

激光与光电子学进展

基于单向多次平移的矩形平面反射镜绝对检测

周广^{1,3}, 类维政², 董晓浩^{1,2*}, 王劫^{1,2}¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;²中国科学院上海高等研究院, 上海 201210;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 随着相干光源的发展,对大尺寸高精度反射镜的表面光滑度要求不断提高。针对 X 射线使用的高长宽比矩形平面反射镜,发展了一种基于激光干涉平移剪切法的二维绝对检测方法,以单方向多次平移测量取代正交方向的平移测量,推导出多矩阵增广区域法重构算法,获得了高精度矩形平面镜的绝对面形。经过仿真模拟,在不考虑噪声时,得到的绝对面形与初始面形的残差均方根(RMS)为 0.03 nm($\sim\lambda/20000$);在考虑随机高斯噪声时,重点模拟分析了不同平移次数和平移距离下的面形恢复情况。对 120 mm \times 40 mm 的矩形平面镜进行了实验验证,测量恢复的绝对面形与三平板法得到的绝对面形 RMS 为 1.07 nm($\lambda/591$)。模拟和实验结果均表明:所提方法可有效地获得高精度矩形平面反射镜的二维绝对面形,且单方向平移也为发展基于绝对检测的多孔径拼接测量奠定了基础。

关键词 光学测量; 矩形平面镜; 绝对检测; 单向多次平移法; 区域法重构

中图分类号 TH74

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222992

Absolute Measurement of Rectangular Flat Mirrors Using a Unidirectional Multi-Shifted Method

Zhou Guang^{1,3}, Lei Weizheng², Dong Xiaohao^{1,2*}, Wang Jie^{1,2}¹Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;²Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China;³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With the development of advanced light sources, surface smoothness is becoming crucial for large-sized and high-precision mirrors. In this study, a two-dimensional (2D) absolute metrology method is developed that is based on the laser interferometer translational shear method for high aspect ratio rectangular flat mirrors used in X-rays. In this method, translational measurements in orthogonal directions are replaced with multiple shifted measurements in a single direction. In addition, a multi-matrix augmented zonal method reconstruction algorithm is derived to obtain the absolute surface shape of high-precision rectangular flat mirrors. Through simulations, the root mean square (RMS) of the residuals between the reconstructed absolute surface shape and initial surface shape is 0.03 nm ($\sim\lambda/20000$) without considering noise. Surface shape recovery under different numbers of translations and translation distances when considering Gaussian noise is then simulated and analyzed, and an experimental verification is performed for a rectangular plane mirror of 120 mm \times 40 mm. The measured absolute surface shape recovery is determined as 1.07 nm ($\lambda/591$) using the RMS of the absolute surface shape residual obtained by the three-plane method. Both simulations and experiments show that the proposed method can effectively obtain the 2D absolute surface shape of a high-precision rectangular planar mirror. Unidirectional translation thus lays the foundation for establishing multi-aperture stitching measurements based on absolute measurements.

Key words optical measurement; rectangular flat mirror; absolute measurement; unidirectional multi-shifted method; zonal reconstruction

1 引言

先进光源的不断发展,特别是第四代同步辐射衍

射极限环和硬 X 射线自由电子激光的兴起^[1-2],使得高精度光学反射镜的需求日益增长。其中,具有代表性的就是应用于光束线工程上的高长宽比、超高精度的

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2022-12-23; 录用日期: 2022-12-29; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1832172)、上海市市级科技重大专项(2017SHZDZX02)、中科院“BR 计划”人才项目(2018)

通信作者: *dongxiaohao@zjlab.org.cn

掠入射细长矩形平面反射镜,这对高精度细长矩形平面反射镜的制造和测量提出极大的挑战^[3]。光学元件的表面质量和面形误差直接决定了光学系统的稳定性及最终输出的光束波前质量,因此必须采用高精度检测方法来满足高精度矩形平面光学反射镜的测量需求^[4]。

绝对检测已成为高精度光学镜面测量领域实现纳米级精度极其重要的一环^[5-6]。现有高精度光学平面反射镜主要通过共光路 Fizeau 干涉仪进行面形测量,但 Fizeau 干涉仪的高精度参考镜十分昂贵且面形精度普遍低于高精度被测矩形平面,为了解决 Fizeau 干涉仪参考镜面形带来的测量误差,必须采取绝对测量方法消除参考镜面形误差以获得被测高精度矩形平面反射镜的绝对面形^[7]。传统的绝对测量方法主要有液体平面法^[8]、伪剪切干涉法^[9]、三平板及其扩展法^[10-13]等,但三平板法及其扩展法都是通过 3 个平面进行两两相对测量并采用一定的近似处理获得被测面的绝对面形,无法精确得到高精度矩形平面反射镜的绝对面形;1983 年,Keenan^[9]提出了两平面绝对测量的伪剪切干涉法,但仅限于理论分析。2010 年, Bloemhof^[14]通过两平面反射镜测量实验,采用区域法重构验证了平移剪切的测量精度可达 $\lambda/100$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),并在 2014 年讨论了非整数多倍像素平移情况下的绝对检测^[15]。2011 年, Vidal 等^[16]对正交平移测量中的主要误差进行详细分析。2015 年, Huang 等^[17]在剪切差分处理的基础上提出共轭差分测量法,进一步提高了测量精度。2021 年, Wisniewski 等^[18]提出将被测圆形平面单向多次平移,实现了圆形平面反射镜一维的绝对检测。中国科学院上海光学精密机械研究所、南京理工大学等机构对高精度矩形平面反射镜测量的理论和误差分析都进行了一定的研究^[19-21]。现有的绝对测量方法主要针对圆形平面,该方法操作

繁琐,且圆形参考镜的面形精度极大地限制了高长宽比、高精度矩形平面反射镜的测量研究和实际应用。

本文从干涉相对测量的原理出发,采用单向多次像素级平移测量方法,推导矩形平面反射镜绝对测量公式,并通过数值分析和模拟仿真,选取高精度矩形平面测量最优像素平移大小,无需剪切处理,利用多矩阵增广区域法重构恢复获得高精度矩形平面二维绝对面形,然后采用所提方法进行高精度矩形平面绝对测量实验,并对测量过程中的主要误差进行分析和讨论,从而验证此方法对高精度矩形平面反射镜绝对检测的有效性和可行性。

2 原 理

Fizeau 干涉测量结果为参考镜面形(REF)和被测镜面形(SUT)在干涉仪电荷耦合元件(CCD)上像素点对点的一一叠加^[9],基于单向多次像素级平移测量的二维相对测量结果可表示为

$$\begin{cases} M_0(x+p_0, y) = S_0(x+p_0, y) + R_0(x, y) \\ M_1(x+p_1, y) = S_1(x+p_1, y) + R_1(x, y) \\ M_2(x+p_2, y) = S_2(x+p_2, y) + R_2(x, y) \\ \vdots \\ M_N(x+p_N, y) = S_N(x+p_N, y) + R_N(x, y) \end{cases}, \quad (1)$$

式中: M_N 为平移 N 个像素后的二维相对测量结果; S_N 为 SUT 在单向平移 N 个像素后的二维面形高度分布; R_N 为干涉仪 REF 的二维面形高度分布; M_0 为第一次基准测量; (x, y) 为对应镜面面形像素点分布的坐标位置; p_N 为不同的像素级平移距离。REF 不进行平移,但 SUT 单方向平移一定整数像素大小,会造成干涉区域减小导致测量的面形区域变小,因此 R_N 的实际测量区域也会变小。多次相对测量结果的矩阵可表示为

$$\mathbf{M} = [M_0 \ M_1 \ M_2 \ \cdots \ M_N]^T = \begin{bmatrix} R_{1,1} + S_{1,1} & \cdots & R_{1,m} + S_{1,m} & \left| \begin{array}{c} R_{1,2} + S_{1,1} \\ \vdots \\ R_{n,2} + S_{n,1} \end{array} \right. & \cdots & R_{1,m} + S_{1,m-1} & \cdots & \left[\begin{array}{c} R_{1,m} + S_{1,1} \\ \vdots \\ R_{n,m} + S_{n,1} \end{array} \right]^T \\ \vdots & & \vdots & & & \vdots & & \\ R_{n,1} + S_{n,1} & \cdots & R_{n,m} + S_{n,m} & \left| \begin{array}{c} R_{n,2} + S_{n,1} \\ \vdots \\ R_{n,m} + S_{n,m-1} \end{array} \right. & \cdots & R_{n,m} + S_{n,m-1} & & \left[\begin{array}{c} R_{n,m} + S_{n,1} \end{array} \right]^T \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{M} 为多次相对测量结果的最终矩阵; m 为被测矩形平面平移方向长度的总像素数; n 为被测矩形平面的宽度像素数。在单向多次像素级平移绝对检测中,实际测量的区域会随着平移次数的增加而减小,因此平移方向的测量数据量会逐步减小,而正交于平移方向的测量大小保持不变。

不同于平移剪切测量^[14],单向多次像素级平移是通过高重叠区域的冗余数据之间的联系,不进行两两相对测量之间的剪切处理,减少数据处理过程,直接将多次像素级平移相对测量数据构造成一个线性方程

组。根据式(1),每个像素点测量数据是一一对应的高度数据,直接通过空间坐标与像素点测量位置对应关系构造恢复系数矩阵 \mathbf{C} ,进而重构求解得到绝对高度面形,单像素平移的 \mathbf{C} 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{C} [K_w + (m+1)W, K_w + W] &= 1 \\ \mathbf{C} [K_w + (m+1)W, K_w + m] &= 1 \\ K_w &= 1, 2, \dots, m - W, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: W 为从 0 到 $m-1$ 的整数; K_w 为相对测量一一对应的坐标位置,不处于对应位置的数据均为 0。在计算时,可以将 \mathbf{C} 作为稀疏矩阵处理。当移动距离不为

单一像素大小时,只需适当改变 C 就能满足绝对检测平面的需求^[15]。将线性方程组改写成矩阵形式求解 SUT 和部分 REF 的绝对面形高度分布,相对测量结果^[18]可表示为

$$CZ = M, Z = \begin{bmatrix} R \\ S \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: Z 为 REF 和 SUT 的实际绝对面形, R 为 REF, S 为 SUT。式(4)的展开形式为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,n-1} & R_{1,n} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,n-1} & R_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ R_{m,1} & R_{m,2} & \cdots & R_{m,n-1} & R_{m,n} \\ S_{1,1} & S_{1,2} & \cdots & S_{1,n-1} & S_{1,n} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \cdots & S_{2,n-1} & S_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ S_{m-1,1} & S_{m-1,2} & \cdots & S_{m-1,n-1} & S_{m-1,n} \\ S_{m,1} & S_{m,2} & \cdots & S_{m,n-1} & S_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1,1} & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & \cdots & M_{2,n-1} & M_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ M_{m-1,1} & M_{m-1,2} & \cdots & M_{m-1,n-1} & M_{m-1,n} \\ M_{m,1} & M_{m,2} & \cdots & M_{m,n-1} & M_{m,n} \\ M_{1,1} & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ M_{m-1,1} & M_{m-1,2} & \cdots & M_{m-1,n-1} & M_{m-1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ M_{1,1} & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \\ M_{m-2,1} & M_{m-2,2} & \cdots & M_{m-2,n-1} & M_{m-2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ M_{1,1} & M_{1,1} & \cdots & M_{1,1} & M_{1,1} \\ M_{2,1} & M_{2,2} & \cdots & M_{2,n-1} & M_{2,n} \\ M_{1,1} & M_{1,2} & \cdots & M_{1,n-1} & M_{1,n} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: R 、 S 分别为 REF 和 SUT 经过恢复得到的 $m \times n$ 个像素区域的绝对面形分布, m 为被测矩形平面平移方向长度的像素数, n 为被测矩形平面的宽度像素数, m 、 n 的数据大小由被测矩形平面以及干涉仪 CCD 分辨能力来决定。根据单像素平移测量可知, M 矩阵为 $\frac{m(m+1)}{2} \times n$, Z 矩阵为 $2m \times n$, C 矩阵为 $\frac{m(m+1)}{2} \times 2m$,经过多次平移后, C 矩阵不再是方阵,且行数明显大于列数,无法直接求得逆矩阵且求解出现秩亏,可将 C 矩阵扩展一行全 0 值并同时为 M 矩阵对应行扩展为全 1 值实现满秩^[15],进一步采用最小均方广义逆矩阵法求解,求解式(5)的表达式如下:

$$Z = (C^T C)^{-1} C^T M. \quad (6)$$

通过求解式(6),能够得到 Z 矩阵的表达式,进一步分离得到被测矩形平面 SUT 和同一区域参考镜 REF 的二维绝对面形高度分布。根据测量原理可知,所提方法对测量重复性要求较高,应尽量减小随机误差,且 SUT 平移方向边缘数据仅被测量采集一次,数据处理较少,抗干扰能力较差,在实际测量过程中应适当延长测量距离并进行多次测量来获得最优恢复结果^[16],用多次相对测量数据来消除误差,从而提高最终的面形恢复精度。基于单向多次像素级平移的矩形平面反射镜绝对检测示意图如图 1 所示。

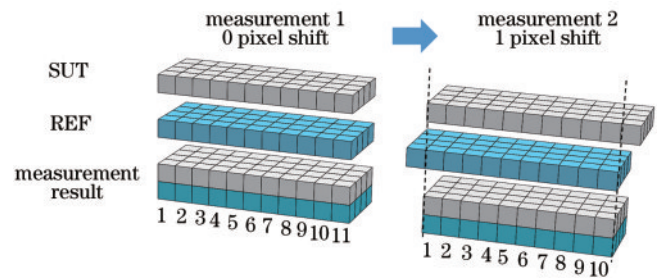


图 1 像素级单向多次平移二维绝对检测示意图
Fig. 1 Schematic diagram of pixel-level translation 2D absolute measurement

3 多像素平移仿真

为了验证单向多次像素级平移高精度矩形平面绝对检测方法的可行性,从相对测量结果中重构恢复到矩形平面的绝对高度面形。通过 Zernike 拟合生成干涉仪参考圆形平面镜 REF 和矩形平面 SUT,模拟实际测量结果 M ,模拟结果如图 2 所示。参考圆形平面镜为 $150 \text{ pixel} \times 150 \text{ pixel}$,均方根 (RMS) 为 2.64 nm ,峰谷值 (PV) 为 24.86 nm ;矩形平面镜为 $40 \text{ pixel} \times 120 \text{ pixel}$,RMS 为 1.74 nm ,PV 为 10.23 nm 。实际测量结果为参考平面 REF 和矩形平面 SUT 面形之和,最后得到的相对测量结果 M 为与矩形平面 SUT 等大的测量区域,其相对测量结果 M 面形如图 2(c) 所

示, RMS 为 2.84 nm, PV 为 21.28 nm。

拟合生成的 SUT 为 40 pixel × 120 pixel, 可移动的最大距离为 120 pixel, 移动次数最大为 119 次。测量次数越多, 可处理的数据量越大, 理论上可得到最优的恢复效果, 因此首先模拟单向多次平移 1 pixel 的绝对

测量实验。为了更加符合实验测量过程, 分析单向多次像素级平移二维高精度矩形平面绝对检测方法的恢复精度, 在每次相对测量即每次像素平移测量时, 引入一定的高斯分布随机噪声来模拟实际测量时的随机误差, 其引入的随机噪声 RMS 为 1 nm。

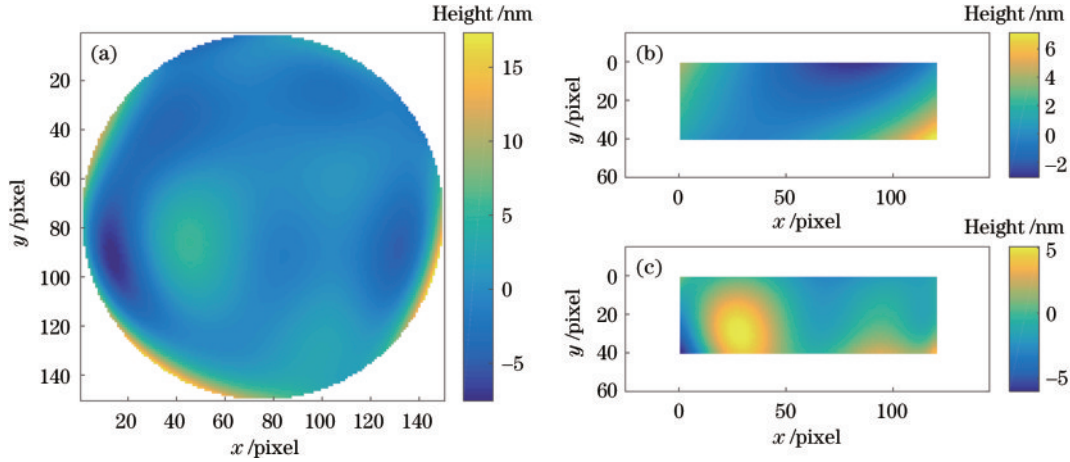


图 2 拟合平面。(a)参考圆形平面 REF; (b)被测矩形平面 SUT; (c)相对测量结果 M

Fig. 2 Fitted plane. (a) Reference circular plane REF; (b) measured rectangular plane SUT; (c) relative measurement result M

引入随机噪声前后矩形平面一维中心线绝对检测恢复结果如图 3 所示, 无随机噪声时恢复得到的一维被测矩形平面中心线与原始平面中心线的 RMS 差值为 0.016 nm, 存在随机噪声时恢复的一维被测矩形平面中心线与原始平面中心线的 RMS 差值为 0.097 nm。由图 3 可知, 3 条中心线整体趋势一致, 波动较小, 主要偏差是随机噪声引起的误差。

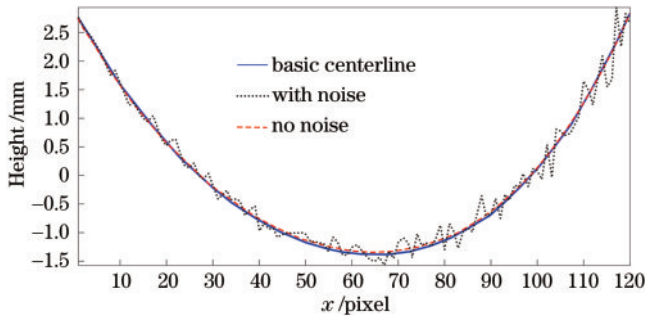


图 3 随机噪声对一维绝对测量的影响

Fig. 3 Effect of random noise on one-dimensional absolute measurement

无随机噪声时通过多次单像素平移恢复的矩形平面反射镜 RMS 为 1.73 nm, PV 为 10.30 nm, 恢复效果如图 4 所示。由图 4(c) 可知, 二者面形十分吻合且面形残差 RMS 为 0.03 nm ($\sim \lambda/20000$), 其误差较小。引入随机噪声后矩形二维平面绝对检测结果如图 5 所示, 恢复的二维矩形绝对面形 RMS 为 1.75 nm, PV 为 12.11 nm, 二者的面形残差 RMS 为 0.21 nm ($\lambda/3013$)。由图 5 可知, 矩形平面整体面形仍然恢复较好, 残差 RMS 较小, 在边缘部分存在一定

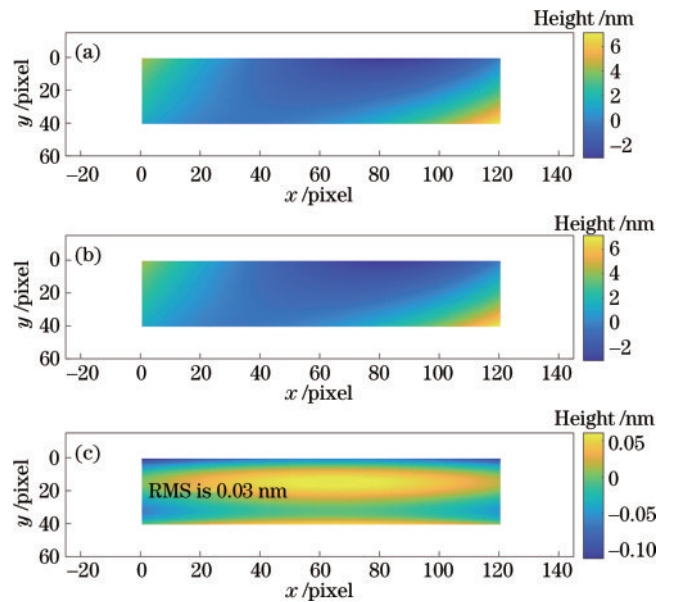


图 4 无噪声时面形对比图。(a)原始平面; (b)恢复后的矩形平面; (c)残差图

Fig. 4 Surface contrast without noise. (a) Original plane; (b) rectangular plane after recovery; (c) residual map

的误差, 通过分析可知被测镜平移方向边缘地区进行处理的数据量较少, 抗干扰能力较弱, 对随机误差较为敏感, 会导致最后几个像素区域测量效果不佳, 所以应在实验测量中适当延长测量区域以获得最佳面形结果。

在测量过程中, 平移测量的次数会对整体测量时间以及最终恢复结果造成较大的影响。通过模拟存在随机噪声的情况下, 分析单像素移动不同次数后的面形恢复效果, 以初始面形的残差 RMS 作为评判标准,

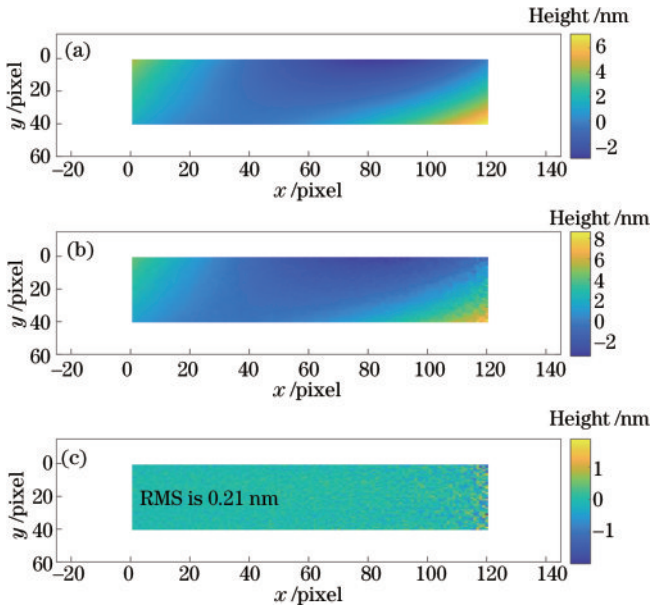


图 5 加入随机噪声后的面形对比图。(a)原始平面;(b)恢复后的矩形平面;(c)残差图

Fig. 5 Surface contrast with random noise. (a) Original plane; (b) rectangular plane after recovery; (c) residual map

模拟结果如图 6 所示。由图 6 可知,单像素平移测量次数在 30 次及以上时,面形残差 RMS 基本保持稳定,移动不同像素大小对应的最优平移次数会存在不同,因此在保证恢复精度的前提下,可以根据实际测量需求适当减少平移次数以获得最优的测量方案。30 次平移得到的绝对面形与原始面形的残差图如图 6 所示。

多次移动不同像素大小必定也会影响最终的恢复面形,通过模拟分别移动 1、2、3、4、5、6、8、10、12、15、20、24、30、40、60 pixel 这 15 个矩形平面反射镜总长度的因数大小,平移次数为可移动的最大次数,以恢复矩形平面与原始平面的残差 RMS 来判断其有效性。15 次数值模拟数据如表 1 所示,不加入随机噪声和加入随机噪声后的面形残差 RMS,如图 7 所示。在 15 次模

表 1 平移不同像素大小恢复后的面形残差 RMS

Table 1 Surface residual RMS for recovery with different pixel sizes

unit: nm

Pixel size	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	24	30	40	60
No noise	0.033	0.034	0.035	0.036	0.038	0.040	0.045	0.050	0.057	0.067	0.090	0.113	0.163	0.312	1.001
Noise	0.210	0.283	0.325	0.369	0.397	0.417	0.478	0.511	0.550	0.581	0.644	0.688	0.730	0.824	1.276

4 高精度矩形平面测量实验

4.1 实验设置

高精度矩形平面反射镜绝对检测实验采用高精度 Fizeau 干涉仪, RMS 测量重复性为 0.044 nm, CCD 像素分辨率为 0.176 mm, 并选取口径为 150 mm、面形精度 PV 为 $\lambda/40$ 的平面参考镜和 40 mm × 120 mm 的矩形平面反射镜, 长宽比为 3:1, 采用传统三平板法去除参考镜误差后, 测量得到的矩形反射镜面形精度 PV

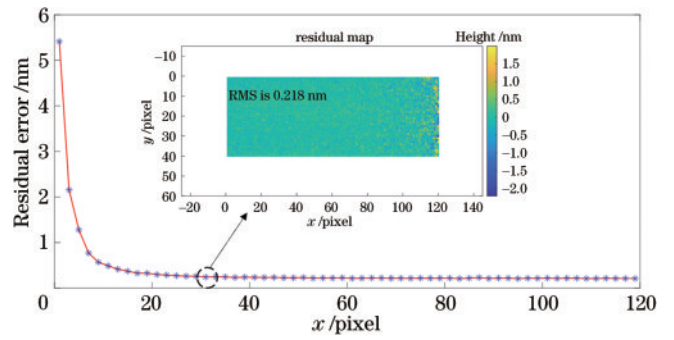


图 6 加入随机噪声后不同平移次数对恢复面形的影响

Fig. 6 Effect of different translation times on surface shape with random noise

拟实验中,除最后一次平移 60 pixel 外,其余不加入随机噪声时的面形残差 RMS 都小于 1 nm,且在一定范围内的像素平移大小基本不对实验结果造成影响,验证了所提方法具有一定的稳定性,且理论恢复精度可以满足高精度矩形平面的测量需求;加入随机噪声后的面形残差 RMS 随平移像素大小的增大而增大,符合理论分析的结果,在实际测量时为了满足绝对检测精度的需求,应尽量保证平移精度和较多的平移次数,每次单向平移距离至少应为 SUT 长度的 1/20,进而保证高精度的面形恢复效果。

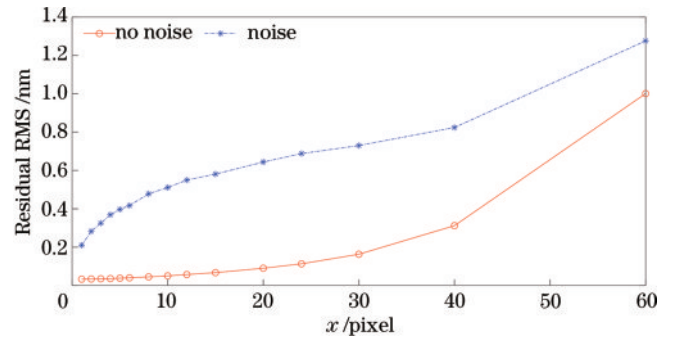


图 7 平移像素对恢复面形的影响

Fig. 7 Effect of shift pixel on surface shape recovery

为 32.20 nm, RMS 为 5.14 nm, 并将其作为基准面形。将矩形平面反射镜放置在多维运动调节台上, 多维运动调节台单向位移的分辨率为 0.5 μm , 可满足高精度矩形平面像素级平移的运动精度需求, 且能实现零条纹测量状态, 具体实验装置如图 8 所示。所有实验仪器均放置在大理石平台上, 加装防护罩隔绝气流扰动, 保持实验室 24 h 恒温恒湿, 温度控制在 $20^\circ \pm 0.1^\circ$ 。

为了精确获得矩形平面反射镜 SUT 的绝对二维面形, 在测量之前设置一定大小的掩模并导出第一次

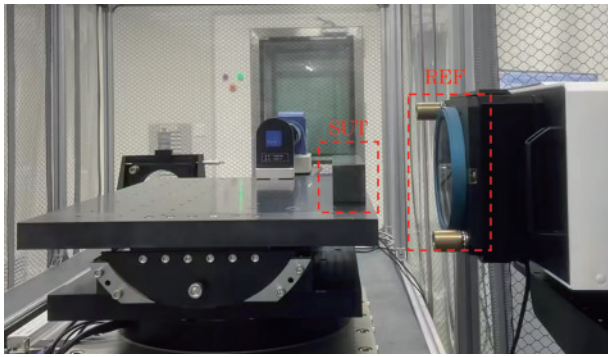


图 8 实验装置图

Fig. 8 Experimental setup

相对测量结果,分析其具体的成像区域以确定每次矩形平面像素级平移的大小,矩形平面反射镜零条纹测量图如图 9 所示。



图 9 矩形平面镜测量界面

Fig. 9 Rectangular plane mirror measurement interface

通过数值模拟分析可知,每次移动 $1056\ \mu\text{m}$ (6 pixel) 完全满足矩形平面反射镜绝对面形精度测量的需求,总共移动 114 次,每次移动后静置 5~10 s,并保证零条纹下测量。本次实验采用往返 2 次测量,并在同一测量位置取 20 次平均测量结果以达到减小随机误差的效果。将所有相对测量数据导入 Matlab 程序中进行面形数据重构恢复,可直接恢复矩形平面反射镜 SUT 的绝对面形。

4.2 结果与讨论

将直接测量恢复的面形与矩形平面反射镜基准面形进行对比分析,其基准面形,单向多次平移后的恢复面形和残差面形如图 10 所示。矩形平面反射镜基准面形精度 PV 为 $32.20\ \text{nm}$,RMS 为 $5.14\ \text{nm}$,直接重构恢复的矩形平面反射镜面形精度 PV 为 $32.95\ \text{nm}$,RMS 为 $4.92\ \text{nm}$,二者面形残差 RMS 为 $1.77\ \text{nm}$ ($\lambda/357$),二者面形符合较好,但仍存在一些面形误差,可进一步通过误差分析进行优化。

考虑到实验室环境的变化会引入随机误差,为了减小随机误差的影响,最终测量结果为多次测量结果的平均值,然后进行区域法重构恢复绝对面形。矩形平面反射镜 SUT 在单向多次平移时会引入倾斜误差,因此在最终恢复的绝对面形后采用人工拟合去除一定的倾斜误差。最终重构恢复的矩形平面反射镜面形精

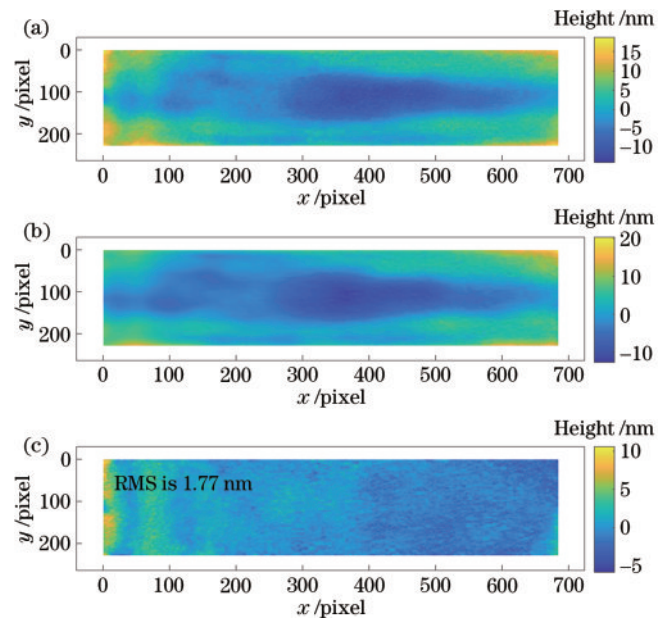


图 10 面形对比图。(a)基准平面;(b)恢复后的矩形绝对面形;(c)残差图

Fig. 10 Surface contrast. (a) Original plane; (b) rectangular absolute plane after recovery; (c) residual map

度 PV 为 $31.17\ \text{nm}$,RMS 为 $4.92\ \text{nm}$ 。一维中心线对比图如图 11 所示,最终恢复的矩形平面绝对面形图与基准面形的对比图如图 12 所示。基准面形中心线 RMS 为 $6.49\ \text{nm}$,直接恢复面形中心线 RMS 为 $6.39\ \text{nm}$,去除误差后恢复中心线 RMS 为 $6.45\ \text{nm}$ 。由图 11 可知,3 条中心线变化趋势一致,减小误差后的面形中心线更加接近基准面形中心线。因为无法完全消除平移过程中带来的倾斜误差,所以在最终的面形结果中存在一定的偏移。一维中心线的平滑效应可以认为是将环境因素带来的误差进行平均优化的结果^[18]。

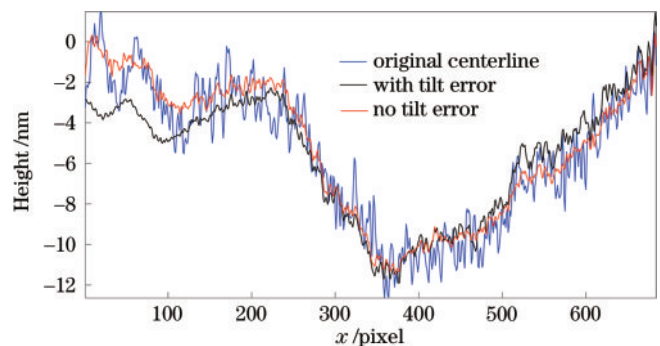


图 11 中心线对比图

Fig. 11 Centerline contrast

由图 12 可知,减小误差后的最终恢复矩形绝对面形与基准面形更加符合,恢复精度进一步提高,面形残差 RMS 也减小为 $1.07\ \text{nm}$ ($\lambda/591$),从而验证了基于单向多次像素级平移的高精度二维矩形平面镜绝对检测方法的有效性。采用区域法重构恢复绝对面形,重构区域的内部处理数据远高于边缘区域,会造成二维

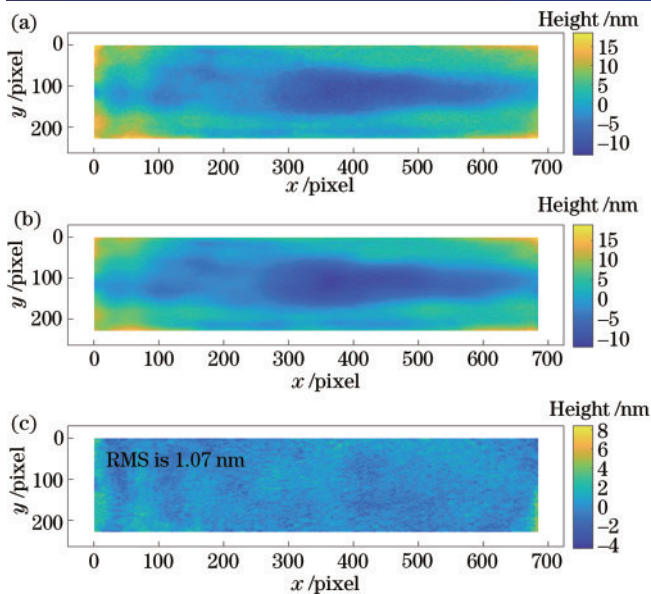


图 12 最终面形对比图。(a)基准平面;(b)恢复后的矩形绝对面形;(c)残差图

Fig. 12 Final surface contrast. (a) Original plane; (b) rectangular absolute plane after recovery; (c) residual map

镜面内部区域恢复精度较高,边缘精度较低,应进一步优化系数矩阵 C 及平移距离并从高重叠冗余数据提取更多的面形信息^[16]。

5 结 论

针对 X 射线用高精度、高长宽比矩形平面反射镜,提出了一种基于单向多次像素级平移的绝对检测方法。该方法不进行剪切处理,直接通过多次相对测量结果,采用多矩阵增广区域法重构恢复矩形平面反射镜的绝对面形分布,实现高精度的二维平面绝对检测。在推导矩形平面镜绝对检测公式的基础上,采用本绝对检测方法进行仿真模拟得到的矩形平面反射镜绝对面形残差 RMS 为 0.03 nm ($\sim \lambda/20000$),并重点模拟了加入随机高斯噪声前后一维中心线和不同像素大小不同平移距离下的面形恢复效果,验证了所提方法的有效性。采用高精度矩形平面反射镜进行绝对测量实验,在人工拟合去除平移过程中引入的倾斜误差后,实现了恢复的绝对面形与基准面形残差 RMS 为 1.07 nm ($\lambda/591$),面形符合较好,表明所提方法适用于高精度、高长宽比的矩形平面反射镜绝对检测,后续将进一步进行误差分析并开展实验验证基于绝对检测的多孔径拼接测量。

参 考 文 献

[1] Kang H S, Min C K, Heo H, et al. Hard X-ray free-electron laser with femtosecond-scale timing jitter[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(11): 708-713.
 [2] Feng C, Deng H X. Review of fully coherent free-electron lasers[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2018, 29(11): 160.

[3] 佟亚军, 刘芳, 范家东, 等. 光学元件污染对 X 射线自由电子激光光束质量的影响[J]. *光学学报*, 2022, 42(11): 1134006.
 Tong Y J, Liu F, Fan J D, et al. Effect of optics contamination on X-ray free-electron laser beam quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(11): 1134006.
 [4] 李明, 吴介立, 吴永前, 等. X 射线反射镜研制技术的现状和发展[J]. *光电工程*, 2020, 47(8): 200205.
 Li M, Wu J L, Wu Y Q, et al. A review on the fabrication technology of X-ray reflector[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200205.
 [5] 黄元申, 吕昊宇, 曾媛, 等. 绝对平面检测方法的研究进展[J]. *光学仪器*, 2018, 40(1): 72-77.
 Huang Y S, Lü H Y, Zeng Y, et al. Research progress of absolute flatness testing[J]. *Optical Instruments*, 2018, 40(1): 72-77.
 [6] 荣飘, 张淳民. Fizeau 型激光干涉仪在面形检测中的应用[C]//2013 年(第五届)西部光子学学术会议论文集. 西安: 陕西省光学学会, 2013: 48.
 Rong P, Zhang C M. Application of Fizeau type laser interferometer in surface shape inspection[C]// *Proceedings of the 2013 (5th) Western Conference on Photonics*. Xi'an: Shaanxi Optical Society, 2013: 48.
 [7] Schulz G, Schwider J. Precise measurement of planeness [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1077-1084.
 [8] Powell I, Goulet E. Absolute figure measurements with a liquid-flat reference[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13): 2579-2588.
 [9] Keenan P B. Pseudo-shear interferometry[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 429: 2-7.
 [10] Griesmann U. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(23): 5856-5865.
 [11] 张梦然, 周广, 类维政, 等. 基于单次旋转法的 X 射线平面镜绝对检测[J]. *激光杂志*, 2022, 43(8): 43-48.
 Zhang M R, Zhou G, Lei W Z, et al. Absolute measurement of X-ray planar mirrors based on single rotation method[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(8): 43-48.
 [12] 张艳微, 苏东奇, 隋永新, 等. 基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0708007.
 Zhang Y W, Su D Q, Sui Y X, et al. Absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of rotation-averaging and compensation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0708007.
 [13] Lin W H, He Y M, Song L, et al. Absolute surface metrology by rotational averaging in oblique incidence interferometry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(16): 3370-3378.
 [14] Bloemhof E E. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2346-2348.
 [15] Bloemhof E E. Absolute surface metrology with a phase-shifting interferometer for incommensurate transverse spatial shifts[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(5): 792-797.
 [16] González J V, Nicolàs J, Campos J. New method to improve the accuracy in a sequential lateral shearing

- interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 115601.
- [17] Huang Y, Ma J, Zhu R H, et al. Absolute measurement of optical flat surface shape based on the conjugate differential method[J]. *Optics Express*, 2015, 23(23): 29687-29697.
- [18] Wisniewski H J, Whalen M, Heilmann R K, et al. Lateral shift mapping metrology for X-ray telescope mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11822: 118220X.
- [19] 徐洋, 唐锋, 王向朝, 等. 平面面形绝对检验技术测量误差分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(10): 1008009.
Xu Y, Tang F, Wang X Z, et al. Measurement error analysis of absolute flatness test[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(10): 1008009.
- [20] 孟诗, 刘世杰, 陈磊, 等. 光学面形绝对测量方法仿真和实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 051201.
Meng S, Liu S J, Chen L, et al. Simulation and experimental study of absolute measurement method for optical surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051201.
- [21] 许明明, 胡中文, 季杭馨, 等. 大尺寸矩形准直镜轻量化结构多学科优化设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(1): 45-50.
Xu M M, Hu Z W, Ji H X, et al. Multidisciplinary design optimization of large rectangle collimating mirror lightweight structure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 45-50.