射,下同),即点光源相息图的再现像,如图2(c)所示。



(a) 单像素亮点物体　　(b) 相息图

(c) $z=f$=600 mm时CCD接收的主焦点图像

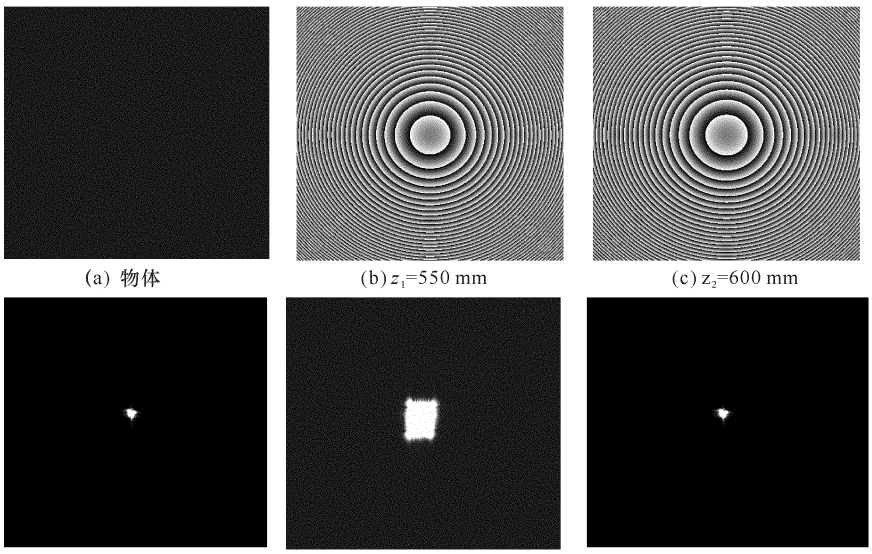
图2　单像素亮点的相息图及在焦面上的再现像

Fig. 2　Kinoform of single pixel object and the reconstruction of object on the focus

本实验中LC-SLM实现了平行光汇聚,并在600 mm处聚焦,其效果等效于透镜的汇聚作用。加载了相息图的LC-SLM相当于一个透镜,焦距为600 mm,即为计算相息图时设定的物体到相息图所在平面的衍射距离。改变计算衍射距离,就得到了焦距不同的新的透镜。通过改变相息图的计算衍射距离就改变透镜焦距,从而达到可变焦透镜的目的。

如图3(a)所示,计算相息图时物体到相息图的距离分别为$z_1=550$ mm和$z_2=600$ mm,其他参数相同的情况下计算得到的相息图,如图3(b)和3(c)所示。将图3(b)和3(c)分别输入LC-SLM,实验发现,在距离空间光调制器分别为550 mm和

600 mm 的地方可以看到一个亮点(见图 3(d)和图 3(f)),也就是说,LC-SLM 在该相息图的作用下实现了将平行光汇聚成一个亮点,即等效于一个焦距为设定的衍射距离,孔径大小为空间光调制器尺寸的透镜。如图 3(e)所示,设计距离 $z_2=600$ mm,实际接收距离 $R=550$ mm,由于接收平面没有位于焦平面上,故只能接收到一个光斑。从图 3 中可以看出,实验结果基本达到预想的效果,通过切换不同的相息图,可以方便地改变透镜的焦距,从而实现变焦的目的。



(a) 物体　(b) z_1=550 mm　(c) z_2=600 mm

(d) $R_1=z_1$=550 mm　(e) R=550 mm,z_2=600 mm　(f) $R_2=z_2$=550 mm

图 3　同一物体不同衍射距离计算得到的相息图及 CCD 在不同衍射距离处主焦点的光斑

Fig. 3　Kinoforms calculated with different diffraction distances, and the corresponding reconstuction images

实验中还发现,当衍射距离等于计算相息图设定的衍射距离时,焦面处再现的是一个亮点;由于全息图存在一定的孔径,因此孔径衍射引起成像光束不能聚成一个理想的点像,在像空间有了扩展量 $\varepsilon(z)$。扩展量 $\varepsilon(z)=2\sqrt{2}\lambda\cdot z/W_h$,其中 λ 为照明光波波长,W_k 为相息图的宽度。z 越大即衍射距离越远时,其焦面上的光斑向外扩张量越大。本文中只给出了部分聚焦面上的再现光斑,如图3(d)和图3(f)所示。当CCD 采集的光斑在离焦处,则光斑变大,如图3(e)所示,离焦程度越大,成像光斑越扩散。另外,由于LC-SLM 位相调制函数并非理想的线性关系,故位相调制的本质是引起介质折射率的改变,当介质折射率的控制不准确时将引起带内位相整体涨落,引起多焦现象[17]产生,造成再现像模糊。

4　结论

本文利用纯位相型液晶空间光调制器的位相调制特性,通过改变计算衍射距离来改变各像素点的位相,实现变焦透镜的目的。该方法具有可控、精度高等优点,可在一定程度上代替传统的机械控制式变焦透镜,并将在光通信、光计算、光互连等领域有广泛的应用前景。另外,如果将制作三维物体得到的相息图输入到液晶空间光调制器,当相息图按照一定的顺序快速切换时,利用视觉残留效应就可以实现三维物体的立体扫描和显示。

参考文献:

[1]　闰琪. 激光变焦透镜设计[J]. 激光杂志,1988,9(4):223-225.
RUN Qi. Laser zoom lens design [J]. Laser Magazine,1988,9(4):223-225. (in Chinese with an English abstract)

[2]　张微,张宏建,田维坚. 一种机械驱动式液体可变焦透镜的设计[J]. 应用光学,2008,29(1):59-62.
ZHANG Wei, ZHANG Hong-jian, TIAN Wei-jian. Design of mechanically-actuated variable focus liquid lens[J]. Journal of Applied Optics,2008,29(1):59-62. (in Chinese with an English abstract)

[3]　常蓝天,国承山. 基于液晶空间光调制器的程控变焦透镜[J]. 山东师范大学学报:自然科学版,2008,23(4):35-39.
CHANG Lan-tian, Guo Cheng-shan. Programmable zoom lenses based on liquid crystal spatial light modulators [J]. Journal of Shandong Normal University: Natural Science. 23(4): 35-39. (in Chinese with an English abstract)

[4]　顾德门. 傅里叶光学导论[M]. 詹达三,译. 北京:科学

出版社,1979.
GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. Translated by ZHAN Da-san. Beijing: Science Press, 1979.

[5] LESEM L B, HIRSCHAND P M, JORDAN J A, Jr. The kinoform: a new wavefront reconstruc-tion device[J]. IBM J. RES. Develop., 1969, 13(3): 150-154.

[6] 陈岩松,王玉堂,李秀英,等. 一种位相型再现元件——相息图[J]. 中国激光,1979,6(10):28-33.
CHEN Yan-song, WANG Yu-tang, LI Xiu-ying, et al. A wavefront reconstructing device-kinoform [J]. Chinese Journal of Lasers, 1979, 6(10): 28-33. (in Chinese with an English abstract)

[7] 曹召良,胡五生,胡立发,等. 液晶相息图用于光学检测[J]. 光子学报,2006,35(12):1941-1945.
CAO Zhao-liang, HU Wu-sheng, HU Li-fa, et al. Application of the liquid crystal kinoform for optical testing [J]. Ahotonica Sinica, 2006, 35 (12): 1941-1945. (in Chinese with an English abstract)

[8] 杨晓苹,翟宏琛,王明伟. 一种应用相息图对灰度图像信息进行隐藏的方法[J]. 物理学报,2008,57(2):847-852.
YANG Xiao-ping, ZHAI Hong-chen, WANG Ming-wei. Gray-image information hiding based on kinoform [J]. Physics, 2008, 57 (2): 847-852. (in Chinese with an English abstract)

[9] KONFORTI N, MAROM E, WU Sin-Tson. Phase-only modulation with Twisted Nematie liquid crystal spatial light modulation[J]. Opt. Lett., 1988, 13(3): 251-254.

[10] BROOMFIELD S E, NEIL M A A, PAIGE E G. Four-level phase-only spatial light modulator [J]. Eleetronies Letters, 1993, 29(18): 1661-1663.

[11] GOLDBERG K A, BOKOR J. Fourier-transform method of phase-shift determination [J]. Appl. Opt., 2001, 40(17): 2886-2894.

[12] 蔡晓鸥,王辉,李勇. 三维物体相息图的研制[J]. 中国激光, 2001, 28(2): 173-175.
CAI Xiao-ou, WANG Hui, LI Yong. Study on the kinoform of 3D object [J]. Chinese Journal of Lasers. 2001, 28 (2): 173-175. (in Chinese with an English abstract)

[13] 李勇,王辉,金洪震. 一种由全息图制作相息图的方法[J]. 激光与红外,2005,35(10):765-767.
LI Yong, WANG Hui, JIN Hong-zhen. A new approach for making kinoform from hologram [J]. Laser & Infrared, 2005, 35 (10): 765-767. (in Chinese with an English abstract)

[14] 张洪鑫,张健,吴丽莹. 泰曼-格林干涉仪测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. 中国激光,2008,35(9):1360-1365.
ZHANG Hong-xin, ZHANG Jian, WU Li-yin. Phase modulation of liquid crystal spatial light modulator measured by a Twyman-Green interferomete [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35 (9): 1360-1365. (in Chinese with an English abstract)

[15] 徐展斌,应朝福,林培秋,等. 纯位相液晶空间光调制器位相调制特性的优化[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,2009,32(2):194-198.
XU Zhan-bin, YING Chao-fu, LIN Pei-qiu, et al. Optimization of the phase modulated characters of phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Science Edition, 2009, 32(2): 194-198. (in Chinese with an English abstract)

[16] 李娜. 基于LCD的动态变焦透镜的研究[D]. 浙江:浙江大学,2006:41-42.
LI Na. Study of the dynamic zoom lens based on LCD[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006: 41-42. (in Chinese)

[17] 王辉,孟庆源. 位相误差对菲涅耳透镜衍射效率的影响[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,1995,18(1):24-37.
WANG Hui, MENG Qing-yuan. Influence of phase errors upon the diffraction efficiency of the phase fresnel lens [J]. Journal of Zhejiang Normal University: Natural Science Edition. 1995, 18 (1): 24-37. (in Chinese with an English abstract)