

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2023.01.003

共轭涡旋光干涉位移测量拓扑荷优化实验研究*

赵秉义¹, 赵冬娥^{1,2**}, 马亚云¹, 褚文博³

(1. 中北大学 信息与通信工程学院,太原030051; 2. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室,太原030051;
3. 中北大学 机电工程学院,太原030051)

摘 要: 以共轭涡旋光干涉原理为基础,理论分析了干涉图像旋转角度和位移量的对应关系,利用光学仿真系统验证了理论的可行性。采用基于空间光调制器和改进型的马赫-泽德干涉仪组成的共轭涡旋光干涉测量系统,利用不同拓扑荷数的共轭涡旋光实验测量了纳米位移台的位移变化。实验结果表明,在位移量为100 nm、200 nm和250 nm的情况下,拓扑荷数为3时的相对误差最小,分别为2.19%、1.28%和1.27%。研究结果有助于提高基于共轭涡旋光干涉位移测量的精度。

关键词: 物理光学; 涡旋光; 位移测量; 拓扑荷数; 相对误差

中图分类号: TN247;O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0011-06

Experimental Study on Topological Charge Optimization for Displacement Measurement with Conjugated Vortex Beams Interferometry

ZHAO Bingyi, ZHAO Donge, MA Yayun, CHU Wenbo

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, CHN; 2. State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, CHN; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, CHN)

Abstract: Based on the interference principle of conjugated vortex beams, the relationship between the rotation angle and displacement of the interference image was theoretically analyzed, and the feasibility of the theory by optical simulation system was verified. An interferometer composed of a spatial light modulator and an improved Mach-Zehnder interferometer was designed to measure the displacement of the nano-displacement stage using the conjugated vortex beams with different topological charges. The experimental results showed that when the displacement was 100 nm, 200 nm and 250 nm, the relative error was the smallest when the topological charge was 3, which was 2.19%, 1.28% and 1.27%, respectively. The research results were helpful to improve the accuracy of dis-

收稿日期:2022-11-22

* 基金项目:国家自然科学基金(62205307)

作者简介:赵秉义(1997—),男,硕士研究生,研究方向为光学精密测量技术;(E-mail:1084326981@qq.com)

赵冬娥(1970—),女,教授、博士生导师,主要从事光学精密测量技术、高光谱图像分类等领域的研究工作;(E-mail:zhaodong@nuc.edu.cn)

马亚云(1989—),男,副教授,主要从事全固态激光技术、非线性光学、光电检测技术等领域的研究工作。

** 通讯作者

placement measurement based on conjugated vortex beams interference.

Key words: physical optics; vortex beam; displacement measurement; topological charge; relative error

引 言

涡旋光束是一种波前结构为螺旋状,中心处存在相位奇点的特殊光束,涡旋光在光学操纵^[1]、高分辨率显微成像^[2]、光通信^[3]、量子通信^[4]以及光学测量^[5-8]领域都有广泛应用。自 Allen 等基于 Hermite-Gauss 光束制备出 Laguerre-Gaussian 光束以来,众多学者对其物理性质和产生方法进行了详细的研究^[9-12]。Shvedov 等利用光学楔块系统的高斯光束的衍射产生了高阶光学涡旋^[13]。Milne 等利用一种可调谐流体锥形透镜,用于贝塞尔光束的生成和动态重构^[14]。张亚楠等在几何焦平面获得完美涡旋光场,并且分析了不同偏振态完美涡旋光对微粒施加的光学力和轨道矩^[15]。Ding 等基于低频外差干涉测量方法,得到了涡旋光束的相位奇点和波前螺旋度,研究了涡旋光的相位分布^[16]。在位移测量方面,英国利物浦大学的 Gopal Verma 等对两束拓扑荷为 +10 和 -10 的共轭涡旋光干涉情况进行了仿真分析,仿真结果表明该方案理论上可实现的测量分辨率为 3 pm^[17]。本课题组基于涡旋光与球面波的干涉测量装置,通过测量螺旋形干涉图样在中心处的切线斜率变化,实现了微位移测量,对 27 nm 的位移量,测量误差为 1.25 nm^[18];合肥工业大学夏豪杰等人研究了一种将 PIN 光电探测器的花瓣周期电压信号计数和高分辨力图像细分处理相结合的干涉测量方法,实现了基于共轭涡旋光的微位移测量,实验室条件下分辨率为 0.5 nm^[19];山东大学韩世泽等人研究了涡旋光与平面波干涉测量方法,实现了纳米级的微位移测量^[20];孙平等人将涡旋光应用于电子散斑干涉测量领域,为物体变形测量提供了新思路^[21]。

根据共轭涡旋光束干涉特性可知,干涉图样的花瓣随着拓扑荷数的增大而变薄,因此有利于提高干涉位移测量的灵敏度。然而,伴随着拓扑荷数的增加,涡旋光的产生难度增加、光束质量退化,最终会影响共轭涡旋光束干涉位移测量的精度。

为了研究涡旋光拓扑荷数对测量精度的影响,文中以共轭涡旋光束干涉测量位移为基础,理论上

建立了干涉图案旋转角度与位移变化量和涡旋光拓扑荷数的关系,采用不同拓扑荷数的涡旋光束进行位移测量,并利用图像处理的方法获取位移导致的花瓣状干涉图案的旋转角度,实验研究了不同拓扑荷数涡旋光的位移测量精度。文章的研究结果可为基于共轭涡旋光干涉位移测量的方案优化提供参考。

1 基本原理

涡旋光束电场强度在极坐标 (r, θ) 下可以表示为:

$$E_+(r, \theta) = A \cdot \exp(il\theta) \quad (1)$$

其中 A 为振幅, l 为拓扑荷数, θ 为方位角。

其共轭的涡旋光束电场强度可以表示为:

$$E_-(r, \theta) = A \cdot \exp(-il\theta) \quad (2)$$

此时的涡旋光共轭干涉光强分布可以表示为:

$$I(r, \theta) = 2A^2 [1 + \cos(2l\theta)] \quad (3)$$

根据公式(3)可知,共轭涡旋光束干涉产生的光场强度会发生 $\cos(2l\theta)$ 的角度调制,拓扑荷数将整体干涉图案分为对称的 $2l$ 个部分。

当参考臂保持恒定,而待测物体发生位移导致干涉光路中测试臂的光程产生 d 的变化后,此时干涉光场的光强表达式为:

$$I(r) = 2A^2 \left\{ 1 + \cos \left[2l \left(\theta + \frac{kd}{l} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, λ 为涡旋光的波长。对比(3)和(4)可知,待测物体位移变化 d 后,干涉图像的旋转角度为 $\phi = kd/2l$ 。因此根据 $d = \frac{\lambda l \phi}{\pi}$,通过求解图像旋转角度 (ϕ) ,就能完成位移 d 的精准测量。

2 系统仿真

为验证基于共轭涡旋光束干涉微位移测量理论的正确性,在 VirtualLab Fusion 光学仿真软件上搭建共轭涡旋光束干涉微位移测量系统进行了仿真。VirtualLab Fusion 是一款物理光学数值分析软

件,它基于电磁场核心理论,对整个光波场进行完整的描述,能够通过探测器测得空间中任何位置的光场数据,所以能保证光学系统建模的准确性^[22]。基于共轭涡旋光干涉理论微位移测量光学建模图如图1所示,图中波长为632.8 nm的He-Ne激光器发出高斯光束,光束直径为0.7 mm;利用焦距分别为2 mm和6 mm透镜“L1”和“L2”对激光器出射的光束进行扩束和准直;然后利用分光比为50:50的分束器“BS1”将光束分为水平方向和垂直方向两束;其中水平方向的激光光束通过空间光调制器“SLM1”加载相息图生成涡旋光束后依次经过平面镜“M1”、合束器“BS2”反射后入射到CCD相机作为测试光束;垂直方向的激光光束通过空间光调制器“SLM2”加载相息图生成与测试光束相反拓扑荷数的涡旋光束后依次经过平面镜“M2”反射、合束器“BS2”透射后入射到CCD相机作为参考光束与测试光束实现共轭干涉。

在VirtualLab Fusion 光学设计软件中,设置拓

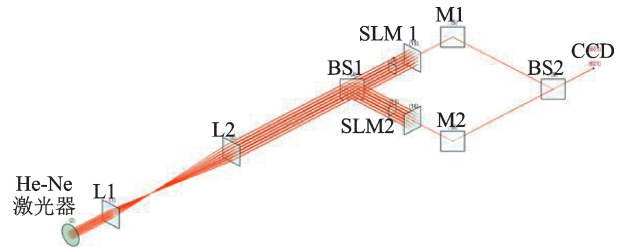


图1 基于共轭涡旋光干涉理论微位移测量仿真图
Fig.1 Simulation of micro-displacement measurement based on interference theory of conjugated vortex beams

扑荷数 $l=3$, 移动平面镜1(M1), 获得位移前后干涉图像如图2所示, 图2(a)为平面镜M1位移前的干涉图像, 图2(b)、图2(c)、图2(d)为平面镜M1位移后的干涉图像, 位移 d 分别为平面镜M1移动 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 和 λ 位移后的干涉图像。从图中可以看到共轭涡旋光干涉图像为花瓣状, 当物体发生位移后, 整个花瓣相较于位移前发生角度的旋转, 当位移量分别为 $\lambda/4$ 、 $\lambda/2$ 和 λ 时, 图像顺时针旋转的角度分别为 15° 、 30° 和 60° , 与理论分析一致。

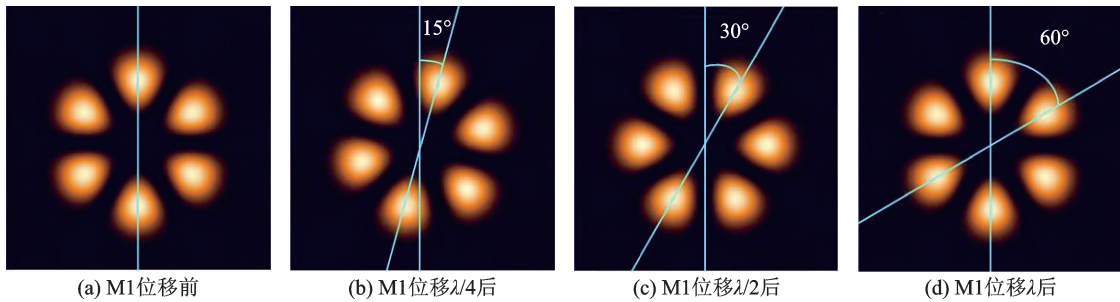


图2 VirtualLab软件共轭涡旋光干涉仿真图
Fig.2 VirtualLab software conjugated vortex beams interference simulation

3 实验分析

3.1 实验装置

基于共轭涡旋光束干涉微位移测量的实验装置如图3所示, He-Ne激光器(632.8 nm、2 Mw)发出的光束首先经过偏振片P, 然后经过透镜L1($f_1=15$ mm)、L2($f_2=75$ mm)进行准直扩束, 扩束后的光束通过分束镜BS1入射到空间光调制器LC-SLM的液晶表面。通过在空间光调制器中加载涡旋光束的相息图将入射的高斯光束转换为涡旋光束, 并反射至分束镜BS1。涡旋光束经过分束镜BS1向下反射, 入射至分束镜BS2后被分为水平方向和垂直方向的两束光。其中, 被BS2分为垂直方向的涡旋光束依次经过反射镜M2、分束镜BS3入射至CCD

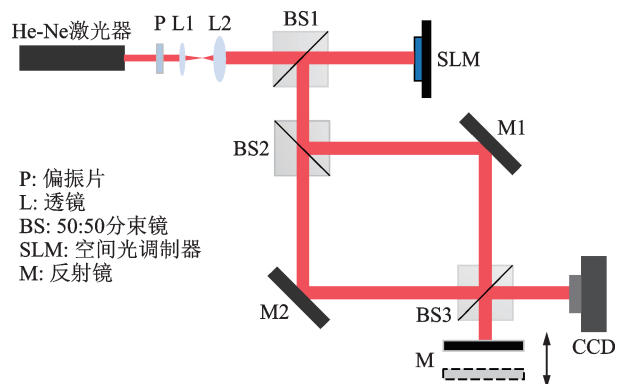


图3 基于共轭涡旋光束干涉测量微位移实验装置示意图
Fig.3 Experimental setup for measuring micro-displacement of objects based on conjugated vortex beams interferometry

相机, 作为参考光束。而水平方向涡旋光束作为测量光束, 经反射镜M1反射和分束镜BS3透射后入

射至固定在纳米位移台上的反射镜(M)。实验中,通过给纳米位移台的控制器加载信号可实现纳米位移台的前后移动,因此该平面反射镜反射的光束携带了位移信息。测量光束经分束镜BS3反射后与参考光束在CCD相机处干涉,由于测量和参考光束的反射次数之差为奇数,因此两束涡旋光实现了共轭涡旋光束共轴干涉。实验中的LC-SLM为反射式纯相位液晶空间光调制器 PLUTO-NIR-011,其分辨率为 $1\,920\times 1\,080$,像素单元尺寸为 $8.0\ \mu\text{m}$,响应时间 $16\sim 200\ \text{ms}$ 。CCD相机使用的是GEV-B2020,像素为 $2\,048\times 2\,048$,像素单位尺寸为 $7.45\ \mu\text{m}$ 。

3.2 实验结果

实验过程中设置纳米位移台的位移为 $100\ \text{nm}$,由于光路往返,系统测量臂产生的实际光程变化为 $200\ \text{nm}$ 。纳米位移台位移前后采集的不同拓扑荷数的共轭涡旋光束干涉图像经图像处理后的结果如图4所示。其中,图4(a)1~图4(a)6分别为 $l=1\sim 6$ 时纳米位移台产生位移前的干涉图样,图4(b)1~图4(b)6为与之对应的纳米位移台产生位移后的干涉图样。图中可以明显看出实验中干涉图样呈花瓣状对称分布,纳米位移台产生位移后,干涉图样发生明显的旋转,与仿真一致。

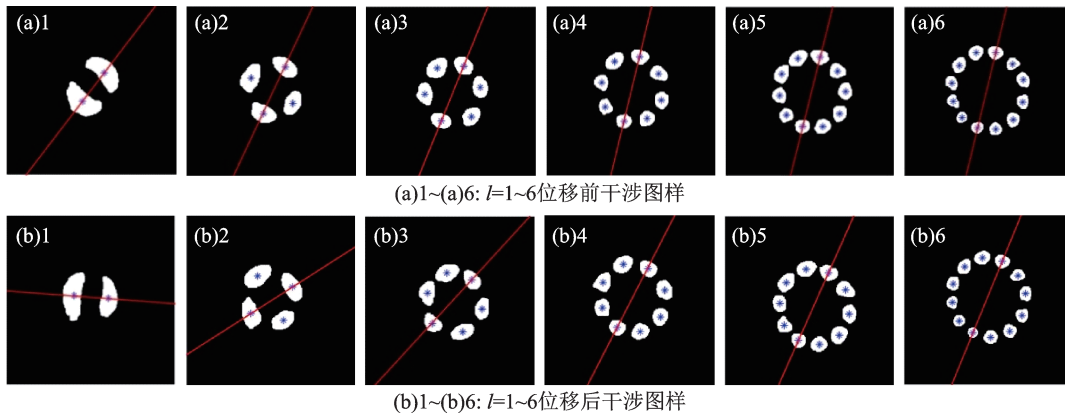


图4 图像处理后的 $100\ \text{nm}$ 位移前后干涉图样

Fig.4 Interference pattern before and after $100\ \text{nm}$ displacement with image processing

由于干涉图像呈对称状分布,因此将位移前图像中对称的两花瓣质心连线定义为向量 α ,与其对应的位移后的旋转图像中两花瓣的质心连线为向量 β ,求出 α 与 β 的夹角即为位移前后图像的旋转角度,再根据旋转角度与位移量和拓扑荷数的关系便可计算出纳米位移台的位移量。为了增加数据可信度,进行了5次重复实验,对其求平均后的结果如表1所示。

表1 位移为 $100\ \text{nm}$ 时计算得到的误差结果

Tab.1 Error results calculated at $100\ \text{nm}$ displacement						
拓扑荷数 l	1	2	3	4	5	6
理论旋转角度/ $^\circ$	56.89	28.45	18.96	14.22	11.38	9.48
测量旋转角度/ $^\circ$	53.02	30.25	19.38	13.79	11.81	9.91
位移计算/ nm	93.20	106.34	102.19	96.96	103.81	104.53
相对误差/ $\%$	6.80	6.34	2.19	3.04	3.81	4.53

由表1可知,在位移为 $100\ \text{nm}$ 时,拓扑荷数在 $l=1\sim 6$ 范围内共轭涡旋光束的位移测量平均误差均在 $\pm 6.8\ \text{nm}$ 范围内,其中拓扑荷数 $l=3$ 时,相对误

差为 2.19% ,误差最小。

分别设置纳米位移台位移为 $200\ \text{nm}$ 和 $250\ \text{nm}$,每一位移下采用拓扑荷数 $1\sim 6$ 的共轭涡旋光进行5次重复实验,结果如图5,图6和表2,表3所示。位移量为 $200\ \text{nm}$ 时,平均测量误差均在 $\pm 4.51\ \text{nm}$ 范围内,最小相对误差对应的拓扑荷数为 $l=3$,最小相对误差为 1.28% 。位移量为 $250\ \text{nm}$ 时,平均测量误差均在 $\pm 5.51\ \text{nm}$ 范围内,其中拓扑荷数 $l=3$ 时的相对误差仍然最小,为 1.27% 。

将表1~表3中的相对误差进行对比,如图7所示。可以观察到,纳米位移台产生不同位移时,均为拓扑荷数 $l=3$ 时相对误差最小。

4 结 论

基于共轭涡旋光束的干涉理论基础,分析了干涉图案旋转角度与位移变化量和涡旋光拓扑荷数的对应关系。用VirtualLab Fusion软件进行了模拟

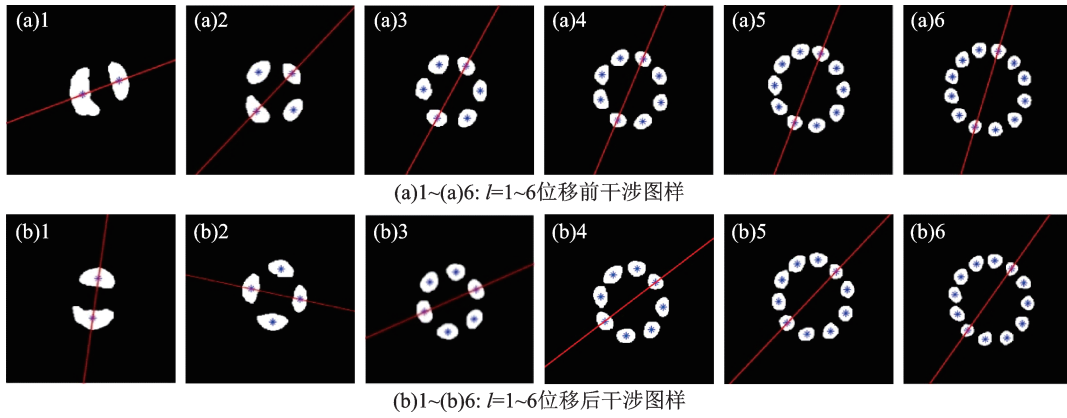


图5 图像处理后的200 nm位移前后干涉图样

Fig.5 Interference pattern before and after 200 nm displacement with image processing

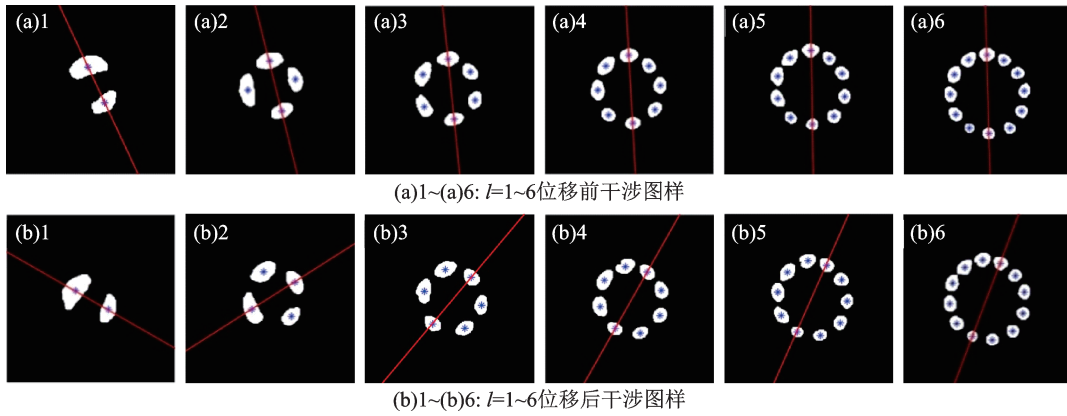


图6 图像处理后的250 nm位移前后干涉图样

Fig.6 Interference pattern before and after 250 nm displacement with image processing

表2 位移为200 nm时计算得到的误差结果

拓扑荷数 l	1	2	3	4	5	6
理论旋转角度/(°)	113.78	56.89	37.93	28.45	22.76	18.96
测量旋转角度/(°)	116.35	55.66	38.41	29.03	22.27	19.37
位移计算/nm	204.51	195.66	202.55	204.14	195.72	204.29
相对误差/(%)	2.25	2.17	1.28	2.07	2.14	2.14

表3 位移为250 nm时计算得到的误差结果

拓扑荷数 l	1	2	3	4	5	6
理论旋转角度/(°)	142.23	71.11	47.41	35.56	28.45	23.70
测量旋转角度/(°)	145.36	72.53	46.80	36.14	28.03	23.23
位移计算/nm	255.51	254.98	246.79	254.13	246.33	245.01
相对误差/(%)	2.20	1.99	1.27	1.65	1.67	2.00

仿真,验证了花瓣状干涉图案旋转角度与位移变化量的线性关系,并且搭建实验系统,研究了不同拓扑荷数时位移测量误差的变化情况。当测量位移分别为100 nm、200 nm、250 nm时,均为拓扑荷数 $l=3$ 时误差最小,相对误差分别为2.19%、1.28%、

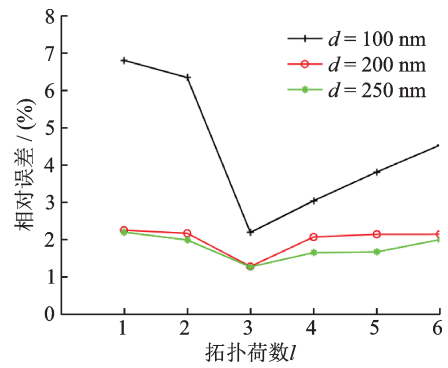


图7 不同位移下相对误差对比图

Fig.7 Comparison of relative errors under different displacements

1.27%。该研究为基于共轭涡旋光干涉的高精度测量方案优化提供了新的研究思路。

参 考 文 献

[1] 张冠鸣. 涡旋光束的矢量衍射以及瑞利条件下的光镊[J]. 江西科学, 2017, 35(5): 671-675.
 [2] 赵迎春, 张秀英, 袁操今, 等. 基于涡旋光照明的暗场数字全息显微方法研究[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 178-183.

