

文章编号 1004-924X(2025)23-3630-09

# 利用双光栅实现液晶空间光调制器绝对干涉校准

张国峰<sup>1</sup>, 张军勇<sup>2</sup>, 王 驰<sup>1\*</sup>

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444;

2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 高能激光与物理国家实验室, 上海 201800)

**摘要:**液晶空间光调制器(Liquid-Crystal Spatial Light Modulators, LC-SLM)在光场调控等领域极具发展潜力,但未校准的 SLM 输出相位不规则,且受实验条件及环境因素影响,相位调制精度难以调控。因此,本文对该调制器进行准确测试与标定,以保障在相关领域稳定且精准应用。基于费马原理和惠更斯-菲涅尔原理,将光栅与衍射透镜组合成衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)。利用一对光栅产生三对焦点,中间重合焦点产生干涉条纹,其余光束构建绝对坐标系以确定条纹运动参考点。运用 U-Net 神经网络预处理干涉条纹图像,通过轮廓检测和质心算法提取关键质心,经计算条纹位移和周期确定相位延迟。最后,搭建包括高相干光源、分束器、LC-SLM、分束光栅和 CCD 相机的相位校准系统开展实验。实验结果表明,在加载不同灰度调制序列的过程中,干涉条纹随灰度值变化发生了可观测的位移,成功获取相位-灰度响应曲线。拟合结果与理论基本一致,决定系数  $R^2$  达 0.985 1,均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)为 0.241 1 rad,且在风扇扰动下仍能维持  $R^2 > 0.95$ , RMSE 仅增加 0.14 rad,验证了方法的稳健性与抗干扰能力。利用双光栅构建绝对空间坐标系的 LC-SLM 高精度相位标定方法,克服了传统 SLM 标定方法对装置稳定性要求高、易受干扰、精度欠佳等缺点,为 LC-SLM 的精确标定提供了可靠方案。

**关键词:**液晶空间光调制器;绝对干涉校准;光栅衍射;抗振性;U-Net 神经网络

中图分类号:O436;TH744 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253323.3630 CSTR:32169.14.OPE.20253323.3630

## Absolute interferometric calibration of liquid crystal spatial light modulators using dual gratings

ZHANG Guofeng<sup>1</sup>, ZHANG Junyong<sup>2</sup>, WANG Chi<sup>1\*</sup>

(1. College of Electromechanical Engineering and Automation, Shanghai University,  
Shanghai 200444, China;

2. National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and  
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

\* Corresponding author, E-mail: wangchi@shu.edu.cn

**Abstract:** Liquid-crystal spatial light modulators (LC-SLMs) hold great promise for applications such as light-field modulation. However, the phase of uncalibrated SLM outputs is typically irregular, and the accuracy of phase modulation is difficult to control due to experimental and environmental perturbations. Accurate testing and calibration of LC-SLMs is therefore essential to ensure stable and precise performance in

收稿日期:2025-05-06;修订日期:2025-06-09.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2023YFF0722902);国家自然科学基金资助项目(No. 62175245);中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助项目(No. XDA25020302, No. XDA25020101)

practical applications. In this study, a diffractive optical element (DOE) combining a grating and a diffractive lens is designed based on Fermat's principle and the Huygens - Fresnel principle. A pair of gratings is employed to generate three pairs of focal points; interference fringes are produced by the overlapping central foci, while the remaining beams form an absolute spatial coordinate system that determines the reference point for fringe motion. A U-Net neural network is applied to preprocess the interference fringe images, after which the key centroid positions are extracted using contour detection and a center-of-mass algorithm. The phase delay is then obtained by calculating the fringe displacement and period. A phase calibration system comprising a high-coherence light source, beam splitter, LC-SLM, beam-splitting grating, and CCD camera is constructed to perform the experiments. During the loading of different grayscale modulation sequences, the interference fringes exhibit clearly observable displacements as the grayscale values vary, enabling the successful extraction of the phase-grayscale response curve. The fitted results show high consistency with theoretical predictions, with a coefficient of determination  $R^2$  of 0.985 1 and a root mean square error (RMSE) of 0.241 1 rad. Under fan-induced perturbations, the method still maintains  $R^2 > 0.95$ , and the RMSE increases by only 0.14 rad, demonstrating strong robustness and resistance to interference. A high-precision phase calibration method for LC-SLMs is thus proposed, in which a double-grating structure is used to construct an absolute spatial coordinate system. This approach overcomes the limitations of traditional SLM calibration methods, including stringent stability requirements, susceptibility to environmental disturbances, and limited accuracy, and provides a reliable scheme for accurate phase calibration of LC-SLMs.

**Key words:** liquid-crystal spatial light modulator; absolute interferometric calibration; grating diffraction; vibration resistance; U-Net neural network

## 1 引 言

液晶空间光调制器(Liquid Crystal Spatial Light Modulator, LC-SLM)作为一种可编程的动态光学器件,是操纵激光束振幅和相位的优秀工具<sup>[1-2]</sup>。因此,它被广泛应用于波前相位调制等关键技术中,在光场调控<sup>[3-4]</sup>、自适应光学<sup>[5-6]</sup>、光通信<sup>[7]</sup>、成像<sup>[8]</sup>和数字全息<sup>[9-10]</sup>等领域均有广阔的发展前景。由于不同型号的LC-SLM常具有不同的相位调制特性,在一个均匀的二维灰度值驱动下,未经过校准的SLM输出的相位是一个高低不平的曲面,且相位调制精度容易受到运输过程及使用环境等因素的影响,故在使用前进行测试与标定是LC-SLM应用于波前调制与波前校正中必不可少的环节。

目前,常用的SLM标定方法分为衍射法<sup>[11]</sup>和干涉法<sup>[12]</sup>。衍射法通过上传虚拟光学元件或编码灰度图,从而将SLM相位分布转换为光谱或唯一强度特征,虽然基本的衍射形状没有改变,但强度分布可能发生漂移。干涉法包括

Twyman-Green干涉法<sup>[13]</sup>、Michael-son干涉法<sup>[14]</sup>和Mach-Zehnder干涉法<sup>[15]</sup>等,主要是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。本课题组提出了一种基于相位的绝对干涉标定方法<sup>[16]</sup>,但该方法的波前像差影响数据处理,需要多次平均来减小误差。以上方法均对实验装置的稳定性要求较高,容易受到外界干扰,并存在精度不足的特点。

考虑到光束质量和系统稳定性,在使用干涉法进行SLM标定过程中应该保证干涉图像的清晰,以及条纹移动的准确性。由于SLM调制过程中不可避免地引入背景光和系统散射,干涉条纹的精确定位会受到干扰。U-Net神经网络<sup>[17]</sup>因其可对特征图进行逐层编码-解码处理,并能够有效保留空间细节信息与上下文语义,而广泛应用于医学图像和精细结构的分割任务中。对称的网络结构和跳跃连接机制使U-Net神经网络在低信噪比干涉图像中依然能够实现高精度、亚像素级的条纹骨架提取,显著提升了干涉条纹中心线的检测能力,可以为后续的相位位移计算与

精度标定提供可靠支撑。因此,本文提出一种通过光栅分光构建绝对坐标系实现 LC-SLM 高精度标定的方法,并利用 U-Net 神经网络处理得到光滑的干涉条纹骨架线,进一步计算相位位移量。该方法利用一对光栅产生三对焦点,处于中间位置的焦点用于干涉,剩余光束作为一个固定的信号来构建绝对坐标系。干涉条纹和坐标原点都来自 SLM 的调制光束,因此干涉条纹和坐标原点位置相对固定。通过 U-Net 图像分割神经网络提取干涉条纹特征,并采用算法获取干涉条纹宽度及条纹移动量,进而计算相位延迟。此方法可以有效抵消系统振动及其他外部环境的干扰。

## 2 原理与仿真

### 2.1 LC-SLM 的相位调制原理

LC-SLM 调制相位的原理基于液晶材料独特的光学性质和电光效应。LC-SLM 中的液晶分子在未施加电场时,具有特定的排列取向,当在 LC-SLM 上施加外部电场,即加载驱动电压时,液晶分子的指向会发生改变,这种指向变化会导致液晶材料的双折射特性改变,进而产生光程差,实现对入射光的相位调制<sup>[18]</sup>。从微观角度来看,液晶分子的长轴方向会在电场作用下发生旋转,使得沿着不同方向传播的光在液晶层中经历不同的光程。

当一束波长为  $\lambda$  的线偏振光入射到 SLM 上,穿过厚度为  $d$  的液晶层,无外加驱动电压时,  $e$  光和  $o$  光之间的相位差可以表示为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d [n_e(\theta_z) - n_o] dz, \quad (1)$$

其中:  $n_e(\theta_z)$  为  $e$  光的等效折射率。根据晶体的折射率椭球公式得到:

$$n_e(\theta_z) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \theta_z + n_e^2 \sin^2 \theta_z}}, \quad (2)$$

其中:  $n_e$  为非常光的折射率,  $n_o$  为寻常光的折射率,  $\theta$  为未加电场时液晶分子长轴与外加电场时液晶分子长轴的夹角。通过在 LC-SLM 上加载灰度序列图,调整不同像素位置的驱动电压来控制液晶分子长轴偏转角的变化,就可以实现对光束偏转方向和角度的精确控制,最终达到调制光束相位的目的。

### 2.2 衍射原理与仿真

根据费马原理<sup>[19]</sup>和惠更斯-菲涅尔原理<sup>[20]</sup>,通过在衍射透镜上加工特定的光栅结构,可以实现对入射光的相位调制。引入更多衍射级次(如  $\pm 2, \pm 3$  级)虽可在理论上增加参考点数量,但实际上这些高阶光斑能量显著减弱,干涉条纹对比度下降,极易受到系统噪声与环境扰动影响,降低了条纹提取精度与系统稳定性。综合考虑干涉图信噪比和标定稳定性,选择  $\pm 1$  级的 4 个衍射光斑作为参考点更加合理且实用。具体来说,当光的波长和光栅的周期恰当,衍射现象使得 Ronchi 光栅将光束分为如图 1 所示的 0 级(未衍射光)和  $\pm 1$  级(正、负方向的衍射光)三束光线,在远场聚焦为 3 个沿垂直于光栅周期方向排列的焦点。

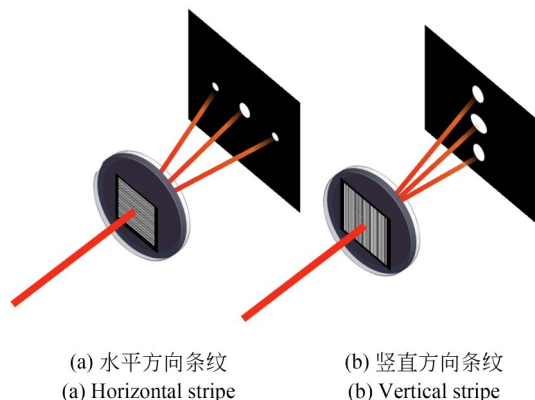


图 1 Ronchi 光栅衍射原理

Fig. 1 Principle of Ronchi grating diffraction

基于以上原理,利用 Matlab 生成规律的光栅朗奇刻线来模拟衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE),如图 2 所示。此次设计的 Ronchi 光栅尺寸为 5.12 mm,光栅周期精确设定为 160  $\mu\text{m}$ ,占空比为 1:1,且相位差为  $0.8\pi$ 。用同一光束照射在两个互相垂直的 Ronchi 光栅上,则中间位置的一对焦点重合,从而发生干涉效应。

光栅参数经过仿真验证后采用光刻、刻蚀等一系列高精度加工工艺实现,确保干涉效应能够按照预期发生。仿真实验在 VirtualLab 仿真软件进行了验证运算,仿真结果如图 3 所示。中心位置处焦斑相互干扰产生干涉条纹,未使用的焦斑

则作为绝对参考点。由干涉理论易得出像平面上各点的光强分布为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (3)$$

其中:  $I_1, I_2$  分别为参与干涉的两路光的强度,  $\delta$  为两路光的相位差。

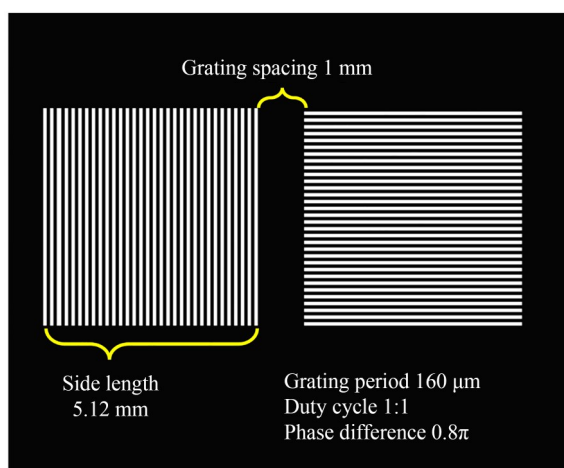


图 2 光栅设计图

Fig. 2 Grating design diagram

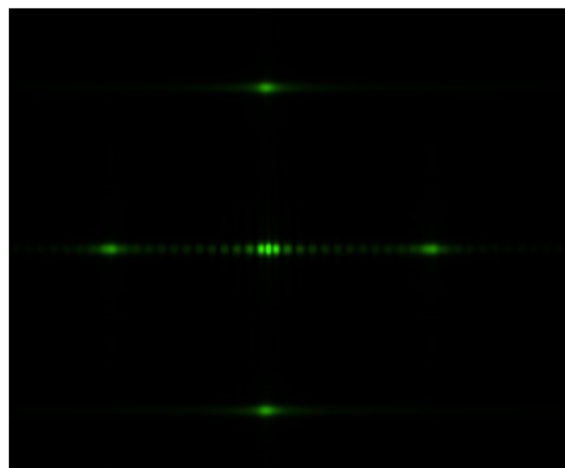


图 3 VirtualLab 仿真结果

Fig. 3 VirtualLab simulation results

在仿真结果的基础上,将 DOE 作为衍射分束器,从而将入射光束在一维方向上分成三束具有一定发散角度的出射光束。所以这里提出一种新的配置方案,通过在石英玻璃前表面的左右各加工一个光栅,后表面加工衍射透镜,左右两个光栅分别对应 SLM 调制区域的左半部分和右半部分,其中左光栅为垂直光栅,右光栅为水平光栅。此时,如果 SLM 左区域保持灰度为 0 不

变,右区域的灰度在 0~255 之间变化,那么在焦平面处就可以观察到干涉条纹产生位移,另外多余的 4 个焦点不会随着 SLM 加载的相位而移动,故可以作为一个固定信号,相对于干涉条纹是不变的,取其中点处作为绝对坐标系的原点,大大提高系统的稳定性,实验光学系统原理如图 4 所示。

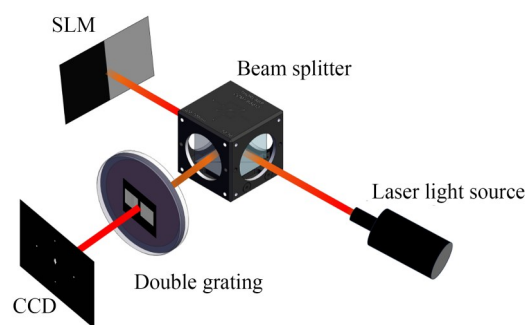


图 4 实验光学系统原理

Fig. 4 Principle of experimental optical system

### 2.3 U-Net 神经网络提取干涉条纹骨架线

由于相移量较小,干涉条纹的移动精度为亚像素级,所以为了建立灰度值与条纹位移之间的关系,必须对干涉条纹图像进行预处理。本文采用 U-Net 神经网络实现干涉条纹的骨架线提取。U-Net 是一种经典的卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 架构,最初用于生物学图像分割,具有较为简单的网络架构以及良好的精度,可以将图像的像素级特征与语义级特征相融合。Nam Hoang Nguyen 使用注意力机制修改 U-Net 架构提高了骨架化模型的性能,克服了传统方法不稳定且效率低的问题<sup>[21]</sup>。本研究借鉴 Nguyen 提出的网络架构作为辅助工具用于图像预处理,如图 5 所示。该网络架构在原 U-Net 编码器中采用多头注意力机制 (Multi-head attention) 进行改进,为提升重建骨架图像的能力,在原 U-Net 解码器中引入卷积块注意力模块 (Convolutional Block Attention Module, CBAM)。CBAM 添加在解码器的  $3 \times 3$  卷积层之前,通过聚焦重要信息、抑制不必要信息,提高了干涉条纹骨架化的精度,实现了亚像素级别的语义分割。最后,针对干涉条纹以及 4 个参考点,利用轮廓检测值绘制参考点以及干涉条纹轮廓,利用质心算法提取干涉条纹质心以及参考点质心。这



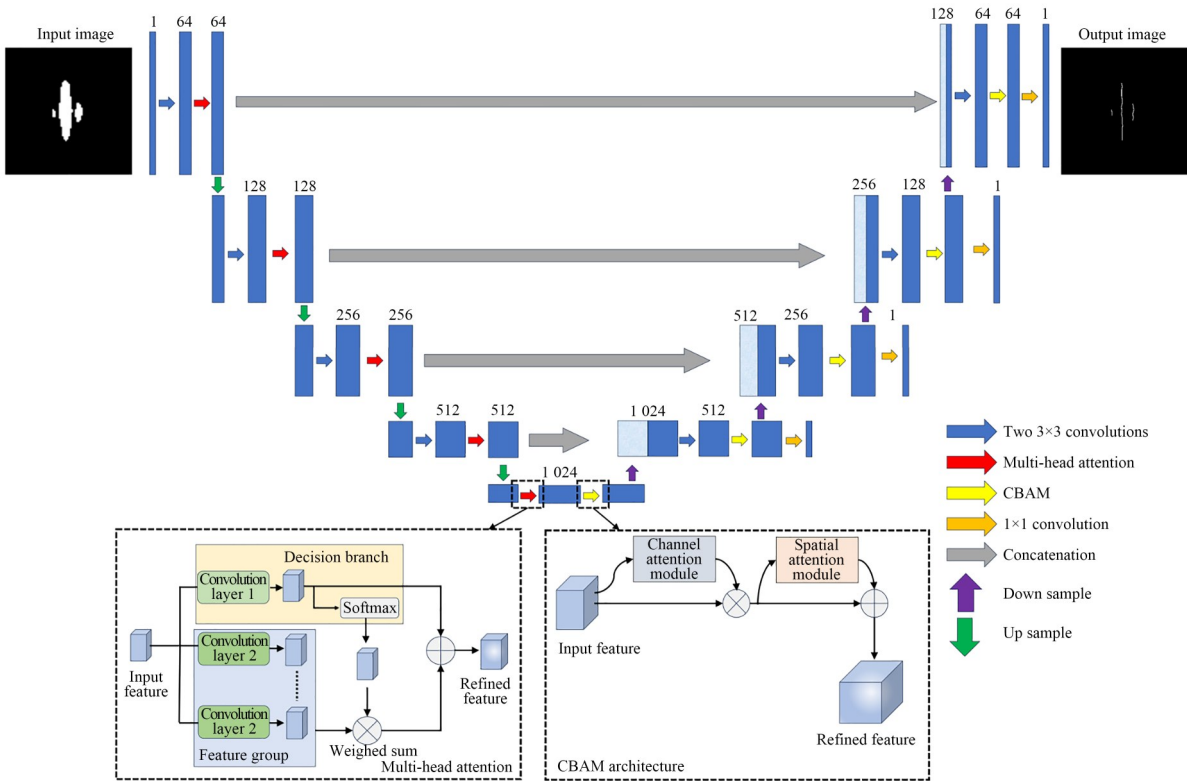


图 5 结合注意力机制的 U-Net 网络框架

Fig. 5 U-Net network framework incorporating attention mechanism

些质心坐标可代表条纹与参考点的位置,通过计算这些质心坐标点之间的欧拉距离,可以确定干涉条纹的周期。以上计算在绝对坐标系的基础上进行。

干涉图案的质心会随着 SLM 灰度的变化而移动。干涉条纹的位移  $D$  与干涉周期  $T$  成正比。在这种情况下,对应于灰度级的相移理论值由下

式给出:

$$\varphi = 2\pi \frac{D}{T}. \quad (4)$$

这里的图案包含 4 个参考点,其质心分别用  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$  和  $(x_4, y_4)$  表示。类似地,也可以利用加权质心算法计算出干涉图样的质心,记为  $(x_5, y_5)$ 。则条纹的偏移量  $D$  可写为:

$$D = \frac{\sqrt{(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - 4x_5)^2 + (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 4y_5)^2}}{4}. \quad (5)$$

### 3 实 验

#### 3.1 实验系统构建与结果分析

LC-SLM 相位校准实验系统如图 6 所示。系统构成简洁,主要包括一台高相干单色激光器、分束器、LC-SLM(分辨率为  $1\,920 \times 1\,200$ , 像素间距为  $8\,\mu\text{m}$ )、光栅元件以及 CCD 探测器(分辨率为  $4\,000 \times 3\,000$ , 像素间距为  $1.85\,\mu\text{m}$ )。实验过程中,在 SLM 上加载不同灰度水平的调制图像,保持参考区域灰度恒定为 0,而调制区域的灰

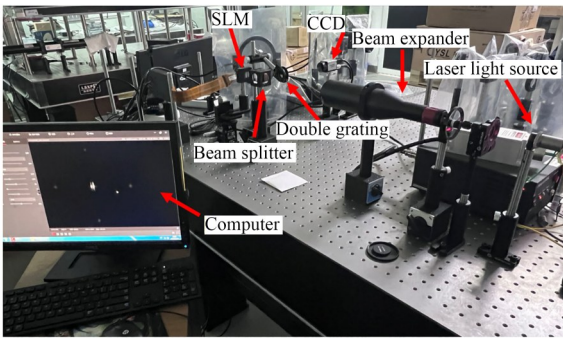


图 6 相位校准实验装置

Fig. 6 Experimental setup of phase calibration

度值从 0 开始,以固定步长依次递增至 255。随着调制区域灰度值的增加,LC-SLM 对入射波前产生的调制效应逐渐增强,进而导致干涉区域条纹的位移明显。通过 CCD 在 671

nm 波长下采集实验图像,从中选取 10 张具有代表性的干涉条纹图像作为结果展示,如图 7 所示,用以反映条纹随相位变化的典型特征。

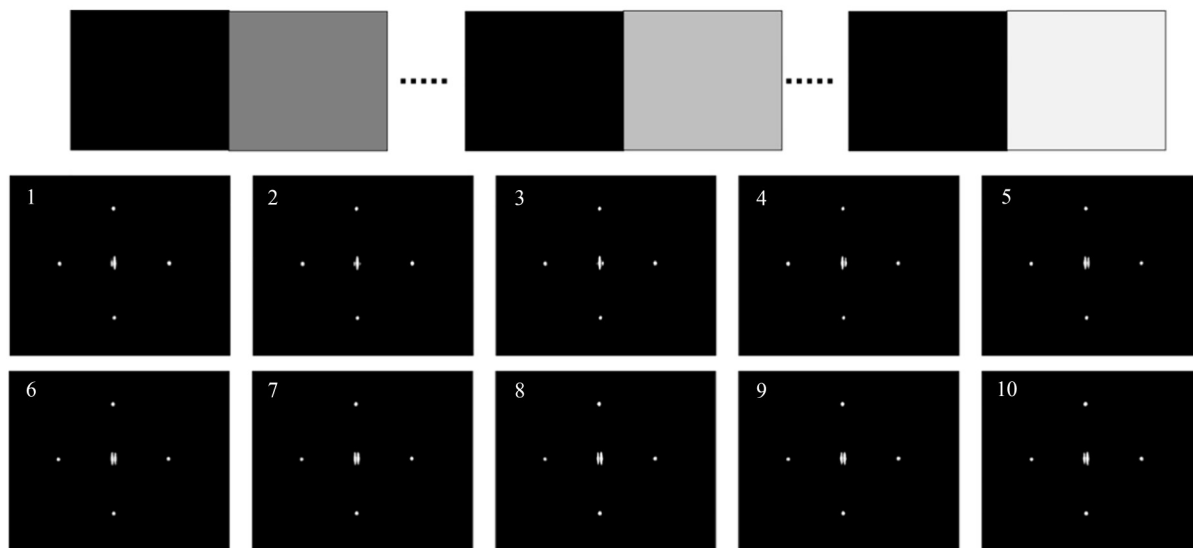


图 7 灰度值等距采样的 10 幅实验图像(经过阈值处理,分割成 600 像素×490 像素)

Fig. 7 Ten experimental images equally sampled for gray values (thresholded and segmented into 600 pixel×490 pixel)

利用引入注意力机制的 U-Net 神经网络对干涉条纹图像进行预处理,有效去除噪声并增强条纹特征。随后,运用轮廓检测和质心算法精确提取干涉条纹和参考点质心。经计算得到条纹位移和周期等数据,进而确定相位延迟。实验结果如图 8 所示,图中散点为实际测量所得到的不同灰度值下对应的相位值,其单位以弧度制表示,拟合直线则基于理论模型构建,其数学表达

式为  $y=0.025\ 7x-0.134\ 4$ 。决定系数  $R^2=0.985\ 1$ ,接近 1,表明实验值与理论值之间具有高度的相关性;均方根误差 RMSE 为 0.241 1 rad,数值相对较小,进一步验证了该方法在相位估计上的准确性与稳定性较高,能够有效测定 LC-SLM 在不同灰度输入下的相位调制情况。结果表明,通过 4 个参考点构建绝对坐标系并采用加权平均策略进行条纹位移修正,可以大大提高干涉相移法对 SLM 进行相位标定的精度和稳定性。

### 3.2 方法的稳定性分析

为进一步验证本文方法在实际应用环境中的抗振性,特别是在存在轻微机械扰动条件下的稳定性,设计并实施了引入外部振动源的对比实验。该实验与前述系统搭建的条件完全一致,于平台附近布置一台计算机,利用其散热风扇及机身振动作为干扰源,用于模拟常见实验环境中可能出现的微振动因素,如冷却风扇、风道扰动、附近设备运行等。

在此条件下,LC-SLM 分别加载 0 至 255 的不同灰度值图像,保持原实验灰度步长与拍摄流

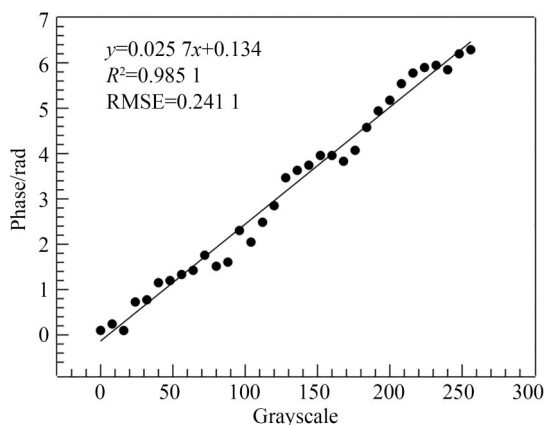


图 8 相位-灰度曲线

Fig. 8 Phase-grayscale curve

程不变,采集 10 幅具有代表性的干涉图像,并采用相同的 U-Net 图像处理与加权质心定位方法进行条纹提取与相位计算。对比实验得到的相位灰度曲线如图 9 所示。

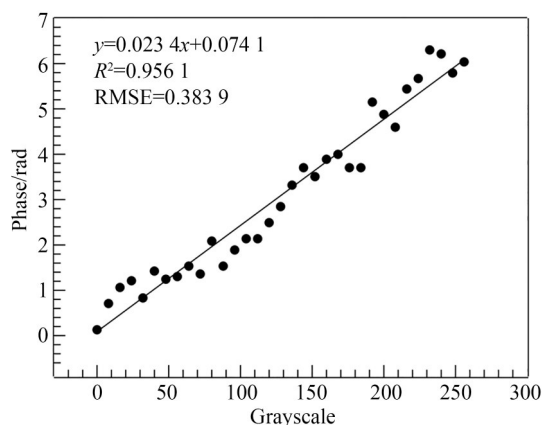


图 9 相位-灰度曲线(引入振动源)

Fig. 9 Phase-grayscale curve (introducing vibration source)

在风扇振动干扰下,干涉图像整体虽存在微弱扰动,但由于本文方法采用 SLM 调制光束形成的参考点构建绝对坐标系,干涉条纹与坐标原点之间的相对位置保持稳定,条纹质心提取误差控制在亚像素范围内,最终提取得到的相位-灰度曲线与无振动条件下的拟合曲线几乎重合,决定系数  $R^2$  维持在 0.95 以上, RMSE 仅增加 0.14 rad,差异可忽略不计。

该实验验证了本文方法在实际弱扰动环境中的良好稳定性,能够显著抑制由平台振动等因素引起的干涉图整体漂移,保证了相位提取的稳定性与准确性。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] CHEN B, LI X Y, YANG X. Phase grating wave-front curvature sensor based on liquid crystal spatial light modulator[C]. 2015 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*. Beijing, China. SPIE, 2015: 962015.

## 4 结 论

本文提出了一种基于光栅分光构建绝对空间参考系,并利用引入注意力机制的 U-Net 神经网络进行干涉条纹骨架提取的 LC-SLM 高精度相位调制标定方法。该方法首次将 U-Net 骨架提取应用在 LC-SLM 相位标定领域,通过对干涉图样中的骨架线进行精确提取与位移追踪,进而实现相位调制响应的强鲁棒性与高精度拟合。实验结果表明,在不同灰度输入条件下,本方法获得的相位调制曲线与参考曲线之间的拟合程度均较高,决定系数  $R^2$  达到 0.985 1, RMSE 为 0.241 1 rad,显著优于传统基于干涉图样对比度变化或条纹间距变化进行计算的标定方法。在进一步开展的抗扰稳定性验证实验中,即便在引入风扇振动等扰动条件下,本方法所提出的标定模型依旧保持较高精度,决定系数  $R^2$  维持在 0.95 以上, RMSE 仅增加 0.14 rad,充分验证了其对环境噪声与系统振动的抑制能力。相较于 Twyman-Green 干涉法、全尺寸全像素干涉标定方法和数字全息重构等传统标定手段,本文方法仅通过提取参考点与干涉条纹骨架的相对位移,无需依赖全图干涉条纹展开处理,适用于对系统精度与稳定性要求较高的 LC-SLM 精密相位控制应用场景。

#### 作者贡献声明:

张国峰:代码编写,程序测试和论文撰写;

张军勇:测量实验的设计及数据整理和分析;

王驰:论文审核与编辑写作。

- [3] 周源,李润泽,于湘华,等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 9-40.  
ZHOU Y, LI R Z, YU X H, *et al.* Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 9-40. (in Chinese)
- [4] 杨启航,李盼,杨烜,等. 空间光调制器模拟光栅产生高阶和分数阶涡旋光束[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(19): 2809-2817.

- YANG Q H, LI P, YANG H, *et al.* Generation of high-order and fractional vortex beams using gratings simulated by spatial light modulators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(19): 2809-2817. (in Chinese)
- [5] 李征, 穆毅, 梁静远, 等. 液晶空间光调制器及其在自适应光学中的应用[J]. 光通信研究, 2024(2): 80-91.
- LI ZH, MU Y, LIANG J Y, *et al.* Application of LC-SLM in adaptive optics[J]. *Study on Optical Communications*, 2024(2): 80-91. (in Chinese)
- [6] SHEN X L, KAHN J M, HOROWITZ M A. Compensation for multimode fiber dispersion by adaptive optics[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 2985.
- [7] 韦育, 于永河, 黑小兵, 等. 涡旋光束和光子计数在水下光通信中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 95-100.
- WEI Y, YU Y H, HEI X B, *et al.* Application of vortex beam and photon counting in underwater optical communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 95-100. (in Chinese)
- [8] 许忠保, 王双迎, 刘文超, 等. 基于液晶空间光调制器的多焦菲涅尔透镜[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10s): 156-161.
- XU ZH B, WANG SH Y, LIU W CH, *et al.* Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10s): 156-161. (in Chinese)
- [9] 汤明玉, 武梦婷, 臧瑞环, 等. 菲涅耳非相干数字全息大视场研究[J]. 物理学报, 2019, 68(10): 99-104.
- TANG M Y, WU M T, ZANG R H, *et al.* Fresnel incoherent digital holography with large field-of-view[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(10): 99-104. (in Chinese)
- [10] TIWARI V, GAUTAM S K, NAIK D N, *et al.* Characterization of a spatial light modulator using polarization-sensitive digital holography [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 2024.
- [11] REMULLA K I T, HERMOSA N. Spatial light modulator phase calibration based on spatial mode projection [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(21): 5624-5630.
- [12] REICHEL T S. Spatially resolved phase-response calibration of liquid-crystal-based spatial light modulators[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2610-2618.
- [13] 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.
- [14] 郑梦杰, 杜艳丽, 黄松涛, 等. 结构光照明下的非相干自干涉数字全息成像[J]. 光电工程, 2022, 49(7): 74-82.
- ZHENG M J, DU Y L, HUANG S T, *et al.* Incoherent self-interference digital holographic imaging under structured light illumination [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(7): 74-82. (in Chinese)
- [15] MAHMUD M S, NAYDENOVA I, TOAL V. Implementation of phase-only modulation utilizing a twisted nematic liquid crystal spatial[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 10(8): 085007.
- [16] WANG C, SHAN J, ZHANG J Y. Absolutely interferometric calibration of phase liquid crystal spatial light modulators using honeycomb gratings composited with Billet-split Fresnel zone plates [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(4): 1105.
- [17] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation[C]. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015*. Cham: Springer, 2015: 234-241.
- [18] 王发民, 张运海, 黄维, 等. 采用条形光栅相位图的液晶空间光调制器的标定[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 97-104.
- WANG F M, ZHANG Y H, HUANG W, *et al.* Calibration of LC-SLM with strip grating phase image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 97-104. (in Chinese)
- [19] 朱向冰, 陈瑾, 邓善熙, 等. 复杂分光仪器中的像差研究[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 116-120.
- ZHU X B, CHEN J, DENG SH X, *et al.* Aberrations in complex spectral instruments[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(1): 116-120. (in Chinese)
- [20] 谭毅. 双矩孔夫琅禾费衍射图样的仿真研究[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(7): 10-12.
- TAN Y. The simulation study of Fraunhofer diffraction pattern by twin rectangle aperture[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2018, 45(7): 10-12.



10-12. (in Chinese)

- [21] NGUYEN N H. U-Net based skeletonization and bag of tricks [C]. 2021 *IEEE/CVF International*

*Conference on Computer Vision Workshops (IC-CVW)*. October 11-17, 2021, Montreal, BC, Canada. IEEE, 2021: 2105-2109.

#### 作者简介:



张国峰(1999—),男,河北石家庄人,博士研究生,2022年于河南科技大学获得学士学位,主要从事光学成像与融合传感等方面的研究。E-mail: guofengzhang@shu.edu.cn

#### 通讯作者:



王 驰(1982—),男,河南太康人,博士,教授,2009年于天津大学获得博士学位,主要从事应用光学与融合传感测试技术等方面的研究。E-mail: wangchi@shu.edu.cn