

文章编号 1004-924X(2015)04-0934-07

# 用于子孔径拼接干涉系统的机械误差补偿算法

张 敏<sup>1,2\*</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 杨怀江<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对拼接干涉检测系统机械定位精度引起的各子孔径间的相对定位误差,提出了含定位误差补偿项的全局最优化拼接算法。介绍了该算法原理,从理论上分析了该算法拟合出的平移和旋转定位系数的精度。结合 MetroPro 和 Matlab 软件仿真模拟实验,分析了机械定位误差对拼接检测精度的影响。实验表明:拟合出的平移定位系数精度高于旋转定位系数精度,与理论分析一致;相对于一般算法,该算法对机械误差有较强的免疫力。在搭建的拼接检测装置上检测了口径为 150 mm 的平面镜,结果显示:拼接结果与干涉仪直接检测的全口径相位残差的分布峰谷值(PV)为 0.015 30 $\lambda$ ,均方根值(RMS)为 0.001 570 $\lambda$ ,得到的结果十分接近,验证了该算法稳定可靠,能够合理有效地补偿机械精度引起的子孔径定位误差。

**关键词:**拼接干涉检测;子孔径拼接;机械定位误差;补偿算法;大口径平面镜

**中图分类号:** TG84; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152304.0934

## Mechanical error compensation algorithm for subaperture stitching interferometry

ZHANG Min<sup>1,2\*</sup>, SUI Yong-xin<sup>1</sup>, YANG Huai-jiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optic,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangminxiaowei@163.com

**Abstract:** An error compensation algorithm was proposed by introducing a position correction compensator into general stitching algorithm to reduce the relative location errors between subapertures due to poor positioning accuracy in a subaperture stitching interferometry. The working principle of the algorithm was introduced and the accuracy of the fitted translation and rotation coefficients was analyzed in theory. Then a simulation experiment by using MetroPro software and Matlab software was implemented, and the influence of positioning accuracy on the stitching results was analyzed. The simulation result shows that the accuracy of rotation coefficient is less than that of the translation coefficient and is consistent with the theoretical analysis. Moreover, the algorithm is more robust than the general stitching algorithms. For the purpose of experimental verifying mechanical error compen-

收稿日期:2013-11-04;修订日期:2014-01-03.

基金项目:国家科技重大专项资助项目(No. 2009ZX02205)

sation algorithm, a  $\Phi 150$  mm flat mirror was tested by a subaperture stitching interferometer and a full aperture interferometer. The test results indicate that the peak-to-valley(PV) and root-mean-square(RMS) of the phase distribution residue are  $0.01530\lambda$  and  $0.001570\lambda$ , respectively as compared with the stitching results from the directly measured full aperture, which means that the optimal algorithm is stable and reliable and effectively compensates positioning system errors.

**Key words:** stitching interferometry; subaperture stitching; positioning system error; compensation algorithm; large aperture flat mirror

## 1 引言

在光刻技术、天文光学、空间光学、惯性约束聚变(ICF)等高技术领域,大口径光学系统的应用越来越广泛。大口径光学系统中光学元件的制造需要高精度的检测方法和仪器<sup>[1]</sup>,其中,子孔径拼接干涉检测是一种高精度检测大口径光学元件的有效方法。相比于大口径干涉仪,它具有空间分辨率高、造价低等优势。该方法采用小口径干涉仪分别测量大口径光学镜面上各个子孔径区域,根据相邻两子孔径间重叠区域的面形冗余信息<sup>[2]</sup>,通过合理的算法将各子孔径的测量结果拼接到一起,从而获得全口径上的面形分布。自美国 Arizona 大学光学中心的 C. J. Kim<sup>[3]</sup>首次提出子孔径拼接检测概念以来,该方法得到了广泛的研究和应用<sup>[4-7]</sup>。

在子孔径拼接干涉法检测大口径光学元件的过程中,除干涉条纹调零的平移、倾斜等机械调整误差外,子孔径扫描过程中待测镜与干涉仪的相对运动也会导致各个子孔径的机械定位误差,降低根据子孔径重叠区相位信息消除调整误差法的拼接精度<sup>[8]</sup>。除了应用高精度的精密机械运动平台来实现子孔径拼接精确定位之外,Tang 等<sup>[9]</sup>还提出考虑刚体运动不确定性的6个自由度,基于这6个参数拟合重叠区点的相位偏差来获得最优估计值。Sjoedahl<sup>[10]</sup>等人提出一种迭代算法,用迭代方法分别计算每个子孔径相对于基准子孔径的6个自由度参数,但 Tang 与 Sjoedahl 采用的两两拼接方法在拼接过程中会积累测量误差<sup>[11]</sup>。陈善勇等<sup>[12]</sup>提出综合优化的子孔径迭代拼接算法,虽然降低了机械定位的精度要求,但牺牲了拼接算法效率。张鹏飞等<sup>[13]</sup>采用立体视觉实现了子孔径拼接测量的工件定位,该方法用两个 CCD 相机组成双目立体视觉系统来实现对子孔径的准

确定位。近几年,国内外一些科研工作者将图像处理中的搜索方法应用到子孔径定位中<sup>[8,14-15]</sup>。Maurer<sup>[14]</sup>等人提出了标记点辅助搜索法,将使两个子孔径相关系数最大的位置作为子孔径的定位,但该方法仅对 X, Y 方向的平移运动有效,而且定位精度受限于干涉仪 CCD 的分辨率。

为保留拼接算法的高效性以及拼接检测的可重复性,本文研究了可同时补偿子孔径机械定位误差和调整误差的全局优化拼接法,分析了定位误差对拼接检测精度的影响,该算法提高了子孔径拼接干涉仪检测对大口径平面镜的检测精度。

## 2 子孔径拼接算法

在进行子孔径拼接检测时,首先根据干涉仪视场和待测镜面的比例、子孔径之间的重叠区域面积选择合适的子孔径圈数,确定子孔径个数以及分布。然后进行子孔径扫描,先检测中心子孔径,再将待测镜或干涉仪沿径向移动到适当的位置,并绕待测镜中心轴旋转待测镜,逐个测量外圈子孔径的面形。最后,将各子孔径局部坐标按照规划转换到全局坐标下,选择合适的拼接算法拼

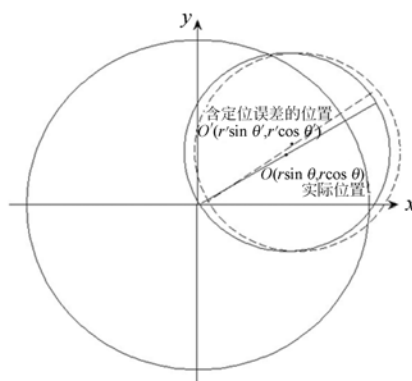


图1 拼接测量过程中的机械定位误差( $\theta' = \theta + \Delta\theta$ )

Fig. 1 Illustration of positioning errors by stitching interferometry

接出全口径面形。在检测子口径的过程中,机械运动误差和调整误差会对子口径相位引入平移和倾斜等误差。而机械定位误差会导致实际检测的子口径坐标系与规划子口径坐标系之间存在 X、Y 轴方向的错位,以及 Z 轴方向的旋转,如图 1 所示。

包含机械定位误差的相位分布可记为:

$$\omega(r' \cos(\theta + \Delta\theta), r' \sin(\theta + \Delta\theta)). \quad (1)$$

根据一阶泰勒公式:

$$\begin{aligned} & \omega(r' \cos(\theta + \Delta\theta), r' \sin(\theta + \Delta\theta)) = \\ & \omega((x + \Delta x) \cos \Delta\theta - (y + \Delta y) \sin \Delta\theta, \\ & (y + \Delta y) \cos \Delta\theta + (x + \Delta x) \sin \Delta\theta) \approx \\ & \omega(x + \Delta x - y \Delta\theta, y + \Delta y + x \Delta\theta) \approx \\ & \omega(x, y) + \Delta x \frac{\partial \omega}{\partial x}(x, y) + \Delta y \frac{\partial \omega}{\partial y}(x, y) + \\ & \Delta\theta \left[ x \frac{\partial \omega}{\partial y}(x, y) - y \frac{\partial \omega}{\partial x}(x, y) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

其中:

$$r' = \sqrt{(x + \Delta x)^2 + (y + \Delta y)^2},$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= (x + \Delta x) / r', \sin \theta = (y + \Delta y) / r', \\ \cos \Delta\theta &\approx 1, \sin \Delta\theta \approx \Delta\theta. \end{aligned} \quad (3)$$

忽略二阶小量,式中  $\Delta x, \Delta y$  分别是 X、Y 轴方向的平移定位误差,  $\Delta\theta$  是绕 Z 轴的旋转角度定位误差。因此,机械误差补偿算法不仅需要引入调整误差补偿项,还要引入定位误差补偿项,引入补偿项后子口径的相位分布记为:<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} W(x, y) &= \omega(x, y) + P + T_x x + T_y y + \Delta x \frac{\partial \omega(x, y)}{\partial x} + \\ & \Delta y \frac{\partial \omega(x, y)}{\partial y} + \Delta\theta \left[ x \frac{\partial \omega(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial \omega(x, y)}{\partial x} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $P$  为面形平移系数,  $T_x, T_y$  分别为 X、Y 方向的子口径倾斜系数。若  $N$  为子口径个数,外圈子口径个数为  $N-1$ ,  $\omega_0(x, y)$  为中心子口径的相位分布,各系数可采用全局优化的最小二乘法拟合,如式(5)所示:

$$\min f(P, T_x, T_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\theta), \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} f(P, T_x, T_y, \Delta x, \Delta y, \Delta\theta) &= \sum_{i=1 \dots N-1} \sum_{j=0 \dots N} \left\{ \left[ \omega_i(x, y) + P_i + T_{xi} x + T_{yi} y + \Delta x_i \frac{\partial \omega_i(x, y)}{\partial x} + \right. \right. \\ & \left. \Delta y_i \frac{\partial \omega_i(x, y)}{\partial y} + \Delta\theta \left[ x \frac{\partial \omega_i(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial \omega_i(x, y)}{\partial x} \right] \right] - \\ & \left[ \omega_j(x, y) + P_j + T_{xj} x + T_{yj} y + \Delta x_j \frac{\partial \omega_j(x, y)}{\partial x} + \Delta y_j \frac{\partial \omega_j(x, y)}{\partial y} + \right. \\ & \left. \Delta\theta \left[ x \frac{\partial \omega_j(x, y)}{\partial y} - y \frac{\partial \omega_j(x, y)}{\partial x} \right] \right] \right\}^2. \end{aligned} \quad (6)$$

在用式(2)推导各机械误差补偿项的过程中,平移误差补偿项由泰勒展开时忽略二阶小量得到;而旋转定位误差补偿项多采用一步三角公式进行近似,如式(3)所示。显然由最小二乘法拟合出的旋转定位系数与实际值的相对误差应较大。采用迭代法可使计算出的补偿量更加精确,但迭代法会降低拼接算法的时效,所以需研究机械定位精度对拼接结果的影响,从而为选择适当的拼接算法提供指导。

### 3 仿真模拟实验

对一口径为 150 mm 的平面光学元件进行模

拟拼接检测,用 zygo 干涉仪检测其面形分布,检

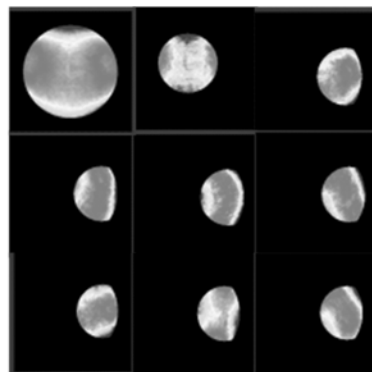


图 2 全口径和子口径相位分布图

Fig. 2 Phase maps of full aperture and eight subapertures

测结果的 PV 值和 RMS 值分别为  $0.0901\lambda$ ,  $0.01186\lambda$  ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ )。应用 zygo 干涉仪自带 MetroPro 软件中的旋转 (Rotate Data)、遮蔽 (Mask Data) 等功能将全口径的相位分布分割成 8 个子孔径,并在分割子孔径过程中通过改变边缘子孔径的中心位置引入机械定位误差。全口径和各子孔径的相位分布如图 2 所示。利用 Matlab 软件读取数据,并引入机械调整误差,模拟仿真流程如图 3 所示。

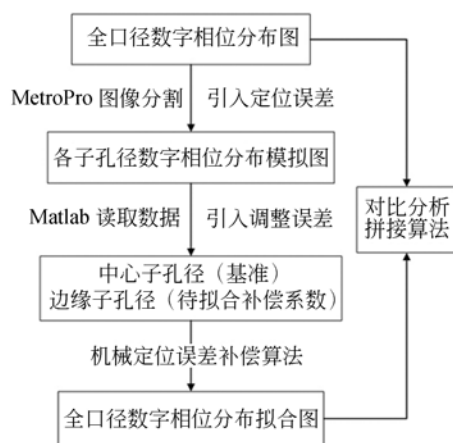


图 3 子孔径拼接检测机械误差的仿真流程图

Fig. 3 Simulation flowchart of mechanical error determined by subaperture stitching

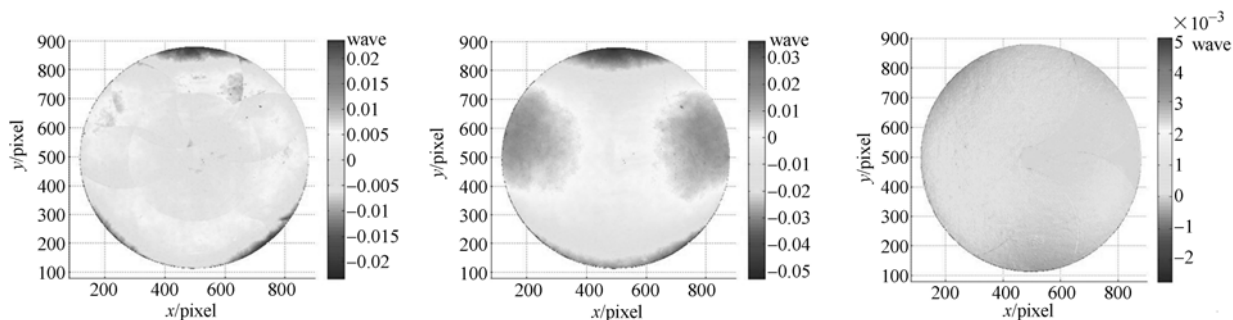
子孔径直径为 90 mm,第一圈子孔径与第二圈子孔径两两重叠区域的面积占单个子孔径面积的 30%,第二圈子孔径两两重叠区域的面积比例为 47%。以中心子孔径为基准,其它子孔径引入的机械调整误差以及定位误差如表 1 所示。

表 1 输入的机械误差 (rand 为大于 0 小于 1 的随机数)

Tab. 1 Input mechanical error data (rand is a random number between 0 and 1)

类型	引入机械调整误差大小
$\Delta z/\lambda$	$rand * 0.1$
X-tilt/[rad/(°)]	$rand * 0.0001/rand * 20.63$
Y-tilt/[rad/(°)]	$rand * 0.0001/rand * 20.63$
$\Delta x/\text{pixel}$	$rand * 1$
$\Delta y/\text{pixel}$	$rand * 1$
$\Delta\theta/[rad/(°)]$	$rand * 0.000175/rand * 36$

图 4(a)为直接拼接出的全口径面形相位分布,从图中可看出明显的拼接痕迹。采用机械误差补偿算法拼接子孔径得到的全口径相位分布如图 4(b)所示,PV 值和 RMS 值分别为  $0.0896\lambda$ ,  $0.01207\lambda$ ,PV 值和 RMS 值与原始相位分布的相对误差分别为 0.55%和 1.79%。图 4(c)为补偿算法拼接出的全口径相位与初始相位相减后的残差分布,其 PV 值为  $0.00772\lambda$ ,RMS 值为  $0.001028\lambda$ ,并且图中拼接痕迹已不明显。



(a) 直接拼接结果  
(a) Direct stitching result

(b) 机械误差补偿算法的拼接结果  
(b) Stitching result of mechanical error compensation algorithm

(c) 机械误差补偿算法的残差分布  
(c) Difference between stitching results of mechanical error compensation algorithm and full aperture measurement

图 4 直接拼接与机械误差补偿算法的拼接结果对比

Fig. 4 Comparison of results between direct stitching and stitching by mechanical error compensation algorithm

各个子孔径机械误差的相对误差值  $\Delta R$ (见式(7))如表 2 所示,  $\Delta R$  均较小, 尤其是调整误差的  $\Delta R$ , 验证了定位误差补偿算法的正确性和可行性。而相对于其他类型的机械误差, 旋转定位误差的  $\Delta R$  较大, 与理论分析一致。当定位误差的相对误差过大时, 拼接结果将变差, 若拼接结果

不满足检测精度要求时, 需改进拼接方法。由于相对误差与实际定位误差相关, 所以研究定位误差对拼接结果的影响可为拼接检测系统选择拼接方法提供指导。

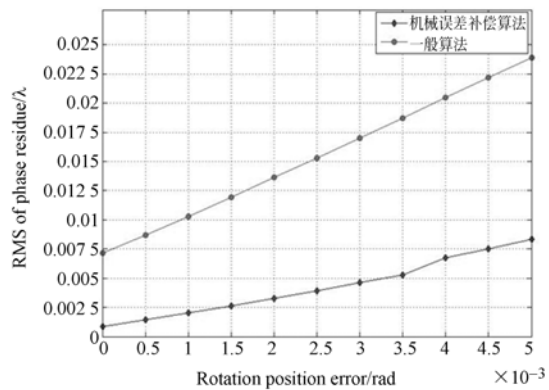
$$\Delta R = \left| \frac{\text{计算出的机械误差} - \text{引入的机械误差}}{\text{引入的机械误差}} \times 100\% \right| \quad (7)$$

表 2 机械误差相对误差表

Tab. 2 Relative error data for mechanical errors

相对误差 $\Delta R(\%)$	$\Delta z/\lambda$	X-tilt/rad	Y-tilt/rad	$\Delta x/\text{pixel}$	$\Delta y/\text{pixel}$	$\Delta\theta/\text{rad}$
1	0.267 2	0.640 3	0.678 1	3.630 5	0.091 2	41.473 5
2	0.049 0	0.061 1	0.175 6	16.909 5	0.602 3	39.181 2
3	0.054 3	0.136 7	0.044 9	12.223 1	8.766 2	47.414 8
4	0.043 2	0.156 4	0.672 3	5.465 2	21.464 8	31.968 9
5	0.072 3	0.045 0	0.641 4	1.065 4	8.375 6	25.374 6
6	0.033 3	0.019 0	2.576 9	1.922 5	17.370 2	19.583 4
7	0.154 7	0.348 3	0.731 6	8.504 0	8.545 1	27.979 2

一般的拼接算法仅拟合调整误差补偿系数, 而机械误差补偿算法增加了 3 个机械定位误差补偿项来提高对机械误差的免疫力。在引入如表 1 所示的其他机械误差的基础之上, 分别增加 X, Y 轴定位误差和旋转定位误差, 用以分析 X, Y 轴平移误差和旋转定位误差对一般算法和本文算法的影响, 结果如图 5 所示。随着 X, Y 轴平移误差、旋转定位误差的增加, 拼接结果与全口径相位之间残差 RMS 值均增大, 但机械误差补偿算法 RMS 值的增加速率较慢, 并且始终低于一般算法, 说明误差补偿算法对定位误差有较强的免疫力, 能有效补偿子孔径的定位误差。由此可根据图 5 为拼接系统选择合适的算法, 若拼接精度为



(b) 增加绕 Z 轴旋转定位误差

(b) Increase of rotation positioning errors around Z axis

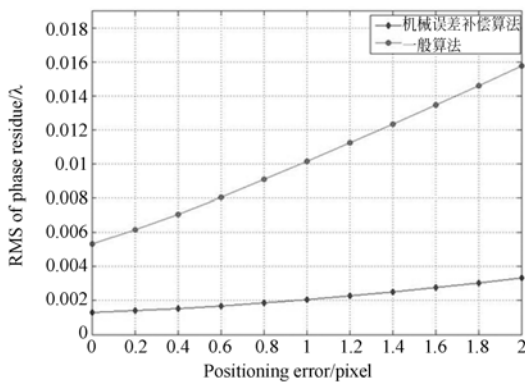
图 5 X, Y 轴平移定位误差和绕 Z 轴旋转定位误差对算法的影响

Fig. 5 Influence of positioning accuracy on stitching results

残差分布 RMS 值不大于 0.002 5  $\lambda$ , 可在平移定位精度为 1 pixel, 旋转定位精度为 0.001 rad (3.438') 的拼接检测系统中使用本文算法。

### 4 实验验证

用搭建的拼接干涉检测系统测量口径为 150 mm 的平面镜, 并以干涉仪全口径检测结果作为参考值。已知干涉仪参考面的面形, 子孔径拼接



(a) 增加 X, Y 轴平移定位误差

(a) Increase of translation positioning errors along X, Y axes

干涉检测采用口径为 100 mm 的标准参考镜,子孔径分布如图 6 所示。搭建的拼接检测平台如图 7 所示, Y 轴方向的平移运动由 Y 轴导轨和五维调整台 Y 轴方向的精密调节机构组成, Y 轴导轨为大行程粗调系统,调整台中 Y 向精调整系统为小行程的精密调节系统,两者组成最大行程为 615 mm、双重定位精度为 0.15 mm 的调节定位系统,干涉仪分辨率为 0.16 mm/pixel,所以 Y 轴方向的定位精度相当于 0.94 pixel; Z 轴旋转由五维调整台单独完成,双向重复定位精度为 23''。

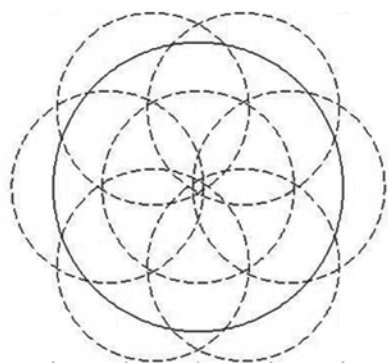


图 6 子孔径分布示意图

Fig. 6 Distribution of subaperture stitching

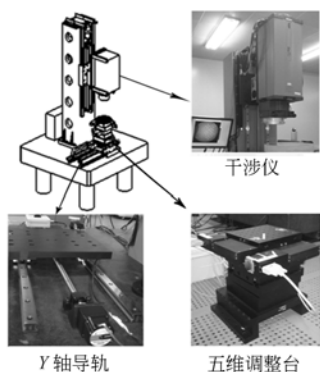
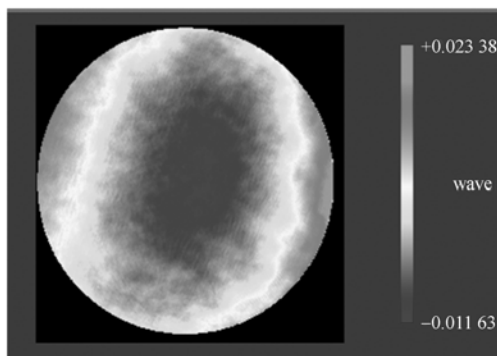


图 7 子孔径拼接干涉检测系统

Fig. 7 Subaperture stitching interferometry

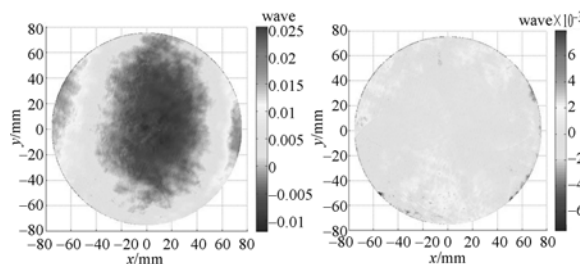
大口径干涉仪检测结果除去参考面得到的全口径面形如图 8(a)所示, PV 值和 RMS 值分布为  $0.0355\lambda, 0.01835\lambda$ 。对于子孔径数据采用机械误差补偿算法拼接,子孔径数据均去除了干涉仪参考面面形,拼接结果如图 8(b)所示, PV 值和 RMS 值分别为  $0.0372\lambda, 0.01877\lambda$ 。将两组数据进行最优匹配<sup>[17]</sup>,得到的面形残差分布如图 8(c)所示,图中无明显的拼接痕迹,残差分布的 PV 值为  $0.01530\lambda$ , RMS 值为  $0.001570\lambda$ 。实验结果

表明:本文算法能有效补偿由机械运动引起的子孔径定位误差,很好地拼接出全口径相位分布。



(a) 干涉仪全口径检测结果

(a) Test result for full aperture



(b) 拼接干涉仪检测结果

(c) (a)和(b)的残差分布

(b) Stitching test result

(c) Difference distribution

between (a) and (b)

图 8 全口径测量与拼接测量结果

Fig. 8 Results of full aperture test and stitching test

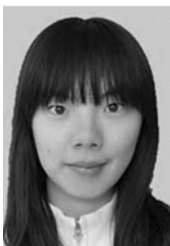
## 5 结 论

为减少子孔径拼接干涉检测中由机械精度引起的定位误差对检测结果的影响,本文提出了全局优化的子孔径机械误差补偿算法。首先介绍了该算法的原理,采用 MetroPro 和 Matlab 软件相结合的模拟方法分析了定位误差对拼接精度的影响;然后对该算法进行了实验验证。模拟实验表明,与只校准调整误差的方法相比,机械误差补偿算法提高了拼接测量对定位误差的免疫力;实验结果显示,拼接与直接测量之间残差分布的 PV 值和 RMS 值误差分别为  $0.01530\lambda, 0.001570\lambda$ , 拼接结果与通过全口径测量的结果接近,且相位分布基本一致,说明该方法能够有效补偿机械定位误差。但对于定位误差更大的拼接测量系统,该补偿算法有待于进一步的改进和优化。

## 参考文献:

- [1] 侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 子孔径拼接干涉测试技术现状及发展趋势[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3): 50-53.  
HOU X, WU F, YANG L, *et al.*. Status and development trend of subaperture stitching interferometry [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2005, 3(3): 50-53. (in Chinese)
- [2] BURGE J H, ZHAO CH Y. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors [J]. *SPIE*, 2012, 8450: 84500X.
- [3] KIM C J, WYANT J C. Subaperture test of a large flat on a fast spherical surface [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1981, 71: 15-87.
- [4] CHEN SH Y, DAI Y F, LI SH Y, *et al.*. Surface registration-based stitching of quasi-planar free-form wavefronts [J]. *Opt. Eng.*, 2012, 51(6): 063605. 2.
- [5] 陈一巍, 王飞, 王高文, 等. 基于变换的子孔径拼接新算法[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912004.  
CHEN Y W, WANG F, WANG G W, *et al.*. New sub-aperture stitching algorithm based on transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912004. (in Chinese)
- [6] ZHAO W R, LIANG ZH N, PAN G Y, *et al.*. Based on the method of subaperture splicing detection on spherical [J]. *SPIE*, 2012, 8557: 85571S.
- [7] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿 [J]. 中国光学, 2013, 6(1): 88-95.  
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [8] 汪利华, 吴时彬, 任戈, 等. 子孔径拼接检测光学系统波前机械定位误差补偿算法 [J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0112003.  
WANG L H, WU SH B, REN G, *et al.*. Location error compensation algorithm for measure optical system wave front [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112003. (in Chinese)
- [9] TANG SH H, CLENDENIN B. Measuring height variation over entire wafer surface with high lateral resolution [J]. *SPIE*, 2007, 6672: 667209.
- [10] SJODAHL M, OREB B F. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(2): 403-408.
- [11] 王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口非球面反射镜 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 520-528.  
WANG X K, WANG L H, DENG W J, *et al.*. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 520-528. (in Chinese)
- [12] 丁凌艳, 戴一帆, 陈善勇. 平面子孔径拼接测量研究 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 978-985.  
DING L Y, DAI Y F, CHEN SH Y. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 978-985. (in Chinese)
- [13] 张鹏飞, 赵宏, 周翔, 等. 采用立体视觉实现子孔径拼接测量的工件定位 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 503-511.  
ZHANG P F, ZHAO H, ZHOU X, *et al.*. Work-piece localization in sub-aperture stitching test based on stereo vision [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 503-511. (in Chinese)
- [14] MAURER R, SCHNEIDER F, VOGT C, *et al.*. Physical marker based stitching process of circular and non-circular interferograms [J]. *SPIE*, 2011, 8083: 80830Q.
- [15] LIN P C, CHAN Y A, CHANG H SH, *et al.*. Aberration compensation and position scanning of a subaperture stitching algorithm [J]. *SPIE*, 2012, 8494: 84940L.
- [16] GOLINI D, FORBES G, MURPHY P. Method for selfcalibrated subaperture stitching for surface figure measurement: US Patent, 69566572B2 [P].
- [17] 陈善勇, 戴一帆, 解旭辉, 等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法 [J]. 光学学报, 2008, 28(5): 883-888.  
CHEN SH Y, DAN Y F, XIE X H, *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 883-888. (in Chinese)

## 作者简介:



张敏(1988—), 女, 河南杞县人, 博士研究生, 2010年于吉林大学获得学士学位, 主要从事光学检测方面的研究。  
E-mail: zhangminxiaowei@163.com

## 导师简介:



杨怀江(1966—), 男, 辽宁丹东人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1988年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 1993年于长春理工大学获得硕士学位, 1996年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事紫外光刻技术、光学信息融合、网络信息安全等方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)