

相位型空间光调制器的自参考标定方法

李儒佳, 高云晖, 曹良才

引用本文:

李儒佳, 高云晖, 曹良才. 相位型空间光调制器的自参考标定方法[J]. 液晶与显示, 2021, 36(6): 854–860.

LI Ru-jia, GAO Yun-hui, CAO Liang-cai. Self-referenced methods for phase calibration of a spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 854–860.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于液晶空间光调制器的变倍率激光扩束技术研究

Laser beam expanding technology based on liquid crystal spatial light modulator

液晶与显示. 2018, 33(9): 764–771 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183309.0764>

基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展

Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators

液晶与显示. 2021, 36(6): 797–809 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0049>

基于单步曝光的光配向液晶器件研究及应用

Research and application: liquid crystal devices fabricated by single-exposure photoalignment

液晶与显示. 2021, 36(6): 761–771 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0032>

扭曲向列相液晶太赫兹相位调制器特性研究

Characteristics of twisted nematic liquid crystal terahertz phase modulator

液晶与显示. 2021, 36(3): 379–388 <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2020-0258>

空间光调制器用于多光束二维偏转的算法研究

Algorithm research of spatial light modulator for multi-beam two-dimensional deflection

液晶与显示. 2020, 35(6): 537–546 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203506.0537>

文章编号:1007-2780(2021)06-0854-07

相位型空间光调制器的自参考标定方法

李儒佳, 高云晖, 曹良才*

(清华大学 精密仪器系, 北京 海淀 100084)

摘要:相位型空间光调制器(SLM)是一种对光的相位信息进行定量调控的器件。由于制造和使用过程中的一些不确定因素,需要标定 SLM 的相位调制,即输入灰度和输出相位的响应(LUT)。本文介绍了基于自参考光路的 SLM 相位调制标定方法。通过在 SLM 上产生光栅相位,光栅的衍射级次作为参考光,与标定区域的光干涉、形成干涉图。利用傅立叶频谱分析技术和数字全息技术分析干涉图,可分别对 SLM 的全局 LUT 和局部 LUT 进行测量标定。自参考标定方法仅需一个分束器和 CMOS 即可标定 SLM,同时可实现原位标定,是一种简便高效的标定方法。

关键词:液晶空间光调制器;相位调制;相位标定;自参考;干涉法

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0046

Self-referenced methods for phase calibration of a spatial light modulator

LI Ru-jia, GAO Yun-hui, CAO Liang-cai*

(*Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Phase-only spatial light modulator (SLM) modulates the phase of the light quantitatively. Due to the limited manufacture process, the SLM need to be calibrated. The LUT describes the input grayscale and output phase, which represents the modulation. This article introduces the self-referenced calibration method for the SLM. The reference beam is generated from the grating zone. The measured beam carries the modulated phase on the measured zone. The interferograms are made by the self-reference beam. Using the fringes analysis method and digital holography technique, the global and spatial phase modulation of the SLM are measured for calibration. The self-referenced calibration method is compact and easy to align. On-site phase calibration can be carried out with a beam splitter and imaging sensor.

Key words: spatial light modulator; phase modulation; phase calibration; self-referenced method; interference method

收稿日期:2021-02-10;修订日期:2021-03-15.

基金项目:国家自然科学基金(No.61827825)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61827825)

* 通信联系人, E-mail: clc@tsinghua.edu.cn

1 引言

相位型空间光调制器(SLM)是一种可以对光的相位信息进行定量调控的数字器件,其被应用于诸多领域,如全息三维显示^[1-3]、波前传感相位成像^[4-6]、光操控^[7-8]等。由于SLM调制面板每层材料对环境变化的响应不同、有限加工精度导致的液晶层厚度分布不均、液晶对调制电压的非线性响应等潜在因素,实际使用SLM进行相位调制时具有调制误差^[9-11]。同时,由于SLM通过改变e光等效折射率调制相位,当SLM实际工作波长与预设工作波长不同时,相同的折射率也会调制出不同的相位。为了获得准确的相位调制,需要对SLM进行标定。

SLM的标定方法本质上是测量相位的方法。为此可使用传统的相位恢复算法^[12-13],通过衍射强度信息迭代求解相位。相位恢复是一个优化问题,所得到的解是迭代产生的近似解。同时,由强度信息求解复振幅信息的过程是一个病态过程,利用含有噪声的实验数据求解时迭代计算的鲁棒性不强。因而,利用相位恢复的方法还无法高效定量地标定SLM的调制相位。同时,可利用SLM的调制能力来模拟光学元件,如光栅^[14]、菲涅尔波带片^[15]等,通过测量所模拟的光学元件的傅立叶频谱强度变化,求解器件的调制相位变化。这种标定方法可定量地获得调制相位,光路抗干扰性强。但由于模拟一个完整的光学元件需要一定数量的SLM像素,通过该方法难以获得较高空间分辨率的测量结果。

干涉法利用干涉图记录相位信息,通过分析干涉图定量的求解相位。利用商用干涉仪可直接对SLM的调制相位进行定量测量,一般需要将SLM移入干涉仪的实验光路单独进行测量标定。对基于SLM的复杂实验系统而言,移动SLM可能会影响实验效率。同时,还可通过自建干涉光路测量SLM调制相位^[16-17],这种方法光路相对复杂,在标定时需要移动SLM,难以实现SLM的原位标定。

本文从SLM的常用标定方法出发,详细介绍了可以实现SLM相位调制原位标定的自参考标定方法。自参考标定方法利用SLM面板的部分区域产生光栅相位,光栅的衍射级次可作为参

考光,与携带调制相位的标定光形成干涉图。通过对干涉图作傅里叶频域分析^[18]和数字全息重建^[19],可分别定量地求解SLM的全局和局部相位调制。本文给出了对SLM进行全局标定后的相位调制响应,并进一步地对全局标定后的SLM的局部相位调制进行了测量。实验结果表明,自参考标定方法可以在简便的实验光路中实现对SLM相位调制的原位标定。

2 SLM常用标定方法

自参考的标定方法利用SLM的某一区域产生参考光,形成自参考的干涉光路,测量相位。以Holoeye公司的SLM为例,该公司提供常用的标定方案如图1所示。激光束经过扩束、准直、起偏后成为偏振的准直平面波,偏振方向由SLM的工作偏振方向决定。经过一个双孔掩膜后,平面波被分成两束,分别到达SLM的左右两个区域。SLM倾斜放置,将两束光沿斜向反射。经过一个透镜后,两束光汇聚相交,形成干涉条纹。

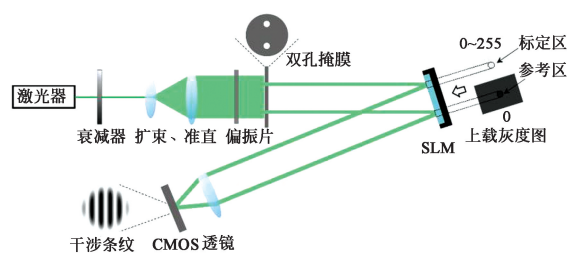


图1 一种SLM厂商提供的自参考的标定方法 (Holoeye GAEA2)

Fig.1 Configuration of the self-referenced calibration method(Holoeye GAEA2)

SLM的一半区域作为标定区域,均匀地上载0~255的灰度,因而标定区域产生从0不断增大的调制相位 φ_g 。SLM的另一半区域作为参考区域,均匀地保持上载0灰度,因而参考区域的调制相位为0。假设标定区域和参考区域的反射光强度均为 I_0 ,则形成的干涉条纹可表示为:

$$I = 2I_0(1 + \cos\varphi_g), \quad (1)$$

标定区域的调制相位不断增大,因而干涉条纹不断移动。通过干涉的基本原理,结合CMOS参数,即可通过干涉条纹的移动量,求解标定区域调制相位。

这种标定方法光路简便,但仍需单独搭建

SLM 的标定光路,且标定后需要重新移动、装调 SLM。同时,这种方法标定的区域仅为 SLM 面板上的一小部分区域。测量标定小部分区域的查找表(Look-up-Table, LUT)被应用至整个 SLM 的所有区域上。因此,这种方法是一种全局的 SLM 相位调制标定方法,即假设 SLM 上每个像素的调制响应一致,测量其中一部分像素的 LUT,以代表整个 SLM 的相位调制^[20]。

3 SLM 自参考标定方法

3.1 SLM 生成光栅产生参考光

SLM 的照明光源多为平行光,因此来自 SLM 不同区域的反射光也相互平行,无法自发地汇聚、干涉,因而传统方法为从外部引入参考光,或者如前文的方法由透镜折变、汇聚参考光和标定光形成干涉。SLM 是可以调制相位的器件,因此可以利用 SLM 的部分区域,产生相位光栅,利用光栅以级次衍射的性质,生成倾斜的参考光。

图 2 所示为利用 SLM 生成光栅进行自参考标定的光路。如图 2(b) 所示,实现标定功能的光路为一个等效的衍射光路。为了在衍射光路中产生参考光,可上载如图 2(d) 所示的灰度图。该灰度图分为两部分,一部分为标定区域,另一部分为光栅区域。在光栅区域,上载周期变化的相位,SLM 上的对应区域也会产生光栅相位。因此,在如图 2(c) 所示的衍射光路中,由 SLM 光栅区域出射的光会以级次倾斜出射。在标定区域上载均匀相位,SLM 的对应区域也产生大致均匀的平面相位。因此,由 SLM 标定区域出射的光会直接出射。经过一定距离后,倾斜出射的光作为参考光会与直接出射的标定光干涉,形成干涉图记录调制相位。

利用图 2 所示的自参考标定光路,可以实现 SLM 的原位标定。对需要标定的 SLM,在 SLM 前插入放置一个分束器,并在合适位置放置 CMOS 采集干涉图,即可完成标定数据的采集,进而完成标定。

未标定的 SLM 无法产生理想光栅,作为参考光的光栅衍射级次有着不均匀的强度和相位。在实验中,当参考光强度不均匀时,干涉条纹对比度可以满足计算相位的需求。分析干涉图得到的相位值代表参考光和标定光间的相位差值。设差值为 $\varphi_{m,r,i}$, $\varphi_{m,r,i} = \varphi_m + \varphi_r + \varphi_i$ 。其中, φ_m 为待

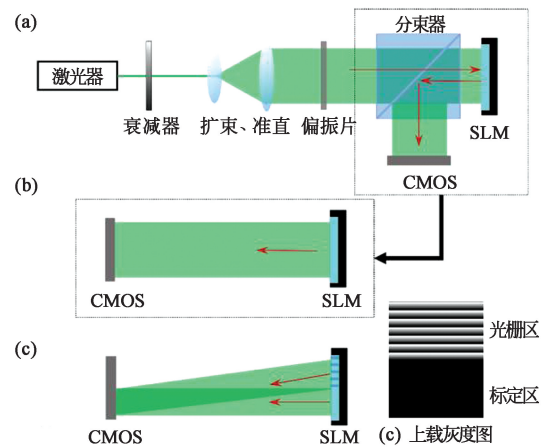


图 2 利用 SLM 生成光栅的自参考标定光路。(a) 实验标定光路示意图; (b) SLM 至 CMOS 的等效衍射光路; (c) SLM 生成光栅后, SLM 至 CMOS 的等效衍射光路; (d) 上载的含光栅的标定灰度图。

Fig.2 Configuration of the self-referenced calibration method using SLM generated grating. (a) Calibration setup; (b) Equivalent diffraction setup from the SLM to the imaging sensor; (c) Equivalent diffraction setup with uploaded grating; (d) Uploaded calibration pattern with grating.

求解调制相位, φ_r 为不均匀参考光的相位分布, φ_i 为实验光路中的其他相位误差。在标定过程中,光栅区域上载的灰度图样保持不变, φ_r 保持不变。标定开始时,首先在标定区域上载 0 灰度值,则 $\varphi_m = 0$,此时计算干涉图得到的相位差值可表示为: $\varphi_{0,r,i} = 0 + \varphi_r + \varphi_i$ 。标定开始后,在标定区域上载某一灰度值,对应的调制相位可作差求出: $\varphi_m = \varphi_{m,r,i} - \varphi_{0,r,i}$ 。因此,即使实际光栅参数不够理想,依然可由自干涉法求出调制相位。

3.2 多参考光束的全局相位调制标定

在上述干涉标定方法中,参考光仅有一束,且与标定光不共路。产生的干涉图易受环境扰动,影响相位求解。为提高标定方法的稳定性,清华大学的高云辉等人提出了一种多参考光束的自参考全局相位标定方法^[18]。基于多光束干涉及频域分析方法,可以有效提高相位求解的稳定性。

从 SLM 至 CMOS 的等效光路示意图如图 3 所示。通过改变上载的标定灰度图,实现多参考光。上载的灰度图可被分成上、中、下 3 部分。上下两侧为互相成一定倾角的光栅。经过光栅相位

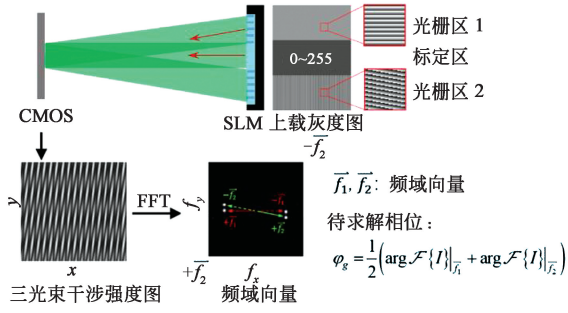


图 3 多参考光束全局相位调制标定示意图

Fig.3 Schematic of the multi-referenced method

调制后,SLM 光栅区的光以级次出射。这里使用的光栅相位为闪耀光栅相位,将两光栅相对放置,可使 SLM 的两出射光在空间某一位置重叠、共同作为参考光。SLM 标定区的光携带调制相位信息直接出射,与两参考光形成三光束干涉。图 3 所示为有两参考光时形成的三光束干涉图,其强度分布 I 为:

$$I = A_g^2 + A_1^2 + A_2^2 + 2A_g A_1 \cos \varphi_{g1} + 2A_g A_2 \cos \varphi_{g2} + 2A_1 A_2 \cos \varphi_{12}, \quad (2)$$

其中, A_1, A_2 分别为两参考光束的振幅, φ_{12} 为与测量无关的相位项。 A_g 为标定区域反射光的振幅, φ_{g1} 和 φ_{g2} 为含有待测相位 φ_g 的相位项。待测量相位项可被表示为空间频率项的形式:

$$\begin{cases} \varphi_{g1} = 2\pi(\vec{f}_g - \vec{f}_1) \cdot \vec{r} \\ \varphi_{g2} = 2\pi(\vec{f}_g - \vec{f}_2) \cdot \vec{r} \end{cases}, \quad (3)$$

其中, $\vec{f}_g$ 为待测量相位的空间频率, $\vec{f}_1, \vec{f}_2$ 分别为两参考光束的空间频率, $\vec{r}$ 为频域空间的单位向量。当产生参考光的闪耀光栅周期为 P , 两光栅间倾角为 α 时,参考光束的空间频率为:

$$\begin{cases} \vec{f}_1 = \left(\frac{1}{P}, 0 \right) \\ \vec{f}_2 = \left(-\frac{1}{P}, \frac{\tan \alpha}{P} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

因此,待求解的相位项可表示为:

$$\begin{cases} \varphi_{g1} = \frac{2\pi x}{P} - \varphi_g \\ \varphi_{g2} = \frac{2\pi x}{P} + \frac{2\pi y \tan \alpha}{P} - \varphi_g \end{cases}, \quad (5)$$

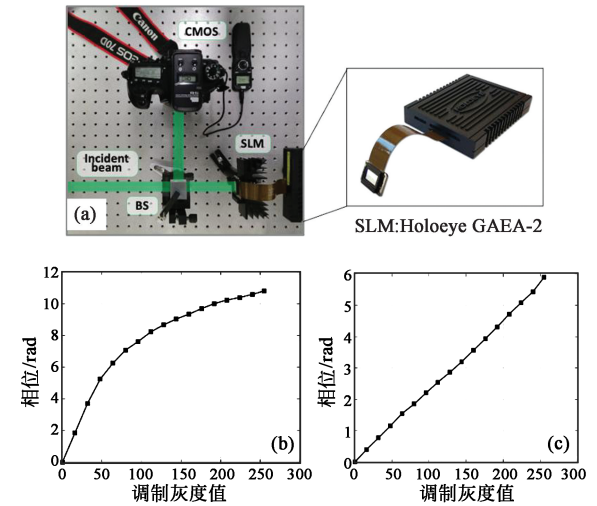
为从多光束干涉光强中求出某一灰度下的调制相位 φ_g , 可对干涉图进行傅里叶变换,根据空间频率求解相位。在有两束参考光时,干涉图的频谱

中有两对频域向量,此时调制相位 φ_g 可由两对向量的平均值表示:

$$\varphi_g = \frac{1}{2} (\arg F\{I\} |_{\vec{f}_1} + \arg F\{I\} |_{\vec{f}_2}), \quad (6)$$

其中, $\arg$ 代表取幅角, $F\{\}$ 代表傅里叶变换。

我们利用该方法测量标定了 HOLOEYE 公司生产的出厂状态下的 GAEA-2 型 SLM, 实验光路如图 4(a) 所示。标定区域的灰度由 0~255 以 16 的间隔均匀增加, 并使用相机分别采集标定区域不同灰度下的 17 张干涉图。使用频域分析求解相位, 实验光路如图 4(a) 所示。当处于未标定状态时, SLM 处于非线性的过调制状态, 无法直接使用。通过对测得的 SLM 调制曲线进行线性拟合, 可以标定建立线性的 LUT。标定后的 LUT 如图 4(c), 此时标定后的 SLM 可以进行线性的相位调制。

图 4 (a)多参考光束标定实验光路; (b)未标定时的 LUT; (c)标定后的 LUT^[18]。Fig.4 (a) Experimental calibration setup; (b) Measured LUT without calibration; (c) Calibrated LUT^[18].

利用多参考光束的方法,可以实现更稳定的相位标定。由于相位是根据干涉条纹的傅立叶变换进行求解的,利用一束参考光生成干涉图时,只有一对频域向量可用于求解相位。利用多参考光的方法,可以产生多对频域向量,利用多对频域向量可平均求解相位,提高标定系统的稳定性。在多参考光束的方法中,可以实现对 SLM 相位调制的全局标定,获得全局 LUT。对干涉图做傅立叶变换后进行频域分

析,求解得到的相位代表干涉图上的整体相位,即 SLM 标定区上的相位调制的平均值。相较于选取 SLM 部分代表整体调制的方法,这种方法求解得到的 LUT 更能反应 SLM 的整体调制响应。

3.3 基于数字全息局部相位调制标定

前文介绍的自参考标定方法可以标定 SLM 的全局 LUT,测量得到的全局 LUT 仅能代表 SLM 面板上所有像素的平均响应。由于 SLM 液晶层的厚度变化或一些其他的缺陷,SLM 面板不同像素的相位调制可能是不同的^[14,20]。因此,对调制精度要求更高的实验场景,需要标定 SLM 的局部 LUT。为了使自参考的方法具有标定局部相位调制的能力,我们提出了基于数字全息技术的 SLM 局部相位调制标定方法^[19]。

基于数字全息技术的等效标定光路如图 5 所示。上载的灰度图分为两个区域,分别为光栅区和标定区。光栅区为闪耀光栅灰度分布,用以使 SLM 的对应区域产生参考光。标定区上载从 0~255 的灰度值,使 SLM 产生不同灰度下的调制相位。标定区域的标定光与参考区域的参考光干涉,形成全息图 I :

$$I = |R e^{i\varphi_r} + O e^{i\varphi_o}|^2 = |R|^2 + |O|^2 + 2R O e^{i(\varphi_r - \varphi_o)} + 2R O e^{i(\varphi_o - \varphi_r)}, \quad (7)$$

其中, R 和 O 分别为参考光和标定光的振幅, φ_r 和 φ_o 分别为参考光和标定光的相位。为了重建标定光的相位,可使用参考光照射全息图。

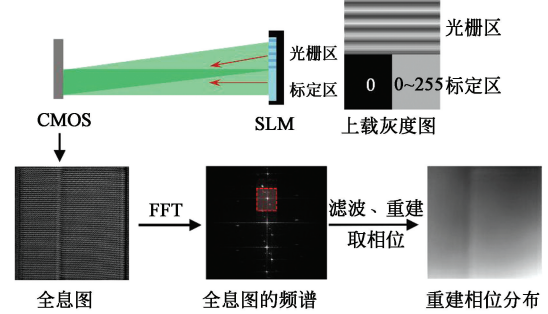


图 5 基于数字全息的局部相位调制标定示意图^[19]

Fig.5 Schematic of the spatial uniformity calibration based on digital holography^[19]

$$I \times R e^{i\varphi_r} = (|R|^2 + |O|^2) R e^{i\varphi_r} + |R|^2 O e^{i(2\varphi_r - \varphi_o)} + |R|^2 O e^{i\varphi_o}, \quad (8)$$

由于参考光与标定光呈一定角度,因此标定系统是一个离轴全息系统^[21]。通过傅里叶频域滤波,可直接获得含有待求解相位的项,即 $|R|^2 O e^{i\varphi_o}$ 。

将全息图进行滤波后,获得的待求解项表示标定光场在全息图平面的复振幅分布,而待求解的是 SLM 平面的相位分布。因此 SLM 平面的调制相位可通过菲涅尔衍射传播获得:

$$\varphi_o(x_o, y_o) = \arg \left\{ \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp \left[\frac{ik}{2z} (x_o^2 + y_o^2) \right] \times F \left\{ |R|^2 O \exp[i\varphi_o(x_o, y_o)] \times \exp \left[\frac{ik}{2z} (x_o^2 + y_o^2) \right] \right\} \right\}, \quad (9)$$

其中, k 为由照明光波长 λ 决定的波数, x, y, x_o, y_o 分别为全息图平面和 SLM 平面的坐标, z 为两平面之间的距离。当闪耀光栅周期为 P 、SLM 的边长为 L 时,两平面之间的距离为:

$$z = \frac{L}{2 \tan \theta}, \quad \sin \theta = \frac{\lambda}{P}. \quad (10)$$

数字全息技术可以重建相位分布,重建的分辨率由系统的几何尺寸决定。根据衍射距离 z ,结合系统几何参数,可求解标定系统的相位成像数值孔径 NA。当 CMOS 采样间隔为 P_{camera} 时,NA 为:

$$NA = \frac{\lambda \times M \times P_{\text{camera}}}{L \times P}, \quad (11)$$

其中, M 为 CMOS 平面全息图的有效像素数。由于对全息图的采集还需要满足采样定理,因此,重建局部相位调制的空间分辨率 δ 由数值孔径和 CMOS 的像素尺寸共同决定^[22]:

$$\delta \geq \max \left\{ 0.82 \frac{\lambda}{NA}, 2P_{\text{camera}} \right\}. \quad (12)$$

利用数字全息技术可以重建 SLM 的调制相位分布。改变上载至 SLM 的灰度,可以重建出不同灰度下的调制相位分布。由于使用数字全息的方法对每个灰度下的调制相位具有空间分辨的能力,可根据需要对 SLM 上的某个点或区域进行测量,标定 SLM 的局部相位调制。由于本方

法也采用了自参考光路,因而也可对 SLM 进行原位标定。

我们利用该方法测量标定了 HOLOEYE 公司生产的 GAEA-2 型 SLM,分辨率为 $3\,840 \times 2\,160$,像素尺寸 $3.8\,\mu\text{m}$ 。标定时,向 SLM 上载图 5 中的灰度图,实验光路如图 6(a)。标定区域

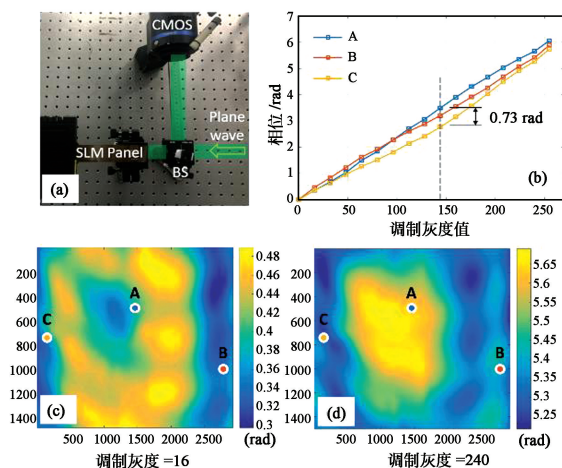


图 6 (a)基于数字全息方法的标定实验光路;(b)A、B、C三个观测点的局部 LUT;(c)调制灰度为 16 时,标定区域的调制相位分布;(d)调制灰度为 240 时,标定区域的调制相位分布^[19]。

Fig.6 (a) Experimental calibration setup based on digital holography; (b) Measured LUT on the A, B and C points; (c) Phase profile with modulated grayscale of 16; (d) Phase profile with modulated grayscale of 240^[19].

的灰度由 0~255 以 16 的间隔均匀增加,并使用相机分别采集标定区域不同灰度下的 17 张全息图。利用数字全息的方法,可以直接衍射重建出 SLM 在不同调制灰度下的调制相位分布。当标定区域调制灰度为 16 和 240 时,求解出的相位分布如图 6(c)、(d)所示。通过在标定区域内选取测量点,可标定出测量点处 SLM 的局部相位调制。在实验中测得的 A、B、C 三个测量点的局部 LUT 如图 6(b)所示,当调制灰度为 144 时,3 个测量点处的调制相位最大差值为 0.73 rad。通过分别对 3 个测量点处的 LUT 进行线性拟合,可对局部 LUT 进行标定。

4 结 论

本文介绍了 SLM 调制的基本原理和厂商提供的一种标定方法,总结了基于自参考光路的 SLM 相位调制标定方法。自参考方法的光路简便,光学元件易得。在 SLM 的工作光路中,插入一个分束器引出调制光后即可记录干涉图、求解相位,可以实现 SLM 的原位标定。自参考标定方法的核心是上载灰度图样设计和干涉图的分析方法,通过傅立叶频谱分析技术和数字全息技术,可分别求解 SLM 的全局 LUT 和局部 LUT。通过借鉴其他干涉测量方法,如四步相移法,可利用自参考的标定光路实现更有效的标定。

参 考 文 献:

- [1] MA Q G, CAO L C, HE Z H, *et al.* Progress of three-dimensional light-field display [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(11): 111001.
- [2] HE Z H, SUI X M, JIN G F, *et al.* Progress in virtual reality and augmented reality based on holographic display [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A74-A81.
- [3] 吴广志,张吟盛,茆文艺.基于并行结构的相位恢复算法在全息激光投影中的应用[J].液晶与显示,2014,29(6): 1010-1015.
WU G Z, ZHANG H S, MAO W Y. Application of phase recovery algorithm based on parallel architecture in holographic projection technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1010-1015. (in Chinese)
- [4] LI R J, CAO L C. Complex wavefront sensing based on alternative structured phase modulation [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A48-A53.
- [5] GAO Y H, CAO L C. High-fidelity pixel-super-resolved complex field reconstruction via adaptive smoothing [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(24): 6807-6810.
- [6] WU Y C, SHARMA M K, VEERARAGHAVAN A. WISH: wavefront imaging sensor with high resolution [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 44.
- [7] CHIZARI S, SHAW L A, HOPKINS J B. Simultaneous printing and deformation of microsystems via two-photon

- lithography and holographic optical tweezers [J]. *Materials Horizons*, 2019, 6(2): 350-355.
- [8] CAI Y N, YAN S H, WANG Z J, *et al.* Rapid tilted-plane Gerchberg-Saxton algorithm for holographic optical tweezers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 12729-12739.
- [9] 申文, 马文超, 胡栋挺, 等. 温度对液晶波前校正器响应速度及 LUT 的影响研究[J]. 液晶与显示, 2018, 33(11): 911-917.
- SHEN W, MA W C, HU D T, *et al.* Effect of temperature on LUT and response speed of liquid crystal wavefront corrector [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(11): 911-917. (in Chinese)
- [10] 郭玉强, 王翼飞, 刘建龙, 等. 取向层厚度及介电常数对 TN-LCD 影响的研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(11): 1017-1022.
- GUO Y Q, WANG Y F, LIU J L, *et al.* Effect of thickness and dielectric constant of alignment layer on the TN-LCD [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(11): 1017-1022. (in Chinese)
- [11] 叶文江, 刘小松, 宋晓龙, 等. 基板锚定特性对液晶盒电容的影响[J]. 液晶与显示, 2014, 29(5): 686-691.
- YE W J, LIU X S, SONG X L, *et al.* Influence of anchoring property of substrate on capacitance of liquid crystal cell [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(5): 686-691. (in Chinese)
- [12] KOHLER C, ZHANG F, OSTEN W. Characterization of a spatial light modulator and its application in phase retrieval [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(20): 4003-4008.
- [13] HART N W, ROGGMANN M C, SERGEYEV A V, *et al.* Characterizing static aberrations in liquid crystal spatial light modulators using phase retrieval [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(8): 086601.
- [14] ENGSTRÖM 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.
- [15] MENDOZA-YERO O, MÍNGUEZ-VEGA G, MARTÍNEZ-LEÓN L, *et al.* Diffraction-based phase calibration of spatial light modulators with binary phase Fresnel lenses [J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1027-1032.
- [16] YANG L, XIA J, CHANG C L, *et al.* Nonlinear dynamic phase response calibration by digital holographic microscopy [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7799-7806.
- [17] 刘冬梅, 刘娟, 张昭, 等. 相位型液晶空间光调制器初始相位的校准与多波长响应的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(4): 041203.
- LIU D M, LIU J, ZHANG Z, *et al.* Study of initial phase calibration and multi-wavelength response of phase-only spatial light modulator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 041203. (in Chinese)
- [18] GAO Y H, LI R J, CAO L C. Self-referenced multiple-beam interferometric method for robust phase calibration of spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 34463-34471.
- [19] LI R J, GAO Y H, CAO L C. *In situ* calibration for a phase-only spatial light modulator based on digital holography [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(5): 053101.
- [20] LI R J, CAO L C. Progress in phase calibration for liquid crystal spatial light modulators [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(10): 2012.
- [21] CUCHE E, BEVILACQUA F, DEPEURSINGE C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(5): 291-293.
- [22] COTTE Y, TOY F, JOURDAIN P, *et al.* Marker-free phase nanoscopy [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 113-117.

作者简介:



李儒佳(1995—),男,黑龙江七台河人,博士研究生,2018年于中央民族大学获得学士学位,主要从事定量相位测量方面的研究。E-mail: lrj18@mails.tsinghua.edu.cn



曹良才(1977—),男,湖北公安人,博士,副教授,2005年于清华大学获得博士学位,主要从事全息光学方面的研究。E-mail: clc@tsinghua.edu.cn