

液晶光栅自干涉测量空间光调制器相位调制特性

赵自新, 肖昭贤, 张航瑛, 赵宏*

西安交通大学机械工程学院机械制造系统国家重点实验室, 陕西 西安 710049

摘要 提出了一种测量平行液晶空间光调制器(SLM)相位调制特性的自干涉法。该方法实验简单,具有良好的稳健性。加载到 SLM 的灰度图由三部分组成,一部分是二元衍射光栅灰度图;另外两部分加载的灰度图均匀分布,下部分灰度值恒为 0,上部分灰度值从 0 逐渐增加。随着上部分灰度的改变,经过相位调制的反射光束与光栅产生的+1 级衍射光干涉生成一整幅错位条纹图,通过测量同一幅干涉条纹的周期和上下条纹之间的相对移动量来计算 SLM 的相位调制量大小,该方法消除了环境振动或空气湍流引起的条纹抖动对测量的影响,提高了测量精度。与其他方法相比,该方法获取 SLM 相位调制特性不需要复杂的光学装置,且具有优良的机械稳定性,反应快速更易实施。

关键词 测量;液晶空间光调制器;自干涉法;相位调制特性;图像后处理

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.061204

Self-Interference for Spatial Light Modulator Phase Modulation Characteristics by Liquid Crystal Grating

Zhao Zixin, Xiao Zhaoxian, Zhang Hangying, Zhao Hong

State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering,
Xi'an JiaoTong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

Abstract A self-interference method for measuring phase modulation characteristics of parallel liquid crystal spatial light modulator (SLM) is proposed. The method is experimentally simple and robust. The gray image loaded onto the SLM is composed of three parts, one is a binary diffraction grating grayscale map, the other two maps are codified by a uniformly distributed gray level area, where the gray value below the part is constantly 0, the upper part gray value is gradually increased from 0. With the gray value of the upper part changing, the reflected beam by modulation interferes with the +1 order grating diffraction wave to generate a whole dislocation fringes, the amount of SLM phase modulation can be calculated by measuring the cycle and the relative displacement between the upper and lower fringes on the same interference pattern. This proposed method eliminates the influence of the fringe jitter caused by ambient vibration or air turbulence on the measurement and improves the measurement accuracy. Compared with other methods, the new method which obtains the phase modulation characteristics of SLM does not require complex optical devices, and has excellent mechanical stability, fast response and easy to implement.

Key words measurement; liquid crystal spatial light modulator; self-interference; phase modulation characteristics; image post processing

OCIS codes 230.3720; 070.6120; 120.3180

1 引言

液晶空间光调制器(LC-SLM)基于液晶的电控双折射原理,通过改变电驱动信号,可应用于波前的相位和强度连续调制。LC-SLM 具有空间分辨率高、可编程控制、质量轻等优点^[1],在材料的显微处理^[2]、空间光

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61575157)、中国博士后科学基金(163576)

作者简介: 赵自新(1987—),男,博士,讲师,主要从事干涉测量和子孔拼接方面的研究。E-mail: zixinzha@xjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhaohong@mail.xjtu.edu.cn

束整形和脉冲整形^[3-4]、波前传感器^[5]和自适应光学^[6]等领域有着广泛应用。因此,对波前相位控制的高精度和相位调制深度范围的线性化提出了要求^[7],这就需要准确评价空间光调制器的性能,甚至校正厂家预设的相位响应参数。

目前研究 LC-SLM 相位调制特性的方法很多,传统的检测方法主要分为两类:干涉法和衍射法。其中干涉法主要包括双缝干涉^[8-9]、泰曼-格林干涉^[10-11]和马赫-曾德尔干涉^[12-13]。干涉法的相位测量依赖条纹图的位移,而双光束在干涉之前要进行较长的路径,机械振动、空气湍流等环境因素都会引起其光程差的变化,导致采集的条纹图不稳定。而衍射法^[14-15]基于强度传输,对机械振动和空气湍流具有较高的稳健性,但从相位计算的角度来看,强度图像用有效相位差的余弦值来表征,使得相位估计的运算过程更复杂。

传统干涉法原理是偏振光垂直入射空间光调制器,在光路中采用分光器件将入射光和出射光在空间上分离,但这样会引起光强的损失,进而影响测量的准确性。Panzai 等^[16]利用双孔干涉法对斜入射下相位调制特性进行了研究,得出当入射角小于 10° 时,相位调制深度与垂直入射时几乎一致。鲁强等^[17]利用 Zygo 干涉仪测量斜入射液晶空间光调制器的相位调制特性,得到小角度(5° 以内)入射下 LC-SLM 相位调制曲线重合,小角度入射的情况和垂直入射得到的结果没有太大差别。所以测量 SLM 相位调制特性时,可用小角度斜入射来代替垂直入射。

本文提出了一种测量平行液晶(PAL)空间光调制器(SLM)相位调制特性的自干涉法。该方法实验简单,所需仪器成本低,不需要复杂的光学装置,克服了干涉法入射光和出射光空间分离和衍射法相位估计复杂的问题,具有良好的稳健性和机械稳定性。建立了在小角度斜入射时,使用自干涉法测量 SLM 相位调制量的干涉条纹图模型,通过实验验证了方法的可行性,利用图像处理方法来计算相位调制量,得到 SLM 相位调制曲线,并对实验结果进行了分析和讨论。

2 自干涉法测量原理

2.1 测量系统

测量 LC-SLM 相位调制特性的液晶光栅自干涉系统如图 1 所示。激光器发射激光束入射到显微物镜(OBJ)进行扩束,并通过针孔(PH)滤波后入射至准直透镜 L,经透镜准直成平行光束后入射到偏振器 P,得到振动方向平行于液晶分子的线偏振光,偏振光小角度斜入射到加载有组合模式灰度图的空间光调制器(SLM)上,液晶光栅衍射的+1 级光与经过相位调制但未偏转的出射光束在空间某位置相遇,最后由相机采集它们的干涉条纹图像。

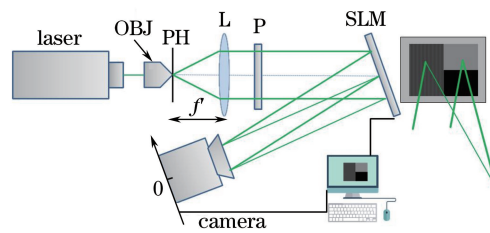


图 1 液晶光栅自干涉测量系统

Fig. 1 Self-interference by liquid crystal grating measurement system

通过计算机加载到 SLM 上的组合模式灰度图分成三部分。其中一半屏幕加载二元垂直的液晶周期光栅,实际上类似于周期可调的闪耀相位光栅^[18-19],可以实现出射光束的偏转。多元周期液晶光栅虽然衍射效率高,但是光束偏转角较小,出射光束将在较远距离处发生干涉,干涉条纹图受机械振动和空气湍流的影响而变大,所以选择二元光栅,能够缩短相机到 SLM 的布置距离,降低环境造成的影响。对于该衍射光栅灰度级的选择,将其中一组条纹设置为零灰度级。由相关实验证明^[20],干涉图的对比度会随着光栅条纹灰度值的变化而改变,这是因为液晶器件存在瞬时相位调制量不恒定的闪烁现象,当光栅中条纹调制的相位差为 π 时,干涉条纹图中将产生最大对比度,于是将剩下的条纹灰度级设置为 128。

SLM 的另一半屏幕分为上下两部分,均加载均匀的灰度级,下半部分加载零灰度级,在测量过程中始终保持静态不变,上半部分灰度值则是从 0 逐步增加至 255。整个 SLM 屏幕加载灰度图的组合模式如

图 2(a)、(b)所示。CMOS 相机采集到干涉条纹图,上半部分的条纹将随着对应均匀区域灰度级的变化产生移动,下半部分的条纹不移动,则可以在同一幅条纹干涉图中,使用相对条纹移动法测量 SLM 相位调制特性,这是因为干涉条纹的抖动不易影响条纹相对移动量的测量,可以降低环境干扰对测量结果的影响,提高相位调制量的测量精度。

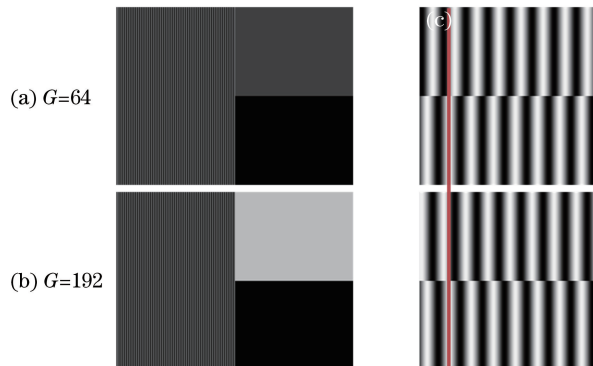


图 2 加载灰度图组合模式。(a) $G=64$; (b) $G=192$; (c) 干涉条纹仿真图

Fig. 2 Combined mode of loading grayscale map. (a) $G=64$; (b) $G=192$; (c) simulation of interference fringes

2.2 自干涉法数值仿真

因为 SLM 像素空间周期远大于液晶分子层厚度,所以假设光束从入射到衍射光栅至出射过程中,仅经历了等电压的相位调制,且 SLM 的相位调制深度为 2π 。根据液晶的双折射效应,以灰度值为 $g=0$ 时的 e 光的光程为基准,当入射偏振光斜入射时,灰度值为 $g=h$ 的纯相位调制量大小为

$$\delta_h = \frac{2\pi d [n_e(\theta_h - \varphi_1) + n_e(\theta_h + \varphi_1) - 2n_e(\theta_0)]}{\lambda \cos \varphi_1}, \quad (1)$$

式中 d 代表液晶层厚度, n_o 和 n_e 分别表示寻常光(o 光)和非寻常光(e 光)的折射率, λ 表示入射光的波长, φ_1 表示光束入射角, θ_h 和 θ_0 分别表示 $g=h$ 和 $g=0$ 时液晶分子的偏转角度。光束入射零灰度级衍射光栅条纹,理想情况下,纯相位调制量大小由(1)式可得,同理光束入射至另一灰度级(128)衍射光栅条纹,相位调制量大小为 δ'_n 。则根据液晶空间光调制器等效闪耀相位光栅的性质,相位调制量随空间横坐标 x 变化为

$$\delta = x \frac{\delta_n - \delta'_n}{P} + 2\pi - \delta_n, \quad (2)$$

式中 P 代表衍射光栅空间周期,假设相机靶面与 SLM 靶面相同,则相机采集到的干涉条纹强度图随空间横坐标 x 表示为

$$I(x, g) = I_0 + \Delta I \cos [\delta + \varphi_0 + \Delta\varphi(g)]. \quad (3)$$

将(2)式代入(3)式中,整理得到:

$$I(x, g) = I_0 + \Delta I \cos \left[x \frac{\delta_n - \delta'_n}{P} + 2\pi - \delta_n + \varphi_0 - 2\pi + \Delta\varphi(g) \right] = I_0 + \Delta I \cos \left[x \frac{\delta_n - \delta'_n}{P} - \delta_n + \varphi_0 + \Delta\varphi(g) \right], \quad (4)$$

式中 I_0 和 ΔI 是干涉条纹的强度项, φ_0 是初始相位值, $\Delta\varphi(g)$ 是作为灰度级 g 的函数而添加的相位,实际上就是需要测量的空间光调制器的相位调制特性。由数值仿真得到如图 2(c)所示的干涉条纹图,从图中可以看出,随着灰度值的变化,上半部分条纹向左侧移动,当灰度值为 128 时,条纹刚好移动半个周期,此时对应的相位调制量为 π 。

3 实验装置及结果

图 3(a)为液晶光栅自干涉测量实验装置图。实验使用波长为 532 nm、输出功率为 10 mw 的激光器作为光源。光由 $40\times$ 显微物镜聚焦,经 $25 \mu\text{m}$ 针孔孔径过滤,然后通过准直透镜。光经过偏振器,使得 e 光的偏振方向平行于液晶分子轴方向,此时液晶空间光调制器工作在纯相位调制模式。待测量的空间光调制器

型号为 RLE-CH04, 像素为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 。

实验编码设置液晶衍射光栅周期 $P = 8 \text{ pixel}$, 被测 SLM 每个像素尺寸为 $9 \mu\text{m}$, 则衍射光栅的空间周期为 $72 \mu\text{m}$ 。根据斜入射式的衍射公式 $\sin \theta - \sin \varphi = \lambda/P$ 和空间几何关系, 计算得到光栅衍射出射的 +1 级光与经过均匀分布的液晶相位调制出射光束的干涉位置, 并安装 CMOS 相机采集干涉条纹。

在 SLM 上加载如图 2(a)、(b) 所示的组合模式灰度图, CMOS 相机采集到如图 3(b) 所示的干涉条纹图, 随着上部分被测均匀区域灰度级的变化, 生成一整幅错位干涉条纹图, 测量 SLM 相位调制特性使用相对条纹移动法, 降低了干涉条纹的抖动对条纹移动量测量的影响。

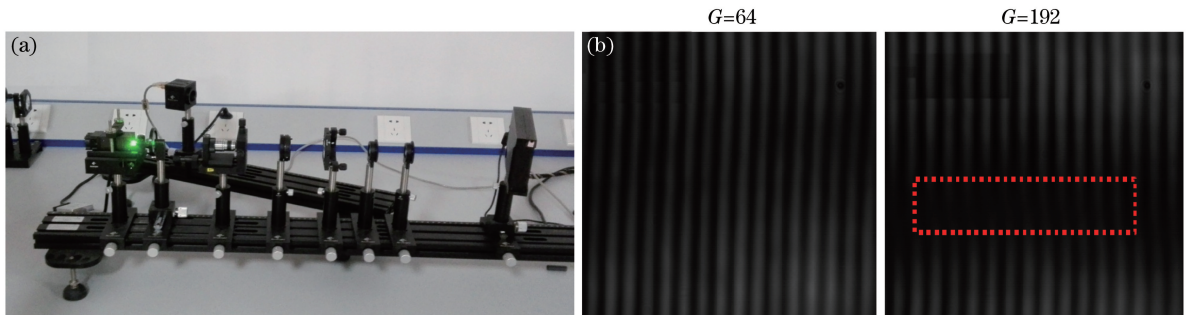


图 3 (a) 液晶光栅自干涉测量实验装置图; (b) 干涉条纹图

Fig. 3 (a) Self-interference by liquid crystal grating experimental device; (b) interference fringes

液晶空间光调制器的相位调制量可以利用干涉条纹的相对移动量来获得, 计算公式为

$$\delta = 2\pi(\Delta/\Lambda), \quad (5)$$

式中 Δ 和 Λ 分别为条纹相对移动量和条纹周期宽度, 这两个参数的获得可以通过间距平均法计算来实现。如果干涉条纹是沿水平分布的, 则作垂直扫描线穿过各条纹, 扫描线与 M 个条纹的中心线分别交于 P_0, P_1, \dots, P_M 点, 则条纹间距矢量为 $\mathbf{V} = (P_M - P_{M-1}, \dots, P_2 - P_1, P_1 - P_0)$, 条纹周期宽度为

$$\Lambda = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{V}_i. \quad (6)$$

当左右两组干涉条纹产生垂直方向的相对移动时, 两条垂直扫描线分别穿过静止条纹和移动条纹, 与每条干涉条纹中心线的交点分别为 P_0, P_1, \dots, P_M 和 S_0, S_1, \dots, S_M , 则条纹位移矢量为 $\mathbf{T} = (P_0 - S_0, P_1 - S_1, \dots, P_M - S_M)$, 条纹移动量为

$$\Delta = \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \mathbf{T}_i. \quad (7)$$

对于采集到的干涉条纹图, 亮条纹代表振动加强区域, 暗条纹代表振动减弱区域, 都具有一定的宽度, 而获得波峰或波谷的精确位置变得比较困难, 也就加大了干涉条纹周期和移动量精确测量的难度, 从而导致测量对灰度值相位调制量也是错误或不准的。为了得到更好的结果, 需对干涉条纹进行图像后处理。图像后处理方法包括三个步骤: 二值化、开操作和骨骼提取。

观察干涉条纹图, 发现中间部分的亮度较低, 这是因为加载的两部分均匀灰度等级图之间没有设置过渡区域, 不可避免地存在刀口阴影缺陷。在图像处理过程中, 人为提高对比度并不能很好地解决这个问题, 所以首先对干涉条纹图进行均值滤波, 得到干涉条纹的水平梯度图。应该注意的是, 阈值的选择取决于所记录干涉图的对比度, 而对于得到的水平梯度图阈值选择为 0。图 4 为不同灰度值下对应的实验干涉条纹图、水平梯度图和经过二值化、开操作和骨骼化后的效果图。

4 分析与讨论

图 5 是利用 Origin 软件绘制出 SLM 的相位调制特性曲线图。可以看到, 随着灰度值的增加, SLM 相位调制量随之增加。对干涉条纹进行图像后处理, 利用相对条纹移动法得到的调制曲线, 可以发现当变化灰度值为 0 时, 计算得到的相位调制量为 0.919 rad 。观察采集到的干涉条纹, 发现条纹整体向右侧有微小的倾斜, 并不处于垂直状态, 骨骼化处理后仍然保留了这种倾斜, 所以利用相对条纹移动法计算条纹移动量

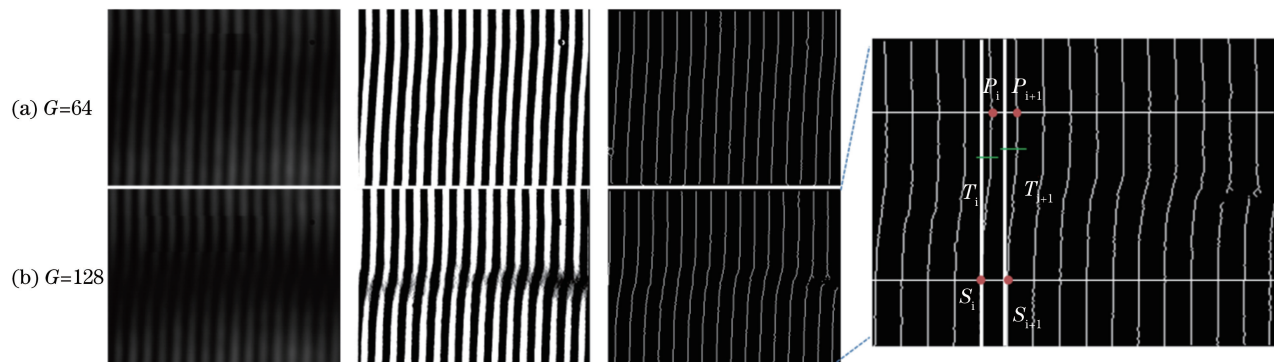


图 4 干涉条纹图像后处理过程图。(a) $G=64$; (b) $G=128$

Fig. 4 Post processing of interference fringes. (a) $G=64$; (b) $G=128$

和周期时,会导致相位调制量变大。这是因为 SLM 在安装定位过程中存在一定的俯仰倾角,属于人为误差。基于这种误差,在进行图像处理之前对干涉条纹图进行了消倾斜处理,干涉条纹消倾斜效果如图 6 所示。

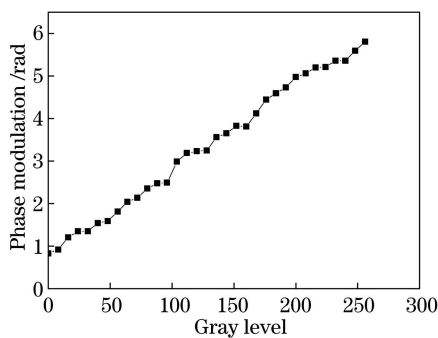


图 5 SLM 的相位调制曲线图

Fig. 5 Phase modulation curve of SLM

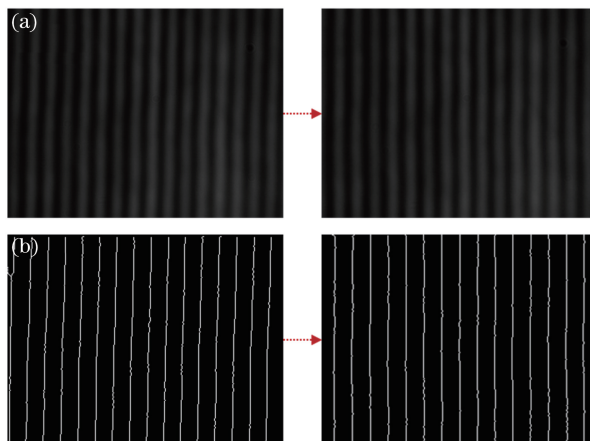


图 6 (a)干涉条纹图消倾斜处理;(b)消倾斜处理骨骼效果图

Fig. 6 (a) Interference fringe pattern through eliminating tilt processing; (b) skeleton after eliminating tilt processing

为了验证干涉条纹经过图像处理,使用相对条纹移动法获得相位调制量的准确性,这里对经过消倾斜处理的条纹同时使用傅里叶变换(FFT)位相分析法^[21]获得上下条纹相对相移量,即被测区域的相位调制量,重新计算得到 SLM 相位调制曲线如图 7 所示。由图 7 可知,消除倾斜之后使用相对条纹移动法,当变化灰度值为 0 时,SLM 相位调制量为 0.09 rad,调制量下降 0.829 rad。未消倾斜的 SLM 相位调制量最大为 5.806 rad,消倾斜后最大调制量下降 1.006 rad。利用傅里叶变换位相分析法获得的相位调制曲线,与本文方法获得的曲线变化趋势非常接近,且均方差为 0.1552 rad,验证了实验和图像后处理过程的正确性和可靠性。

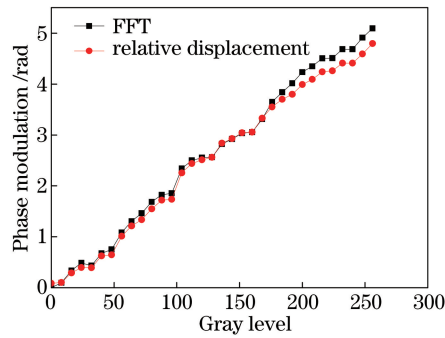


图 7 消除倾斜处理后相对条纹移动法和傅里叶变换位相分析获得调制曲线对比图
Fig. 7 Comparison of the phase modulation curve by the relative displacement and the Fourier transform method after eliminating the tilt

在同样的实验环境下搭建泰曼-格林实验装置测量 SLM 的相位调制特性,实验装置如图 8(a)所示,并得到如图 8(b)所示的干涉条纹图。在实验过程中,条纹一直处于抖动状态,使用 CCD 采集得到的条纹图扭曲变形,无法进行图像后续处理,以致不能得到正确的 SLM 相位调制曲线。但从图中可以看到,条纹的中间部分随着灰度变化,条纹出现了断裂和错位。这也说明该方法在克服空气湍流和机械振动方面具有良好的稳健性和可靠性,保证了测量精度具有实用性。

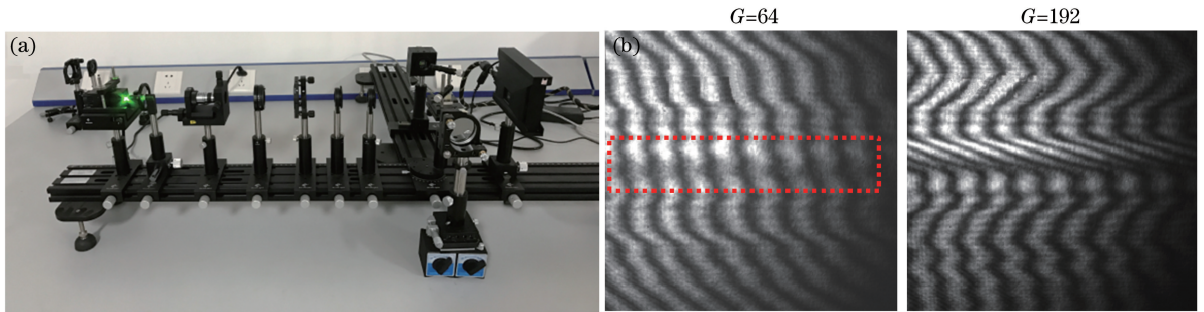


图 8 (a)泰曼-格林干涉测量实验装置图;(b)干涉条纹图 $G=64$, $G=192$

Fig. 8 (a) Twyman-Green interferometry experimental device; (b) interference fringe $G=64$, $G=192$

5 结 论

在小角度斜入射 SLM 和液晶光栅的理论及实验研究基础上,提出了一种测量平行液晶 SLM 相位调制特性的自干涉法。通过加载组合灰度图,使得经过相位调制的反射光束与光栅产生的 +1 级衍射光干涉生成一整幅错位条纹图,然后利用相对条纹移动法和图像后处理测量干涉条纹的周期和移动量,提高了相位调制的测量精度。使用该方法测量了型号为 RLE-CH04 的 SLM,得到其相位调制曲线,验证了该方法可行性和正确性。该方法同时克服了干涉法入射光和出射光空间分离和衍射法相位估计复杂的问题,且实验简单、实用性强,具有良好的稳健性和可靠性。该方法同样也适用测量 SLM 相位调制的空间不均匀性,所提出的以二值化为核心的图像后处理方法也可以运用到 SLM 其他特性参数的测量中。

参 考 文 献

- [1] Cai Dongmei, Xue Lixia, Ling Ning, *et al.* Characteristics of phase only liquid crystal spatial light modulator[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(11): 19-23.
蔡冬梅, 薛丽霞, 凌 宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 19-23.
- [2] Kuang Z, Perrie W, Leach J, *et al.* High throughput diffractive multi-beam femtosecond laser processing using a spatial light modulator[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 2284-2289.
- [3] Weiner A M. Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(5): 1929-1960.

- [4] Sinclair G, Leach J, Jordan P, *et al.* Interactive application in holographic optical tweezers of a multi-plane Gerchberg-Saxton algorithm for three-dimensional light shaping[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1665-1670.
- [5] Arines J, Duran V, Jaroszewicz Z, *et al.* Measurement and compensation of optical aberrations using a single spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15287-15292.
- [6] Li C, Xia M, Mu Q, *et al.* High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10774-10781.
- [7] O'Brien D C, Faulkner G E, Wilkinson T D, *et al.* Design and analysis of an adaptive board-to-board dynamic holographic interconnect[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(16): 3297-3305.
- [8] Chen Huaixin, Sui Zhan, Chen Zhenpei, *et al.* Optical modulation characteristics of liquid crystal television (LCTV) and its application in optics information processing[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(8): 741-745.
陈怀新, 隋展, 陈祯培, 等. 液晶电视 LCTV 的光学调制特性及其应用[J]. *中国激光*, 2000, 27(8): 741-745.
- [9] Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.* System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0508006.
李杰, 唐锋, 王向朝, 等. 光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0508006.
- [10] Ge Aiming, Sui Zhan, Xu Keshu. Characteristics of phase-only modulation using a reflective liquid crystal on silicon device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(10): 2481-2485.
葛爱明, 隋展, 徐克瑞. 反射型 LCOS 器件纯相位调制特性的研究[J]. *物理学报*, 2003, 52(10): 2481-2485.
- [11] Zhang H, Zhang J, Wu L. Evaluation of phase-only liquid crystal spatial light modulator for phase modulation performance using a Twyman-Green interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18(6): 1724-1728.
- [12] Yamauchi M, Marquez A, Davis J A, *et al.* Interferometric phase measurements for polarization eigenvectors in twisted nematic liquid crystal spatial light modulators[J]. *Optics Communications*, 2000, 181(1-3): 1-6.
- [13] Wang Yijia, Zhang Chonglei, Wang Rong, *et al.* Phase difference surface plasmon resonance sensor based on Mach-Zehnder configuration[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0714003.
王弋嘉, 张崇磊, 王蓉, 等. 基于马赫-曾德尔结构的相差表面等离子体共振传感器[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0714003.
- [14] Xun X, Cohn R W. Phase calibration of spatially nonuniform spatial light modulators[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(35): 6400-6406.
- [15] Mendoza-Yero O, Minguez-Vega G, Martinez-Leon L, *et al.* Diffraction-based phase calibration of spatial light modulators with binary phase Fresnel lenses[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1-11.
- [16] Panezai S, Wang D, Zhao J, *et al.* Study of oblique incidence characterization of parallel aligned liquid crystal on silicon[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 037109.
- [17] Lu Qiang, Sheng Lei, Zhang Xin, *et al.* Investigation on pure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator at oblique incidence[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(1): 0112001.
鲁强, 盛磊, 张鑫, 等. 斜入射下液晶空间光调制器纯相位调制特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0112001.
- [18] Wang X, Wilson D, Muller R, *et al.* Liquid-crystal blazed-grating beam deflector[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(35): 6545-6555.
- [19] Zhang Jian, Wu Liying, Liu Bohan. Liquid crystal spatial light modulator and real-time transform of interferential light wavefront[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 124-127.
张健, 吴丽莹, 刘伯晗. 液晶空间光调制器与相干光波前实时变换[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 124-127.
- [20] Engstrom D, Persson M, Bengtsson J, *et al.* Calibration of spatial light modulators suffering from spatially varying phase response[J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16086-16103.
- [21] Miao Yue, Bai Fuzhong, Liu Zhen, *et al.* A common-path interferometry applied to measure phase modulation characteristics of liquid crystal spatial light modulator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 021204.
苗悦, 白福忠, 刘珍, 等. 采用共光路干涉法测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 021204.