

对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量

郑艺琛 武锦辉 刘吉 张博洋 袁涛

Micro-displacement measurement based on opposed dual-surface differential conjugate vortex beam interference

ZHENG Yi-chen, WU Jin-hui, LIU Ji, ZHANG Bo-yang, YUAN Tao

引用本文:

郑艺琛, 武锦辉, 刘吉, 张博洋, 袁涛. 对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0097

ZHENG Yi-chen, WU Jin-hui, LIU Ji, ZHANG Bo-yang, YUAN Tao. Micro-displacement measurement based on opposed dual-surface differential conjugate vortex beam interference[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0097

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0097>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用级联超构表面同时测量径向角位移和纵向线位移

Simultaneous measurement of radial angular displacement and longitudinal linear displacement with cascade metasurfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(5): 1016 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0033>

基于曼彻斯特编码的图像式角位移测量系统

Image-based angular displacement measurement system based on Manchester coding

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 830 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0178>

面向微光学元件表面形貌测量的涡旋相移数字全息技术

Vortex phase-shifting digital holography for micro-optical element surface topography measurement

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 852 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0180>

涡旋光轨道角动量的拓扑荷差值法测量

Measurement of orbital angular momentum of vortex beam by topological charge difference

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 216 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0141>

扫描干涉曝光系统中双频激光干涉测量误差建模与分析

Error modeling and analysis of dual-frequency laser interferometry in scanning beam interference lithography system

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 224 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0149>

基于干涉条纹成像的测角系统设计及其离轴测量精度

Design of an angle measurement system based on interferometric fringe imaging and its off-axis measurement accuracy

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1397 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0049>

对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量

郑艺琛^{1,2}, 武锦辉^{1,2*}, 刘吉^{1,3}, 张博洋^{1,3}, 袁涛^{1,3}

(1. 极限环境光动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西太原 030051;

2. 中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051;

3. 中北大学信息与通信工程学院, 山西太原 030051)

摘要:针对传统共轭涡旋光干涉微位移测量方法中干涉图样旋转角变化量小、亚纳米级微位移检测精度不足的问题, 本文提出了一种对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量方法。该方法利用共轭涡旋光干涉图样旋转角与两臂相位差之间的线性关系, 将待测微位移转换为花瓣状干涉图样的角向旋转。为克服相机像素分辨率和图样畸变对微小旋转角解算的限制, 系统构建对向双端面差分光路, 使两束共轭涡旋光分别作用于同一被测目标的相对表面, 使相对光程差相比传统单端面反射结构翻倍, 从而使相同位移下的干涉图样旋转角实现理论倍增。进一步地, 采用基于圆谐波卷积的 H-Nets 模型对旋转图样进行等变特征表征, 将连续角向变化映射为复数特征空间中的相位偏移, 实现微小旋转角的稳定表征与位移反演。实验结果表明, 在 0-500 nm 范围内最大绝对误差小于 0.61 nm, 平均绝对误差为 0.37 nm。该方法通过差分光程增强与旋转等变解码的协同作用, 有效提升了微位移测量的精度与稳定性。

关键词: 共轭涡旋光干涉; 对向双端面差分光路; H-Nets 谐波网络; 旋转等变性; 微位移测量; 亚纳米测量精度

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0097 CSTR: 32171.14.CO.2026-0097

Micro-displacement measurement based on opposed dual-surface differential conjugate vortex beam interference

ZHENG Yi-chen^{1,2}, WU Jin-hui^{1,2*}, LIU Ji^{1,3}, ZHANG Bo-yang^{1,3}, YUAN Tao^{1,3}

(1. State key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, Taiyuan 030051, China;

2. College of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: wujinhui@nuc.edu.cn

Abstract: To address the limitations of conventional conjugate vortex beam interference-based micro-displacement measurement methods, including limited rotation-angle variations of interference patterns and insufficient capability for sub-nanometer displacement detection, a micro-displacement measurement method

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 山西省科技成果转化引导专项 (No. 202404021301029); 山西省基础研究计划资助项目 (No. 202403021211089); 山西省回国留学人员科研资助项目 (No. 2024-117)

The Shanxi Special Project for Guiding the Transformation of Scientific and Technological Achievements (No. 202404021301029); Supported by Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 202403021211089); Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (No. 2024-117)

based on opposed dual-surface differential conjugate vortex beam interference is proposed. The proposed method exploits the linear relationship between the rotation angle of the conjugate vortex interference pattern and the phase difference between two interferometric paths, converting micro-displacement into the angular rotation of petal-shaped interference patterns. To overcome the constraints imposed by camera pixel resolution and pattern distortion on tiny rotation-angle extraction, an opposed dual-surface differential optical path is developed, where two conjugate vortex beams interact with opposite surfaces of the same target. Compared with the conventional single-surface reflection configuration, the proposed structure doubles the relative optical path difference, thereby theoretically doubling the interference-pattern rotation angle under identical displacement conditions. Furthermore, an H-Nets model based on circular harmonic convolution is introduced to extract rotation-equivariant features from the rotating interference patterns. Continuous angular variations are encoded as phase shifts in the complex-valued feature space, enabling stable characterization of tiny rotation angles and accurate displacement inversion. Experimental results demonstrate that, within a displacement range of 0–500 nm, the maximum absolute error is below 0.61 nm, with a mean absolute error of 0.37 nm. The proposed method achieves enhanced micro-displacement measurement accuracy and stability through the synergistic integration of differential optical-path amplification and rotation-equivariant feature decoding.

Key words: conjugate vortex beam interference; opposed dual-surface differential optical path; Harmonic Networks; rotation equivariance; micro-displacement measurement; sub-nanometer measurement accuracy

1 引 言

微纳尺度位移测量是精密制造、半导体检测、微机电系统和纳米定位控制等领域的重要基础技术^[1-2]。激光干涉测量^[3-4]因具有非接触、高分辨率和大动态范围等优势,已被广泛应用于精密位移测量^[5-7]。传统激光干涉测量方法包括迈克尔逊干涉、马赫-曾德尔干涉^[8-9]及相移干涉等,具有较高的理论分辨率。涡旋光束凭借其独特的螺旋相位波前分布^[10]和轨道角动量特性,当其与参考光场相干叠加时,光程变化引起的相位差可表现为干涉图样空间结构或角向位置的变化,为微位移测量提供了区别于传统条纹平移解算的相位—结构编码新范式。

为提高图样结构稳定性和角度特征可辨性,共轭涡旋光干涉技术被引入微位移测量。当两束拓扑荷数相反的共轭涡旋光相干叠加时,可形成花瓣状环形干涉图样,其花瓣数量与拓扑荷数相关^[11],且整体花瓣图样的角向位置与两臂相位差直接相关。相比涡旋光与球面波干涉形成的螺旋干涉条纹,共轭涡旋光产生的花瓣图样具有更高

的对称性、对比度和结构稳定性,更适合用于微小位移引起的旋转角提取。

现有共轭涡旋光干涉测量方法主要依赖单花瓣解算、质心定位、全花瓣匹配或光路优化实现旋转角解算。Webster 等通过连接两个相对花瓣质心形成向量计算旋转角度,实现了 0.5° 的旋转角精度^[12]。Emile 等人提出了一种利用共轭涡旋光干涉的线性位移测量方法^[13],实现了 44 pm 的位移测量分辨率,然而这项研究只评估了一个特定的花瓣,在工程应用中难以实现。夏豪杰等通过定位全部花瓣质心并确定干涉图中心来解算旋转角度,实现了优于 0.5 nm 的微位移测量分辨率^[14]。陆华丽等人用反射模块替换了 Mach-Zehnder 干涉仪参考臂中的简单反射镜,从光路结构上提升了系统稳定性^[15]。

尽管上述方法在旋转角解算和光路优化方面取得了一定进展,但微小位移引起的花瓣角向变化较弱,仍易受像素分辨率、噪声和畸变影响。仅依赖后端算法难以从根本上提升输入图样的可分辨性,因此有必要从光路结构和算法解码两个层面协同提高测量性能。

光路结构方面,本文引入对向双端面差分光

路,通过偏振调制与双反射结构使位移相关光程差累积增强,从而使相同位移下的花瓣旋转角理论上提高为传统结构的 2 倍,为后续角度解码提供更显著的图样特征。

光路增强后的花瓣图样仍需依赖高鲁棒算法进行旋转角解码。传统质心法和边缘定位法对花瓣完整性、中心定位精度和光强均匀性较为敏感;标量卷积神经网络 CNN 虽然具备较强的特征学习能力,但缺乏对旋转变化的显式建模,容易在卷积与下采样过程中丢失角向信息^[16-17]。相比之下,向量化神经网络能够在特征空间以相位形式编码旋转信息,与花瓣干涉图样的物理特性高度契合。

已有旋转等变网络如 G-CNN 和 RotEqNet 虽提升了旋转变化的建模能力,但前者主要针对离散群变换保持等变性^[18],后者的方向估计依赖多角度滤波器响应^[19],仍难以完全适应微小位移对应的连续角度回归任务。而由于涡旋光束本身携带有轨道角动量,其相位形式 $e^{il\theta}$ 与圆形谐波有着天然的同构性,使得 H-Nets 圆形谐波网络^[20]可直接在复数域中精准捕捉由微位移引起的花瓣状干涉图样的微小旋转角度,实现对连续旋转角度的准确测量。

基于上述分析,本文提出一种对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量方法。在光学层面采用对向双端面差分光路^[21],实现位移信号的物理放大,使相同位移对应的花瓣旋转角理论上实现倍增。在算法层面利用谐波网络的圆谐波卷积和复数相位表征能力,对放大后的旋转特征进行等变换码。与传统几何算法和卷积网络相比,该方法能够更充分地利用花瓣图样的旋转对称性和角向相位信息,从而提高微位移反演的精度与鲁棒性。

2 理论基础

2.1 共轭涡旋光干涉测微位移的基本原理

在极坐标 (r, θ) 中,拓扑荷数分别为 $+l$ 和 $-l$ 的两束共轭涡旋光电场可表示为:

$$E_l(r, \theta) = E_0 \exp(il\theta + ik\phi_1) \quad (1)$$

$$E_{-l}(r, \theta) = E_0 \exp(-il\theta + ik\phi_2) \quad (2)$$

其中 E_0 是振幅, l 是拓扑荷数, θ 是方位角,

$k=2\pi/\lambda$ 表示波数。

当具有相反拓扑电荷的两束共轭涡旋光束如 $+l$ 和 $-l$ 相干叠加时,产生的干涉强度由以下公式给出:

$$I = |E_l(r, \theta) + E_{-l}(r, \theta)|^2 = 2E_0^2 \{1 + \cos[2l\theta + \Delta\phi]\} \quad (3)$$

其中, $\Delta\phi=k(\phi_1-\phi_2)$ 为两束光之间的相位差。由上式可知,它们干涉形成具有 2 个 $|l|$ 瓣的花瓣状图案,且花瓣的角向位置由相位差 $\Delta\phi$ 决定。

当待测物体发生位移 d 时,传统单次反射光路中,光路的光程差变化为:

$$\Delta L = 2d \quad (4)$$

此时位移后的共轭涡旋光干涉电场强度为:

$$\begin{aligned} I &= |E_l(r, \theta) + E_{-l}(r, \theta)|^2 \\ &= 2E_0^2 \{1 + \cos[2l\theta + \Delta\phi - 2kd]\} \end{aligned} \quad (5)$$

对应的相位变化为:

$$\Delta\phi = k\Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} 2d = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (6)$$

因此,传统共轭涡旋光干涉图案旋转角度 $\Delta\theta_C$ 与位移 d 的关系如下:

$$\Delta\theta_C = \frac{2\pi}{\lambda l} d \quad (7)$$

由式(7)可得,花瓣图样的旋转位移和光路的物理位移呈线性变化^[22]。通过精确跟踪干涉图样的角位移,可以达到纳米级甚至亚纳米级的精度确定微位移。

2.2 基于对向双端面差分光路的共轭涡旋光干涉仪

为提升共轭涡旋光干涉系统对微小位移的角度响应灵敏度,本文在传统共轭涡旋光干涉结构基础上引入对向双端面差分光路,使位移信息在光路中被等效探测两次,从而在光学层面实现位移信号的物理放大。

系统采用 532nm 单频相干激光器作为光源。光束经扩束准直后入射至空间光调制器(SLM),通过加载全息图调制为携带拓扑电荷 l 的涡旋光束。调制后的光束经 50:50 分束器(BS1)反射,并通过四分之一波片(QWP)转换为圆偏振态,随后在分束器(BS2)处分为路径 A 和路径 B。如图 1 所示。

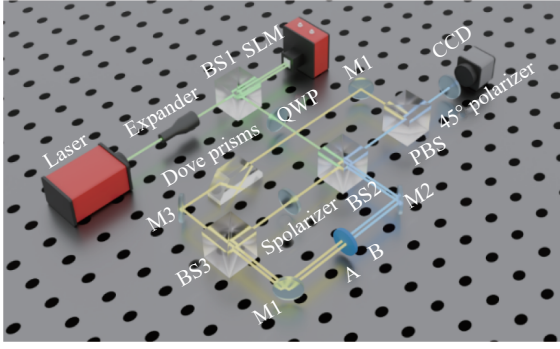


图 1 微位移测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of Micro-displacement Measurement System

路径 A(如图中黄色光路所示)中, 光束以反射形式从 BS2 输出, 经过 S 偏振片后, 由 BS3 与反射镜 M1 引导入射至被测物体的 A 表面, 随后经由道威棱镜与反射镜构成的光路系统, 用于实现涡旋光场的空间变换, 使其与路径 B 返回的光束满足共轭干涉条件, 并通过 45° 偏振分析器进入 CCD 探测端。

路径 B(如图中蓝色光路所示)中, 光束以透射形式从 BS2 输出, 经反射镜 M2 反射后到被测物体的 B 表面。反射光返回至 BS2, 经 PBS 及后续反射结构重新定向至主传播光路。

最终, 两路径输出的共轭涡旋光在 45° 偏振分析器后发生干涉, 在 CCD 上形成花瓣状干涉图样。

以路径 A 的入射方向为正方向, 当被测物体位移 d 时, 入射至 A 端面的光束反射后产生 $+2d$ 的光程变化; 路径 B 中的光束从相反方向入射至 B 端面, 其反射光程变化可表示为 $-2d$ 。两束光在探测端发生干涉时, 相位差由两臂光程差决定, 因此对向双端面差分反射结构引入的相对光程差为:

$$\Delta L_{diff} = \Delta L_A - \Delta L_B = 2d - (-2d) = 4d \quad , \quad (8)$$

该式表明, 对向双端面差分反射结构将传统单端面反射中的 $2d$ 光程响应增强为 $4d$ 。对应的相位变化为:

$$\Delta\phi_{diff} = K\Delta L_{diff} = \frac{2\pi}{\lambda}4d \quad . \quad (9)$$

在对向双端面差分光路作用下, 干涉形成的花瓣图样在相位调制下发生旋转, 其旋转角度与位移呈线性关系, 可表示为:

$$\Delta\theta_D = 2\Delta\theta_C = \frac{4\pi}{\lambda l}d \quad , \quad (10)$$

如式 (10) 及图 2 所示, 相比传统光路, 对向双端面差分光路产生的花瓣干涉图样具有更清晰的结构边界和更好的对称性, 条纹分布更加均匀稳定, 有利于提高特征识别能力。同时在相同位移条件下, 对向双端面差分反射结构能够使花瓣图样旋转角理论上提高为传统结构的 2 倍, 使图样旋转变化更加明显, 为后续旋转角解算提供更加稳定、灵敏且易于识别的干涉图样。

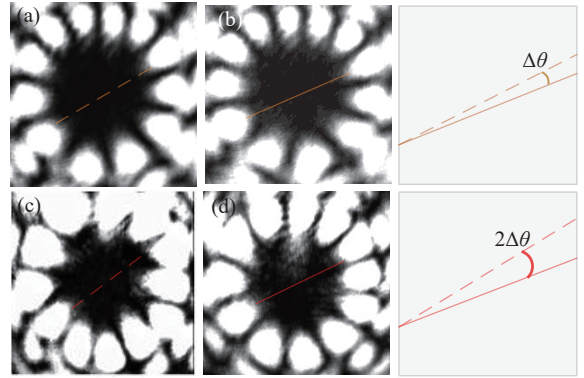


图 2 干涉花瓣旋转效果对比图。(a) 传统光路位移前 (b) 传统光路位移后 (c) 差分光路位移前 (d) 差分光路位移后

Fig. 2 Comparison of Interference Petal Rotation Effects. (a) Conventional path, before displacement; (b) Conventional path, after displacement; (c) Differential path, before displacement; (d) Differential path, after displacement

2.3 谐波神经网络 (Harmonic Networks, H-Nets)

谐波网络 (Harmonic Networks, H-Nets) 在传统卷积神经网络的基础上引入圆形谐波滤波器, 在复数域中实现对旋转特征的等变建模, 从而将共轭涡旋光花瓣干涉图样的旋转角度变化编码为特征空间中的相位偏移, 因此, 该网络能够有效表征花瓣图样中的角向旋转特征, 适用于共轭涡旋光干涉图样的连续角度回归与微位移反演任务。

设 I^0 为原始输入干涉图像, I^θ 为发生旋转角度 θ 后的输入图样, W_m 表示 m 阶圆形谐波滤波器, 则旋转后的干涉图样与圆谐波滤波器之间的卷积过程满足如下旋转等变映射关系:

$$W_m * I^\theta = e^{im\theta} (W_m * I^0) \quad , \quad (11)$$

该方程表明, 输入图样的旋转角度被线性地编码为特征空间中复数表征的相位偏移, 如图 3 所示。

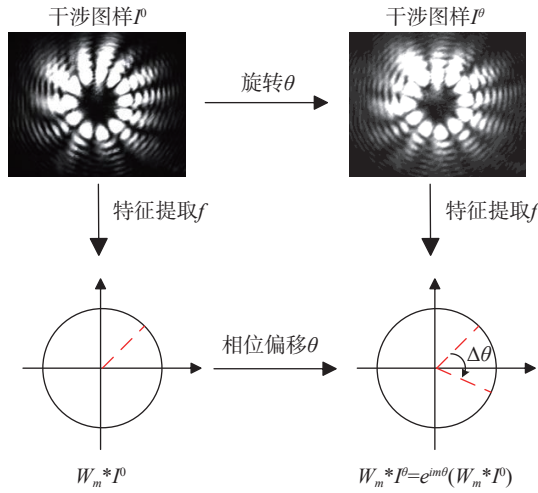


图3 花瓣旋转在圆谐波特征空间中的相位偏移表示

Fig. 3 Phase Offset Expression of Petal Rotation in Circular Harmonic Feature Space

进一步地, 图样旋转角度可表示为:

$$\Delta\theta = \frac{1}{m} [\arg(W_m * I^\theta)] - \arg(W_m * I^0) \quad (12)$$

该模型采用 12 层深度的谐波神经网络(H-Nets)架构, 包括一个输入层, 七个谐波卷积层(C1-C7), 三个非线性激活层, 三个批归一化层, 两个下采样池化层, 以及回归输出层, 如图 4 所示。

由于该实验中共轭涡旋光干涉图样由拓扑荷数为 6 的光束形成, 其干涉图样具有 12 重角向周期对称性。圆谐波阶数 m 与图样角向结构响应密切相关, 因此选取谐波阶数 $m=6$ 能够有效捕获由拓扑荷数主导的旋转相位特征, 并在保证网络稳定性的同时降低高阶谐波带来的训练复杂度。

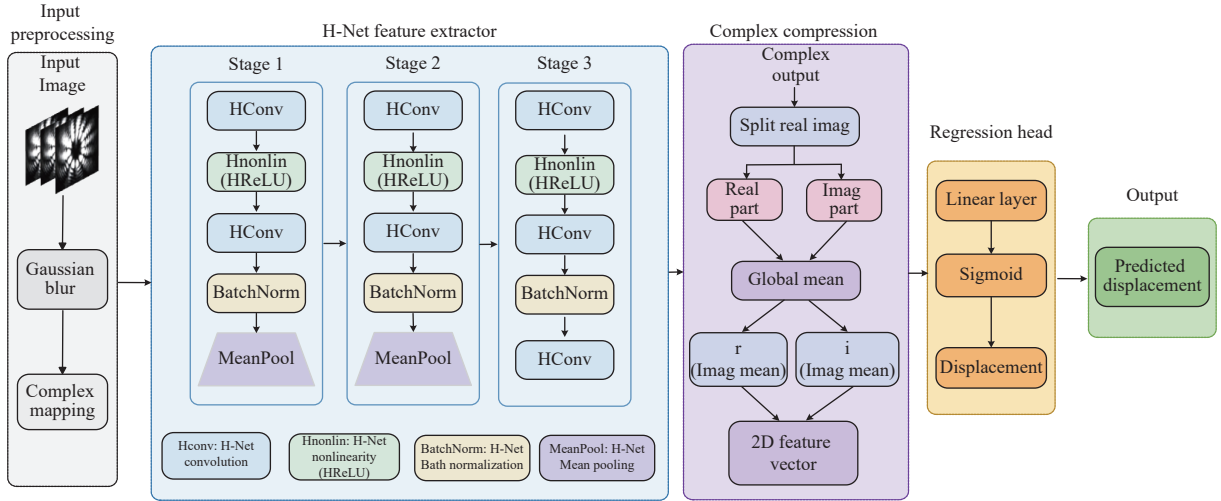


图4 H-Nets 网络整体结构

Fig. 4 Overall Architecture of H-Nets

原始干涉图像以 1920×1200 分辨率采集获得, 输入图像经过高斯模糊预处理抑制图像中的高频成分, 避免后续过程中出现抗混叠效应。并以图像几何中心作为空间参考基准, 对中心区域进行统一裁剪处理, 最终生成尺寸一致的 640×640 正方形输入图像。

该架构以圆形谐波卷积(HConv)为核心构建了三个特征提取阶段(Stage1-3)。在各阶段中, 复数非线性激活(HReLU)与批归一化(BatchNorm)交替作用, 在确保网络旋转等变性的同时, 显著提升了训练的稳定性。

在特征下采样方面, 架构引入了平均池化(MeanPool), 旨在有效压缩空间维度的同时, 最大

限度地保留关键的相位信息。在网络末端, 最后一层复数特征图经由实虚部分离与全局平均池化, 转化为二维特征向量; 最终, 该向量通过线性层与激活函数进行非线性映射, 实现对位移量的精准预测。各层配置如表 1 所示。

此外由于 H-Nets 能够在特征空间中直接表征花瓣干涉图样的旋转信息, 无需依赖更深网络结构即可完成特征学习与位移预测, 从而有效降低模型计算复杂度。模型训练完成后仅需进行前向推理即可获得位移预测结果, 无需复杂迭代运算, 具有较高的推理效率和实时处理能力。

表 1 H-Nets 模型参数表
Tab. 1 Parameter Table of H-Nets Model

Layer Index	Layer Name	Number of Channel-s	Ker-nel size	Output Size
1	Input	1	-	640×640×1
2	Conv1+HNonlin	16	5×5	640×640×16
3	Conv2+BN+Mea-nPool	16	5×5	320×320×16
4	Conv3+HNonlin	32	5×5	320×320×32
5	Conv4+BN+Mea-nPool	32	5×5	160×160×32
6	Conv5+HNonlin	64	5×5	160×160×64
7	Conv6+BN	64	5×5	160×160×64
8	Conv7	1	5×5	160×160×1
9	Complex-to-Real Conversion	2	-	160×160×2
10	Global Average Pooling (Complex)	2	-	2
11	FC	1	Line-ar	1
12	Output	1	-	1

3 实 验

3.1 实验装置

实验装置如图 5 所示。为兼顾测量灵敏度、测量范围及算法稳定性,这里采用拓扑荷数 $l=\pm 6$ 的涡旋光束。尽管较小的拓扑荷数具备更高的理论敏感度,但在大位移下其干涉条纹易出现模糊与误差跳变;而更高的拓扑荷数则因干涉花瓣过于密集,增加了特征点提取的难度和误差。相较之下, $l=\pm 6$ 所形成的干涉图样密度适中、特征清晰,在保证高灵敏度的同时兼顾了算法的稳定性。为确保实验结果的准确性和可重复性,整个实验系统搭建在隔振光学平台上,且实验全程在恒温环境中进行。



图 5 微位移测量系统实验装置

Fig. 5 Experimental setup of micro-displacement measurement system

采用内置高精度传感器的控制精密位移平台, CoreMorrow FPS150/7/160 M14 压电位移驱动器进行位移量调控,该型号 PZT 分辨率可达 0.01 nm;同时, CCD 相机采用海康机器人 MV-CS040-A0UM 黑白工业面阵相机,分辨率为 2048×2048,最高帧率为 90。由高分辨率 CCD 相机实时捕获干涉条纹的变化,在每个位移步长下连续采集 20 帧干涉图像,以有效抑制随机噪声,用于后续位移量的反演计算。

3.2 模型训练与性能指标

H-Nets 位移预测模型整体框架如图 6 所示。对 CCD 采集的干涉图像进行高斯模糊去噪处理后,采用谐波网络作为核心架构,利用圆形谐波卷积核对花瓣干涉图样进行深层特征提取,通过谐波卷积的旋转等变性,构建花瓣旋转角度与特征空间相位变化之间的精准映射,并结合旋转角度与待测位移之间的线性关系,达到亚纳米级的高精度位移预测。

本实验选择的测量范围为 500 纳米,可以满足大多数领域纳米尺度的位移测量要求。这个范围既涵盖了常见的微位移,又在保持高分辨率和测量精度的同时平衡了技术实现的可行性。本实验中使用的数据集由 15,000 个干涉图案组成,均匀分布在 0 到 500 nm 范围内的位移区间。这些图像由 CCD 随机选择,用于训练或测试网络。数据集的划分如下:70% 的图像分配给训练集,10% 分

配给验证集, 20% 分配给测试集。训练集用于训练模型, 而验证集则监控进度并微调超参数。测

试集与训练集完全分离, 用于评估模型的实际性能, 并确保它能很好地泛化到未见过的数据。

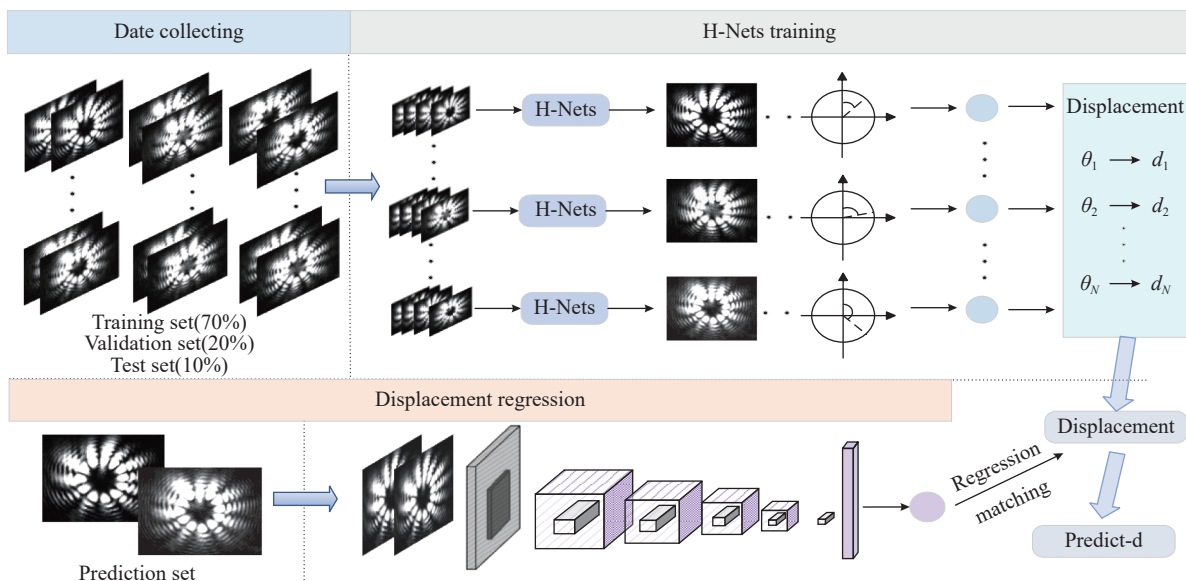


图 6 H-Nets 位移预测整体框架

Fig. 6 Overall Framework of H-Nets Displacement Prediction

模型参数优化采用 Adam 自适应优化算法, 在反向传播过程中对各参数的学习率进行自适应调节, 以提高收敛效率并增强训练过程的稳定性, 同时引入 Cosine Annealing 学习率调度策略, 使学习率在训练过程中平滑衰减。为避免过拟合现象, 在训练阶段引入基于验证集性能的早停策略: 当验证误差在若干连续 epoch 内未出现有效下降时, 提前终止迭代, 并回滚至验证性能最优的权重参数。该机制在保证泛化能力的同时, 有效减少了不必要的计算开销。

为全面评估模型性能, 分别从预测误差、误差敏感性和统计解释能力三方面构建评估体系。对应采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error,

MAE)、均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和决定系数 (R^2) 进行量化评估。

4 结果与分析

4.1 花瓣干涉图样动态实测对比

为进一步验证模型在实际测量条件下的有效性, 本文进行了两种光路架构, 传统共轭涡旋光干涉仪 (Conjugate Vortex Beam Interferometer, CVBI) 和双端面差分涡旋光干涉仪 (Dual-Surface Vortex Beam Interferometer, DSVBI) 条件下的实测干涉图样对比分析, 其中, 以位移量为 0 nm 时对应的花瓣干涉图样旋转角度作为参考零点, 对后续不同位移状态下的旋转角进行相对测量。如图 7 所示。

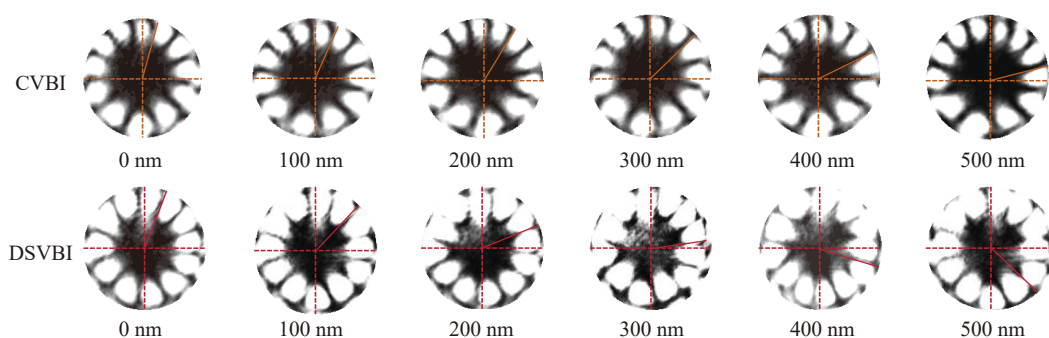


图 7 实测花瓣干涉图样对比

Fig. 7 Comparison of Measured Interference Petal Patterns

如表 2 所示,随着位移量的增加,共轭涡旋光花瓣干涉图样发生稳定旋转,且不同位移状态下的花瓣结构保持良好一致性,说明系统在实验采集过程中具有较高的成像稳定性与可重复性。

表 2 两种光路结构下花瓣干涉图样旋转角度

Tab. 2 Rotation Angles of Interference Petal Patterns under Two Optical Path Structures

Displacement(nm)	CVBI Rotation(°)	DSVBI Rotation(°)
100	11.1	22.3
200	22.1	45.4
300	33.3	67.1
400	44.5	90.2
500	55.2	112.3

4.2 H-Nets 性能分析

为了验证所提出 H-Nets 作为核心网络结构的合理性,本文进一步开展了消融实验,以分析圆形谐波卷积、复数特征表示以及旋转等变机制等关键模块对模型性能的影响。

如表 3 所示,完整 H-Nets 模型取得了最佳性能。去除圆形谐波卷积后,模型误差明显增大,表明传统卷积难以有效提取花瓣干涉图样中的旋转特征,验证了圆形谐波滤波器的重要作用。移除复数特征表示后,模型精度进一步下降,说明复数域中的相位信息对于表征花瓣旋转具有关键意义。同时,取消旋转等变机制后,网络对不同角度图样的鲁棒性降低,导致预测精度下降,进一步证明了旋转等变结构在连续角度测量中的有效性。

表 3 H-Nets 消融实验

Tab. 3 Ablation Study of the H-Nets Model

Model Variant	MAE(nm)	MSE(nm ²)	R ²
Full H-Nets	0.324	0.297	0.956
W/o Harmonic Filter	0.367	0.338	0.924
W/o Complex Feature	0.379	0.356	0.909
W/o Rotation Equivariance	0.413	0.401	0.891

在损失函数设计方面,选用均方误差作为回归目标函数,用于刻画网络预测旋转角度与真实标定角度之间的数值偏差。该指标对较大误差具有更强惩罚能力,有助于提升角度估计精度。

在模型训练过程中,损失函数(MSE)的变化趋势如图 8 所示。大约在 110 轮的时候,验证损失达到全局最小值,为防止模型进入过拟合状态,在此过程中引入了早停机制,若在连续的 10 轮内未出现更低的损失值,则保留模型最优性能,避免模型过度学习训练样本导致性能衰退。训练损失和验证损失曲线的持续下降且变化平稳,说明模型在训练过程中收敛良好,未出现明显震荡或过拟合现象,体现了参数设置的合理性以及模型在位移预测任务中的稳定性与准确性。

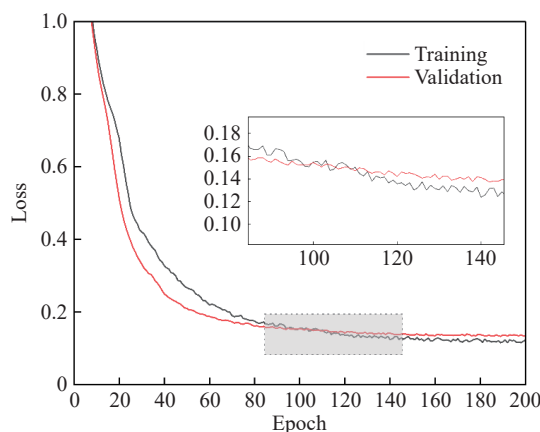


图 8 损失函数曲线图

Fig. 8 Loss Function Curves

为全面评估模型在整个测量区间内的稳定性与泛化能力,采用按位移量逐步训练的策略,并统计关键性能指标,对应的训练结果如表 4 所示。

表 4 不同位移量评估结果

Tab. 4 Evaluation Results at Different Displacement Levels

Displacement(nm)	MAE(nm)	MSE(nm ²)	R ²
10	0.366	0.297	0.956
50	0.327	0.317	0.924
100	0.359	0.324	0.914
300	0.369	0.321	0.909
500	0.348	0.356	0.901

根据表中结果,MAE 和 MSE 的整体数值始终保持在较小范围内,且未出现异常波动,表明模型具有较高拟合水平,在不同区间内均具备较高的预测精度和稳定的误差控制能力。同时决定系数 R² 均保持在 0.90 以上,验证了模型在全量程范围内的稳健泛化能力。

4.3 微位移测量方法性能比较

为验证所提基于对向双端面差分光路与谐波网络相结合在微位移测量中的精度优势, 本文设计了系统性对比实验。实验涵盖了传统质心法, CNN 和 H-Nets, 并重点对比了两种光路架构下三种方法的性能表现, 如图 9 和表 5 所示。

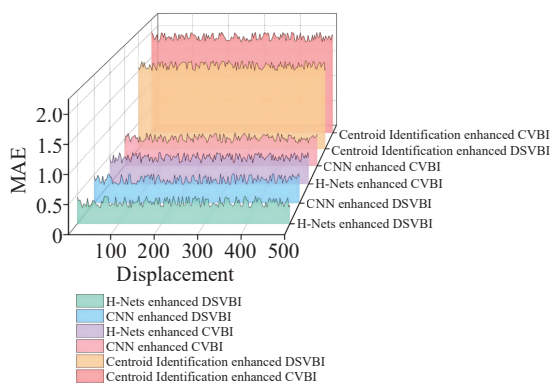


图 9 不同位移测量方法 MAE 比较

Fig. 9 Comparison of MAE for Different Displacement Measurement Methods

表 5 位移测量方法性能比较

Tab. 5 Performance Comparison of Micro-Displacement Measurement Methods

Method	MAE/nm	MSE/nm ²
Centroid Identification enhanced CVBI	1.987	4.237
Centroid Identification enhanced DSVBI	1.643	3.967
CNN enhanced CVBI	0.579	0.496
H-Nets enhanced CVBI	0.457	0.384
CNN enhanced DSVBI	0.419	0.342
H-Nets enhanced DSVBI	0.370	0.299

表 5 汇总了各方法在 0-500 nm 范围内的平均绝对误差 MAE 与均方误差 MSE, 分别用于表征整体测量精度及误差波动程度。

基于平均绝对误差 MAE 与均方误差 MSE 的对比分析, 本研究提出的对向双端面差分光路与 H-Nets 融合模型在全量程微位移测量中展现出显著优势, 且其最大绝对误差未超过 0.61 nm。

在光路结构层面, 对向双端面差分光路利用双面反射产生的灵敏度倍增机制, 有效增强了干涉图样的角度响应特性。实验数据表明, 在相同算法解调下, 对向双端面差分光路结构的测量精度普遍优于传统光路。以本研究提出的 H-Nets

解调算法为例, 相较于传统光路, 采用对向双端面差分光路后, MAE 从 0.457 nm 降至 0.370 nm, MSE 从 0.384 nm² 降至 0.299 nm², 证明了差分结构在提升原始特征辨识度方面的物理优越性。

基于 H-Nets 的解调算法相较于传统质心法与 CNN 均表现出更优的测量性能。在传统光路条件下, H-Nets 的 MAE(0.457)与 MSE(0.384)相较 CNN 进一步降低; 在对向双端面差分光路下, H-Nets 同样优于 CNN, 其平均绝对误差与均方误差分别降至 0.370 nm 和 0.299 nm²。说明 H-Nets 能够更有效地提取花瓣干涉图中的旋转等变特征, 提高对微小位移变化的表征能力, 从而增强测量精度与抗噪鲁棒性。

综合来看, 对向双端面差分光路与 H-Nets 谐波网络的结合实现了最佳测量性能, 在全量程范围内均表现出最优的精度与稳定性, 其最终 MAE 与 MSE 分别达到 0.370 nm 和 0.299 nm²。相较于 CNN 结合传统光路的方案, MAE 降低约 36.1%, MSE 降低约 39.7%, 充分验证了高灵敏度差分光路与旋转等变深度学习算法之间的协同优势, 可显著提升微位移测量系统的精度与鲁棒性。

5 结 论

本文提出了一种对向双端面差分共轭涡旋光干涉微位移测量方法。该方法通过构建对向双端面差分光路结构, 实现微小旋转角度的物理放大, 同时利用共轭涡旋光干涉图样随相位差产生旋转的物理特性及旋转等变性, 引入基于圆形谐波卷积的 H-Nets 模型, 将连续角向变化映射为复数特征空间中的相位偏移, 实现微小旋转角的稳定表征与位移反演, 显著提升了系统对微位移的检测灵敏度。实验结果表明, 在 0-500 nm 标准位移内, 最大绝对误差小于 0.61 nm, 平均绝对误差为 0.37 nm。未来工作将在现有研究基础上进一步探索高阶涡旋光束对测量精度的影响规律, 并针对复杂噪声环境及光学畸变环境下的鲁棒性优化, 同时轻量化深度学习架构设计, 以提升模型的稳定性与泛化能力。以期为实现高稳定性、高分辨率的亚纳米级位移测量提供新的技术路径。

参考文献:

- [1] HSIEH H L, LEE J Y, WU W T, *et al.*. Quasi-common-optical-path heterodyne grating interferometer for displacement measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(11): 115304.
- [2] CUI C, LI X H. Precision nanometrology: laser interferometer, grating interferometer and time grating sensor[J]. *Sensors*, 2025, 25(21): 6791.
- [3] 张智超, 海澜, 张书瑞, 等. 复杂结构光场的多自由度协同调控技术研究进展[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 240079.
ZHANG ZH CH, HAI L, ZHANG SH R, *et al.*. Advances on the manipulation of structured beams with multiple degrees of freedom[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(8): 240079. (in Chinese).
- [4] 赵冬城, 王思育, 马亚云, 等. 基于涡旋光与球面波干涉的微位移测量研究[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(4): 0413005.
ZHAO D E, WANG S Y, MA Y Y, *et al.*. Measurement of micro-displacement based on the interference of vortex beams and spherical wave[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(4): 0413005. (in Chinese).
- [5] MA J B, LI P, GU Y Z. Characteristics of spiral patterns formed by coaxial interference between two vortex beams with different radii of wavefront curvatures[J]. *Photonics*, 2021, 8(9): 393.
- [6] XIAO M C, YANG D, XIONG J W. Non-contact measurement for cone angle of axicon lens based on vortex interference[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127267.
- [7] YANG D, YANG ZH M, ZHAO ZH G, *et al.*. Radius of curvature of spherical wave measurement based on vortex beam interference[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 142: 106592.
- [8] WANG Y C, SHYU L H, CHANG C P. The comparison of environmental effects on Michelson and Fabry-Perot interferometers utilized for the displacement measurement[J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 2577-2586.
- [9] ZHAO N, QIAN G, FU X CH, *et al.*. Integrated optical displacement sensor based on asymmetric Mach-Zehnder interferometer chip[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 027109.
- [10] SENTHILKUMARAN P, MASAJADA J, SATO S. Interferometry with vortices[J]. *International Journal of Optics*, 2012, 2012(1): 517591.
- [11] GAO H W, YANG D, HU X N, *et al.*. High-precision micro-displacement measurement in a modified reversal shearing interferometer using vortex beams[J]. *Optics Communications*, 2023, 537: 129454.
- [12] WEBSTER J, ROSALES-GUZMÁN C, FORBES A. Radially dependent angular acceleration of twisted light[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 675-678.
- [13] EMILE O, EMILE J. Naked eye picometer resolution in a Michelson interferometer using conjugated twisted beams[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 354-357.
- [14] 夏豪杰, 谷容睿, 潘成亮, 等. 涡旋光位移干涉测量方法与信号处理[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1905-1912.
XIA H J, GU R R, PAN CH L, *et al.*. Signal processing method for displacement measurement interferometry using vortex beams[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1905-1912. (in Chinese).
- [15] LU H L, HAO Y Y, GUO CH J, *et al.*. Nano-displacement measurement system using a modified orbital angular momentum interferometer[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, 58(2): 7500105.
- [16] YUAN T, LIU J, WU J H, *et al.*. Advanced vortex beam interference system enhanced by CNN for micro-displacement detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 191: 108987.
- [17] 杨雪娇, 刘吉, 武锦辉, 等. 深度学习融合模型共轭涡旋光干涉微位移测量[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(15): 2331-2341.
YANG X J, LIU J, WU J H, *et al.*. Conjugate vortex beam interferometry for micro-displacement measurement with deep learning fusion architecture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(15): 2331-2341. (in Chinese).
- [18] COHEN T, WELLING M. Group equivariant convolutional networks[C]. *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning*, JMLR. org, 2016: 2990-2999.
- [19] MARCOS D, VOLPI M, KOMODAKIS N, *et al.*. Rotation equivariant vector field networks[C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, IEEE, 2017: 5058-5067.
- [20] WORRALL D E, GARBIN S J, TURMUKHAMBETOV D, *et al.*. Harmonic networks: deep translation and rotation equivariance[C]. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, 2017: 7168-7177.

- [21] ZHANG ZH H, ZHAO G B, BAN Y W, *et al.*. High-fold optical subdivision blazed grating interferometer based on Mach-Zehnder interferometer[J]. *Measurement*, 2025, 242: 116128.
- [22] YE G Y, YUAN T, ZHANG Y L, *et al.*. Recent progress on laser interferometry based on vortex beams: status, challenges, and perspectives[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 172: 107871.

作者简介:



郑艺琛(2000—),男,山西临汾人,研究生,主要从事信息探测与处理方面的研究。E-mail: sz202406167@st.nuc.edu.cn



武锦辉(1978—),男,教授,博士,主要从事高动态光参数光电探测技术、光纤传感技术、嵌入式系统及仪器的研究。E-mail: wujinhui@nuc.edu.cn