

文章编号 1004-924X(2024)15-2325-09

偏振可调谐式剪切干涉的大畸变波前实时重构

卞 点, 骆雅婷, 侯登峰, 罗 哉*

(中国计量大学 计量测试与仪器学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了实现对大畸变波前的实时测量, 基于紧凑稳定的剪切干涉结构, 提出一种偏振式单帧波前重构方法, 有效克服传统横向剪切需要两幅或以上的图像梯度整合缺陷, 实时重构大畸变待测样本波前的形貌。以无限共轭模型为理论基础进行仿真分析, 对生成的大畸变波前样本进行计算重构, 验证该优化算法的可行性。在此基础上, 搭建双平面镜可调谐剪切干涉共轭结构, 结合偏振器件, 以分辨率目标靶作为待测对象, 对所提算法进行实验验证, 实现入射光场波前的实时条纹分离和波前重构。实验结果表明, 所提单帧波前法重构样本波面的均方根误差为 60 nm, 算法运行时间有效提升至 0.11 s。所提偏振剪切式光学设计以及单帧波前重构算法, 作为一种自干涉剪切方法, 无需多幅图像的重建程序, 简化横向剪切干涉的实验结构, 提高宏观微观样本三维形貌的检测效率, 在光学定量相干干涉测量领域具有一定的应用潜力。

关键词: 剪切干涉; 波前检测; 大畸变; 实时重构; 偏振调控

中图分类号: O43; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243215.2325

Polarization-tunable shearing interferometry method for real-time reconstruction of large aberration wavefronts

BIAN Dian, LUO Yating, HOU Dengfeng, LUO Zai*

(College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University,
Hangzhou 310018, China)

* Corresponding author, E-mail: luozai@cjlu.edu.cn

Abstract: This paper introduces a polarization-based single-frame wavefront reconstruction method using a compact and stable shear interferometry structure for real-time measurement of large aberration wavefronts. This approach overcomes the need for multiple images in traditional lateral shear interferometry, allowing real-time reconstruction of large aberration samples. The method is theoretically supported by simulations based on an infinite conjugate model, and computational reconstruction of large aberration wavefront samples confirms the algorithm's feasibility. A dual-plane mirror tunable shear interferometry structure, combined with polarization devices, is experimentally validated using a resolution target, achieving real-time fringe separation and wavefront reconstruction. The results show high accuracy with a root mean square error of 60 nm and improved runtime of 0.11 s. The proposed design and algorithm eliminate the need for multiple image reconstruction, simplify lateral shear interferometry, improve detection efficiency of three-dimensional macro and micro samples, and have potential applications in optical quantitative co-

收稿日期: 2024-05-22; 修订日期: 2024-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52075511)

herent interferometric measurement.

Key words: shearing interference; wavefront detection; large aberration; real-time reconstruction; polarization control

1 引言

光学干涉测量是一种基于光波干涉原理的精密测量方法,凭借其高对比度、高精度和非接触的成熟优势,在元件测试、机械制造、生物医学以及材料科学等领域得到了广泛应用^[1-3]。例如,光学元件的表面质量检测、精密机械零件的几何尺寸测量、细胞或组织的形态分析以及材料微观结构的可视化研究等。其中,自参考干涉仪通过光束共路结构可以极大地提高抗干扰能力,降低系统的搭建难度。与典型干涉仪相比,自参考干涉仪无需理想参考波前,仅通过两部分测量波前相互发生干涉^[4],可以使用玻璃平板^[5]、双棱镜^[6]、楔形板^[7]等剪切元件,在有效保证剪切条纹对比度的同时,使整体系统结构简单紧凑;再结合相应的波前重构算法,通过剪切波前的区域^[8-9]或模式^[10-11]重构实现干涉解调与相位重构,具有原位检验的便携式开发潜力。然而,对于非对称复杂曲面或大畸变非均匀表面,传统横向剪切干涉的波前重构无法获取均匀分布的直条纹,从而引起干涉图样的复杂变化,导致相应的波前重构算法无法适配,难以准确地重构出表面形貌信息。为了克服上述限制,研究人员考虑搭建两个或多个剪切波前的装置^[12-13],可以有效实现更为精准的波前重构。这种方法虽然有效,但不仅需要考虑成像相机之间的同步标定问题,更要保证自参考光路传播的光程稳定可控,相应的波前重建程序也更加复杂,影响波前重构的准确性,降低了成像效率。此外,还需要考虑多幅图像作为梯度输入时的噪声影响以及特定的参数调整问题,因此,对于非回转对称或者是面形变化较大的畸变波面拟合重构精度较低。

在此基础上,本文提出一种针对大畸变波前的实时重构方法,旨在通过简洁的光学系统实现高效精确的测量。该方法在仅使用一个横向剪切干涉结构的情况下,捕捉偏振单帧图像对原始入射波前进行实时重构。通过一对平面镜的可

调谐式剪切,实现对干涉条纹密度、倾角等剪切参数的调制;通过创建紧凑的无限共轭空间,有效保证光场传输过程中的光程稳定性、相位一致性以及波前空间一致性,提高系统的通用适配性,针对各种不同的测量目标和环境条件,实现复杂波前的稳定实时检测。

2 原理

2.1 大畸变波前实时重构结构

本文采用偏振调制与共轭成像相结合的横向剪切干涉结构,系统原理如图 1 所示。出射的激光光源在前端进行优化,从而获取均匀分布的照明光斑,提高成像质量。优化后的入射光源经可调偏振镜调控其与透射轴的偏振方向,再由偏振分束器一分为二,分成反射 s 波(紫色指示光)和透射 p 波(绿色指示光)在三角环路系统中沿轴向相向传播,并再次在偏振分束器处相遇,一对平面镜组合可以灵活有效地调节剪切参数。与非偏振结构相比,该方法可以有效避免二次分束的光能损失。

偏振光的传播过程可用琼斯运算来表征,将各个元件代入相应的琼斯矩阵与向量表达式进

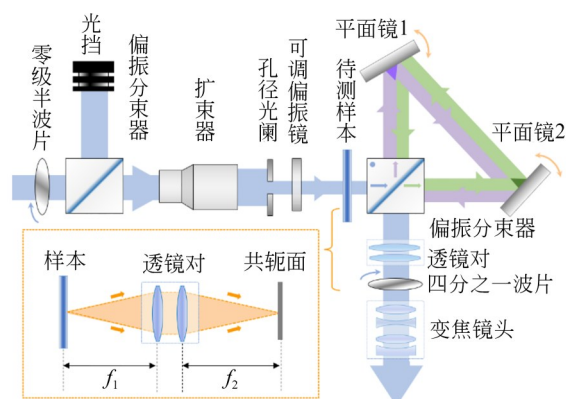


图 1 偏振可调谐式单帧波前重构测量系统原理

Fig. 1 Principle for polarization-turnable single-frame wavefront measuring system

行计算,如式(1)所示。可以看出,两束光的偏振态在穿过四分之一波片之前与电场矢量方向正

$$\begin{cases} E_1 = E_{QWP} \cdot E_{LP} \cdot E_{M2} \cdot E_{M1} \cdot E_{PBS,s} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \\ E_2 = E_{QWP} \cdot E_{LP} \cdot E_{M1} \cdot E_{M2} \cdot E_{PBS,p} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

从四分之一波片表面入射时,沿着快、慢轴的传播速度不同,会产生相位延迟。最后,两束圆偏振光束被偏振相机的图像传感器阵列接收,从而建立偏振特性与表面轮廓的映射关系,实现自参考偏光干涉。本文所用偏振相机的基本原理是将特殊工艺制作的掩膜板覆盖在其成像阵列面上,以4个偏振像素为一组基本单元,使得单元内每个阵列像素均有不同的偏振角度,方向依次为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° ,每个像素都有自己的偏振器通道,以 45° 方向的线性偏振器为例计算,则两束光的琼斯矩阵分别为:

$$\begin{cases} E_{1,45^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} e^{i\varphi_1} = \frac{e^{i\varphi_1} + e^{i(\varphi_1 + \pi/2)}}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ E_{2,45^\circ} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix} e^{i\varphi_2} = \frac{e^{i\varphi_2} + e^{i(\varphi_2 + \pi/2)}}{2\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

其中: φ_1 和 φ_2 分别代表两束光的相位延迟。因此,可以计算出光束落在相机 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 偏振阵列上的振幅分布,如下:

$$\begin{cases} I_{0^\circ} = (E_{1,0^\circ} + E_{2,0^\circ})^2 = 1 + \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ I_{45^\circ} = (E_{1,45^\circ} + E_{2,45^\circ})^2 = 1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ I_{90^\circ} = (E_{1,90^\circ} + E_{2,90^\circ})^2 = 1 - \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \\ I_{135^\circ} = (E_{1,135^\circ} + E_{2,135^\circ})^2 = 1 - \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{cases} \quad (3)$$

因此,两束圆偏振光在偏振相机的4个通道上可以同时获得相移量为 $\pi/2$ 的干涉条纹,进一步利用四步相移干涉调制,则可以快速提取相位分布信息,实现实时成像,如下:

$$\Delta\omega = \arctan\left(\frac{I_{135^\circ} - I_{45^\circ}}{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}\right). \quad (4)$$

在简单紧凑的环路剪切系统中引入无限共轭空间,如图1的方框所示,待测样本、透镜对以及成像平面共同组成复合式成像系统,提供高质量的物像传递成像。

2.2 单帧波前重构优化算法

在偏振可调谐剪切干涉系统中,若两束沿 x 方向的横向剪切光被偏振器接收并发生干涉时,

交,s波经过四分之一波片后转变为左旋圆偏振光,而p波则转变为右旋圆偏振光。

由干涉强度计算公式可得出接收阵列面上任一点 (m, n) 的振幅表达式:

$$I(m, n) = I(m, n) + I(m + a, n) + 2\sqrt{I(m, n)I(m + a, n)} \times \cos[k \cdot r + \varphi(m + a, n) - \varphi(m, n)], \quad (5)$$

其中: a 表示在笛卡尔坐标系中,两束光在 x 方向上的相对剪切量。同理可以得到沿 y 方向、相对剪切量为 b 的表达式。由于被剪切的两束光均包含待测样本的波前信息,式(4)中单方向的相位解调 $\Delta\omega$ 仅代表相位的梯度信息,因此,传统重构方法中需要对 x 和 y 两个方向分别作剪切测量,即有:

$$\begin{aligned} \nabla_\perp w &= a \frac{\partial w}{\partial x} i + b \frac{\partial w}{\partial y} j = a S_{m,n}^x i + b S_{m,n}^y j = P + Q. \end{aligned} \quad (6)$$

为了实现单帧波前重构,本文在偏振式剪切结构中将梯度转置计算与最小二乘法结合,进行波前整合与原相位提取。传统的波前重构方法通常适用于微小畸变波前的扰动探测,且 x 和 y 方向的剪切量调节无法精确控制,为保持剪切量严格一致,使用分割转置法对单幅梯度信息图像进行处理,并对大畸变的样本波前采用多尺度重构方法,具体流程如图2所示。选取待测样本区域(Region of Interest, ROI)进行边缘提取,根据选定的尺度图像,利用经典Canny算子进行多级边缘检测,并引入边界平滑项,根据图像设计过渡区域,降低伪边缘响应^[14];分离样本与背景的强度信息后进行转置处理,利用式(6)求解出梯度矩阵信息,并将二维矩阵转化为列向量,建立最小化代价函数线性方程组,如下:

$$S = D \times W, S = \begin{pmatrix} \text{vec}(P) \\ \text{vec}(Q) \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} D_x \\ D_y \end{pmatrix}, \quad (7)$$

其中: W 为待求重构波前矩阵, $\text{vec}(P)$ 和 $\text{vec}(Q)$ 表示二维梯度矩阵转换成的列向量; D 为 x 和 y 两个方向上的有限差分矩阵。进一步对式(7)的

线性方程组进行最小二乘解求解,可以得到:

$$W = (D^T D)^{-1} D^T S. \quad (8)$$

再利用奇异值分解法(Singular Value Decomposition, SVD)计算相应的协方差矩阵以及特征向量,将矩阵 D 分解为 $D = USV^T$,即可求出最终的波前分布。

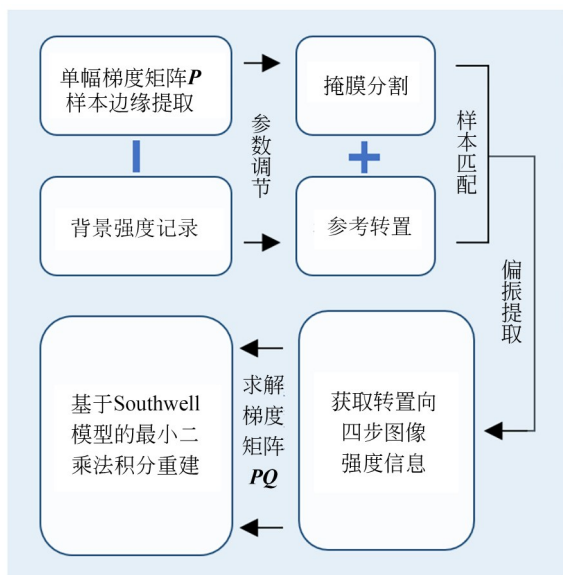
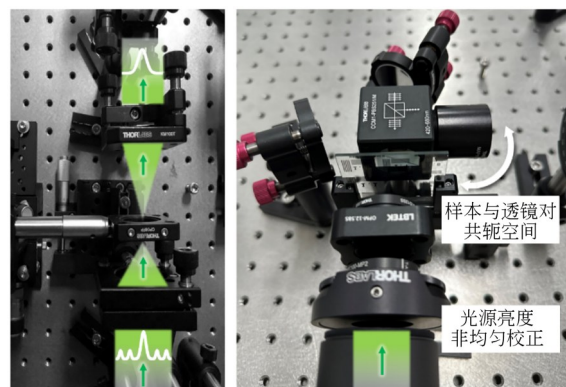


图2 单帧波前重构算法流程

Fig. 2 Flow chart of single-frame wavefront reconstruction algorithm

3 实验与结果讨论

在系统搭建过程中,选取中心波长为532 nm的单纵模激光器,且对光源部分进行了优化。首先,利用非球面透镜与圆形精密针孔搭建空间滤波系统,滤除出射的 TEM_{00} 光斑模式中多余的高斯旁瓣,如图3(a)所示。再采用零级半波片(HWP20-532BT@LBTEK)和偏振分束器(CCM1-PBS251/M@Thorlabs)实现入射光源功率的定量逐级调节,进一步提高损伤阈值。结合扩束器与孔径光阑获得均匀分布的照明光斑,优化与校正入射光场的照明物光与波前分布,搭建实物如图3(b)所示。其中,样本与消色差透镜对(MAP10100100-A@Thorlabs)之间共轭空间的设置可以消除平行距离过长造成的渐晕现象,同时也能进一步满足空间结构紧凑、可集成嵌入的要求。



(a) 光源滤波系统 (b) 循环剪切干涉测量系统
(a) Light source filtering system (b) Cyclic shear interferometry system

图3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup

3.1 仿真算法验证

为了验证所提算法的有效性与准确性,利用MATLAB软件平台生成一大畸变波面作为原始入射光波,尺寸为 200×200 像素,如图4(a)所示。模拟该畸变波面穿过一个在透明基底上、尺寸为 50×50 像素值、表面面形呈高斯分布的不透光的正方形凹槽,作为待测目标,其波阵面形分布如图4(b)所示。模拟实际实验环境,对其作共路循环处理,沿着 x 和 y 方向剪切后生成的双波面分别如图4(c)和4(d)所示。

穿过待测样品槽的波面与自身发生剪切后形成光波干涉,结合四步相移可实现相移量为 $\pi/2$

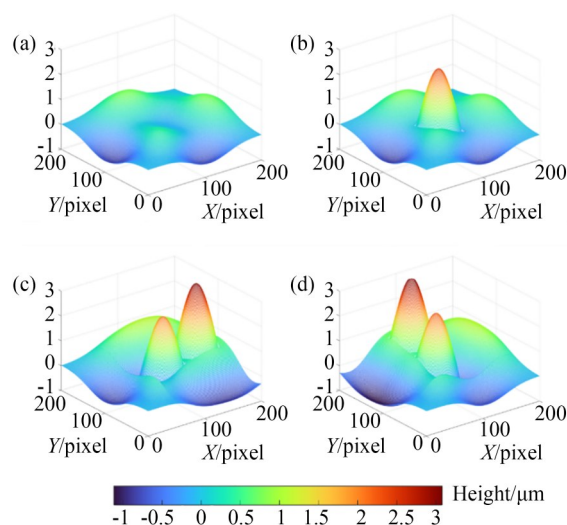


图4 仿真模拟穿过待测样品槽的波面分布

Fig. 4 Simulation of wave surface distribution through sample tank to be measured

的连续干涉,两方向剪切重叠区域生成的相移干涉条纹分布如图 5 所示,两波面的重叠区域图像尺寸为 140×140 像素值。其中,模拟光波穿过不

透光的样品槽,记录样品槽位置掩膜矩阵,设置槽内光强为零。因此,进一步利用式(4)可以有效计算出两个方向的波前梯度分布信息 $\Delta\omega$ 。

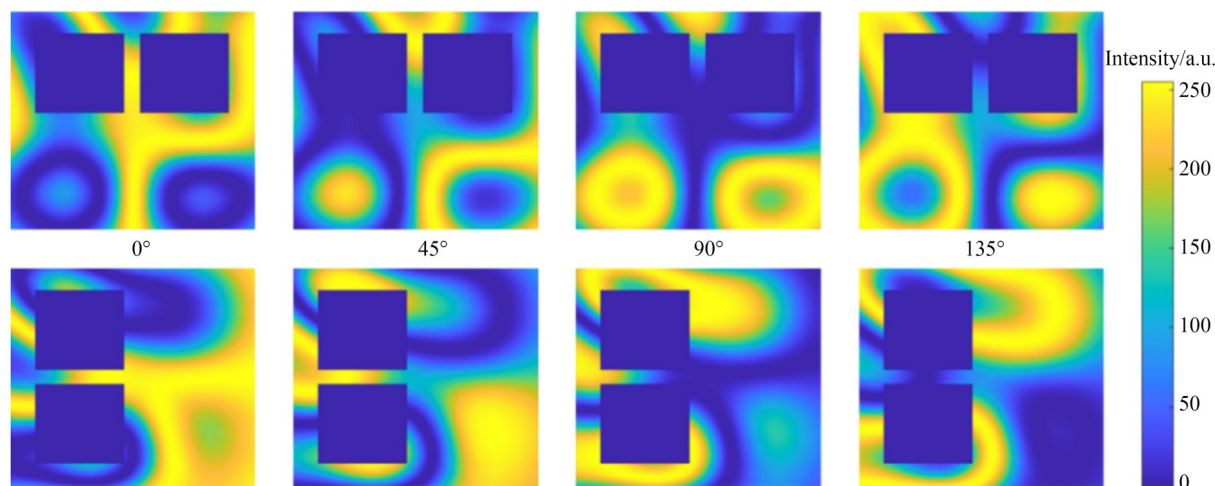


图 5 双剪切四偏振通道的光强分布图像

Fig. 5 Intensity distribution images of double shearing in four-polarization channels

用传统的区域波前重构算法分别对两个剪切方向的入射波前进行整合运算;再根据单帧波前法计算重构另一方向的剪切波前。将二者重构的形貌波前与生成的原始波前进行比对,提取波面重叠区域,最终的重构结果如图 6 所示。其中,图 6(a)为原始生成叠加的波面形貌,图 6(b)是根据传统波前整合方法实现的形貌重构,图 6(c)为单帧波前法计算的重构结果。针对大畸变波前或者存在待测样本的情况下,相较于传统算法,单帧波前法仅需单方向的图像捕获,且波

前形貌恢复的重构结果更加准确,波前分布情况与原始输入基本一致。

进一步对图 6 中虚线框内的待测样品槽区域进行对比检测,三维分布如图 7 所示。针对样品槽区域,传统波前整合法重构的均方根误差为 $0.65 \mu\text{m}$,单帧波前法重构的均方根误差为 $0.06 \mu\text{m}$;针对整个重叠波前区域,传统波前整合法重构的均方根误差为 $0.71 \mu\text{m}$,单帧波前法重构的均方根误差为 $0.13 \mu\text{m}$ 。

根据重构结果以及误差分析可知,本文所提

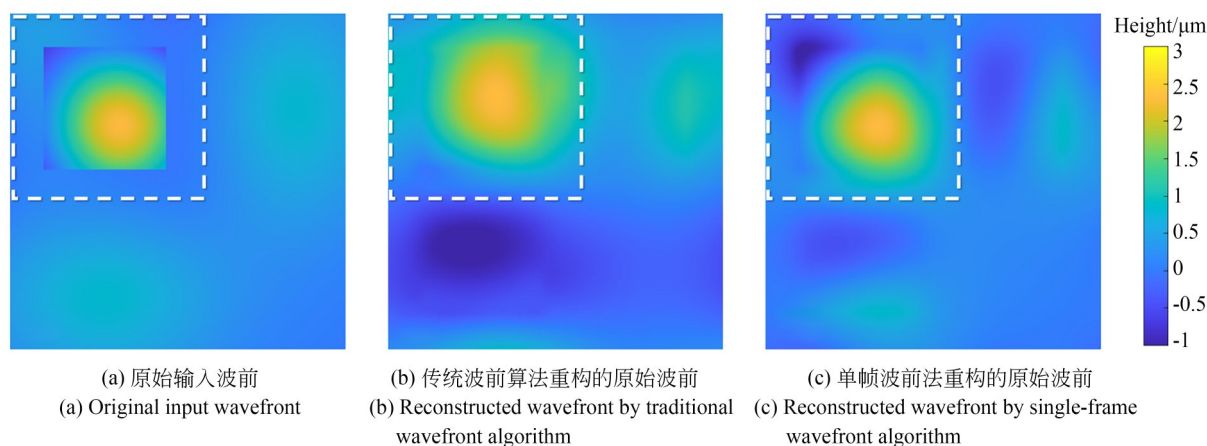


图 6 波前重构结果对比

Fig. 6 Comparison of wavefront reconstruction results

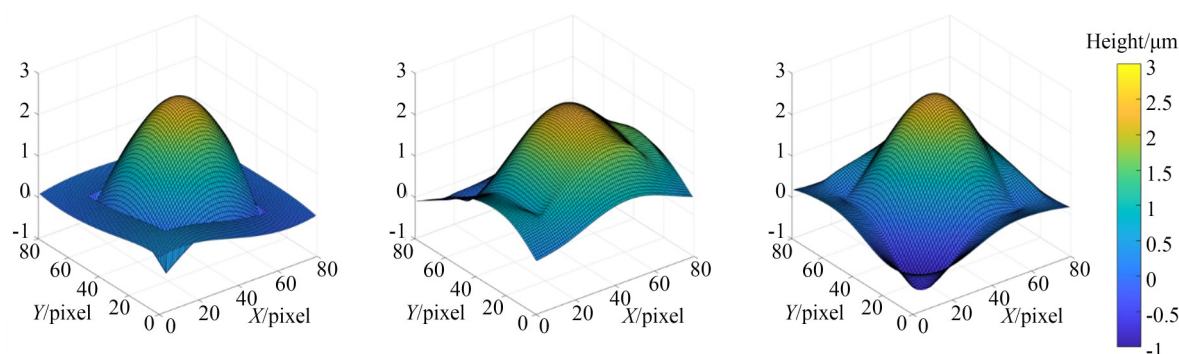


图 7 待测样品区域的形貌分布比较

Fig. 7 Comparison of morphology distribution in sample area to be measured

算法的精度相较于传统算法有明显提升,从而验证了本优化算法对于大畸变波前样本重构的有效性与准确性。传统算法主要受限于波面区域网格的分割程度,对于待测样本的细节信息无法精细还原;优化算法可以有效修正局部的边缘平滑误差,对边缘部分调整重构参数。在实际测量中,待测样品的边缘可能由于制备过程中的不均匀性而导致部分波前信息失真,因此,这里考虑结合梯度算子与边缘跟踪算法对实际捕捉的图像边缘进行多阶检测,从而获取更精确的样本形貌分布。

3.2 目标靶成像效果

实验选取分辨率目标靶(R2L2S1P1@Thorlabs)作为待测样本,利用偏振相机(BFS-U3-51S5M@FILR)对透明基底上的图案进行实时成像,对偏振相机采集的原始图像进行降采样处理,获取任一剪切方向的 4 幅连续相移光强分布图像,如图 8(a)所示,图像尺寸为 900×900 像素。进一步根据单帧波前重构算法的流程进行局部区域图像处理,获取对应正交剪切方向的光强分布图像,如图 8(b)所示。可以看出,剪切条纹与样本信息通过图像分割提取实现转置并向整合分布,因此具备单帧成像的可行性。

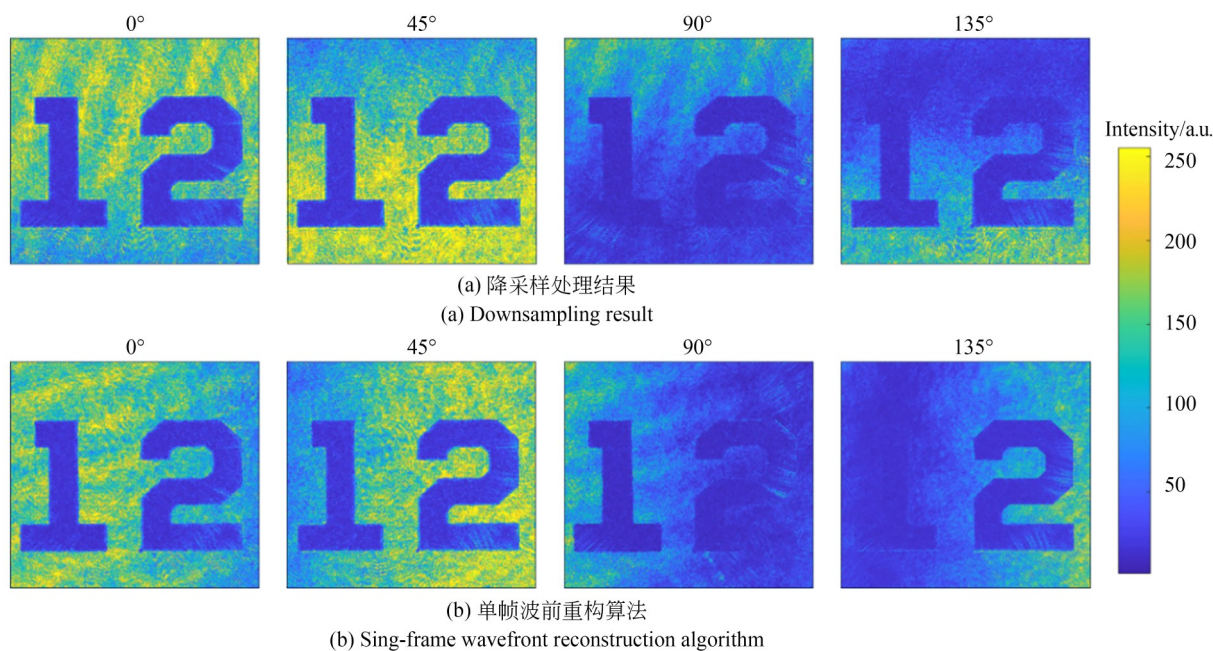


图 8 双剪切四偏振通道的光强分布图像

Fig. 8 Light intensity distribution image of double shear four-polarization channel

利用同轴变焦镜头对待测区域进行进一步放大捕捉,根据目标靶线集参数进行标定计算,可以确定在所搭建的无物镜剪切成像系统,相应的成像放大率在 3.8~27 倍之间连续可调,目标靶视场内目标区域放大过程的图像获取及其位置分布如图 9(a)和图 9(b)所示,图 9(b)由偏振相机实时采

集的生图分辨率为 $2\,048 \times 2\,448$ 像素。进一步结合式(4)与式(8)的计算方法实现双方向的剪切整合,图 9(c)和图 9(d)分别为目标位置处的相位分布结果。可以看出,通过一幅偏振图像的降采样移相和分割转置算法可以实现待测样本的实时成像,有效获取其精细的表面形貌分布。

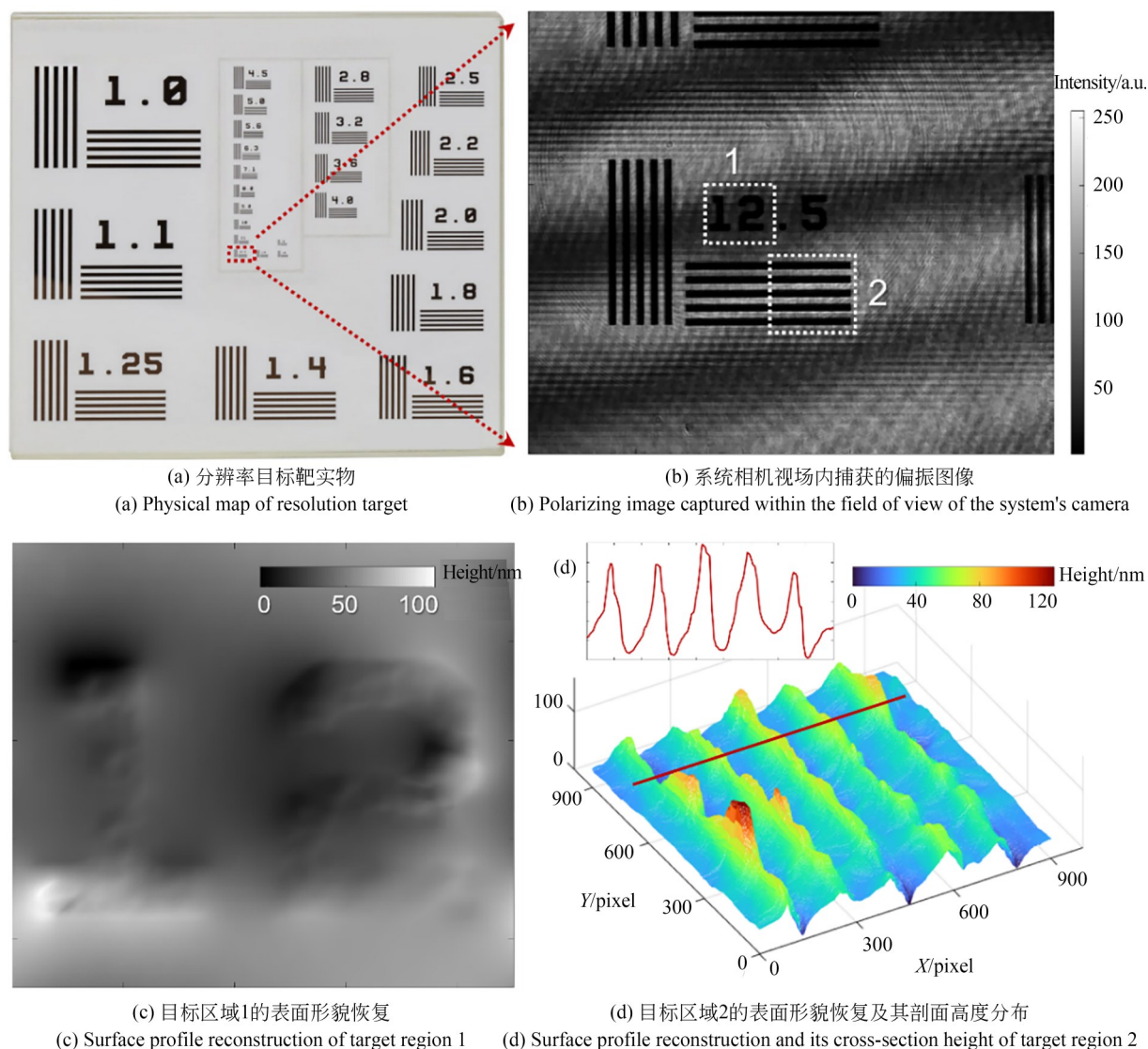


图 9 偏振相机成像结果

Fig. 9 Imaging result of polarized camera

从上述结果可以看出,所提的单帧波前优化算法可以有效运用于双平面镜可调谐剪切干涉结构中,并且能够减少图像采集数量,对于大畸变样本的适应能力更好。此外,处理器配置为 CPU 为 2.5 GHz Intel Core i5,内存为 16 GB 的运行情况下,使用 MATLAB R2022a 软件对 900×900 像素

的图像进行处理,此时单帧波前算法的平均处理时间为 0.11 s,而传统算法的平均处理时间为 1.81 s。所提算法仅需实时处理一幅图像并对分割转置,故其算法的运行速度也显著提高。综上所述,该方法对透明材质基底上的非透明畸变样本形貌检测具有良好的成像效果,针对不规则

ROI区域孔径也可以实时获取其细节进行表面形貌恢复,有效提高了成像与检测效率。

3.3 系统稳定性验证

为了验证系统波前重构的稳定性,针对同一入射的光波波面,在实验室环境内、平台放置一激光器散热风扇的情况下,以 75 Hz 的帧速率连续捕获图像 120 s,再对拍摄的图片进行波前重构计算,并与夏克-哈特曼波前传感器(WFS40-14AR@Thorlabs)进行比较。其稳定性验证结果如图 10 所示。

由图 10 可知,所提系统的波前相位重构标准差仅为 1.02~4.15 nm,平均值为 2.96 nm,重复

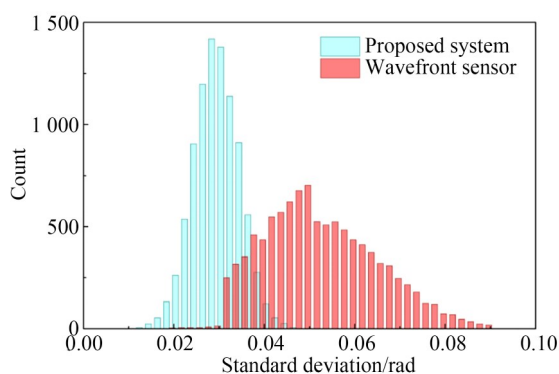


图 10 系统稳定性测试直方图

Fig. 10 Histogram of system stability test

性精度较高;相比之下,波前传感器的结果为 2.62~7.62 nm。该结果也可以验证所提系统具有更为稳定的测量性能,偏振共路结构可以有效滤除外部噪声,减小元件组装的对准偏差,保持测量过程的连续性和稳定性。因此,该方法对捕捉待测样本状态的微小变化具有一定的测量可靠性,且针对运动或流式样本等动态应用场景下的波前实时监测,具有良好的适应性。

4 结 论

本文提出了一种单帧实时重构优化方法,结合偏振共路干涉与循环共轭剪切结构,可以获取与计算出双向的波前梯度信息并加以整合重构,有效应用和适配于大畸变以及不规则孔径的样本结构中,具有结构紧凑、系统稳定以及实时测量的优势。结合同轴变焦镜头可以实现局部区域的精细形貌重构,该重构方法的均方根误差可达 60 nm,算法处理时间也提高至 0.11 s,且系统稳定性较高。因此,偏振剪切式光学设计结合单帧波前算法,可以进一步提高动态以及复杂环境下的光学系统性能,对于实现大畸变波前的快速响应与高精度嵌入式波前校正具有一定的应用潜力。

参考文献:

- [1] UTADIYA S, JOSHI S, PATEL N, *et al.* Integrated self-referencing single shot digital holographic microscope and optical tweezer [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(3): 453-465.
- [2] 马云, 陈磊, 刘一鸣, 等. 用于位相缺陷检测的反射式剪切点衍射干涉仪[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(12): 2873-2880.
MA Y, CHEN L, LIU Y M, *et al.* Reflective shearing point diffraction interferometer for phase defect measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 2873-2880. (in Chinese)
- [3] 闵俊伟, 郜鹏, 但旦, 等. 高精度定量相位显微成像方法研究[J]. *光学学报*, 2024, 44(2): 3788/AOS231191.
MIN J W, GAO P, DAN D, *et al.* Research on high-precision quantitative phase microscopy imaging methods[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(2): 3788/AOS231191. (in Chinese)
- [4] JOO K N, PARK H M. Shearing interferometry: recent research trends and applications. [J]. *Current Optics and Photonics*, 2023, 7(4): 325-336.
- [5] JAVIDI B, MARKMAN A, RAWAT S, *et al.* Sickle cell disease diagnosis based on spatio-temporal cell dynamics analysis using 3D printed shearing digital holographic microscopy[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13614-13627.
- [6] EBRAHIMI S, DASHTDAR M, SÁNCHEZ-ORTIGA E, *et al.* Stable and simple quantitative phase-contrast imaging by Fresnel biprism[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(11): 113701.
- [7] ANAND A, CHHANIWAL V, JAVIDI B. Tutorial: common path self-referencing digital holographic microscopy[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(7): 071101.
- [8] HUANG L, XUE J P, GAO B, *et al.* Zonal wavefront reconstruction in quadrilateral geometry for

- phase measuring deflectometry[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5139-5144.
- [9] LIU R, MILKIE D E, KERLIN A, *et al.* Direct phase measurement in zonal wavefront reconstruction using multidither coherent optical adaptive technique [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1619-1628.
- [10] MOCHI I, GOLDBERG K A. Modal wavefront reconstruction from its gradient [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(12): 3780-3785.
- [11] DAI F Z, TANG F, WANG X Z, *et al.* Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5028-5037.
- [12] JEONG H, PARK H M, GHIM Y S, *et al.* Flexible lateral shearing interferometry based on polarization gratings for surface figure metrology [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 154: 107020.
- [13] ZHANG B, XU W, LI J, *et al.* Modified Michelson interferometer based dual shearing single camera digital shearing [J]. *Experimental Techniques*, 2020, 44(2): 187-195.
- [14] LYNN N D, SOURAV A I, SANTOSO A J. Implementation of real-time edge detection using Canny and Sobel algorithms[C]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021, 1096(1): 012079.

作者简介:



卞 点(1995—),女,安徽合肥人,博士,讲师,2022年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事波前形貌检测方面的研究。E-mail: biandian155@cjlu.edu.cn

通讯作者:



罗 哉(1979—),男,博士,教授,主要从事精密在线检测方面的研究。E-mail: luozai@cjlu.edu.cn