

液晶空间光调制器相位调制特性的快速测量与标定方法

曾婧潇¹, 洪羽剑¹, 卢钧胜^{1,2**}, 王宇莹¹, 付晓锋¹, 胡晓东^{1*}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²天津工业大学生命科学院, 天津 300387

摘要 为提高液晶空间光调制器(LC-SLM)在波前相位调制中的精度,提出了一种能对 LC-SLM 实现快速标定的数字全息测量方法。该方法仅需在成像面上采集单幅数字全息图像,就能实时测量 LC-SLM 在特定波长下的相位调制特性,系统结构简单,且无需经过复杂的衍射传播计算,测量效率较高。在不改变光路结构的情况下利用 Twyman-Green 干涉法开展对比实验,进一步验证了数字全息法在测量精度方面的优势。实验结果表明,LC-SLM 在标准光波波长(633 nm)下的相位调制范围为 0~6.185 rad,利用反插值法校正相位响应的非线性特性使得非线性误差降低到 2.45%,有效提升了器件的线性驱动精度。最后,针对 LC-SLM 的波长响应特性,建立了相位-波长调制修正系数模型,对 LC-SLM 在非标准光波波长(670 nm)下的实际相位调制范围进行了修正,探究了该器件在双波长干涉测量系统中用于相位校正的可行性。

关键词 测量; 液晶空间光调制器; 相位调制; 数字全息; 非线性校正; 波长响应

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221447

1 引言

液晶空间光调制器(LC-SLM)作为一种新型波前调制器件,能够完成各种复杂的光波前调制^[1-5],具有高分辨率、低功耗、无机械惯性、集成化、可编程性和实时控制等优点^[6],故被广泛应用于波前相位调制等关键技术中,在光场调控^[7-8]、激光加工^[9]、自适应光学^[10]、光通信^[11]、光镊^[12]和数字全息^[13]等领域中均有良好的发展前景。由于不同型号的 LC-SLM 往往具有不同的相位调制特性,且相位调制精度容易受到运输过程、使用环境等因素影响,故在使用前对其进行测试与标定是将其应用于波前调制与波前校正中必不可少的环节。目前广泛采用的方法是干涉测量法。赵晓凤等^[14]利用径向剪切干涉法测量 LC-SLM 的相位-灰度调制特性,径向剪切干涉法作为一种共光路干涉法,其稳定性和精度较高,但需要采用复杂的迭代算法进行波前重建,数据处理过程较为繁琐。Zhang 等^[15]采用 Twyman-Green 干涉法使经 LC-SLM 调制的光产生不同的相位延迟并与参考光发生干涉,通过测量干涉条纹的相对移动量,得到相位-灰度的对应关系,该方法原理简单,但需要采集若干幅干涉图像,测量过程复杂。因此,前述方法的测量效率较低,难以满足快速检

测的要求。刘永军等^[16]采用商品化 Fizeau 干涉仪测量了不同灰度下的相位调制量,其光路结构简单,但灵活性较差,只能在固定的光源波长下测量 LC-SLM 的相位调制特性,故也具有一定的局限性。以上测量方法均未系统评价 LC-SLM 在不同波长下的相位-灰度调制特性,忽略了光波波长的影响,故难以应用于多波长波前调制的场景中。

提出了一种基于数字全息原理的快速标定方法,对 LC-SLM 在特定波长下的相位-灰度调制特性进行了测量,并将结果与传统的 Twyman-Green 干涉法进行了对比,以验证数字全息测量方法的有效性。针对空间光调制器相位响应非线性的固有特性,采用反插值法对相位-灰度调制特性曲线进行校正,提高了该器件的线性驱动能力。针对空间光调制器的波长响应特性,提出了相位-波长调制修正系数模型,并在非标准光波波长下对该模型进行了验证,修正了器件的实际相位调制范围,为空间光调制器在双波长干涉测量系统^[17]下实现波前校正提供了参考。

2 基本原理

2.1 液晶空间光调制器的相位调制特性

基于反射式硅基液晶(LCoS)技术的空间光调制

收稿日期: 2022-07-08; 修回日期: 2022-07-30; 录用日期: 2022-08-22; 网络首发日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(52275540)

通信作者: *xdhu@tju.edu.cn; **lujunsheng@tju.edu.cn

器由顶部透明电极层、中间向列相液晶层和底部反射导电层构成,其相位调制量受到液晶分子旋向和入射光偏振态影响。如图 1 所示,相位型 LC-SLM 在两个偏振片的配合下工作,起偏器 P1 和检偏器 P2 的偏振方向与 LC-SLM 光轴方向的夹角分别为 ψ_1, ψ_2 。当入射光进入 LC-SLM 的液晶层后,被分为 e 光和 o 光两个偏振分量^[15],e 光的偏振方向与 LC-SLM 光轴平行, o 光的偏振方向与 LC-SLM 光轴垂直。若在两个电极之间施加垂直于液晶层表面的电压,则液晶分子的偏转方向 θ 会随着电场强度的变化而改变,进而导致 e 光和 o 光之间的相位延迟发生变化。当光束的偏振方向与 LC-SLM 液晶分子的长轴平行,即 $\psi_1 = \psi_2 = 0^\circ$ 时, LC-SLM 对入射光产生的相位延迟大小为

$$\delta = 2\pi d(n_e - n_o)/\lambda, \quad (1)$$

式中: d 为液晶层的厚度; n_e 和 n_o 分别为 e 光和 o 光的折射率; λ 为入射光波长。此时 LC-SLM 的强度透射率保持恒定,工作在纯相位调制模式下。由于 n_e 受到驱动电压的控制,而驱动电压和驱动灰度之间存在一定的映射关系,故对于特定型号的 LC-SLM,其相位调制量 δ 是由驱动灰度和光波波长 λ 共同决定的,在实际使用过程中,需要对该器件在特定波长下的相位-灰度调制特性进行标定。

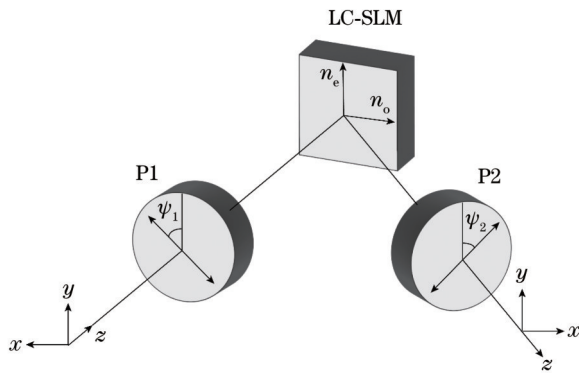


图 1 反射式 LC-SLM 的工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of reflective LC-SLM

2.2 数字全息测量系统

数字全息技术是一种利用数字全息图记录样品干涉信息,从而重构计算出被测物波的波前相位与振幅

的技术,具有单次曝光、实时测量的特性,测量系统如图 2 所示。激光器(Edmund Optics, LDL175, 波长为 633 nm)出射的单色光经过中灰镜 NF 后光强得到了适当的衰减,经起偏器 P1 后成为线偏振光,再利用透镜 L1、L2 组成的扩束准直器 BE 对光束进行扩束、准直,保证光束宽度与 LC-SLM 液晶面板的有效区域匹配。光束到达分光棱镜 BS 后被分为两束,一束被 LC-SLM 调制并反射成为物光 O,另一束被平面镜 M 反射成为参考光 R,两束光合束后经过检偏器 P2 和成像透镜 L3 在电荷耦合器件(CCD)上发生干涉,并记录得到数字全息图像。其中,平面镜 M 固定在五轴精密位移台上,便于调整干涉距离和离轴角度。

实验中所用的 EXULUS-4K1/M 反射式 LC-SLM 的分辨率为 $3840 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $3.74 \mu\text{m}$, 其最大相位调制量已在 633 nm 波长处被预校准为 2π 。在测试之前,首先将起偏器和检偏器的偏振方向均调整至与 LC-SLM 的液晶长轴方向平行,以保证 LC-SLM 处于纯相位调制的状态。然后,调整 CCD 的位置,使其位于透镜 L3 的像平面,与物平面(LC-SLM)满足物像共轭的关系,此时记录面与像面重合,可以利用像面数字全息法恢复物平面的光场分布。

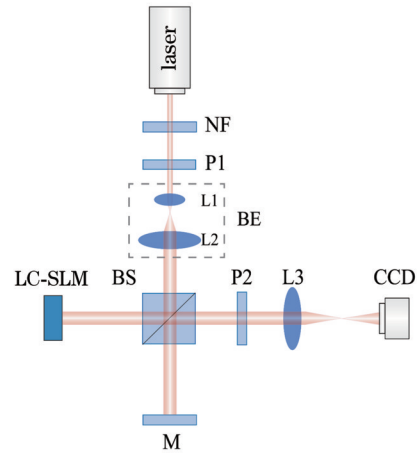


图 2 数字全息测量系统

Fig. 2 Measurement system of digital holography

设物光波 $O(x, y)$ 与参考光波 $R(x, y)$ 在 CCD 所在的记录面处发生干涉,则数字全息图像的强度可以表示为

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y), \quad (2)$$

式中: $O^*(x, y)$ 和 $R^*(x, y)$ 为物光和参考光的共轭项。再现像物光波的复振幅分布可以表示为

$$U(x_r, y_r) = A\mathcal{F}^{-1}\left\{D(f_x, f_y, x, y)W(f_x, f_y)\mathcal{F}[I(x, y)]\exp[-i\pi\lambda d_0(f_x^2 + f_y^2)]\right\}, \quad (3)$$

式中: $A = \exp(i2\pi d_0/\lambda)/(i\lambda d_0)$; d_0 是重构距离; $\mathcal{F}(\cdot)$ 、 $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 分别是傅里叶变换函数和傅里叶逆变换函数;

$D(f_x, f_y, x, y)$ 是相位校正函数,用于消除系统相位误差; $W(f_x, f_y)$ 是圆形窗滤波函数,用于提取

$O^*(x, y)R(x, y)$ 项,其中 $f_x = x/L_x, f_y = y/L_y, L_x$ 和 L_y 分别是全息图 x 方向和 y 方向的宽度。由式(3)可以计算得到光场的相位分布 $\phi(x_r, y_r)$,即

$$\phi(x_r, y_r) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[U(x_r, y_r)]}{\text{Re}[U(x_r, y_r)]} \right\}, \quad (4)$$

式中: $\text{Re}[U(x_r, y_r)]$ 和 $\text{Im}[U(x_r, y_r)]$ 分别为再现物光波波前 $U(x_r, y_r)$ 的实部和虚部。由此可得被测波前真实的相位分布,绘制出特定波长下 LC-SLM 的相位调制量随灰度的变化曲线。由于像面数字全息法直接在记录面处再现物光波的波前信息,因此在重构时无需进行复杂的衍射计算,重构效率得到了提升,能够实现 LC-SLM 相位调制特性的快速测量。

3 分析与讨论

3.1 相位-灰度调制特性曲线的测量

数字全息测量系统的实物装置图如图 3 所示。将 LC-SLM 作为波前发生器件,利用灰度驱动图像对物光波的相位延迟量进行调制,再借助数字全息图像恢复物波波前的相位分布,从而得到 LC-SLM 在特定波长下的相位与灰度的对应关系。为减小测量误差,在相同的测量系统和测量条件下,进行连续多次测量实验。

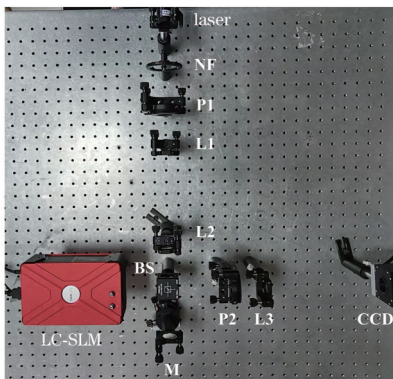


图 3 数字全息测量系统的实物装置图

Fig. 3 Experimental setup of digital holography measurement system

在 LC-SLM 的液晶面板上加载如图 4(a)所示的 256 阶灰度驱动图像,其中心区域(大小为 $1024 \text{ pixel} \times 700 \text{ pixel}$)为 $0 \sim 255$ 的连续灰度级,左右两边分别为 0 和 255 灰度级。在满足记录条件的情况下,尽量扩大物光 O 和参考光 R 之间的离轴角,使得全息图的载频较大,便于进行频谱分离。图 4(b)为单次测量中利用 CCD 采集到的像面数字全息图像,对其进行傅里叶变换后,利用圆形窗函数实现带通滤波,保留式(2)中的 $O^*(x, y)R(x, y)$ 项,再通过数值方法对数字全息测量系统的畸变相位进行校正,最后经傅里叶逆变换后可

以重构得到物光波的相位分布。对 10 次重复测量的解包裹相位进行平均,得到的相位图像如图 4(c)所示,相位的三维图像如图 4(d)所示。将图 4(d)中的相位值沿 x 轴方向进行平均后可以得到数字全息图逐像素列的平均相位值,如图 4(e)所示。将图 4(e)中的横坐标逐个替换为对应的灰度值,得到的相位-灰度调制特性曲线如图 4(f)所示。测试结果表明,该器件在标准光波波长 (633 nm) 下的最大相位调制量为 6.185 rad,相位-灰度调制特性呈线性变化趋势。测得的最大相位调制量与 LC-SLM 在该波长下的预校准相位调制量 2π 相差 1.56%,小于 LC-SLM 给定的最大相位波动范围 5%,表明数字全息法的测量精度较高。

为进一步验证数字全息法测量结果的有效性,采用传统的 Twyman-Green 干涉法,在图 3 所示的光学系统中对 LC-SLM 的相位-灰度调制特性进行对比测试。Twyman-Green 干涉法是一种基于等厚干涉原理的相位测量方法,能够通过条纹的移动量获取相位调制信息。调整反射镜 M 的倾角,使物光 O 和参考光 R 之间的夹角尽量减小。在 LC-SLM 上依次加载阶梯变化的驱动灰度图像,如图 5(a)所示,每幅图像上半部分的灰度值始终为 0 ,下半部分的灰度值为 $0 \sim 255$,以 5 为步长进行递增。灰度值的差异会导致 LC-SLM 的上下工作面上产生不同的相位延迟,使干涉条纹产生相对移动。为提高测量数据的准确性,进行 10 次重复测量实验,图 5(b)为单次测量中利用 CCD 采集到的干涉图像,根据不同灰度下的干涉条纹的相对移动量 Δ ,可以计算出相对相位延迟量 δ 的大小,即

$$\delta = 2\pi \frac{\Delta}{\omega}, \quad (5)$$

式中: ω 为干涉条纹的周期宽度。在干涉图像采集完毕后,将 CCD 替换为光功率计 (PM100D),在同样的灰度驱动图像下测试强度反射率的变化。对 10 次重复测量实验的结果进行平均,得到图 5(c)所示的 LC-SLM 的相位调制特性和归一化强度曲线。由测试结果可知,该器件的最大相位调制量为 6.071 rad,归一化强度反射率接近 1 ,其曲线波动的均方根 (RMS) 为 0.0072 ,均方根误差 (RMSE) 为 0.0169 ,表明纯相位调制模式下的强度调制可以忽略不计。

将数字全息法、Twyman-Green 干涉法测得的相位-灰度调制特性曲线与理想线性曲线进行比较,如图 6 所示,两种方法测得的相位均随灰度呈线性变化,但曲线的非线性程度存在一定差异,且测得的最大相位调制量的重复性误差分别为 1.34% 和 2.44% ,说明数字全息法的测量精度较高。用均方误差 (MSE) 来评价两种方法测量结果的偏差, MSE 为 0.1148 说明两种方法的测量结果在总体上保持着较好的一致性,存在差异的原因可能是激光光源的不稳定性、光学平台的振动、环境温度的变化、LC-SLM 的入射光并非完全

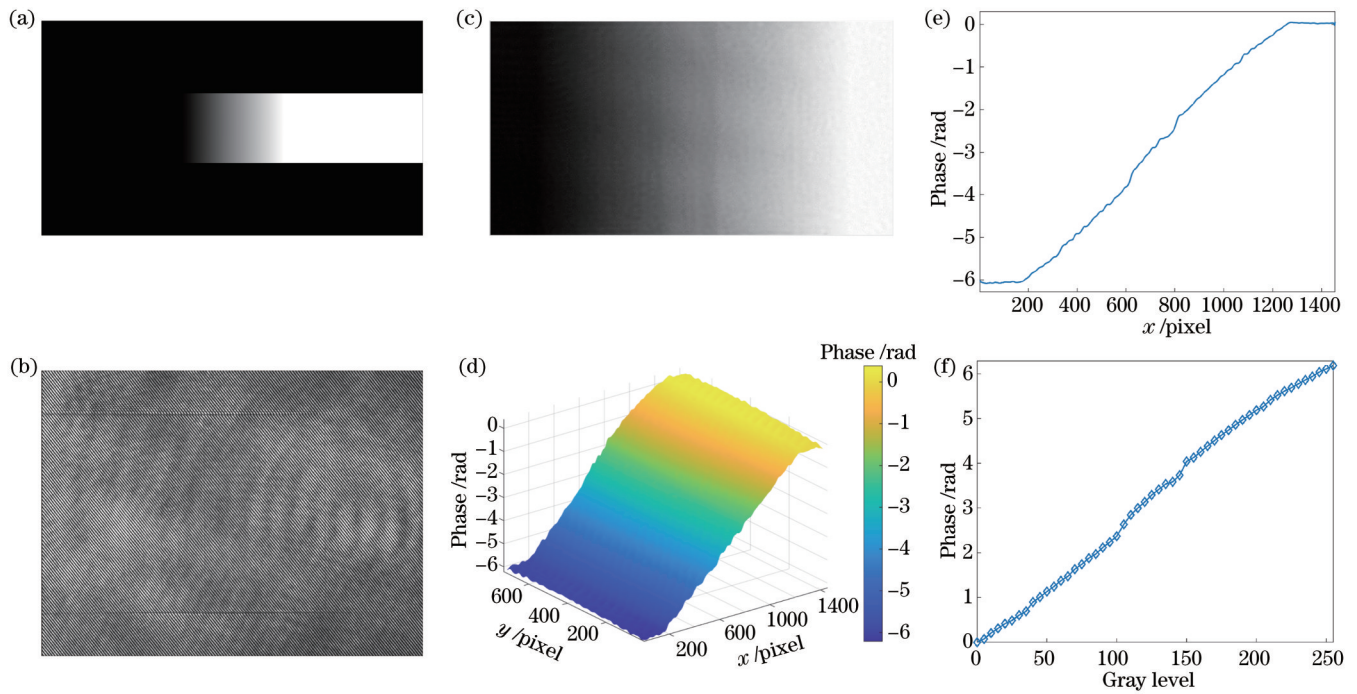


图 4 数字全息法的实验结果。(a)连续灰度级驱动图像;(b)像面数字全息图像;(c)相位展开图像;(d)相位的三维图像;(e)相位展开图像中逐像素列的平均相位值;(f)相位-灰度调制特性曲线

Fig. 4 Experimental results of digital holography. (a) Driving image of continuous gray level; (b) digital image-plane hologram; (c) unwrapped phase image; (d) three-dimensional image of unwrapped phase; (e) average phase value of each pixel column in unwrapped phase image; (f) modulation characteristic curve of phase and gray level

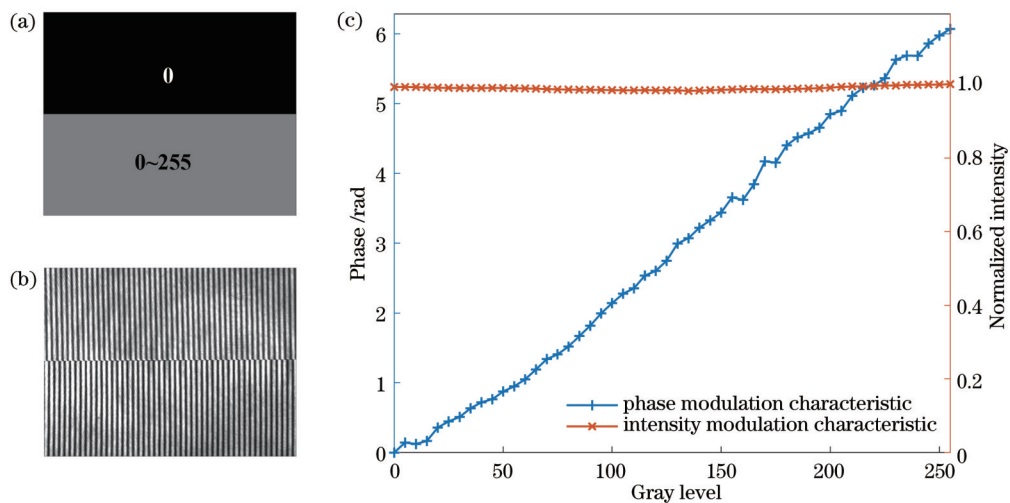


图 5 Twyman-Green干涉法的实验结果。(a)驱动灰度图像;(b)LC-SLM的干涉图像;(c)相位调制特性和归一化强度曲线

Fig. 5 Experimental results of Twyman-Green interferometry. (a) Driving grayscale image; (b) interferogram of LC-SLM; (c) phase modulation characteristics and normalized intensity curves

垂直,以及LC-SLM与CCD的像素尺寸不匹配等因素。相比于Twyman-Green干涉法,数字全息法无需记录大量的干涉图像,仅仅通过单幅数字像面全息图就能计算得出完整的相位-灰度调制特性曲线,且测量过程不易受到由外界环境变化和驱动电压不稳定等因素造成的LC-SLM液晶分子时间波动特性的影响,故具有测量精度高、实时性好的优点。

3.2 相位-灰度调制特性的非线性校正

基于LCoS技术的SLM通过在电极间施加电压,

使液晶分子根据电场的方向和强度进行排列,从而使入射光产生一定的相位延迟。然而,向列相液晶材料对驱动电压(驱动灰度)具有非线性响应,从而空间光调制器的相位-灰度调制特性存在固有的非线性。因此,基于反插值原理对相位响应的非线性进行校正,使空间光调制器能在工作范围内产生线性的相位延迟。

采用非线性误差来衡量相位-灰度调制特性的非线性程度,计算公式为

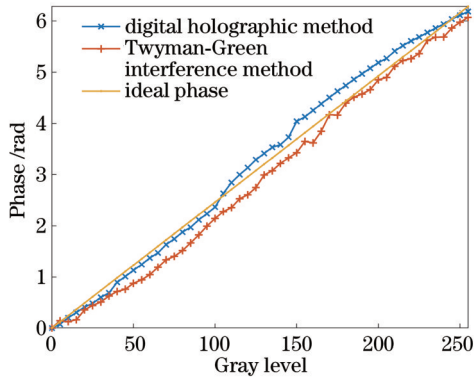


图 6 两种方法实验结果比较

Fig. 6 Comparison of experiment results of two methods

$$e = \frac{\max(\Delta\delta)}{\delta_{\max}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中: $\max(\Delta\delta)$ 为相位-灰度调制特性的实测曲线和理想线性曲线间的最大相位偏差; δ_{\max} 为最大相位调制

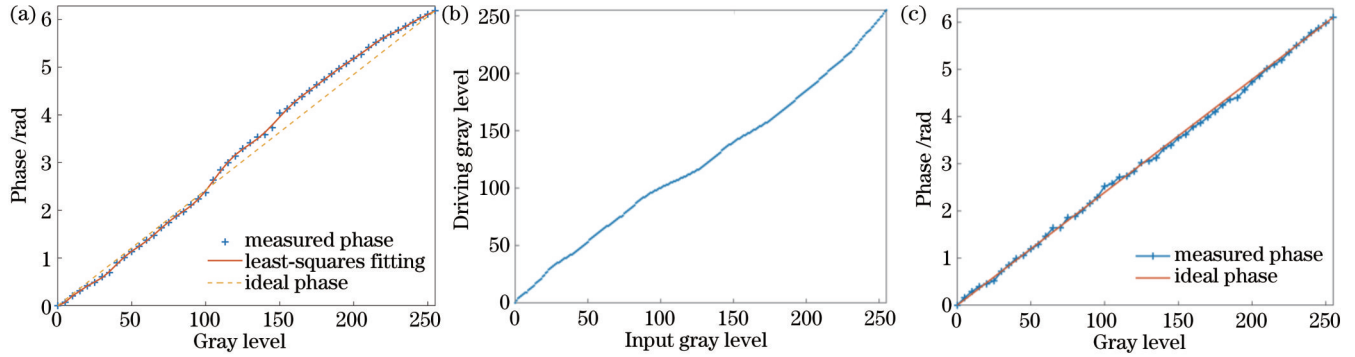


图 7 相位非线性校正的结果。(a)校正前的相位-灰度调制特性曲线;(b)灰度查找表曲线;(c)校正后实测的相位-灰度调制特性曲线

Fig. 7 Results of phase nonlinearity compensation. (a) Modulation characteristic curve of phase and gray level before compensation; (b) curve of gray look up table; (c) modulation characteristic curve of phase and gray level after compensation

将实际的相位调制特性曲线与理想线性曲线之间的相关系数 R 、残差平方和 (SSE) 和 RMSE 作为评价指标,校正前后的评价参数如表 1 所示。可以发现,非线性校正后相关系数 R 由 0.9977 提升到 0.9996, SSE 由 2.5880 降低到 0.1656, RMSE 由 0.2231 降低到 0.0564。 R 越接近于 1, SSE 和 RMSE 越接近于 0, 则实际的相位调制特性曲线越接近于理想线性曲线。由此可知,利用反插值法对相位调制曲线进行非线性校正,能够有效提升相位的线性驱动精度。

3.3 液晶空间光调制器的波长响应特性

由 2.1 节的式 (1) 可知,液晶分子具有双折射色散特性,LC-SLM 在工作状态下的相位-灰度调制特性直接受到入射光波长 λ 的影响。因此,对于在非标准光波波长下使用 LC-SLM 的情况,需要对 LC-SLM 的相位-灰度调制特性进行修正。设标准光波波长 λ_1 和非标准光波波长 λ_2 下的最大相位调制量分别为 δ_1 、 δ_2 , 则

量。在 3.1 节中,在标准光波波长 (633 nm) 下利用数字全息法开展了连续多次重复测量实验,得到的相位曲线的非线性误差为 6.5%, 对其进行非线性校正。首先,对测得的相位-灰度数据进行最小二乘多项式拟合,拟合曲线和理想相位曲线如图 7(a) 所示。然后,将 LC-SLM 在工作范围内理想线性的相位值作为反插值节点,通过分段三次 Hermite 插值法建立插值多项式,对拟合曲线进行反插值,计算出理想相位值对应的实际驱动灰度值,建立起用户输入灰度 (理想驱动灰度) 与实际驱动灰度之间的对应关系,如图 7(b) 所示。该曲线也被称为灰度查找表曲线,可以实现对空间光调制器的线性驱动,提高该器件用于高分辨波前调制的精度。利用校正后的灰度查找表对 LC-SLM 的相位-灰度调制特性进行重新标定,结果如图 7(c) 所示,灰度区间所对应的相位曲线的非线性误差为 2.45%, 相比于校正前降低了 62.3%。

表 1 校正前后相位-灰度调制特性曲线的评价参数

Table 1 Evaluation parameters for modulation characteristic curves of phase and gray level before and after compensation

| Evaluation parameter | Before compensation | After compensation |
|----------------------|---------------------|--------------------|
| R | 0.9977 | 0.9996 |
| SSE | 2.5880 | 0.1656 |
| RMSE | 0.2231 | 0.0564 |

λ_2 对 λ_1 的相位-波长调制修正系数可以表示为

$$\gamma = \frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (7)$$

为测量 LC-SLM 在非标准光波波长下的相位响应特性,在图 3 所示的数字全息测量系统中,将光源更换为波长为 670 nm 的单色光,对 LC-SLM 的相位-灰度调制特性进行重新标定,测得 LC-SLM 在 670 nm 下的相位调制范围为 0~5.641 rad。图 8 为 LC-SLM 在 633 nm 和 670 nm 波长下利用数字全息法测得的相位-

灰度调制特性曲线。

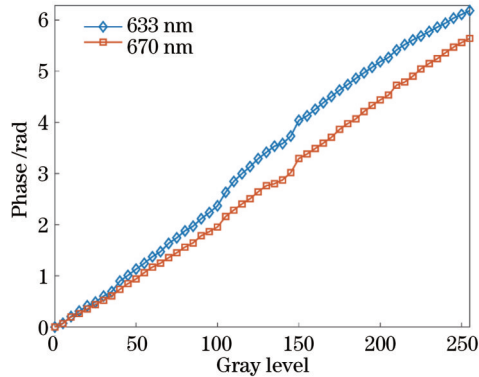


图 8 不同光波波长下的相位-灰度调制特性曲线

Fig. 8 Modulation characteristic curves of phase and gray level under different wavelengths

将 LC-SLM 在 633 nm 和 670 nm 波长下的最大相位调制量 6.185 rad 和 5.641 rad 代入式 (7) 中, 可得 670 nm 对 633 nm 波长的实际修正系数为 $\gamma = \delta_2 / \delta_1 = 0.9121$, 而理想修正系数为 $\gamma = \lambda_1 / \lambda_2 = 0.9448$, 相对误差为 3.46%, 这主要是由 LC-SLM 自身的相位调制波动误差导致的。结合理论推导和实验结果可知, 在同样的驱动灰度下, 入射光波长越大, LC-SLM 产生的相位延迟量越小, 故短波长光源适用于大范围的相位调制, 长波长光源适用于高精度的相位调制。对于双波长或多波长照明的光学系统, 需要在非标准光波波长下使用 LC-SLM 进行相位调制: 如果调制精度要求较低, 则直接乘以该波长相对于标准光波波长的相位-波长调制修正系数, 就能够修正该器件的实际相位调制范围; 如果调制精度要求较高, 则需要对 LC-SLM 在该波长下的相位-灰度调制特性进行重新标定, 以提高该器件的驱动精度。

4 结 论

提出了一种利用单幅数字全息图像对 LC-SLM 的相位调制特性实现快速标定的数字全息测量方法, 系统结构简单, 测量效率较高。实验结果表明, LC-SLM 在标准光波波长 (633 nm) 下的相位调制范围为 0~6.185 rad, 连续多次测量的重复性误差为 1.34%。在同一个光学系统中采用传统的 Twyman-Green 干涉法开展了对比实验, 其重复性误差为 2.44%, 进一步验证了数字全息法的测量精度较高。将反插值法应用于数字全息法测得的相位-灰度调制特性曲线中, 建立了输入灰度与驱动灰度对应的用户查找表, 使相位响应的非线性误差由 6.5% 降低到 2.45%, 有效提升了 LC-SLM 的线性驱动能力。最后, 在非标准光波波长 (670 nm) 下对该器件的相位-灰度调制特性进行了重新标定, 测得实际相位调制范围为 0~5.641 rad, 建立了相位-波长调制修正系数计算模型, 得到 670 nm 对

633 nm 波长的实际修正系数为 0.9121, 与理论修正系数的相对误差为 3.46%。本研究为 LC-SLM 在双波长干涉测量系统中的应用提供了参考, LC-SLM 在波前校正领域中具有较高的研究价值。

参 考 文 献

- [1] Xu Y S, Singh J, Sheppard C J R, et al. Ultra long high resolution beam by multi-zone rotationally symmetrical complex pupil filter[J]. Optics Express, 2007, 15(10): 6409-6413.
- [2] Liu D, Wang Y T, Zhai Z S, et al. Dynamic laser beam shaping for material processing using hybrid holograms[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 102: 68-73.
- [3] Zhang H, Xie J H, Liu J, et al. Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection[J]. Applied Optics, 2009, 48(30): 5834-5841.
- [4] 段雨飞, 李峰, 杨直, 等. 基于液晶空间光调制器进行光谱调制的飞秒啁啾脉冲放大系统[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1101001.
Duan Y F, Li F, Yang Z, et al. Femtosecond chirped pulse amplification system with liquid crystal spatial light modulator for spectral modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1101001.
- [5] Hendriks A, Naidoo D, Roux F S, et al. The generation of flat-top beams by complex amplitude modulation with a phase-only spatial light modulator[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8490: 849006.
- [6] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, et al. Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [7] 谢家俊, 许杭史, 余文慧, 等. 贝塞尔光束自重建的理论模拟与实验验证[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(6): 0617021.
Xie J J, Xu H S, Yu W H, et al. Numerical simulation and experimental confirmation on reconstruction of Bessel beam[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(6): 0617021.
- [8] 刘奎, 李治, 郭辉, 等. 使用空间光调制器产生高阶厄米高斯光束[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0905004.
Liu K, Li Z, Guo H, et al. Generation of high-order Hermite-Gaussian beams using a spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0905004.
- [9] 张怀智, 徐家明, 张兰天, 等. 硅晶圆多焦点激光隐切算法与实验[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202018.
Zhang H Z, Xu J M, Zhang L T, et al. Algorithm and experiment of silicon wafer multifocus laser stealth dicing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202018.
- [10] Li C, Xia M L, Mu Q Q, et al. High-precision open-loop adaptive optics system based on LC-SLM[J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10774-10781.
- [11] 艾勇, 段梦云, 徐洁洁, 等. LC-SLM 激光大气传输湍流模拟及通信实验分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3103-3109.
Ai Y, Duan M Y, Xu J J, et al. LC-SLM laser atmospheric transmission turbulence simulation and communication test[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3103-3109.
- [12] 梁言生, 姚保利, 雷铭. 全息光镊在生物学研究中的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207020.
Liang Y S, Yao B L, Lei M. Applications of holographic optical tweezers in biological research[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207020.
- [13] Song Q H, Wu Y M, Li J C, et al. Surface contour measurement by LC-SLM digital phase-shifting holography[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6832: 68320B.
- [14] 赵晓凤, 李大海, 陈祯培. 利用径向剪切干涉法测量液晶空间光调制器的位相调制特性[J]. 四川大学学报(自然科学版),

2002, 39(4): 675-679.

Zhao X F, Li D H, Chen Z P. Measuring phase modulation characteristics of liquid crystal spatial modulators by using cyclic radial shearing interference[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2002, 39(4): 675-679.

- [15] Zhang H X, Zhang J, Wu L Y. 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.

- [16] 刘永军, 宣丽, 胡立发, 等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(12): 1682-1686.

Liu Y J, Xuan L, Hu L F, et al. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(12): 1682-1686.

- [17] Zeng Y N, Lu J S, Chang X Y, et al. A method to improve the imaging quality in dual-wavelength digital holographic microscopy[J]. Scanning, 2018, 2018: 4582590.

Fast Measurement and Calibration Method for Phase Modulation Characteristics of Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Zeng Jingxiao¹, Hong Yujian¹, Lu Junsheng^{1,2**}, Wang Yuying¹, Fu Xiaofeng¹,
Hu Xiaodong^{1*}

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²School of Life Sciences, Tiangong University, Tianjin 300387, China

Abstract

Objective As a new type of phase modulator, the liquid-crystal spatial light modulator (LC-SLM) has been widely used in adaptive optics, optical communication, optical tweezers, and digital holography. However, the phase modulation characteristics of LC-SLMs are different generally, and the accuracy of phase modulation will be affected by their transportation processes and application environments. Therefore, it is essential to measure and calibrate the phase modulation characteristics of an LC-SLM before using the device for phase modulation and compensation. Nevertheless, the currently used measurement methods still suffer from limitations. Traditional radial shearing interferometry and Twyman-Green interferometry are usually inefficient and difficult to meet the requirements for rapid detection. Commercial Fizeau interferometers can only measure the phase modulation characteristics of the LC-SLM at a fixed light wavelength. In addition, these methods ignore the influence of light wavelength on phase modulation characteristics. In this study, a fast measurement and calibration method based on digital holography is proposed, and the phase modulation characteristics of the LC-SLM at different light wavelengths are systematically evaluated. Digital holography exhibits excellent measurement accuracy and efficiency. We expect that our method can be helpful in improving the accuracy of LC-SLMs in phase modulation and compensation.

Methods Digital holography is used to measure and calibrate an LC-SLM in this study. First, an experiment setup of a digital holography system is developed, in which the LC-SLM is used as an object. Then, a driving image with gray levels of 0-255 is loaded on the LC-SLM, and a digital hologram is recorded on the image plane. The phase distribution of the object wave can be obtained by using the reconstruction algorithm, and the relationship between the phase and the gray level of the LC-SLM at the specific wavelength can be determined. Next, without changing the structure of the setup, a comparative experiment is carried out using Twyman-Green interferometry, which requires 52 interference images to obtain the phase modulation characteristics. Afterwards, the inverse interpolation method is used to linearly correct the phase modulation curve and improve the driving accuracy of the LC-SLM. Finally, the formula of the phase correction coefficient at the specific wavelength is theoretically derived and experimentally verified by recalibrating the phase modulation characteristics at a non-standard light wavelength.

Results and Discussions The experimental results show that the maximum phase modulation value of the LC-SLM at the standard light wavelength of 633 nm is 6.185 rad, which is close to the pre-calibrated phase modulation value of 2π . The relative error is 1.56%, less than the maximum phase fluctuation of 5% given by the manufacturer, indicating that the measurement accuracy of digital holography is high (Fig. 4). The repeatability error of digital holography is 1.34%, which is lower than 2.44% of Twyman-Green interferometry (Fig. 6). Compared with Twyman-Green interferometry, digital holography can measure the phase modulation characteristics through one digital image-plane hologram. Moreover, the measurement process will not be easily affected by the time fluctuation characteristics of the LC-SLM caused by external environmental change and unstable driving voltage. Therefore, digital holography has the advantages of high measurement

accuracy and good real-time performance. Then, the inverse interpolation method is used to establish the look-up table (LUT) of the input gray level and the driving gray level, which effectively reduces the nonlinear error of the phase modulation characteristics from 6.5% to 2.45% (Fig. 7). Finally, the phase modulation characteristics of the LC-SLM at a non-standard light wavelength of 670 nm are recalibrated, and the maximum phase modulation value is 5.641 rad (Fig. 8). With the phase correction coefficient model built in this work, the actual correction coefficient of 670 nm relative to 633 nm is calculated to be 0.9121. The relative error between the actual correction coefficient and the theoretical correction coefficient is 3.46%, which is mainly caused by the phase modulation fluctuation error of the LC-SLM.

Conclusions In this study, a fast measurement method based on digital holography is proposed to calibrate LC-SLMs. With this method, the phase modulation characteristics at a specific wavelength can be measured in real time by using only one digital image-plane hologram. This method improves the measurement efficiency thanks to the simple system structure and no need for diffraction propagation calculation. Without changing the structure of the setup, a comparative experiment which uses Twyman-Green interferometry is carried out to verify that digital holography has higher measurement accuracy. The experimental results show that the phase modulation range of the LC-SLM is 0–6.185 rad at the standard light wavelength of 633 nm, and the nonlinear error of the phase modulation characteristics is reduced to 2.45% by the inverse interpolation method, which effectively improves the linear driving accuracy of the device. Depending on the wavelength response characteristics of the LC-SLM, a phase correction coefficient model at the specific wavelength is built, and the actual phase modulation range of the LC-SLM at a non-standard light wavelength of 670 nm is corrected. This study verifies the feasibility of using an LC-SLM for phase correction in dual-wavelength interference measurement systems.

Key words measurement; liquid-crystal spatial light modulator; phase modulation; digital holography; nonlinear correction; wavelength response