

文章编号: 1001-4888(2020)01-0027-06

基于位移补偿的离面位移实时追踪算法^{*}

杨润森, 胡文欣, 徐敬超, 李伟, 缪泓

(中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 本文提出一种基于位移补偿的离面位移实时追踪算法, 并给出基于卷积全场最大值和基于卷积局部极大值两种计算方法。将位移前后的干涉条纹图子区与 Gabor 模板进行卷积匹配, 得到与相应子区重合的模板, 计算模板位相变化量, 求得位移大小及方向; 再利用锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)对位移进行同步追踪补偿, 实现离面位移测量。文中分别进行了镜面干涉追踪实验以及散斑干涉追踪实验, 验证了本算法在大量程、高分辨率、实时测量以及抗噪声等方面的可靠性与有效性。

关键词: 离面位移测量; 迈克尔逊干涉; 追踪算法; 电子散斑干涉; 位移补偿

中图分类号: O348.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-19-083

0 引言

在超精密加工、微纳技术、航空航天等领域中, 微小结构的精密部件正向着结构精细、功能复杂、材料多样化的方向发展。这类精密部件需要在较大尺度上, 对局部区域进行实时测量来保证结构精度^[1]。这就对大量程高分辨率离面位移实时测量方法提出了迫切需求。

离面位移测量方法分为接触式^[2,3]和非接触式^[4-16]两类。非接触式测量方法中, 激光干涉类方法因其高灵敏度等优点被广泛应用, 通常借助条纹计数^[6]、条纹细分^[7,8]以及时间序列^[9-12]等技术来实现离面位移精确测量。其中条纹计数技术的分辨率可达到波长量级; 条纹细分技术的分辨率取决于实验的本底噪声, 当对噪声进行抑制时, 其分辨率可达到 1/100 到 1/1000 个波长量级, 另一方面, 由于受到散斑噪声以及散斑退相关效应的影响, 其量程受到限制; 时间序列技术对一系列时序条纹图进行分析, 可达到数百微米量程, 但实时性不高。

在之前的工作中, 我们设计了一个基于迈克尔逊干涉的单点实时离面位移测量系统, 可实现大量程、高分辨率以及实时的单点离面位移测量。该系统通过追踪算法获得条纹位相变化量, 并利用锆钛酸铅压电陶瓷(PZT)对位移进行同步追踪补偿的方式来实现测量^[17]。由于之前的追踪算法实时性不高, 且计算过程繁琐, 因此本文提出一种新的追踪算法, 在兼顾大量程以及高分辨率的基础上, 实现离面位移的亚秒级测量。

1 位移补偿测量原理

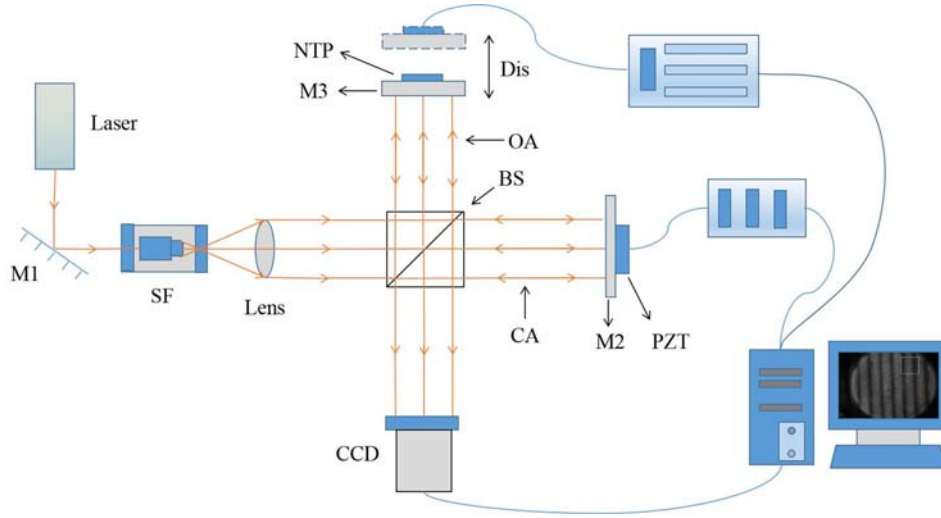
图 1 为迈克尔逊干涉系统示意图。在物光光路中, 系统以纳米平动台的刚体平动来模拟待测离面位移, 其中纳米平动台为 PI 的 P-622.1CL, 其控制器型号为 E-710, 闭环状态的最大行程为 800 μm , 定位精度为 10nm; 在补偿光路中, 通过追踪算法计算干涉条纹的位相变化量, 驱动 PZT 对位移进行同步

^{*} 收稿日期: 2019-05-10; 修回日期: 2019-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11732009, 11890683); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(WK2480000004)

通讯作者: 缪泓(1968—), 男, 教授, 主要从事实验力学测试技术、数字图像分析等领域的研究。Email: miaohong@ustc.edu.cn

追踪补偿,当补偿端 M2 补偿的位移与物端 M3 移动的位移相同时,干涉条纹回到初始状态^[18,19],此时便可通过补偿端位移确定待测离面位移,或者通过 PZT 驱动电压换算得到待测离面位移,因此无需进行复杂的精确位相计算。



M1, M2, M3: 平面镜; SF: 空间滤波器; NTP: 纳米平台; BS: 分光棱镜; Dis: 微小离面位移; OA: 物光路; CA: 补偿光路

图 1 迈克尔逊干涉系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Michelson interferometric system

2 追踪算法

由于测量系统针对单点进行离面位移测量,故 M2、M3 只发生刚体平动。当 M3 位置改变时,干涉条纹保持相同的方向和间距,仅位相发生变化。此时,追踪算法通过计算位相变化量,来驱动 PZT 对位移进行追踪补偿,其中 PZT 的驱动电压或位移补偿值可以换算为待测离面位移。追踪算法中,选择条纹图的某一子区作为计算区域并作初始化,得到与图像子区重合的 Gabor 模板, M3 位置改变后,改变模板位相以与当前图像子区重合,依据模板位相变化量和位移的关系,得到位移大小及方向。

2.1 Gabor 模板

将正弦平面波函数与高斯函数包络,得到 Gabor 滤波函数^[20],其实数部分表达式如下:

$$g(x, y; \lambda_s, \theta, \varphi, \sigma, r) = \exp\left[-\left(\frac{x_\theta^2 + \gamma^2 y_\theta^2}{2\sigma^2}\right)\right] \cos\left(2\pi \frac{x_\theta}{\lambda_s} + \varphi\right) \quad (1)$$

$$x_\theta = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2)$$

$$y_\theta = -x \sin \theta + y \cos \theta \quad (3)$$

式中, (x, y) 为空域坐标; θ 为 Gabor 核的方向,对应着模板条纹方向; φ 为位相,对应着模板条纹位相; λ_s 为正弦平面波波长,对应着模板条纹间距; σ 为高斯函数标准差; γ 为空间宽高比。Gabor 模板具有良好的方向及频率选择性,中心区域的高权值可以充分利用低对比度条纹图中的条纹结构信息。

Gabor 模板在匹配过程中主要受 λ_s 、 θ 、 φ 影响。追踪前,根据干涉条纹的方向、间距以及初始位相获得模板的 λ_s 、 θ 、 φ ,完成模板初始化;追踪过程中,因条纹的方向与间距不变,仅位相改变,故不再变化 λ_s 、 θ ,仅变化 φ 。

2.2 位移追踪计算方法

模板初始化后,便可对 M3 的离面位移进行追踪计算。本文给出两种计算方法:基于卷积全场最大值和基于卷积局部极大值。前者以一定的步长对模板位相进行全场遍历,找到卷积最大值对应的位相;后者以一定的步长对模板位相进行正向或负向遍历,找到卷积极大值对应的位相。求出位相后,与初始模板位相作差,再经相应换算,得到位移大小与方向。

2.2.1 基于卷积全场最大值的计算方法

(1) 固定初始模板的 λ_s 和 θ 不变,使位相由 $\varphi - \pi$ 递增至 $\varphi + \pi$,扫描步长为 Step。

(2) 每进行一次相移,便生成临时模板 m_i 与当前条纹图子区 S 作卷积,相移次数为 i 。

(3) 记录相移过程中的卷积值序列,遍历完成后,找到卷积最大值点对应的位相 $\varphi_{\max}$ 。

(4) 计算得到 $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_0$ 。

$\Delta\varphi$ 的大小为相移大小,符号为相移方向,再结合相移和位移的对应公式(4)得到位移大小及方向。

$$d = \frac{\lambda_l \cdot \Delta\varphi}{4\pi} \quad (4)$$

式中, d 为位移; λ_l 为激光波长,本实验中 λ_l 为 632.8nm。

2.2.2 基于卷积局部极大值的计算方法

(1) 固定初始模板的 λ_s 和 θ 不变,使位相由 φ 正向递增至 $\varphi + \pi$ 或负向递减至 $\varphi - \pi$,扫描步长为 Step。

(2) 正向相移或负向相移过程中,每进行一次相移,便生成临时模板 m_i 与当前条纹图子区 S 作卷积,相移次数为 i 。

(3) 比较相移过程中的卷积值序列,当 $\text{Con}v_i > \text{Con}v_{i+1}$ 且 $\text{Con}v_i > \text{Con}v_{i-1}$ 时,卷积极大值点为 $\text{Con}v_i$,从而求得对应的位相 φ_{ki} ,其中 $\text{Con}v_i$ 为 m_i 与 S 的卷积值。

(4) 计算得到 $\Delta\varphi = \varphi_{ki} - \varphi_0$ 。

$\Delta\varphi$ 的大小为相移大小,符号为相移方向,再结合公式(4)计算得到位移的大小及方向。

正向相移或者负向相移过程中,得到卷积局部极大值后,结束后续寻找过程,并记录下本次追踪位移方向,下一次追踪时,优先在此方向上判定卷积局部极大值是否存在。

3 实验结果及分析

3.1 实验过程

实际应用中,物体表面可能为镜面或漫反射面,故本文分别进行了镜面干涉实验和散斑干涉实验。实验中,补偿端纳米驱动器的最大行程为 $210\mu\text{m}$,因此设定物端纳米平台平动 2528 次,每次平动 $\frac{1}{4}\lambda_l$ (在迈克尔逊干涉光路中,对应 79nm)。考虑到实验环境噪声,扫描步长取 $\frac{1}{16} \cdot 2\pi$ 。实验采用基于卷积局部极大值计算方法,并设定物端每两次离面位移间隔 400ms,追踪实验图如图 2。

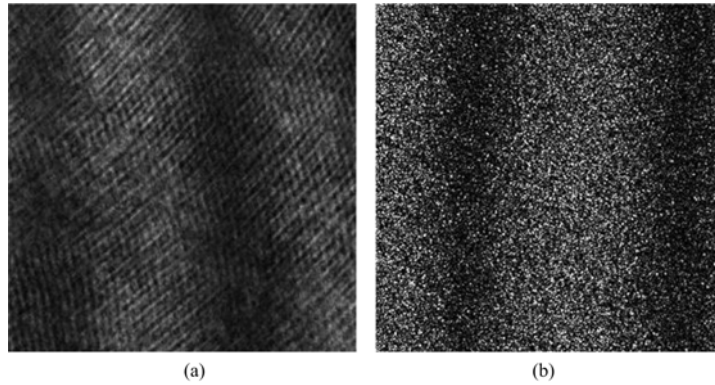


图 2 追踪实验图: (a) 镜面干涉条纹图子区; (b) 散斑干涉条纹图子区

Fig. 2 Tracking experiment figure: (a) subset of mirror interference fringe pattern; (b) subset of speckle interference fringe pattern

3.2 实验结果

图 3 为镜面干涉实验与散斑干涉实验的追踪结果对比图。图 3(a)为两实验的追踪位移曲线,图 3(b)为其局部区域放大显示,可以发现曲线出现波动。在实验过程中,波动值稳定在 20nm 左右,对应实验的测量分辨率,且其波动值不随离面位移增加而累积。图 3(c)为两实验的追踪位移较理论位移的误差曲线,图 3(d)为其局部区域放大显示,可以发现两实验追踪误差均在 20nm 左右,能够保持稳定的测

量精度。

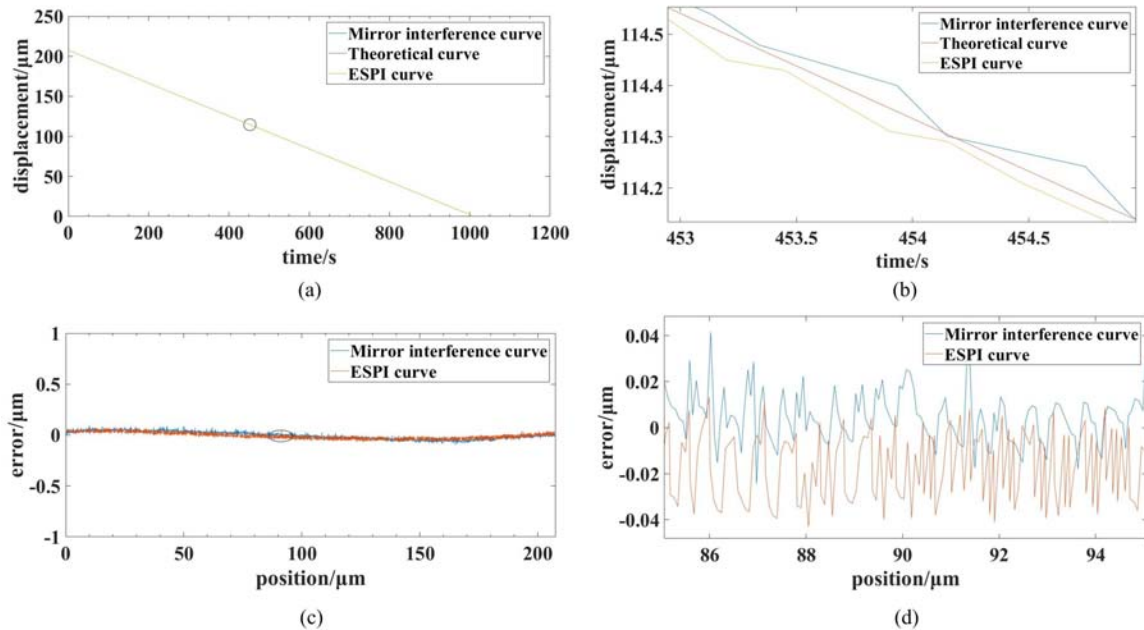


图 3 镜面干涉实验与散斑干涉实验追踪结果对比: (a)两个实验的追踪曲线; (b)图(a)中圆圈区域放大显示; (c)两个实验追踪过程的误差曲线; (d)图(c)中圆圈区域放大显示

Fig. 3 Comparison of tracking results between mirror interferometry and speckle interferometry:

(a)tracking curves of two experiments; (b)enlarged display of circle area of (a);

(c)error curves of two experiments; (d)enlarged display of circle area of (c)

表 1 为散斑干涉实验的追踪结果记录。实验中,由于载波条纹的引入以及物端和补偿端不垂直,补偿端追踪位移与物端离面位移存在一定的比例关系,因此引入系统常数 $K^{[18,19]}$, K 可通过光学几何参数计算或直接标定得到。实验系统搭建完成后, K 即可确定,本系统中标定得到 K 为 0.962。将 K 与补偿端追踪位移相乘,并与物端离面位移作对比,得到相对误差。

表 1 散斑干涉实验追踪结果记录

Tab. 1 Speckle interference experiment tracking result record

物端离面位移/ μm	补偿端追踪位移/ μm	K^* 补偿端追踪位移/ μm	相对误差/%
7.910	8.227	7.914	0.051
9.887	10.270	9.880	0.071
11.865	12.340	11.871	0.051
79.100	82.190	79.067	0.042
98.875	102.727	98.823	0.053
118.650	123.427	118.737	0.073

在实验的量程范围内,本算法可以对离面位移进行精确追踪。随着量程增大,镜面干涉实验可以实现满量程测量,且保持稳定的追踪精度;散斑干涉实验中,由于退相关效应影响,量程受到散斑颗粒的纵向尺寸限制,更大量程可通过更新初始散斑图并重新初始化 Gabor 模板来进行分段测量实现,但这时会引入累积误差。

4 讨论

高分辨率:本文中测量分辨率对应扫描步长,其主要取决于实验的本底噪声,如:驱动电压稳定度、环境振动、气流扰动、温度波动以及 CCD 随机噪声等。考虑到实验中的本底噪声水平,扫描步长取 $\frac{1}{16}\lambda_i$,即实验中测量分辨率为 20nm。如果能够对本底噪声进行抑制,则可以选择更小的扫描步长,如

$\frac{1}{64}\lambda_i$, 对应的测量分辨率为 5nm。

大量程:测量系统的量程由硬件设备决定, 由于本实验中补偿端纳米驱动器的最大行程为 $210\mu\text{m}$, 因此系统的追踪算法仅能测量 $210\mu\text{m}$ 以内的离面位移。若更换更大行程的纳米驱动器, 则可以进行更大量程的位移测量。

实时性:本实验中, 基于卷积全场最大值方法的单步追踪时间为 300ms, 其中包括 50ms 的被测物体位移时间(包含图像采集时间)、150ms 的算法计算时间(计算机型号为联想 E431, CPU 型号为 i5-3230M)、50ms 的 PZT 驱动时间以及 50ms 的条纹稳定时间(包含图像采集时间); 基于卷积局部极大值方法的单步追踪时间为 200ms, 其算法计算时间为 50ms, 其余时间两者相同。前者计算从负向相移到正向相移的所有计算点; 后者仅计算位移相同方向上卷积局部极大值之前的点, 因此计算时间减少了 $2/3$ 。本实验的 CCD 最大采图帧率为 20fps, 在当前的 PZT 时间响应特性下, 实验采用 50ms 的条纹稳定时间。通过以下几种手段可提升时间分辨率: ①更换更高帧率的 CCD 可以减少图像采集时间。②更换时间响应更快的纳米驱动器可以减少条纹稳定时间。③提升计算机硬件配置可以减少计算时间。若将本系统应用于动态位移测量, 则被测物体运动速率应小于 $0.791\mu\text{m/s}$, 其对应着半波长与单步追踪时间的比值。

抗噪声:本文提出的追踪算法通过 Gabor 模板与条纹图子区卷积匹配获得位移, 无需计算条纹图的全场位相信息, 因此具有较强的抗散斑噪声能力。

5 结论

本文基于单点实时离面位移测量系统提出一种实时追踪补偿算法。通过镜面干涉实验以及散斑干涉实验, 验证了本追踪算法在解决大量程、高分辨率、实时测量离面位移问题上的可靠性与有效性, 并为不同应用场合离面位移的实时测量提供了一种解决方法。

参考文献:

- [1] 熊宸. 高分辨率离面位移检测中的若干问题研究[D]. 中国科学技术大学, 2017 (XIONG Chen. Research on key problems in high resolution out-of-plane displacement measurement[D]. University of Science and Technology of China, 2017 (in Chinese))
- [2] Devasia S, Eleftheriou E, Moheimani S R. A survey of control issues in nanopositioning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(5):802–823.
- [3] Agatsuma K, Friedrich D, Ballmer S, et al. Precise measurement of laser power using an optomechanical system[J]. Optics Express, 2014, 22(2):2013–2030.
- [4] 张熹, 孙平, 王海峰. 三维相移电子散斑干涉法在柴油机机身中的应用[J]. 实验力学, 2002, 17(4):393–397 (ZHANG Xi, SUN Ping, WANG Haifeng. 3D-ESPI with phase-shifting and its application in diesel engine research[J]. Journal of Experimental Mechanical, 2002, 17(4):393–397 (in Chinese))
- [5] 缪泓, 张泰华, 郇勇, 等. 微尺度位移、形貌测量系统及应用[J]. 实验力学, 2007, 22(3):424–428 (MIAO Hong, ZHANG Taihua, HUAN Yong, et al. Development of micro-scale displacement and profile measurement system and its applications[J]. Journal of Experimental Mechanical, 2007, 22(3):424–428 (in Chinese))
- [6] 郑世勇, 王广君. 迈克耳孙干涉条纹细分和计数[J]. 物理实验, 2001, 21(9):39–41 (ZHEN Shiyong, WANG Guangjun. Fringe division and count of Michelson interferometer[J]. Physics Experimentation, 2001, 21(9):39–41 (in Chinese))
- [7] He L F. Vibration-compensated interferometry system using phase-modulating interference fringe subdivision technology[J]. Applied Optics, 2006, 45(31):7987–7992.
- [8] Chen B Y, Cheng X H, Li D C. Dual-wavelength interferometric technique with subnanometric resolution[J]. Applied Optics, 2002, 41(28):5933–5937.
- [9] Joenathan C, Franze B, Haible P. Speckle interferometry with temporal phase evaluation for measuring large-object deformation[J]. Applied Optics, 1998, 37(13):2608–2614.

- [10] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computerbased topography and interferometry[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(1):156—160.
- [11] 李喜德. 时间序列散斑干涉技术的发展及应用[J]. 实验力学, 2002, 17(3):279—283 (LI Xide. Progress of time-sequence speckle metrology and it applications[J]. Journal of Experimental Mechanical, 2002, 17(3):279—283 (in Chinese))
- [12] 陶刚, 李喜德. 时间序列散斑干涉场中相位函数的计算[J]. 光学学报, 2001, 21(10):1203—1207 (TAO Gang, LI Xide. Phase map retrieve with temporal speckle pattern interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(10):1203—1207 (in Chinese))
- [13] Fu Y, Guo M, Phua P B. Cross-talk prevention in optical dynamic measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4):547—555.
- [14] Fu Y, Pedrini G, Hennelly B M, et al. Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(5):552—557.
- [15] Yamaguchi I, Ida T, Yokota M, et al. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift[J]. Applied Optics, 2006, 45(29):7610—7616.
- [16] Fu Y, Tay C J, Quan C, et al. Temporal wavelet analysis for deformation and velocity measurement in speckle interferometry[J]. Optical Engineering, 2004, 43(11):2780—2787.
- [17] 缪泓, 熊宸, 张明, 等. 一种高精度大量程实时单点离面位移的测量方法[P]. 中国: CN201610704114.3, 2016-12-07 (MIAO Hong, XIONG Chen, ZHANG Ming, et al. A high-precision large-range real-time single point out-of-plane displacement measurement method[P]. China: CN201610704114.3, 2016-12-07 (in Chinese))
- [18] Xiong C, Hu W X, Zhang M, et al. Real-time one-point out-of-plane displacement measurement system using electronic speckle pattern intefferometry[J]. Optical Engineering, 2016, 55(12):121721.
- [19] Xiong C, Zhang M, Hu W X, et al. An out-of-plane displacement measurement system based on hardware tracking[C]. International Conference on Optical and Photonics Engineering, Proceedings of SPIE, 2017, 10250:102502W.
- [20] 李凯, 张青川. 基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. 光学学报, 2009, 29(10):2751—2755 (LI Kai, ZHANG Qingchuan. Speckle fringe pattern smoothing method based on Gabor filtering[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10):2751—2755 (in Chinese))

Real-time tracking algorithm of out-of-plane displacement based on displacement compensation

YANG Run-sen, HU Wen-xin, XU Jing-chao, LI Wei, MIAO Hong

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A real-time tracking algorithm of out-of-plane displacement based on displacement compensation is proposed. Two calculation methods based on full-field and local convolution maximum values are given, respectively. Gabor template is used for matching with subset of interference fringe patterns before and after displacements, so corresponding Gabor templates can be obtained. The value and direction of displacements can be obtained through calculating the phase shift of these two templates. Moreover, the PZT is used to track and compensate the displacement in real time for measuring the out-of-plane displacement. Mirror interferometry tracking experiments and speckle interferometry tracking experiments are carried out to verify the reliability and effectiveness of this algorithm. The results show that the algorithm can achieve large scale, high resolution, real-time measurement and also has the advantage of anti-noise.

Keywords: out-of-plane displacement measurement; michelson interference; tracking algorithm; ESPI; displacement compensation