

相对角差法重建大口径平面光学元件面形

巫玲^{1*}, 陈念年¹, 范勇¹, 叶一东²

¹西南科技大学计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010;

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 针对已有的相对角差法面形检测的原理验证装置, 提出了一种具有更高稳健性的最小二乘积分面形重建算法。利用相对角差改写了经典最小二乘积分技术的代价函数, 避免了积分重建中的测量误差累积的问题, 空间复杂度和时间复杂度仍分别为 $O(N^2)$ 和 $O(N^3)$ 。仿真结果表明, 本文算法的稳健性显著优于 Zernike 波前重建法与基于样条的最小二乘积分法 (SLI); 实验结果证明, 本文算法可适用于大口径角差法面形检测。

关键词 测量; 面形检测; 角差法; 相对测量; 最小二乘积分重建; 大口径平面光学元件

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0623002

Surface Reconstruction of Large Aperture Plane Optical Components Based on Method of Relative Angle Difference

Wu Ling^{1*}, Chen Niannian¹, Fan Yong¹, Ye Yidong²

¹School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

²Institute of Applied Electronics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract A robust least squares integration surface reconstruction algorithm that exploits the relative angle difference is proposed for a topography measurement device. The cost function of the classical least squares integration technique is rewritten based on relative angle difference to avoid accumulation of measurement errors. The space and time complexities are $O(N^2)$ and $O(N^3)$, respectively. Simulation results demonstrate that the robustness of the proposed algorithm is significantly better than that of Zernike's wavefront reconstruction method and spline-based least squares integration method. Experiments show that the algorithm can be applied to topography measurement with large aperture angle difference method.

Key words measurement; topography measurement; method of angle difference measurement; relative measurement; least squares integration reconstruction; large aperture plane optical components

OCIS codes 120.6650; 350.6620; 230.4040; 350.4800

1 引 言

在国家重大光学工程项目中, 光学元件面形的精密检测是不同姿态、不同种类、面形梯度变化大的在线光学元件正确、安全、高效运行的保证^[1]。常用的干涉仪仅适合于离线状态下垂直或水平放置的光学组件面形测量, 难以实施倾斜状态下的在位检测。目前可用于倾斜状态下面形检测的方法主要有哈特曼波前传感法^[2]和角差法^[3]等。

角差法根据是否设立参考点分为绝对测量法和相对测量法^[3]。绝对测量法得到的是每个测量点与

本行的固定参考点间的相对角度, 测量误差不累积, 但测量过程中光程的变化会引入误差, 且机械结构复杂、工程实施难度大^[4-5]。相对测量法^[1,3]本质上属于子孔径拼接法, 测量得到的是各点在当前子孔径中的相对角度, 该方法的工程实施难度低, 但在面形重建时测量误差会累积^[6]。

文献^[3]针对相对测量中的累积误差对最终面形检测精度的影响进行了仿真和实验分析, 发现该方法仅适用于小口径平面光学元件, 但其在分析高差的计算误差时使用的是一种十字路径积分法, 与其他局部积分法一样, 对噪声非常敏感^[7]。采用

收稿日期: 2019-01-02; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-03-04

* E-mail: wuling751@126.com

Zernike 多项式描述面形重构的方法更适用于对称光学元件,不适用于任意形貌元件的重建^[8]。

本文提出一种基于最小二乘的相对角差全局积分算法,不采用累加相对角差来计算绝对角差,而是直接以所测相对角差数据来建立代价函数,以避免出现测量误差累积的问题。仿真结果表明,本文算法不仅在稳健性上显著优于 Zernike 波前重建法^[3]和基于样条的最小二乘积分 (SLI) 法^[9],且仅有本文算法可以保持重建面形的形状相似性。小口径和大口径面形测试实验证明了本文算法重建结果具有较高的稳定性与适用性。

2 相对角差面形检测系统的原理

图 1(a)为现有测量装置的俯视图,系统在 x 、 y 方向各有一根大行程导轨,这两根导轨组成二维运动平台,平台可俯仰旋转以实现倾斜目标的测量。光学系统由光源、准直分光组件、楔角片阵列和面阵探测器 CCD 等组成。

出射的准直光束被 2×2 的楔角片阵列分割、偏转形成 4 束口径均为 12 mm 的准直扫描光。这 4 束扫描光经被测表面反射后回到光学系统中,在其 CCD 靶面上形成 4 个光斑,如图 2 所示。根据三角测量原理,光斑质心坐标差值可转化为被测面对应扫描区域的平均斜率差值,即相对角差。采用猫步前进(如图 1(b)和图 3,如同猫行走时后脚踩在前脚走过的位置),逐次扫描获得相邻点之间的相对角差,最终积分重构出整个面形。

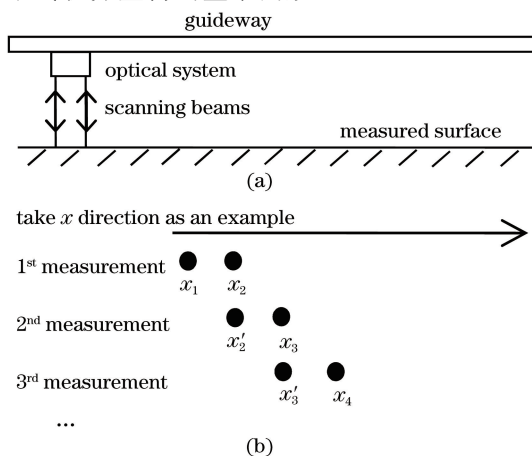


图 1 相对角差面形检测系统测量原理图。

(a)测量装置俯视示意图;(b)猫步测量方法示意图

Fig. 1 Principle of topography measurement system with relative angle difference. (a) Top view of measurement system; (b) diagram of catwalk measurement

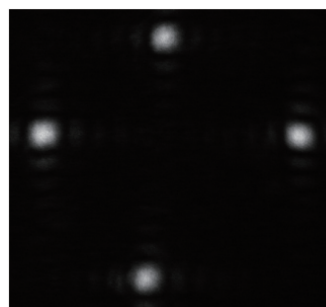


图 2 CCD 获得的激光光斑阵列

Fig. 2 Laser spot array obtained by CCD

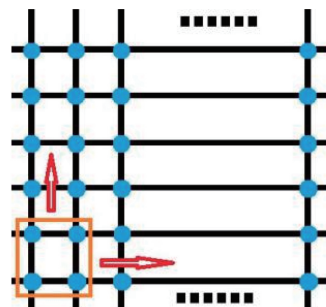


图 3 被测面上扫描过程示意图

Fig. 3 Schematic for scanning process on measured surface

该系统的优点在于测量光程变化小,仅在倾斜姿态测量时光程会发生变化,引入的测量光非平行性误差影响较小;光学系统结构简单,装调复杂度小;系统机械结构简洁,易于达到较高的运动精度。

该系统的缺点是在积分重建面形时,测量误差会被累积,不容易提高测量的精度,如图 4 所示。图 4(a)所示为全口径为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,采样步长为 12 mm,面形峰谷 (PV) 值为 1λ ($0.6328 \mu\text{m}$) 的待测面形的仿真结果,在相对角差数据中分别添加了标准差 σ 为 $0.2''$ 的高斯白噪声,图 4(b)所示为局部积分法 CuRe 重建结果^[10],图 4(c)所示为基于 Zernike 多项式系数的最小二乘积分法重建(以下简称“Zernike 波前重建”)结果^[3],Zernike 多项式采用了前 28 项以提高重建精度(文献[3]采用了前 10 项)。从图 4 可以看出,虽然全局积分法的稳健性显著优于局部积分法,但重建面形的误差仍然较大。因此,设计一种稳健性更高的面形重建算法非常重要。

3 相对角差面形重建算法

3.1 问题分析

设待测的表面为 $Z(x, y)$,其在 x 、 y 方向的斜率矩阵分别表示为 $Z_x = \partial Z / \partial x$, $Z_y = \partial Z / \partial y$,测得的光斑质心坐标像素矩阵为 $(p_u^{(x)}, p_u^{(y)})$, u 为扫

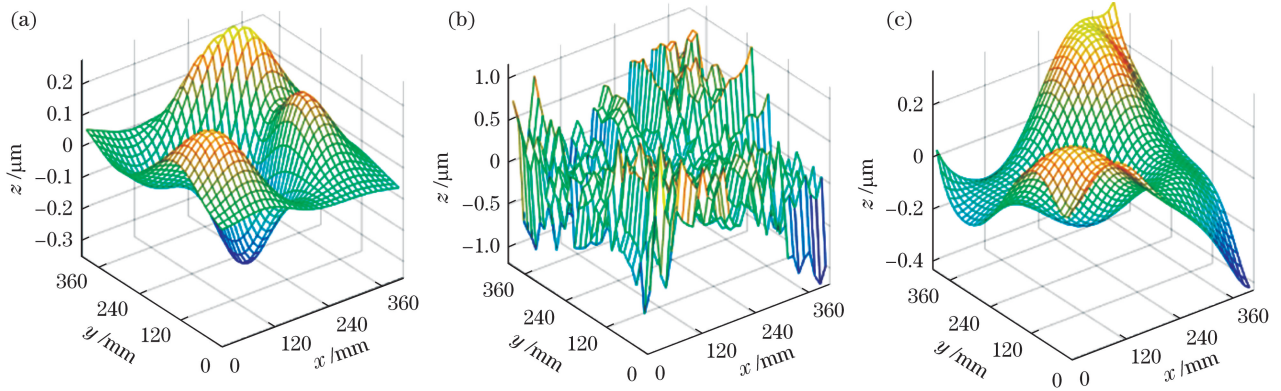


图 4 测量有高斯噪声时的重建结果($\sigma=0.2''$)。(a) 仿真待测面形；(b) CuRe 法重建；(c) Zernike 波前重建

Fig. 4 Reconstruction results with Gaussian noise ($\sigma=0.2''$). (a) Simulated surface to be tested; (b) reconstruction with CuRe method; (c) reconstruction with Zernike wavefront

描点阵中每个子孔径的 4 个光斑的序号,从 1 到 4 分别代表左上、右上、左下、右下,则在扫描点阵的第 i 行 j 列处,测得的相对角差为

$$\begin{cases} k(\mathbf{p}_{2,i,j}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(x)}) = \mathbf{Z}_{i,j+1}^{(x)} - \mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} \\ k(\mathbf{p}_{3,i,j}^{(y)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(y)}) = \mathbf{Z}_{i+1,j}^{(y)} - \mathbf{Z}_{i,j}^{(y)} \\ k(\mathbf{p}_{3,i,j}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(x)}) = \mathbf{Z}_{i+1,j}^{(x)} - \mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} \\ k(\mathbf{p}_{2,i,j}^{(y)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(y)}) = \mathbf{Z}_{i,j+1}^{(y)} - \mathbf{Z}_{i,j}^{(y)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: k 为光学系统的设计参数,即像素坐标到角度的转换系数。

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{i,j+1}^{(x)} &= \mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} + k(\mathbf{p}_{2,i,j}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(x)}) = \\ \mathbf{Z}_{i,j-1}^{(x)} + k(\mathbf{p}_{2,i,j-1}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,j-1}^{(x)}) + k(\mathbf{p}_{2,i,j}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,j}^{(x)}) &= \\ \mathbf{Z}_{i,0}^{(x)} + k \sum_{s=0}^j (\mathbf{p}_{2,i,s}^{(x)} - \mathbf{p}_{1,i,s}^{(x)}) &. \end{aligned} \quad (2)$$

因此,通过累加每次测得的相对角差 $\mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} - \mathbf{Z}_{i,j-1}^{(x)}$ 可以得到绝对角差 $\mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} - \mathbf{Z}_{i,0}^{(x)}$ 。设第一个点的斜率 $\mathbf{Z}_{0,0}^{(x)} = \mathbf{Z}_{0,0}^{(y)} = 0$,可推得每点斜率 $\mathbf{Z}_{i,j}^{(x)}$ 和 $\mathbf{Z}_{i,j}^{(y)}$ 。

在上述累加计算绝对角差的过程中,每次测量的误差也会随之累加,若每次测量相互独立,且测量误差服从正态分布(设在 x 、 y 方向的标准差均为 σ),第 (i,j) 点的角度测量误差为 $\sqrt{i+j}\sigma$ ^[3]。

3.2 直接利用相对角差实现面形重建

现有的使用斜率实现三维面形重建的算法通常都是全局积分算法,它们又可进一步被分为两类:基于最小二乘积分和基于傅里叶变换。后者使用了快速傅里叶变换,速度更快,但要求被重建边界符合周期性延拓条件,当不满足条件时,边缘误差较大。目前最新提出的反对称偏导积分法(ASDI)^[11]突破了此周期性边界条件的限制,却对测量过程中子孔径的倾斜误差非常敏感。虽然基于最小二乘积分的面形重建算法的时间复杂度和空间复杂度都更高,但重建的精度也更高^[8]。相对角差法的采样

点比较稀疏(目前间距设置为 12 mm),重建数据规模较小,因此更适用于采用基于最小二乘积分的面形重建算法。

基于最小二乘积分的面形重建算法通常分为两步:

1) 利用有限差分的思想建立代价函数。此代价函数可表示为

$$\begin{aligned} E(\mathbf{Z}) &= \|\mathbf{D} \times \text{vec}(\mathbf{Z}) - \mathbf{S}\|_2^2 = \\ & \left\| \begin{pmatrix} \mathbf{D}_x \\ \mathbf{D}_y \end{pmatrix} \times \text{vec}(\mathbf{Z}) - \begin{pmatrix} \text{vec}(\mathbf{Z}_x) \\ \text{vec}(\mathbf{Z}_y) \end{pmatrix} \right\|_2^2, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\|\cdot\|_2^2$ 表示 L^2 范数; $\text{vec}(\mathbf{A})$ 表示将二维矩阵 \mathbf{A} 写为列向量, $\mathbf{D}_x \times \text{vec}(\mathbf{Z}) = \text{vec}(\mathbf{Z}_x)$, $\mathbf{D}_y \times \text{vec}(\mathbf{Z}) = \text{vec}(\mathbf{Z}_y)$ 。

2) 求得代价函数的最小二乘解。使用奇异值分解(SVD)、正交三角分解(QR)分解等方法,求得线性方程组 $\mathbf{S} = \mathbf{D} \times \text{vec}(\mathbf{Z})$ 的最小二乘解,此即为(3)式的最优解。

为解决累加相对角差过程中随之而来的误差累计问题,本文算法直接根据测得的相对角差数据来建立代价函数,(3)式被改写为

$$\begin{aligned} E(\mathbf{Z}) &= \|\mathbf{D} \times \text{vec}(\mathbf{Z}) - \mathbf{P}\|_2^2 = \\ & \left\| \begin{pmatrix} \mathbf{D}_{xx} \\ \mathbf{D}_{yy} \\ \mathbf{D}_{xy} \\ \mathbf{D}_{yx} \end{pmatrix} \times \text{vec}(\mathbf{Z}) - k \begin{pmatrix} \text{vec}(\mathbf{p}_2^{(x)} - \mathbf{p}_1^{(x)}) \\ \text{vec}(\mathbf{p}_3^{(y)} - \mathbf{p}_1^{(y)}) \\ \text{vec}(\mathbf{p}_3^{(x)} - \mathbf{p}_1^{(x)}) \\ \text{vec}(\mathbf{p}_2^{(y)} - \mathbf{p}_1^{(y)}) \end{pmatrix} \right\|_2^2. \end{aligned} \quad (4)$$

对于待重建面形 $\mathbf{Z} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 有 $\mathbf{D}_{xx}, \mathbf{D}_{yx} \in \mathbf{R}^{m(n-1) \times mn}$, $\mathbf{D}_{xy}, \mathbf{D}_{yy} \in \mathbf{R}^{(m-1)n \times mn}$ 。更明确地,设 $v \in [0, mn-1]$, 当 $i \in [0, m-1], j \in [1, n-1]$ 时,有

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(xx)} = \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(x)} - \mathbf{D}_{i+(j-1)m+1,v}^{(x)}, \\ \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(yx)} = \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(y)} - \mathbf{D}_{i+(j-1)m+1,v}^{(y)}, \end{cases} \quad (5)$$

当 $i \in [1, m-1], j \in [0, n-1]$ 时,有

$$\begin{cases} \mathbf{D}_{i+j(m-1),v}^{(yy)} = \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(y)} - \mathbf{D}_{i+(j-1)m+1,v}^{(y)}, \\ \mathbf{D}_{i+j(m-1),v}^{(xy)} = \mathbf{D}_{i+jm+1,v}^{(x)} - \mathbf{D}_{i+(j-1)m+1,v}^{(x)}, \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y \in \mathbf{R}^{mn \times mn}$ 。可利用有限差分法得到 $\mathbf{D}_x, \mathbf{D}_y$ ，如利用中心差分，每点的 x 方向斜率可表示为

$$\mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} = \frac{1}{2h_x}(\mathbf{Z}_{i,j+1} - \mathbf{Z}_{i,j-1}), \quad (7)$$

式中： h_x 为该方向的采样步长。对于边界点，(7)式需改写为

$$\mathbf{Z}_{i,j}^{(x)} = \frac{s}{2h_x}(-3\mathbf{Z}_{i,j} + 4\mathbf{Z}_{i,j+s} - \mathbf{Z}_{i,j+2s}), \quad (8)$$

对于左边界点， $s=1$ ；对于右边界点， $s=-1$ 。

此时，线性方程组 $\mathbf{P} = \mathbf{D} \times \text{vec}(\mathbf{Z})$ 的最小二乘解 \mathbf{Z} 即为代价函数(4)式的最优解。

目前使用最广泛的最小二乘求解算法为 QR 分解，其时间复杂度为

$$W_{\text{QR}}(m, n) = 2mn^2. \quad (9)$$

由于系数矩阵 \mathbf{D} 的大小为 $(4mn - m - n) \times mn$ ，因此 QR 求解(4)式的最小二乘解的时间复杂度为 $8m^3n^3$ ，即其时间复杂度为 $O(N^3)$ 。因此，此重建算法的空间和时间复杂度与目前常用的最小二乘表面重建技术相同，分别为 $O(N^2)$ 和 $O(N^3)$ 。

4 仿真分析

为验证本文算法的重建精度和稳健性，实验模拟了 2 种不同的理想待测波面，如图 5 所示。从图 5 可以看出，两种曲面均是平滑的，具有解析导数。 \mathbf{Z}_1 与 MATLAB 软件中 peaks 曲面有一定相似性，被 Harker 等^[12]、Scherr 等^[13] 用于比较全局积分算法的性能。文献[3]认为在现有加工工艺下， \mathbf{Z}_2 是大口径反射镜面最常见的面形。

对比算法除了文献[3]使用的 Zernike 波前重建法，还选择了目前具有较高重建精度和稳健性的 SLI 法^[9]。

测量设备放置于减振台上，实验过程中尽量减小地面振动、人员流动、空气扰动、气温变化等外界条件的影响，质心检测误差主要来源于光学系统像差和电机振动。理论上，各光斑受到的振动影响是同向、等效的，因此各光斑质心相对位置应该保持不变^[1]。在严格控制的实验条件下，在 15 min 的持续监测中发现光斑相对位置的稳定性方差能够达到 $0.02''$ ^[3]，若有风机引起的气流扰动，实际上的测角误差仅能达到 $0.2''$ 。因此在每个相对角差数据中附加均值为 0、标准差 σ 为 $0.2''$ 的高斯随机噪声。

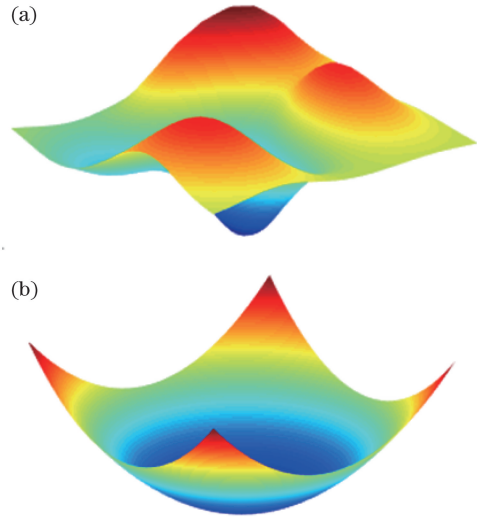


图 5 用于仿真的两种不同的曲面。(a) \mathbf{Z}_1 ；(b) \mathbf{Z}_2

Fig. 5 Two different curved surfaces for simulation. (a) \mathbf{Z}_1 ；(b) \mathbf{Z}_2

设被测镜全口径尺寸为 $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ，面形 PV 为 1λ ，采样步长为 12 mm ，此时每次测量得到的各相对角差数据约在 $-0.4''$ 到 $0.4''$ 之间，添加噪声后的重建结果如图 6 和图 7 所示。

从图 6 和图 7 可以看出，Zernike 波前重建法和 SLI 法的重建结果具有较高的相似性，主要区别在于 Zernike 波前重建法的结果更平滑。在此噪声水平下，与 2 种对比算法相比，本文算法重建残差的 PV 约降低了 1 个数量级，且仅有本文算法重建面形的形状与待测波面相似。

为进一步分析 3 种算法的稳健性，加入的高斯噪声标准差 σ 范围设置为 $0 \sim 1 \mu\text{rad}$ (即约 $0''$ 到 $0.2''$)，每次加噪重建实验重复执行 50 次后，统计结果如图 8 所示。重建精度指标使用方均根误差 (RMSE)，即重建结果 $\hat{\mathbf{Z}}$ 和真实的曲面 \mathbf{Z} 的残差 RMSE。如图 8 所示，本文算法的重建精度显著高于 2 种对比算法。仅当采样步长较大、采样点数较少 (17×17 个)、测量噪声较小 (如小于 $0.2 \mu\text{rad}$) 时，由于本文算法采用的中心差分估计斜率的误差较大，本文算法的重建精度略低于 SLI 法，但显著高于 Zernike 波前重建法。此外，本文算法的噪声敏感性显著低于两种对比算法，具有更好的稳健性。

5 实验验证

验证实验在百级实验室中进行，首先对口径为 $200 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 的镜子进行 4 次重复测量，由于夹持工装所限，测量口径约为 $180 \text{ mm} \times 108 \text{ mm}$ 。在 2 个方面增加不同实验的测量条件差异：1) 测量

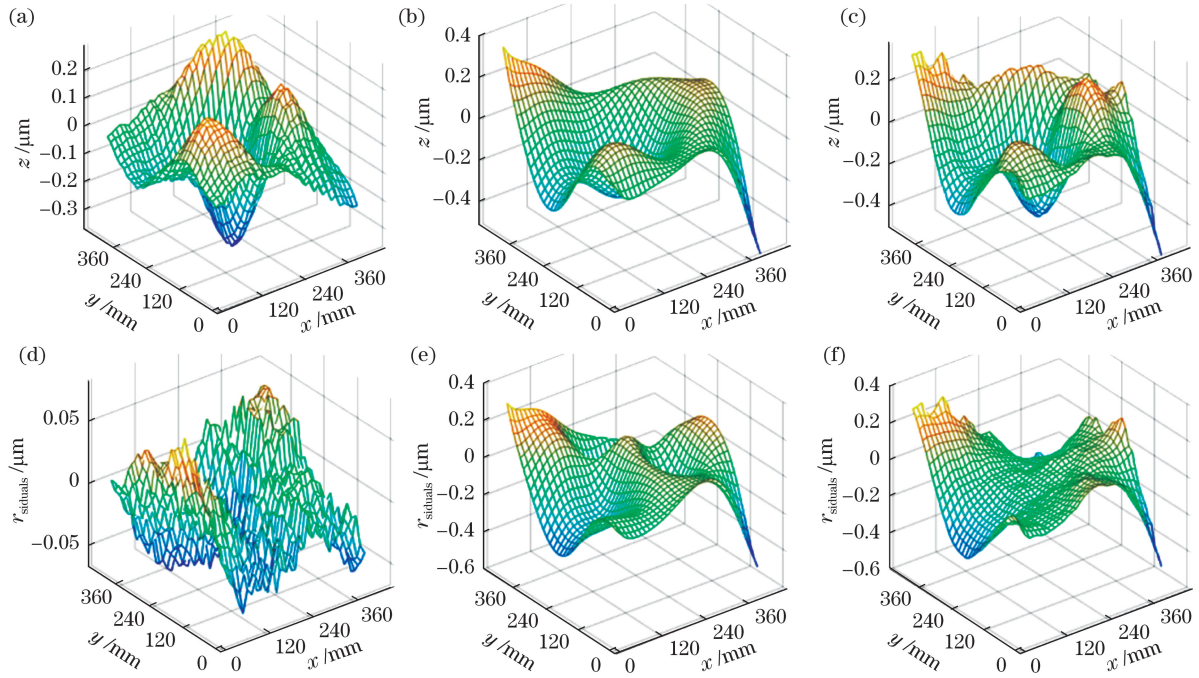


图 6 有 Gaussian 噪声时仿真波面 Z_1 的重建结果及重建残差对比 ($\sigma=0.2''$)。 (a) 本文方法的重建结果; (b) Zernike 波前重建法的结果; (c) SLI 法的结果; (d) 本文方法的重建残差; (e) Zernike 波前重建法的结果; (f) SLI 法的结果

Fig. 6 Comparison of reconstructed surface Z_1 and residual errors with Gaussian noise ($\sigma=0.2''$). (a) Reconstruction result with proposed method; (b) reconstruction result with Zernike wavefront method; (c) reconstruction result with SLI method; (d) reconstructed residual error of proposed method; (e) reconstructed residual error of Zernike wavefront method; (f) reconstructed residual error of SLI method

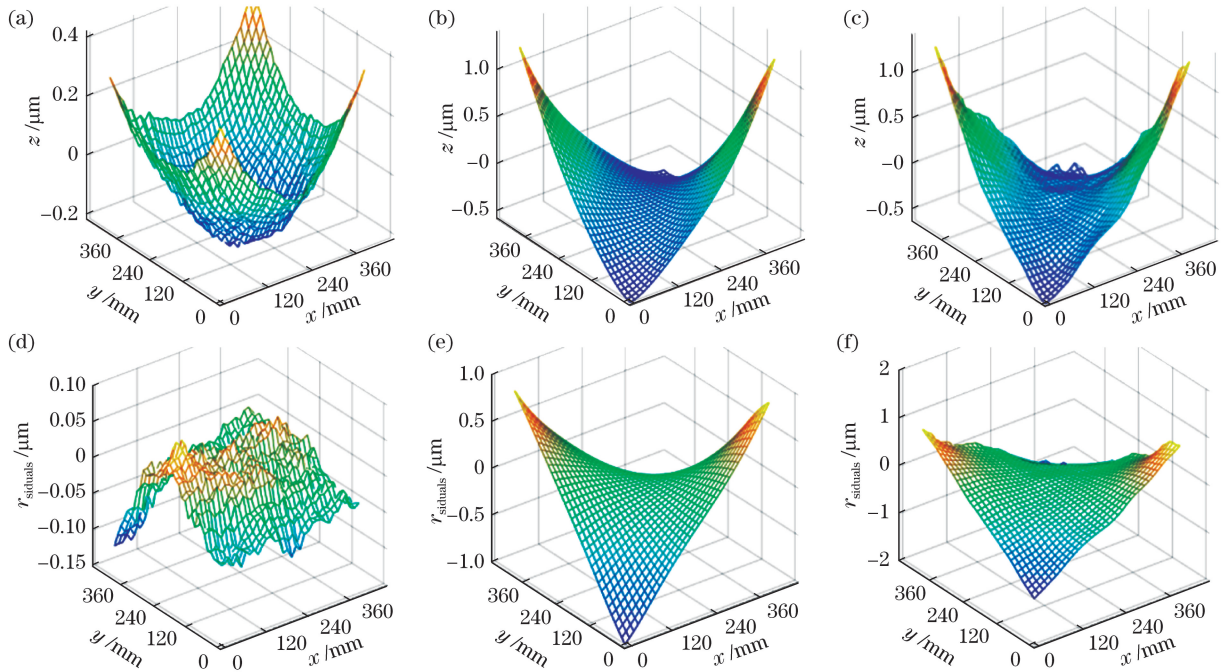


图 7 有 Gaussian 噪声时仿真波面 Z_2 的重建结果及重建残差对比 ($\sigma=0.2''$)。 (a) 本文方法的重建结果; (b) Zernike 波前重建法的结果; (c) SLI 法的结果; (d) 本文方法的重建残差; (e) Zernike 波前重建法的结果; (f) SLI 法的结果

Fig. 7 Comparison of reconstructed surface Z_2 and residual errors with Gaussian noise ($\sigma=0.2''$). (a) Reconstruction result with proposed method; (b) reconstruction result with Zernike wavefront method; (c) reconstruction result with SLI method; (d) residual error of proposed method; (e) residual error of Zernike wavefront method; (f) residual error of SLI method

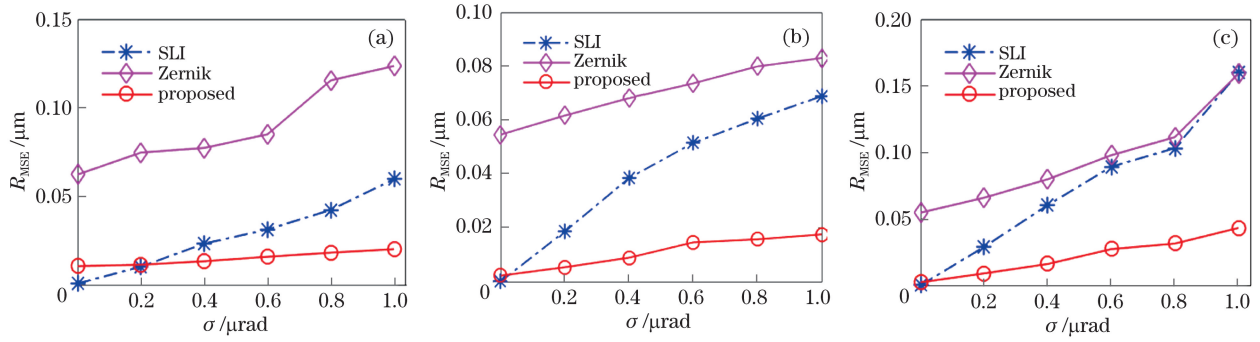


图 8 不同噪声级时重建误差统计($\sigma=0\sim 1\ \mu\text{rad}$)。(a) $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ 口径, 17×17 个采样点;
(b) $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$ 口径, 34×34 个采样点;(c) $400\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$ 口径, 34×34 个采样点

Fig. 8 Reconstruction error statistics at different noise levels ($\sigma=0\sim 1\ \mu\text{rad}$). (a) $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$, 17×17 sampling points; (b) $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}$, 34×34 sampling points; (c) $400\ \text{mm}\times 400\ \text{mm}$, 34×34 sampling points

时长分别人工设为 40、80、120、240 min(每次猫步移动后停等不同的时长);2)每次测量独立进行元件夹持,具体来说是大幅度放松再拧紧被测元件固定工装上的螺钉,模拟被测镜被重新装调至测量状态。重复测量结果如图 9 所示,对每次的测量数据,SLI 算法均未能成功重建,因此未能实现与该算法的对比。与 Zernike 波前重建法

的重建结果和 PV(图 9(b)~(e))更接近干涉仪测量结果(图 9(a))。测量结果的 RMSE 如表 1 所示,对于此小口径元件,本文算法的重建误差约为 $1/10\lambda$,约为 Zernike 波前重建法的 $1/10$ 。第 4 次测量的 Zernike 波前重建法的结果与其前 3 次相比,其 PV 和 RMSE 均出现了较大变化,而本文算法的恢复结果未出现明显差异,因此本文算法的重复性

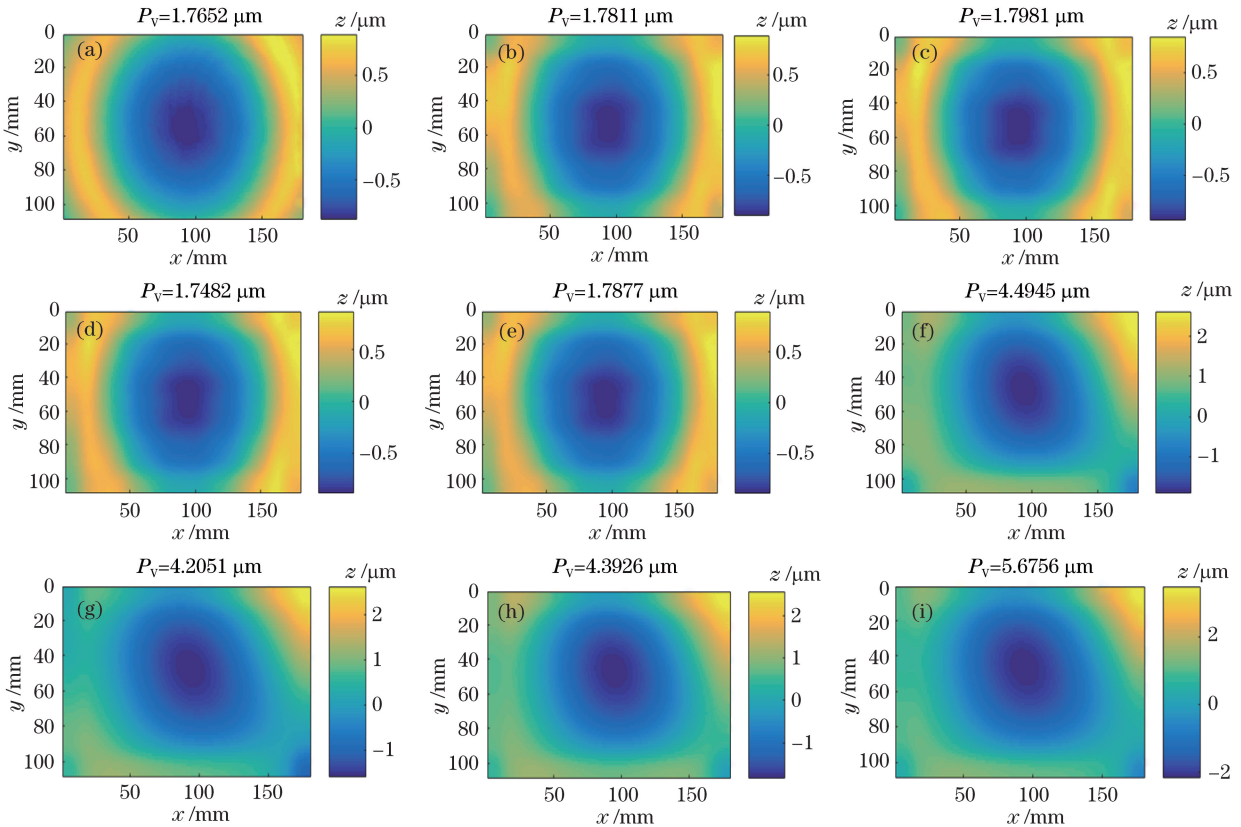


图 9 小口径元件 4 次重复测量实验结果。(a) 干涉仪测量面形;(b)~(e) 本文算法重建结果;
(f)~(i) Zernike 波前重建法的结果

Fig. 9 Four repeated test results for small aperture optical component. (a) Topography measured by interferometer; (b)-(e) reconstruction results of proposed method; (f)-(i) reconstruction results with Zernike wavefront method

更好。

对称口径为 300 mm×300 mm,实际可测区域口径只有 264 mm×240 mm(测量点数为22×20)的大口径元件进行 2 次重复测量,此测量口径超过了文献[3]得出的 216 mm×216 mm 理论可测量口径。测量前将夹持好的被测镜使用干涉仪进行了对比测量,重建结果如图 10 所示。对于 Zernike 波前重建算法,第一次测量结果(图 10(c))与仿真

实验中的图 7(b)具有相似的重建形变,形状与真实面形差距较大;第二次测量结果(图 10(f))与干涉仪数据(图 10(d))的形状比较接近,其 RMSE 也较小(表 1),可推测此次的测量误差较低。采用本文算法可以得出相似的结论:与第一次测量(图 10(b))结果相比,第二次测量的重建结果(图 10(e))与干涉仪测得面形更相似,其 RMSE 也更小(表 1)。

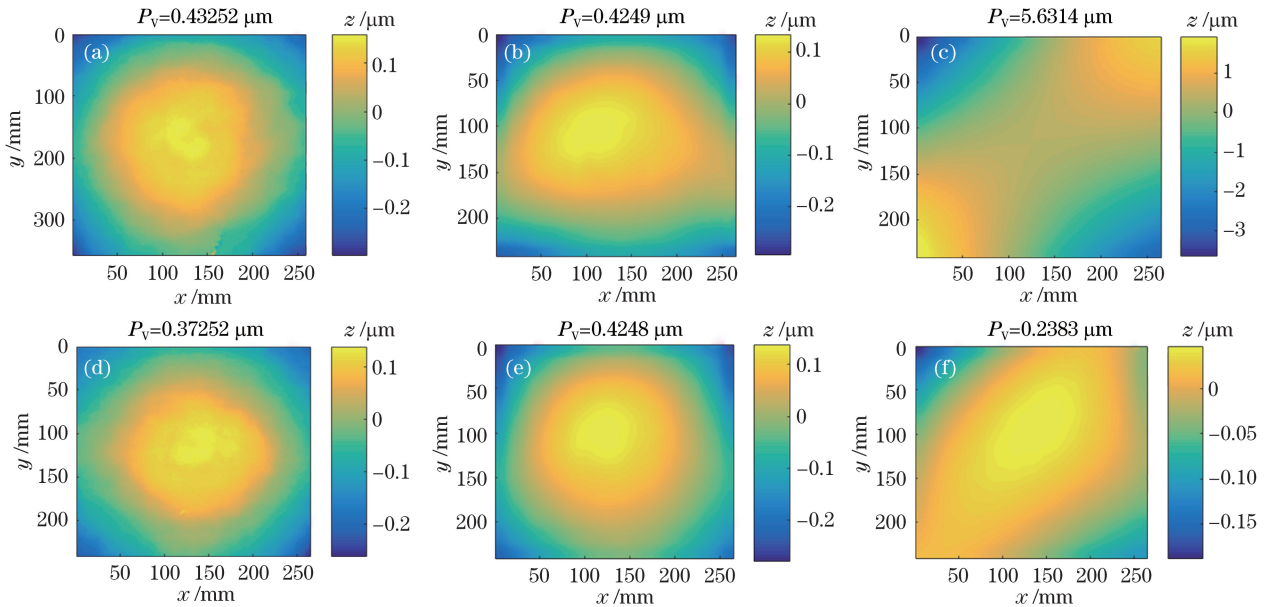


图 10 大口径元件 2 次重复测量实验结果。(a)(d)干涉仪测量面形;(b)(e)本文算法的重建结果;
(c)(f) Zernike 波前重建法的结果

Fig. 10 Two repeated test results for large aperture optical component. (a)(d) Topographies measured by interferometer; (b)(e) reconstruction results of proposed method; (c)(f) reconstruction results with Zernike wavefront method

表 1 两个被测镜重复验证实验的 R_{MSE} 统计

Table 1 R_{MSE} statistics of repeated test for two different mirrors

Algorithm	Small aperture mirror (R_{MSE}) / μm				Large aperture mirror (R_{MSE}) / μm	
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 1	Test 2
Zernike wavefront	0.5733	0.4915	0.5072	0.7305	0.9436	0.0793
Proposed	0.0638	0.0711	0.0674	0.0644	0.0351	0.0246

图 11 给出了第一次测量时 $y = 75 \text{ mm}$ 和 $y = 175 \text{ mm}$ 处本文算法恢复的结果以及干涉仪的对比数据。本文算法重建出的行 $y = 75 \text{ mm}$ (图 11(a))与干涉仪测量结果基本重合,而行 $y = 175 \text{ mm}$ (图 11(b))与干涉仪测量结果形状相似(拱形),但 PV 差距较大。由于本文算法稳健性较高,图 10(b)虽然出现了部分形变,但直观上仍然与干涉仪测试数据具有一定的相似性, RMSE 也较小(表 1)。

6 结 论

仿真和实验结果均表明,由于解决了测量误差累积的问题,相比于传统的 Zernike 波前重建法和 SLI 法,本文算法在重建光学元件面形时具有更高的稳健性,此优势在重建大口径元件面形时更为明显。由于受到 y 轴导轨运动稳定性的影响,目前该系统还未实现 400 mm×400 mm 全口径测量,在后续研究中将改进测量过程,将尝试采用 4×4 子口径测量方案。

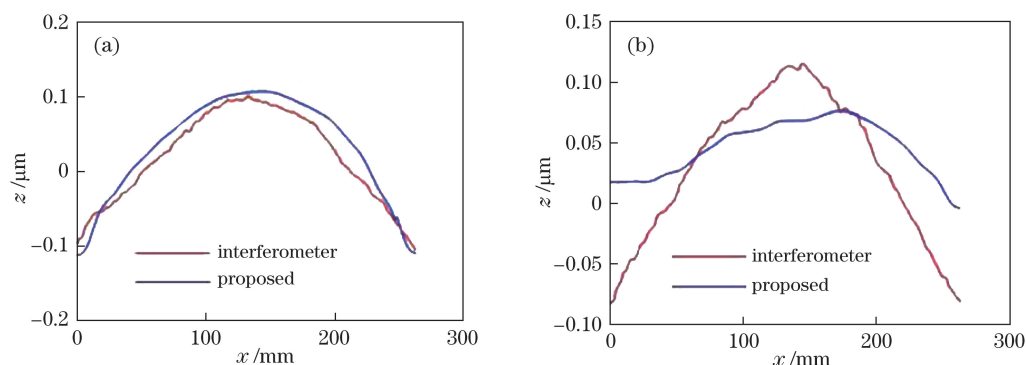


图 11 本文算法与干涉仪测量面形的不同重建行的重建结果对比。(a) $y=75$ mm; (b) $y=175$ mm
Fig. 11 Comparison of corresponding rows between reconstruction results of proposed method and topographies measured by interferometer. (a) $y=75$ mm; (b) $y=175$ mm

参 考 文 献

- [1] Wu L, Li J B, Chen N N, *et al.* Centroid detection of laser spots in large plane optical components topography measurement system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1704-1709.
巫玲, 李佳斌, 陈念年, 等. 大口径平面光学元件面形检测中激光光斑质心定位[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1704-1709.
- [2] Chen H P, Xiong Z, Cao T F, *et al.* Research on surface measure device for process of large aperture mirror assembly[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212002.
陈海平, 熊召, 曹庭分, 等. 大口径反射镜组件面形检测系统及方法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0212002.
- [3] Chen H P, Li J B, Liu C C, *et al.* Research on angle measure error based on method of angle difference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012003.
陈海平, 李佳斌, 刘长春, 等. 基于角差法面形测量装置的测角误差研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1012003.
- [4] Ma D M, Sun J Y, Zhang B, *et al.* High precision large flat mirror measurement by angle difference testing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(S1): 121-126.
马冬梅, 孙军月, 张波, 等. 高精度大口径平面镜面形角差法测试探究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(S1): 121-126.
- [5] Fan Y, Chen N N, Zhang J F, *et al.* Topography measurement system of large flat mirror[J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(4): 785-788.
范勇, 陈念年, 张劲峰, 等. 大口径光学平面镜面形检测系统初步研究[J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18(4): 785-788.
- [6] Lu Y J, Tang F, Wang X Z, *et al.* Analysis on the accuracy of flat sub-aperture stitching interferometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0404002.
卢云君, 唐锋, 王向朝, 等. 平面子孔径拼接干涉测量精度分析[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0404002.
- [7] Schlüns K, Klette R. Local and global integration of discrete vector fields[M] // Solina F, Kropatsch W G, Klette R, *et al.* *Advances in Computer Vision*. Vienna: Springer, 1997: 149-158.
- [8] Huang L, Idir M, Zuo C, *et al.* Comparison of two-dimensional integration methods for shape reconstruction from gradient data[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 64: 1-11.
- [9] Huang L, Xue J P, Gao B, *et al.* Spline based least squares integration for two-dimensional shape or wavefront reconstruction [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 91: 221-226.
- [10] Neubauer A. A new cumulative wavefront reconstructor for the Shack-Hartmann sensor[J]. *Journal of Inverse and Ill-Posed Problems*, 2013, 21(3): 451-476.
- [11] Bon P, Monneret S, Wattellier B. Noniterative boundary-artifact-free wavefront reconstruction from its derivatives[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(23): 5698-6704.
- [12] Harker M, O'Leary P. Regularized reconstruction of a surface from its measured gradient field[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2015, 51(1): 46-70.
- [13] Scherr T. Gradient-based surface reconstruction and the application to wind waves[D]. Heidelberg: Ruprecht Karls University, 2017: 29-63.