

# 基于微纳光栅自成像效应的多功能位移传感器

徐映坤<sup>1</sup>, 张梦迪<sup>1</sup>, 辛晨光<sup>1,2,\*</sup>

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051;

2. 中北大学仪器与智能未来技术学院 太原 030051)

Email: xincg@nuc.edu.cn

**摘要:** 针对精密机床 / 光刻机工件台 / 电子显微镜等精密加工与检测系统对位移精密传感的迫切需求, 本文提出了一种基于微纳光栅自成像效应的多功能位移传感技术。该传感器采用双光栅结构, 通过分别检测单一传感结构下透射光信号相位和振幅的变化, 同时测量线性位移和角位移。仿真结果表明, 透射光强正弦信号的相位与输入线性位移呈正弦关系变化, 而其振幅随输入角度的增加而减小, 结果证明了通过测量信号不同参量对线性位移和角位移进行分离提取的可行性。在实验中验证了多功能位移的同步测量功能, 并实现了位移分辨率  $\sim 3\text{nm}/\sim 3.85$  弧秒、量程  $10\text{mm}/\pm 400$  弧秒等指标。受益于单共轴光路简单结构, 该传感器无需使用反射器、偏振器等光学元件, 具有超高的紧凑性和多参量同步测量能力, 在集成化机械定位和半导体制造等领域展现出良好的应用潜力。

**关键词:** 自成像; 微纳光栅; 多功能; 位移传感器

## 1、研究背景

多自由度精密测量 (DOF) 可用于精确检测物体在平面或三维空间中的位置, 已广泛应用于超精密加工过程中的加工定位和运动驱动。测得的自由度通常包括线性参数 (例如三个线性轴上的位移) 和角度参数 (例如横滚角、偏航角和俯仰角)。在过去的几十年中, 已经报道了几种光学方法用于多自由度测量, 包括激光干涉测量、自准直和光栅衍射干涉测量。在这些方法中, 基于光栅的方法在紧凑型加工系统中显示出高分辨率和稳定性。通常, 基于光学光栅的多自由度测量可以通过使用多个线性位移传感器或结合光学干涉和自准直来证明。考虑到最近为高精度加工系统 (如光刻机床) 开发超紧凑部件的迫切需求, 2022 年, S. Wang 等人提出了一种光栅编码器, 该光栅可以提供绝对的 4 自由度位置和位姿监测, 精度为亚弧秒和亚微米。在这种情况下, 需要大量的光学元件, 包括反射器、偏振器和波片来同步测量线性和角度参数, 导致紧凑度低, 并且由于较大的阿贝误差和串扰误差而导致精度显著下降。

自成像效应揭示了一种现象, 即当周期性结构 (例如光学光栅) 受到平面波的照射时, 结构后方一定距离处的光场强度分布显示相同的周期。得益于简单的光路和高紧凑性, 过去几年已经证明了基于光学光栅的自成像效应的线性或角度测量。对于线性位移测量, 2015 年, S. Agarwal 等人报道了使用圆形光栅 Talbot 干涉仪进行面内位移测量。通过分析自成像干涉条纹图案的偏移,

报告了微米级的分辨率。2022年，C. Xin等人使用双象限探测器将分辨率提高到0.73 nm，范围高达mm级。对于角度测量，2006年，A. Wang等人报道了一种传感器，该传感器利用自成像效应来检测光的局部强度和入射角。2022年，Z. Yang等人报道了一种采用双光栅结构的超紧凑型角位移传感器，在 $\pm 396$  弧秒范围内，灵敏度为0.19 mV/弧秒。由于在上述情况下，线性位移和角位移都在同步改变输出信号的幅度或自成像图像的模式，因此线性位移和角位移很难区分开来。利用输出信号的不同参数（如振幅和相位），原则上可以利用自成像效应开发出紧凑、精度高的多自由度测量。

## 2、研究内容

本文演示了一种基于光学微光栅自成像效应的超小型复合位移和角度传感器。通过检测两个光栅后面的相位变化和光传输幅度，可以同步测量线性位移和角度。通过有限差分域（FDTD）方法得到的仿真结果表明，传输率随两个光栅之间的相对线性位移而呈正弦变化。正弦信号的相位与输入线性位移有关（例如， $2\pi$  的相位对应于光栅的一个单周期的线性位移）。正弦信号的幅度随着上光栅俯仰角的增加而衰减。线性位移的分辨率为3 nm，角度测量的分辨率为3.85 弧秒， $\pm 1^\circ$  范围内的分辨率已通过实验证明，表明具有同步多自由度测量的能力。实验示意图如图1所示。来自激光器（CPS635R, Thorlabs, Newton, NJ, USA）的波长为635nm的光束被照射到两个光栅上。光栅是通过蚀刻厚度为150nm的铝膜制备的，铝膜位于厚度为500  $\mu\text{m}$  的二氧化硅衬底上，光栅周期为4  $\mu\text{m}$ ，占空比为0.5。G2具有双象限结构，其中两个光栅象限位于距离为4.001 mm的单个基板上。多象限探测器（OSQ100-IC, OTRON, 上海, 中国）放置在G2后面，用于测量透射强度。

与细分系数为1000的插补电路相结合，可以通过计数输出的平方信号来测量位移。图2a显示了160  $\mu\text{m}$  范围内线性位移的实验测量结果。电动平移平台（MT1/M-Z8, Thorlabs, Newton, NJ, USA）用于提供线性位移。结果表明，测量结果与输入位移吻合良好，最大误差为2.4  $\mu\text{m}$ ，这可能是由阿贝误差和环境振动引起的。图2b所示的多个测量结果表明精度在 $\pm 1$   $\mu\text{m}$  以内。考虑到实验中使用的平移阶段的位置重复性为 $\pm 0.7$   $\mu\text{m}$ ，结果显示出较高的精度。

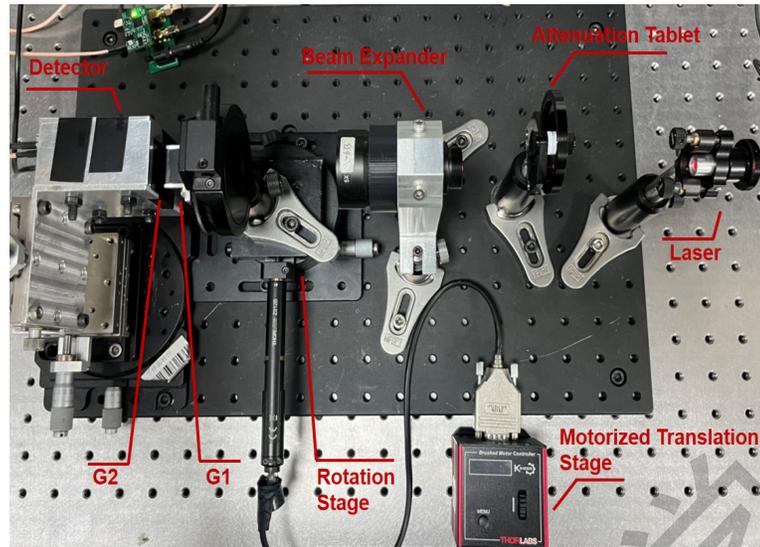


Fig.1 The experimental setup of the proposed combined sensor.

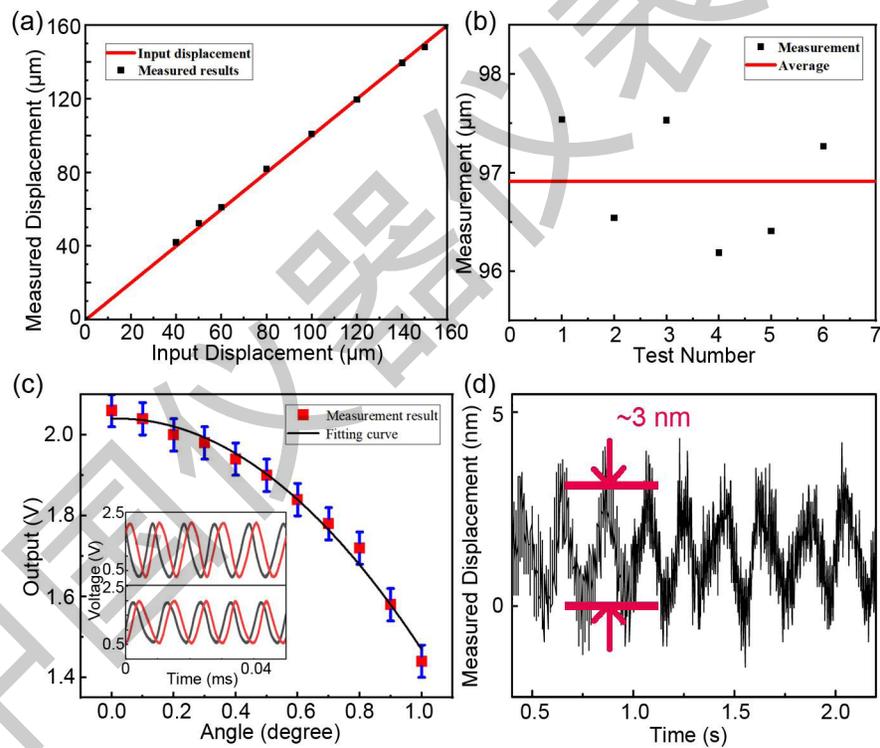


Fig.2 (a) The linear displacement measurement results obtained experimentally. (b) Multiple measurement results with an input linear displacement of  $\sim 100\mu\text{m}$ . (c) The relationship between the rotated angle of the first grating and the amplitude of the output signal from the detector. Inset shows the experiment results with a uniform-rate input linear displacement at a different rotated angle of  $0^\circ$  and  $1^\circ$  respectively. (d) The output with an input vibration at frequency of 60Hz and amplitude of  $\sim 3\text{nm}$ .

G1 的旋转角度与探测器输出信号幅度的关系如图 2c 所示。实验使用的单轴转台 (RSM82-1A, Zolix, Beijing, China) 可在  $360^\circ$  范围内旋转, 分辨率为  $2'$ 。结果显示出下降趋势, 与模拟结果一致。拟合曲线 R2 为 0.98969, 最大斜率为  $0.92 \text{ V/度}$ , 最大灵敏度可达  $0.26 \text{ mV/弧秒}$ 。考虑到实验中使用的示波器 (TBS2204B, Tektronix, Beaverton, QR, USA) 的  $1 \text{ mV}$  电压检测器的分辨率, 计算出该传感器用于角度测量的最大总分辨率为  $\sim 3.85$  弧秒。在实验过程中, 压电陶瓷 (E53.BS1, Coremorrow) 用于通过  $45 \text{ mV}$  的周期电压信号泵浦, 其最大位移为  $3 \text{ nm}$  的周期性运动。从四象限探测器的一个象限获得输出信号, 如图 2d 所示由于信号显示出相同的振动频率和可识别的振幅变化, 结果表明所提出的传感器的实际分辨率不超过  $\sim 3\text{nm}$ , 这与理论上得到的结果相当。

### 3、结论

在本文中, 我们提出了一种基于光学微光栅的自成像效应的组合传感器, 用于同步测量位移和角度。使用双光栅结构, 可以通过分别检测输出正弦信号的相位变化和幅度来测量线性位移和角度。仿真和实验结果均表明, 透射强度随输入线性位移呈正弦变化。正弦信号的幅度随着旋转角度的增加而减小。与细分因子为 1000 的插值电路相关, 通过实验证明了位移分辨率  $\sim 3\text{nm}/\sim 3.85$  弧秒、量程  $10\text{mm}/\pm 400$  弧秒等指标, 这与光栅衍射干涉测量和光电自准直等方法相当。由于位移和角度的测量是在单一结构中进行的, 因此所提出的传感器显示出超紧凑的结构。结果表明, 该传感器在从光刻机床到精密机床等应用中具有集成式高精度多自由度测量的巨大潜力。

### 参考文献

- [1] M.D. Zhang, H. Yang, C.G. Xin, et al. Combined Displacement and Angle Sensor with Ultra-High Compactness Based on Self-Imaging Effect of Optical Microgratings[J]. *Sensors*, 2024, 24(3): 908.
- [2] Y. Hao, M.D. Zhang, C.G. Xin, et al. 3DOF displacement sensor based on the self-imaging effect of optical micro-gratings[J]. *Applied Optics*, 2024, 60(14):3984-3990.
- [3] K.N. Yu, J.H. Zhu, W.H. Yuan, et al. Two-channel six degrees of freedom grating-encoder for precision-positioning of sub-components in synthetic-aperture optics[J]. *Opt. Express*, 2021, 29(14):21113-21128.
- [4] H. Y. Yu, X. L. Chen, C. J. Liu, et al., A survey on the grating based optical position encoder[J]. *Opt. Laser Technol*, 2021, 143, 107352.