

基于莫尔条纹的全周转角精密测量方法

许令鸿 张秋坤 林杰文 李劲林 黎昕婷 钟舜聪

Precision measurement method of full-cycle torsion angle based on Moiré fringe

XU Linghong, ZHANG Qiukun, LIN Jiewen, LI Jinlin, LI Xinting, ZHONG Shuncong

引用本文:

许令鸿, 张秋坤, 林杰文, 等. 基于莫尔条纹的全周转角精密测量方法[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 644–651. DOI: 10.5768/JAO202445.0303002

XU Linghong, ZHANG Qiukun, LIN Jiewen, et al. Precision measurement method of full-cycle torsion angle based on Moiré fringe[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(3): 644–651. DOI: 10.5768/JAO202445.0303002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0303002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

扭转角测量系统中焦距误差分析

Analysis of focal length error in torsion angle measurement system

应用光学. 2020, 41(3): 477–481 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0301007>

基于无衍射光莫尔条纹的轴锥透镜锥角测量方法

Measurement method of axicon cone angle based on moire fringes of non-diffracting beam

应用光学. 2020, 41(3): 559–564 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0303003>

基于二进制条纹加相位编码条纹离焦投影的三维测量方法

3D measurement method based on binary fringe plusphase coding fringe defocus projection

应用光学. 2017, 38(5): 790–797 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0503003>

基于正弦和三角波条纹投影的三维测量方法

Three-dimensional shape measurement method based on sinusoidal and triangular fringe projection

应用光学. 2018, 39(4): 522–527 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0403002>

无衍射光莫尔条纹的中心定位方法

Central positioning method of non-diffracting moire fringes

应用光学. 2019, 40(4): 652–657 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403004>

基于傅里叶变换的细胞牵引力测量研究

Research on cell traction measurement based on Fourier transform

应用光学. 2021, 42(2): 317–326 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 03-0644-08

基于莫尔条纹的全周转角精密测量方法

许令鸿, 张秋坤, 林杰文, 李劲林, 黎昕婷, 钟舜聪

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 由于将莫尔条纹图进行快速傅里叶变换时会导致频谱泄露, 导致无法实现 360° 的全周精确定量, 因此提出基于莫尔条纹的全周转角测量方法并搭建转角测量系统。以 1° 为步距, 利用 CMOS 相机采集不同宽度的莫尔条纹图像, 采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 对条纹进行处理, 得到光栅频谱信息。同时采用汉宁窗能量重心校正算法 (Hanning-window energy centrobaric method, HnWECM) 校正频谱, 得到莫尔条纹图像表征转角的真实有效信息, 实现全周精确测量。实验结果表明, 该系统可快速精准地实现转角的全周测量, 测量范围广, 最大误差率为 0.243 3%。

关键词: 转角测量; 莫尔条纹; 快速傅里叶变换; 汉宁窗能量重心法

中图分类号: TN06; TB22

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0303002](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0303002)

Precision measurement method of full-cycle torsion angle based on Moiré fringe

XU Linghong, ZHANG Qiukun, LIN Jiewen, LI Jinlin, LI Xiting, ZHONG Shuncong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Due to the leakage of frequency spectrum caused by applying fast Fourier transform to the Moiré fringe image, it becomes challenging to achieve accurate 360° full-cycle measurements. A measurement method of full-cycle torsion angle based on Moiré fringe was proposed and a set of torsion angle measurement system was built. The Moiré fringe images with different widths were acquired by a CMOS camera at 1° intervals, and then the grating frequency spectrum information could be obtained by adopting fast Fourier transform (FFT). In addition, the frequency spectrum was corrected by the Hanning-window energy centrobaric method (HnWECM), and the real and effective information of torsion angle represented by Moiré fringe image could be obtained to achieve precision measurement of full-cycle torsion angle. Experimental results show that the system can quickly and accurately realize the full-cycle measurement of the torsion angle with the advantage of wide measurement range, and its maximum error rate is 0.243 3%.

Key words: torsion angle measurement; Moiré fringe; fast Fourier transform; Hanning-window energy centrobaric method

引言

转角测量是角度计量科学的重要组成部分, 在精密加工、军事和工业领域具有重要的应用, 如数控机床加工器件过程中的检验测量、无人机空间位置的测量和航天测量船基准角度测量^[1-3]等。因此开展转角的高精度全周测量具有重要的意义。

目前, 实际工程应用中的转角测量方法主要有

大钢管基准法^[4]、偏振光测量法^[5]、摄影测量法^[6]、光源靶标法^[7]等。其中大钢管基准法探测器中心基准容易漂移, 导致测量精度不稳定; 偏振光测量法设备成本高昂, 控制系统复杂; 摄影测量法受到摄像机与待测对象的位置和角度限制; 光源靶标法测量系统所需跨距较大, 难以小型化和集成化。以上方法在实际测量中, 都会受限于探测器

收稿日期: 2022-01-13; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52275096); 福建省科技重大专项 (2022HZ024005)

作者简介: 许令鸿 (1996—), 女, 硕士, 主要从事精密仪器与测量技术研究。E-mail: xulihong954@163.com

通信作者: 钟舜聪 (1976—), 男, 博士, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事光学和太赫兹仪器、智能传感与诊断技术研究。

E-mail: sczhong@fzu.edu.cn

尺寸和位置等因素, 难以实现360°的全周转角测量。莫尔条纹是由两个空间频率相近的周期性光栅叠加而形成的光学条纹。其具有非接触、高灵敏度和高精确度的优点, 能够应用于工程应用的360°的全周精确测量。

因此, 基于莫尔条纹的角度测量方法受到广泛关注^[8-10]: 李向荣^[11]利用莫尔条纹测量模拟船体的转角, 采用泰勒展开法进行数据处理来计算转角, 发现莫尔条纹宽度在1 615 μm~1 712 μm时测量精度可达1.2", 而当条纹宽度为718 μm~734 μm时测量精度降至5.9"。杨练根等^[12]提出一种基于无衍射光莫尔条纹的轴锥透镜锥角测量方法, 测量误差为9.72"。薛鹏永等^[13]提出基于相位拟合的莫尔条纹局部倾角测量方法, 对莫尔条纹的相位进行泽尼克多项式拟合, 计算的相应条纹角度精度为0.2°。HE F等^[14]发现球面像差是影响莫尔条纹角精度的关键因素, 并提出一种基于加权平均的球面像差校正方法, 提高了测量的相对精度。YANG W C等^[15]提出一种基于莫尔条纹的轧辊变形测量方法, 并分析了系统中各种误差源的影响, 计算误差在0~90°的测量范围内小于7.8"。YEH H Y等^[16]提出一种瞬时分析阴影云纹法, 设计一种由一系列4步高度组组成的新型阶梯结构板, 来瞬时提取莫尔条纹的相位变化, 可将位移偏差抑制到0.83%。ZHU W B等^[17]提出基于粒子群优化算法的正弦误差补偿方法, 对莫尔条纹的正弦误差角进行补偿, 以提高测量精度。陈好等^[18]提出一种莫尔条纹倾角快速求解算法, 将频谱求解过程中包含小数值的坐标点进行公共项分离, 并对公共部分采用傅里叶变换指数项进行滤波, 在测量精度相同的情况下提高了测量速度。在实际应用中, 由于将莫尔条纹图进行快速傅里叶变换时会导致频谱泄露, 特别在莫尔条纹宽度比较小的时候, 上述方法难以精确计算其变换角度, 导致其测量误差较大并且无法实现360°的全周精确测量。

针对上述问题, 本文搭建了一套双光栅莫尔条纹转角测量系统, 利用干涉条纹傅里叶变化法对莫尔条纹进行处理, 采用汉宁窗频谱校正对傅里叶变换的结果进行校正, 实现0~360°全周范围的精确测量, 最大误差率为0.2433%。

1 转角测量系统原理

莫尔条纹的叠合原理如图1所示, 现将两个光栅片与形成的莫尔条纹建立在同一坐标系上。

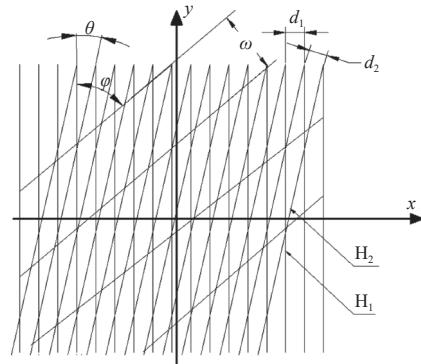


图1 莫尔条纹形成原理

Fig. 1 Schematic diagram of Moiré fringe formation

假设光栅H₁与y轴平行且光栅常数为d₁, 光栅H₂与y轴的夹角为θ且光栅常数为d₂, 莫尔条纹与y轴的夹角为φ且莫尔条纹的宽度为ω, 则可得到^[19-21]:

$$\sin\varphi = \frac{d_1 \sin\theta}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos\theta}} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos\theta}} \quad (2)$$

当两个光栅片的光栅常数d₁=d₂=d时, 则有:

$$\omega = \frac{d}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\pi - \theta}{2} \quad (4)$$

由于莫尔条纹的本质是干涉和衍射的结果, 携带了频率、相位等信息, 因此可以利用FFT处理莫尔条纹, 得到频率等信息。

假设莫尔条纹是一个N点采样的信号序列x(n), 对其进行傅立叶变换g(n):

$$g(n) = F(x(n)), x(n) = e^{(j2\pi f_n/N)} \quad (5)$$

式中:f为频率; j为虚部; N为离散信号长度; n为信号序列的索引。但是快速傅立叶变换在处理信号时, 由于信号的时间范围被截断或裁剪, 引起信号在时间域上的突变从而引起频谱泄漏, 导致频率和相位通常与真实值存在较大的偏差。频谱泄漏又与旁瓣存在密切的关系, 如果旁瓣趋于0, 能量都能集中到主瓣上, 就可以得到比较真实的频谱值。于是, 选择一个旁瓣幅度较小的窗函数对减少能量泄漏至关重要, 使用合适的窗函数可以使频谱泄漏降低。汉宁窗能量重心校正算法(Hanning-window energy centrobaric method, HnWE-CM)^[22]能够提高频率估计的准确性以及拥有较强的噪声鲁棒性, 因此本文采用该算法来对傅立叶变换的结果进行校正。

在式(5)的基础上,对信号进行加汉宁窗截断,然后对截断后的信号进行 FFT 变换得到信号的频谱。汉宁窗的时域表达式可以表示为

$$w_{hn}(n) = 0.5 - 0.5\cos(2\pi n/N) \quad (6)$$

式中: $w_{hn}(n)$ ($n = 0, 1, 2, \dots, N-1$) 为汉宁窗; N 为窗函数的宽, 即截取信号的长度。其中窗长归一化频谱模函数为

$$y(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \cdot \frac{1}{2(1-x^2)} \quad (7)$$

式中 $y(x)$ 为频谱函数。对莫尔条纹采集的信号序列 $x(n)$ 进行汉宁加窗后进行 FFT 变化:

$$G_{(i)} = F(x(n) \times w_{hn}) \quad (8)$$

经过加窗后 FFT 变换和频谱分析的频率、幅值和相位都可能存在较大的误差, 所以需要采用能量重心校正法来降低这个误差, 并且这种方法能对多段信号谱进行频率和幅值校正。加汉宁窗谐波信号的频谱主瓣模函数的平方为

$$P(f) = \left| \frac{A \sin[\pi(f - f_0)]}{2\pi(f - f_0)[1 - (f - f_0)^2]} \right|^2 \quad (9)$$

式中: $P(f)$ 为频谱函数; f_0 为截取出的时域信号的频率; A 为截取出的时域信号的幅值。根据汉宁窗函数的能量重心分布特性, 可以得出:

$$\sum_{i=-n}^n P_{k+i}(k - f_0 + i) = \sum_{i=-n}^n (k + i)P_{k+i} - f_0 \sum_{i=-n}^n P_{k+i} \quad (10)$$

式中: P_{n+k} 为谱线对应的幅值; n 为谱线号; k 为幅值最大处的谱线号。则主瓣的中心可表示为

$$f_0 = \frac{\sum_{i=-n}^n (k + i)P_{k+i}}{\sum_{i=-n}^n P_{k+i}} \quad (11)$$

式中 $\sum_{i=-n}^n P_{k+i}$ 为主瓣峰值处功率谱的理论值。在实际应用中, n 的取值越高, 其校正精度就越高, 但要求相邻两个谱峰的频率间隔越大, 则频率和相角的校正公式可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} f_c = \frac{\sum_{i=-n}^n P_{k+i}(k + i)f_s/S}{\sum_{i=-n}^n P_{k+i}}, n = \infty \\ \theta = \arctan\left(\frac{I_k}{R_k}\right) + \pi(k - f_0) \end{array} \right. \quad (12)$$

式中: f_c 为校正后的频率; f_s 为信号的采样频率; N 为谱点数; I_k 为最大处谱线值的虚部; R_k 为最大处谱线值的实部。由帕塞瓦尔定理, 可以对信号幅值进行校正:

$$A = \sqrt{K_t \sum_{i=-n}^n P_{k+i}} \quad (13)$$

式中 K_t 为汉宁窗能量恢复系数。

采样频率恒定, 利用干涉条纹傅里叶变化法将莫尔条纹的宽度和倾角以及面阵相机 CMOS 的采样区域的信息转换成周期数, 利用 HnWECM 对周期数进行修正, 将式(11)的主瓣中心当成理论周期数。同时通过校正后的相位来判断莫尔条纹的倾角方向, 从而来区别转角属于钝角或者锐角。

基于上述测量算法以及误差分析, 可以构建一套双光栅莫尔条纹转角测量系统方案, 其原理流程图如图 2 所示。

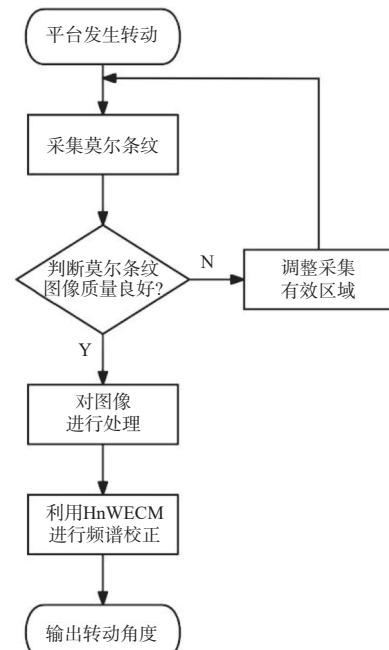


图 2 转角测量系统原理流程图

Fig. 2 Flow chart of principle for torsion angle measurement system

2 转角测量系统搭建

本文搭建的莫尔条纹转角测量系统示意图如图 3 所示。将两个光栅片分别贴在电动精密旋转位移台的内侧和外侧, 光栅 H_1 贴在外侧保持不动; 光栅 H_2 贴在电动旋转平台的内侧, 随电动精密旋转位移台的旋转, 两光栅的夹角不同, 产生不

同宽度和倾角的条纹。通过 CMOS 相机采集到不同状态的莫尔条纹, 保存到 SD 卡上, 再采用 Matlab 软件对条纹进行处理, 提取有效频谱信息, 处理过程包括: 图像预处理、快速傅里叶变换、加汉宁窗、频谱校正等。



图 3 莫尔条纹转角测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Moiré fringe torsion angle measurement system

本系统的实验装置如图 4 所示, 主要包括: 电动精密旋转位移台、光栅片、物镜组、CMOS 面阵相机、Zynq-7000 All Programmable SoC(Zynq)以及 LCD 显示屏。电动精密旋转位移台的型号为 THORLABS 公司的 PRM1Z8, 并配有直流伺服电动控制器, 其精度为 25 arcsec; 两个光栅常数均为 $d=127 \mu\text{m}$; CMOS 相机采用黑金的 OV5640, 采集的像素设置为 1024×600 ; Zynq 采用的是正点原子的 Zynq-7020; LCD 显示屏采用的是正点原子像素为 1024×600 的 7 寸屏; 实验采用的双光栅均为 $d=127 \mu\text{m}$ 的光栅片。利用 THORLABS 公司的 PRM1-Z8 的电动精密旋转位移平台为支撑, 将两个光栅片分别贴在该装置的内侧与外侧, 外侧与器件重合, 将精密旋转位移平台、物镜组、CMOS 传感器放置在同一水平位置, 选择黑金的 OV5640 为 CMOS 传感器与物镜组调节合适的焦距, 形成清晰的莫尔条纹成像在正点原子的 LCD 上, 并通过黑金的 Zynq-7020 保存到 SD 卡上。



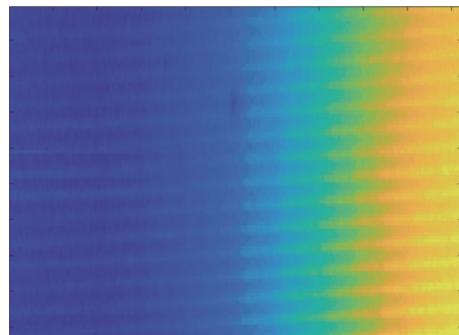
1.驱动器; 2.电动精密旋转位移台; 3.光栅片; 4.物镜组; 5.CMOS 相机; 6.Zynq; 7.LCD

图 4 实验装置图

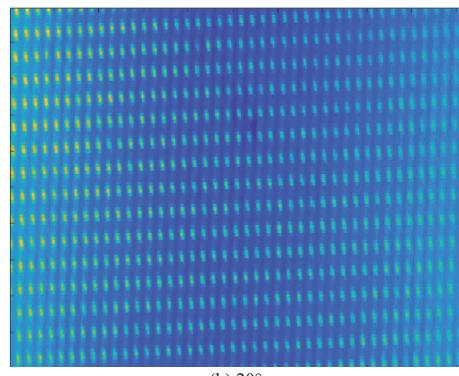
Fig. 4 Physical drawing of experimental apparatus

通过驱动器带动精密旋转位移平台的转动, 每进行一次转动, 两光栅形成的莫尔条纹也会跟着变化。将该系统进行全周角度测量, 以 1° 为步距,

分别保存全周 360° 的图片。以两个光栅片叠合即莫尔条纹宽度无限大为初始角零点, 采集得到光栅夹角为 0° 和 20° 的莫尔条纹如图 5 所示。



(a) 0°

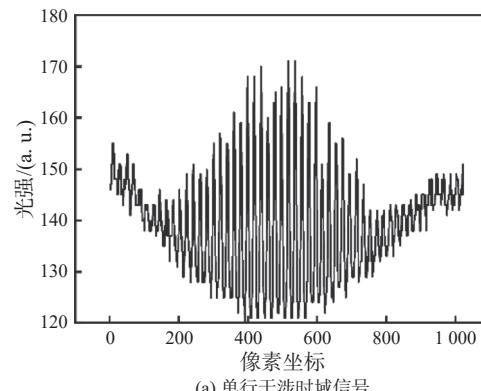


(b) 20°

图 5 采集到不同角度的莫尔条纹图像

Fig. 5 Collected images of Moiré fringe from different angles

利用 Matlab 对莫尔条纹进行处理, 每张图片都是对一个角度的莫尔条纹进行采集, 图片中每行所携带的信息长度一致, 选择较为清晰的中间部分(在本文中均采用 261 行~360 行的数据)进行处理即可得到转角信息以减少数据的运算量。以光栅夹角为 20° 时的莫尔条纹图像中第 348 行的信号为例, 其原始信号和快速傅里叶变换的结果如图 6 所示。



(a) 单行干涉时域信号

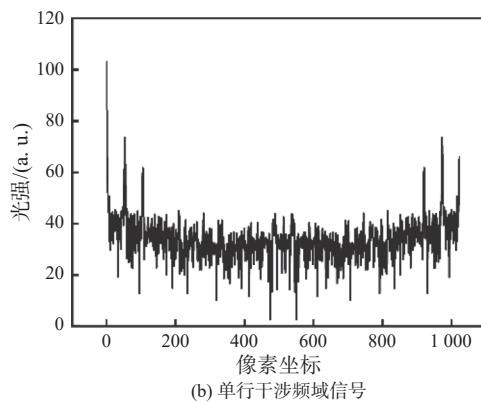


图 6 单行干涉信号和频域图

Fig. 6 Diagram of time domain and frequency domain for single-line interference signal

基于汉宁窗频谱校正能量重心法对莫尔条纹的频谱信息进行校正, 以得到更精确的周期数。采用 FFT 和 HnWECK 对同一组光栅夹角为 60°~120° 的莫尔条纹进行处理, 其计算结果如图 7 所示。

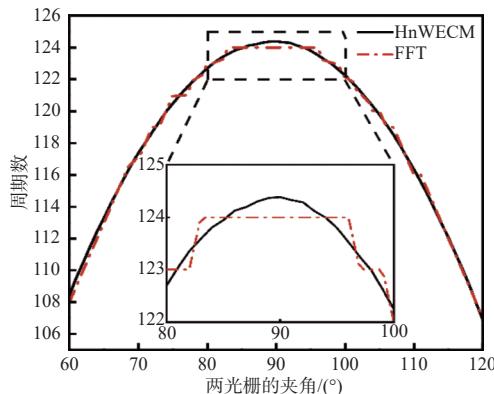


图 7 有无频谱校正的结果对比

Fig. 7 Comparison of results with or without spectral correction

从图 7 中可以看出, FFT 只能计算到 0.5 周期, 得到的周期数不平滑, 呈阶梯状; 而 HnWECK 的周期精确度可以达到 0.001 甚至是 0.000 1, 能够较精确地计算随光栅角度变化的莫尔条纹周期, 曲线较为光滑。因此本实验采用的汉宁窗频谱校正能量重心法, 可以有效地提高测量精度, 得出精确的测量角度。

考虑到实际工程应用的大角度测量需要, 对采集到的全周角度测量得到的 360 张莫尔条纹的图形进行傅里叶变换, 加汉宁窗, 再进行频谱校正, 得到准确的周期数, 其实验结果如图 8 所示。

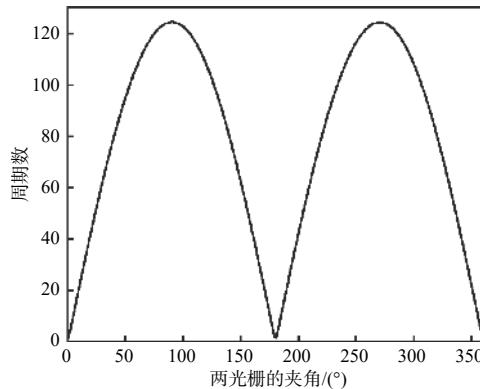
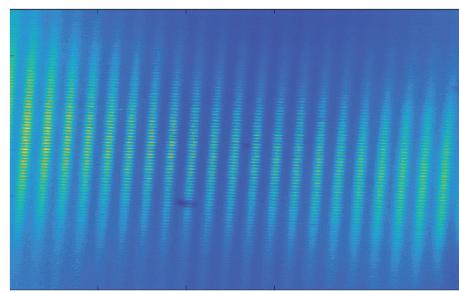


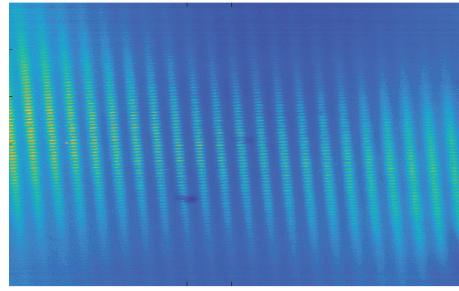
图 8 实验测量结果

Fig. 8 Experimental measurement results

在 0~180° 中任意一个周期数会有两个角度值与之对应, 可以利用相位来判断该角度的区间是属于锐角或者钝角, 如图 9(a) 和图 9(b) 所示。



(a) 10°



(b) 170°

图 9 10°与 170°的采集图片

Fig. 9 Collected images of 10° and 170°

由于 0~180° 与 180°~360° 对称, 在光栅片上刻“△”符号作为标记图形, 根据其符号的朝向进一步判断所处的区间, 其中“△”正向为 0~180°; “▽”为 180°~360°, 从而实现 360° 的全周角度测量。得到光栅周期数与夹角的公式为

$$T = \left| \frac{D}{\omega / \cos(\varphi + \delta)} \right| = \frac{D}{d} \sin \theta \quad (14)$$

式中: T 为周期数; D 为采集的有效区域; d 为光栅常数; δ 为两个光栅之间的夹角。

对该系统进行误差分析, 由式(14)可得到:

$$\theta = \arcsin \frac{Td}{D} \quad (15)$$

系统转角测量的误差因素有光栅栅距 d 的制造误差和采集的有效区域 D 的测量误差以及光栅密度 T 的计算误差。

由误差传递原理可知, 误差传递公式为

$$\sigma_\theta = \frac{1}{\cos \theta} \left(\frac{T}{D} \Delta d - \frac{dT}{D^2} \Delta D + \frac{d}{D} \Delta T \right) \quad (16)$$

显然, 系统的测量误差由以上 3 部分组成, 摄像头采集的有效区域 ΔD 、光栅的制造误差栅距 Δd 以及两光栅间夹角的转动误差 ΔT 都对转角 σ_θ 造成影响。

利用误差分析原理, 所采用的光栅栅线刻度极差 $\delta_d = 0.5 \text{ lpi}$ (lpi: 每英寸包含的线条数, 0.019 7 mm), 该误差服从正态分布, 标准差 $\sigma_d = \delta_d/3 = 6.56 \mu\text{m}$ 。采用游标卡尺量测量摄像头的采集有限区域。游标卡尺的仪器误差 $\delta_D = 0.05 \text{ mm}$, 该误差是均匀分布, 则标准差为 $\sigma_D = \delta_D/\sqrt{3} = 28.87 \mu\text{m}$ 。

3 转角测量系统试验验证

为了进一步验证该系统的可行性, 对全周角度下进行 0.1°和 0.01°的分辨率验证。为了分析方便, 这里以角度为 8°~9°的范围进行 0.1°间距的测量, 以 9.01°~9.10°的范围进行 0.01°间距的测量为例进行分析, 其结果如表 1 和表 2 所示。HnWECM 可以对 0.01°分辨率的角度进行测量, 且 0.1°分辨率的最大相对误差为 0.243 3%, 0.01°分辨率的最大相对误差为 0.024%。造成这一误差的主要原因除了光栅片制造工艺和 CMOS 采样区域测量存在误差, 测量器件制造和光栅片放置也可能引入误差。

表 1 0.1°间距测量理论值与实验值对比

Table 1 Comparison between theoretical values and experimental values in 0.1° spacing measurement

参考值/(°)	周期数	测量值/(°)	误差	相对误差/%
8.000	16.991 1	8.005 7	0.005 7	0.071 0
8.100	17.196 8	8.098 9	-0.001 1	-0.013 6
8.200	17.411 0	8.202 3	0.002 3	0.028 0
8.300	17.627 2	8.306 0	0.006 0	0.072 3
8.400	17.838 6	8.407 8	0.007 8	0.092 9
8.500	18.049 3	8.509 2	0.009 2	0.108 2
8.600	18.264 0	8.612 6	0.012 6	0.146 5
8.700	18.479 4	8.716 3	0.016 3	0.187 4
8.800	18.690 3	8.818 0	0.018 0	0.204 5
8.900	18.901 3	8.919 7	0.019 7	0.221 3
9.000	19.113 2	9.021 9	0.021 9	0.243 3

表 2 0.01°间距测量理论值与实验值对比

Table 2 Comparison between theoretical values and experimental values in 0.01° spacing measurement

参考值/(°)	周期数	测量值/(°)	误差/(°)	相对误差/%
9.010	19.132 8	9.007 8	-0.002 2	-0.024 0
9.020	19.151 1	9.019 5	-0.000 5	-0.005 5
9.030	19.174 5	9.028 2	-0.001 8	-0.019 9
9.040	19.194 7	9.039 6	-0.000 4	-0.004 4
9.050	19.218 2	9.049 3	-0.000 7	-0.007 7
9.060	19.238 9	9.060 6	0.000 6	0.006 6
9.070	19.261 7	9.070 6	0.000 6	0.006 6
9.080	19.281 5	9.081 6	0.001 6	0.017 6
9.090	19.301 0	9.091 2	0.001 2	0.013 2
9.100	19.325 4	9.100 6	0.000 6	0.006 6

4 结论

本文提出了一种莫尔条纹全周转角测量方法, 搭建了相应的实验系统, 并利用频谱校正对处理的结果进行校正, 得到准确的条纹密度。该测量方法在莫尔条纹角度测量原理的基础上, 运用汉宁窗频谱校正算法对莫尔条纹干涉信号进行频域处理来抑制信号频谱泄漏, 提高莫尔条纹在宽度较小时的测量精度, 从而拓宽了转角的精确测量范围。实验结果中最大误差率为 0.243 3%, 证实了方法的有效性及准确性, 并且基于莫尔条纹的测量方法具有非接触、高灵敏度的特点, 可实现转角的全周精确测量。在测量应用中, 由于光栅采集的采样区域大小误差较大且光栅的工艺制造也存在误差, 对莫尔条纹的采样精度会有影响。未来可采用更高精度的均匀光栅片来提高转角的测量精度。

参考文献:

- [1] 刘青, 张杰, 任化帅, 等. 旋转激光经纬仪测量系统特征角误差建模和精度分析[J]. 激光杂志, 2019, 40(5): 39-43.
LIU Qing, ZHANG Jie, REN Huashuai, et al. The error modeling and precision analysis of characteristic angles in the rotary-laser automatic theodolites[J]. Laser Journal, 2019, 40(5): 39-43.
- [2] WANG H C, WANG J L, DING G R, et al. Completion time minimization for turning angle-constrained UAV-to-UAV communications[J]. IEEE Transactions on Vehicu-

- lar Technology, 2020, 69(4): 4569-4574.
- [3] ZHANG S D, LI H W, ZHANG T D, et al. Numerical simulation study on the effects of course keeping on the roll stability of submarine emergency rising[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(16): 3285.
- [4] 鲍海阁. 舰船船体变形及其测量方法[J]. 船舶工程, 2013, 35(5): 72-74.
- BAO Haige. Ship body deformations and measurement method[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(5): 72-74.
- [5] WU Y L, ZHA Y X, ZHANG G S, et al. An optical torsion fiber sensor with simultaneous direction and angle measurement[C]//Advanced Sensor Systems and Applications VIII. Beijing: SPIE, 2018: 108211E.
- [6] 李巍, 董明利, 孙鹏, 等. 大尺寸摄影测量局部参数优化相对定向方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2053-2060.
- LI Wei, DONG Mingli, SUN Peng, et al. Relative orientation method for large-scale photogrammetry with local parameter optimization[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(9): 2053-2060.
- [7] 卢晓冬, 薛俊鹏, 张启灿. 基于圆心真实图像坐标计算的高精度相机标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 242-249.
- LU Xiaodong, XUE Junpeng, ZHANG Qican. High camera calibration method based on true coordinate computation of circle center[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 242-249.
- [8] ZHANG Q, XIE H, SHI W, et al. A novel sampling moire method and its application for distortion calibration in scanning electron microscope[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 127: 105990.
- [9] S'ARI M, KONIUCH N, BRYDSON R, et al. High-resolution imaging of organic pharmaceutical crystals by transmission electron microscopy and scanning Moiré fringes[J]. *Journal of Microscopy*, 2020, 279(3): 197-206.
- [10] GOCŁOWSKI P, TRUSIAK M, AHMAD A, et al. Automatic fringe pattern enhancement using truly adaptive period-guided bidimensional empirical mode decomposition[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6277-6293.
- [11] 李向荣. 基于莫尔条纹法的船体扭转角测量技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2211-2215.
- LI Xiangrong. Research on ship torsion angle measurement based on Moiré fringe[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(10): 2211-2215.
- [12] 杨练根, 刘凡, 冉晶晶, 等. 基于无衍射光莫尔条纹的轴锥透镜锥角测量方法[J]. 应用光学, 2020, 41(3): 559-564.
- YANG Liangen, LIU Fan, RAN Jingjing, et al. Measurement method of axicon cone angle based on Moiré fringes of non-diffracting beam[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(3): 559-564.
- [13] 薛鹏永, 何勇, 郭仁慧, 等. 基于相位拟合的莫尔条纹局部倾角计算[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(24): 118-125.
- XUE Pengyong, HE Yong, GUO Renhui, et al. Calculation of local fringe direction in Moiré patterns based on phase fitting[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(24): 118-125.
- [14] HE F, BAI J. Analysis and correction of spherical aberrations in long focal length measurements[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126564.
- [15] YANG W C, WANG Z Q, SHEN C W, et al. Design of a roll angle measuring sensor[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 115159-115166.
- [16] YEH H Y, HSU Y K, WEI A C, et al. Dynamic out-of-plane displacement measurement using the instantaneous analysis phase-shifting method[J]. *Microsystem Technologies*, 2021, 27(3): 957-965.
- [17] ZHU W B, LIN Y, HUANG Y, et al. Research on sinusoidal error compensation of Moiré signal using particle swarm optimization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 14820-14831.
- [18] 陈好, 贾静, 王询, 等. 莫尔条纹倾角快速求解算法及应用[J]. 激光技术, 2020, 44(4): 399-403.
- CHEN Hao, JIA Jing, WANG Xun, et al. Fast algorithm for solving Moiré fringe angle and its application[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(4): 399-403.
- [19] 李舒航, 高旭, 刘兆武, 等. 基于灰度插值的条纹图像位移亚像素检测算法[J]. 光学学报, 2021, 41(10): 133-141.
- LI Shuhang, GAO Xu, LIU Zhaowu, et al. Algorithm for sub-pixel detection of fringe image displacement based on gray-level interpolation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 133-141.
- [20] 吴玲玲, 王星, 陈靖, 等. 基于Talbot-Moiré法的长焦透镜焦距测量的极限精度分析[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 693-697.
- WU Lingling, WANG Xing, CHEN Jing, et al. Limit precision analysis of focal length measurement of lens based

- on Talbot-Moiré[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4): 693-697.
- [21] 韩建, 姜明达, 张凯, 等. 基于干涉条纹傅里叶分析技术对拼接光栅调整偏角的计算分析[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 126-135.
- HAN Jian, JIANG Mingda, ZHANG Kai, et al. Fourier-transform method for analyzing angular errors from inter-
- ferograms for mosaic grating alignment[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 126-135.
- [22] ZHANG Q K, ZHONG S C, LIN J W, et al. Anti-noise frequency estimation performance of Hanning-windowed energy centrobaric method for optical coherence velocimeter[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 134: 106250.