

# 基于变换的子孔径拼接新算法

陈一巍<sup>1,2</sup> 王 飞<sup>1</sup> 王高文<sup>1</sup> 隋永新<sup>1\*</sup> 杨怀江<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 拼接干涉仪存在机械定位误差,各子孔径间存在相对定位误差,给拼接结果带来影响,需要通过子孔径拼接算法进行补偿。为了提高子孔径拼接算法的补偿能力,提出了有别于基于原始图像计算补偿量的子孔径拼接新算法。将待拼接的图像变换成利于计算补偿量的图像,用变换后的图像进行计算并得到子孔径的相对位置关系,利用得到的相对位置关系将原图像拼好。针对拼接干涉仪机械定位精度较高的情况,设计了一种将原图变换成其梯度的幅值图和方向图,用幅值图作为权重,通过将方向图吻合计算补偿量的新算法。仿真结果表明,该算法相比于用原图计算补偿量的算法,更好地补偿了机械定位误差的影响。以全口径直接测量结果为标准,实验结果进一步验证了这个算法的有效性。说明了根据实际情况选取恰当的变换,基于变换的子孔径拼接算法能提高拼接精度。

**关键词** 测量;干涉仪;光学检测;子孔径拼接算法;变换;梯度

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0912004

## New Sub-Aperture Stitching Algorithm Based on Transformation

Chen Yiwei<sup>1,2</sup> Wang Fei<sup>1</sup> Wang Gaowen<sup>1</sup> Sui Yongxin<sup>1</sup> Yang Huaijiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Sub-aperture stitching algorithm should compensate the mechanical location errors in sub-aperture stitching interferometer because they lead to the relative location errors between sub-apertures which affect the stitching result. In order to improve the compensation ability of sub-aperture stitching algorithm, a new stitching algorithm different from the calculation compensator algorithm using original pictures is proposed. The new algorithm transforms original pictures into images beneficial to the calculation of compensator and calculates the location of each sub-aperture using pictures after transformation. It stitches original pictures using the calculated locations. Due to the high location accuracy of the sub-aperture stitching interferometer, the new algorithm transforms original pictures to gradient norm pictures and gradient direction pictures, and calculates the compensator based on direction pictures using norm pictures as weight. The simulation result shows that this algorithm compensates location errors more effectively than the calculation compensator algorithm does. In comparison with full-aperture testing, sub-aperture stitching result demonstrates the validity of this algorithm, and indicates that the method can enhance the location errors compensation ability by choosing a proper transformation.

**Key words** measurement; interferometer; optical testing; sub-aperture stitching algorithm; transformation; gradient

**OCIS codes** 120.6650; 120.4640; 120.4610

收稿日期: 2013-01-06; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 陈一巍(1987—),男,博士研究生,主要从事精密光学检测技术方面的研究。E-mail: cyw198788@163.com

导师简介: 杨怀江(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事高精度光学加工、检测技术等方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引言

随着科学技术的不断发展,大口径光学系统在空间光学、天文光学、惯性约束聚变、地基空间目标探测与识别及光刻光学等高新技术领域得到了越来越广泛的应用。因此,与之相适应的光学技术便得到了发展<sup>[1-2]</sup>,其中,大口径光学检测技术十分重要。为了能用小口径的干涉仪实现对大口径待测镜的检测,美国 Arizona 光学中心的 Kim<sup>[3]</sup>于 1982 年首先提出了子孔径拼接的方法。该方法一经提出,便得到了广泛的研究和应用。子孔径拼接技术有很多方面,已经发展出了不少方法。在子孔径定位方面,子孔径定位方法分为标记点法<sup>[4]</sup>、立体视觉法<sup>[5]</sup>和机械定位法<sup>[6-7]</sup>等。在补偿量的选取方面,有只选取轴向的相对平移和相对倾斜补偿量的<sup>[6-7]</sup>,也有选取相对六维运动补偿量的<sup>[8]</sup>,甚至有选取六维运动补偿量的同时还选取畸变补偿量的<sup>[9]</sup>。在优化模式上,有逐个子孔径进行补偿量优化的<sup>[10]</sup>,也有同时进行优化的<sup>[7]</sup>。在优化方法方面,有的没使用迭代<sup>[6-7]</sup>,有的使用了迭代<sup>[10-13]</sup>,QED 公司还对补偿量的范围进行了约束<sup>[9]</sup>。

在没有任何误差的情况下,相邻子孔径的重叠区域上所测得的面形应该是相同的。但是,由于种种误差的存在,重叠区域上的数值往往有所差异。子孔径拼接算法补偿机械误差的本质就是:改变补偿量的大小使得重叠区域上的差异最小化,即补偿量的大小的计算是一个优化的过程。所以,优化方法对子孔径拼接算法的重要性是不言而喻的。但是,即使是同样的优化方法和同样的机械定位误差,对于两组不同的待拼接图像,解算出的补偿量也是不同的。因此,如果可以在拼接前将图像进行变换,使得变换后的图像用算法算出的补偿量比用原图像算出的补偿量精度高,则将得到更好的拼接结果。如此,根据不同的情况,寻找一种合适的变换就成了该方法的核心问题。由于高频信息是进行高精度拼接的关键信息,在针对拼接干涉仪机械定位精度较高并需要通过算法进一步提高拼接精度的情况中,必须对高频信息加以强化。因此,本文设计了一种先将原图变换成其梯度的幅值图和方向图,再用幅值图作为权重,通过将方向图吻合计算补偿量的新算法。仿真结果表明,该算法可以更好地补偿机械定位误差。实验结果同样验证了该算法的有效性。

## 2 基本原理

针对拼接干涉仪机械定位精度较高的情况,高频的面形信息对于高精度拼接是至关重要的。因此,这部分信息必须被很好地利用。因为梯度很好地表征了局部频率信息的特性(梯度的幅值表征了局部频率的高低,梯度的方向表征了变化的方向),所以将原图转换成其梯度图像,通过使得重叠区域上的梯度差异最小化来确定机械定位误差补偿量的大小。以下以大口径平面的面形测量为例进行介绍。

### 2.1 用原图像进行拼接的算法

由于新算法需要与用原图像进行拼接的算法相比较,这里简单介绍一下用原图像进行拼接的算法。

$W_i(x, y)$  和  $W_j(x, y)$  分别为两相邻子孔径测量所得面形,两子孔径测量所得面形的关系可以表示为<sup>[9]</sup>

$$W_i(x, y) = P + T_x x + T_y y + \Delta x \frac{\partial W_j(x, y)}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial W_j(x, y)}{\partial y} + \Delta \theta \frac{\partial W_j(x, y)}{\partial \theta} + W_j(x, y), \quad (1)$$

式中  $P$  为面形平移系数,  $T_x$  和  $T_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向子孔径倾斜系数,  $\Delta x$  和  $\Delta y$  分别为  $x$  和  $y$  方向子孔径错位系数,  $\Delta \theta$  为子孔径旋转系数。通过(1)式利用最小二乘法就可求出子孔径间的定位补偿量。然后按照此方法进行反复迭代,使计算出的补偿量更加精确。

### 2.2 基于梯度的子孔径拼接新算法

由于利用原图像计算平移和倾斜补偿量是比较方便而准确的,所以,首先利用原图像对平移和倾斜误差进行补偿<sup>[6]</sup>。对平移和倾斜误差进行补偿后,再计算出每个子孔径去平移和倾斜所得图像的梯度幅值图  $N_i(x, y)$  和梯度方向图  $D_i(x, y)$ 。 $D_i(x, y)$  和  $D_j(x, y)$  分别为两相邻子孔径的梯度方向图,两子孔径的梯度方向图的关系可以表示为

$$D_i(x, y) = \Delta x \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial y} + \Delta \theta \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial \theta} + D_j(x, y). \quad (2)$$

高频信息是提高拼接算法精度的关键信息,必须对其加以强化。因此,将重叠点对的梯度幅值之和  $N_i(x, y) + N_j(x, y)$  作为权重,通过(2)式利用加权最小二乘法最小化重叠区域上梯度的不匹配:

$$\begin{aligned}
 f_{\min} = & \sum_{i=2}^{j \cap i} [N_i(x, y) + N_j(x, y)] \left\{ \left[ D_i(x, y) + a_i x + b_i y + c_i + \frac{\partial D_i(x, y)}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial D_i(x, y)}{\partial y} \Delta y_i + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\partial D_i(x, y)}{\partial \theta} \Delta \theta_i \right] - \left[ D_j(x, y) + a_j x + b_j y + c_j + \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial x} \Delta x_j + \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial y} \Delta y_j + \frac{\partial D_j(x, y)}{\partial \theta} \Delta \theta_j \right] \right\}^2 + \\
 & \sum_{k=2}^{k \cap 1} [N_k(x, y) + N_1(x, y)] \left\{ \left[ D_k(x, y) + a_k x + b_k y + c_k + \frac{\partial D_k(x, y)}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial D_k(x, y)}{\partial y} \Delta y_k + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{\partial D_k(x, y)}{\partial \theta} \Delta \theta_k \right] - D_1(x, y) \right\}^2. \quad (3)
 \end{aligned}$$

这样,就求出子孔径间的错位和旋转补偿量。然后按照此方法进行反复迭代,使计算出的补偿量更加精确。基于梯度的子孔径拼接新算法流程为:

- 1) 根据干涉仪口径和测量平面的实际尺寸,对子孔径进行规划;
- 2) 由子孔径的位置计算出子孔径的平移和倾斜补偿量并进行补偿;
- 3) 计算出每个子孔径图像的梯度幅值图  $N_i(x, y)$  和梯度方向图  $D_i(x, y)$ ;
- 4) 将重叠点的梯度幅值之和  $N_i(x, y) + N_j(x, y)$  作为权重,通过(2)式利用最小二乘法对梯度方向图进行拼接,求出子孔径间的错位和旋转

补偿量并进行补偿;

- 5) 重复步骤 2)~4),直至指定的次数;
- 6) 由子孔径的位置计算出子孔径的平移和倾斜补偿量并进行补偿;
- 7) 按照补偿后的定位计算出拼出全口径图像。

### 3 数值模拟

分别对两幅  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的干涉测量面形图[为了具有代表性,一幅峰谷(PV)值较小,一幅 PV 值较大]进行人为分割,再进行拼接。两幅面形图如图 1(a)和(b)所示。

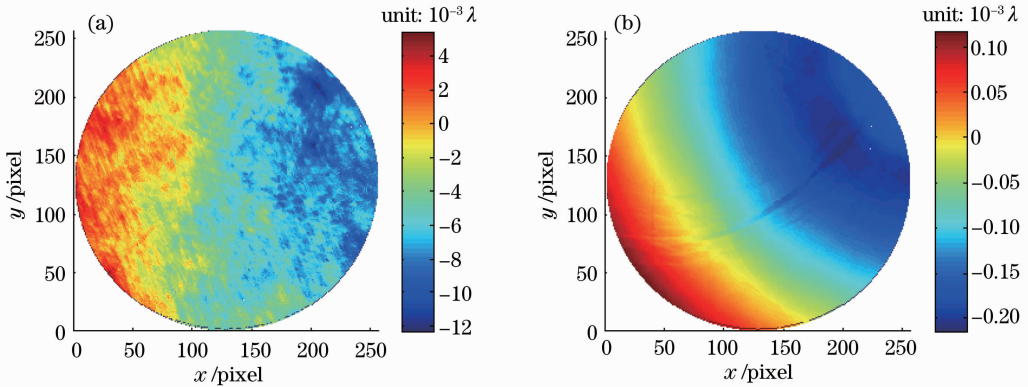


图 1 误差面形图

Fig. 1 Surface error map

为了能较直观地反映出两图的梯度特征,这里分别给出两图的梯度幅值图(图 2)和梯度方向图(图 3)。需要说明的是,梯度的方向是按照其与  $x$  轴的夹角来计算的,范围为  $[0, 2\pi]$ 。当计算梯度方向的差时,并不是简单地直接相减,而是先计算两个梯度方向之间的最小夹角,然后选取正负号。

经过子孔径规划,全口径被划分为 6 个子孔径,每个子孔径的直径为  $170 \text{ pixel}$ (见图 4,小圆表示子孔径,大圆表示全口径)。各子孔径位置如表 1 所示(令中心子孔径圆心位置为原点坐标)。

表 1 子孔径圆心坐标

Table 1 Center coordinates of sub-apertures

Number	1	2	3	4	5	6
$x / \text{pixel}$	0	0	-97	-60	60	97
$y / \text{pixel}$	0	102	31	-82	-82	31

分割好各个子孔径的图像之后,先在每个子孔径的图像上引入在  $[-0.0002, 0.0002] \lambda$  上均匀分布的随机噪声。然后,在每个子孔径(中心子孔径除外)引入在  $[-0.5, 0.5] \lambda / \text{pixel}$  范围的平移和倾斜。接着,在子孔径的圆心位置的  $x, y$  坐标上引入在  $[-0.5, 0.5] \text{ pixel}$  上均匀分布的随机误差,用于模

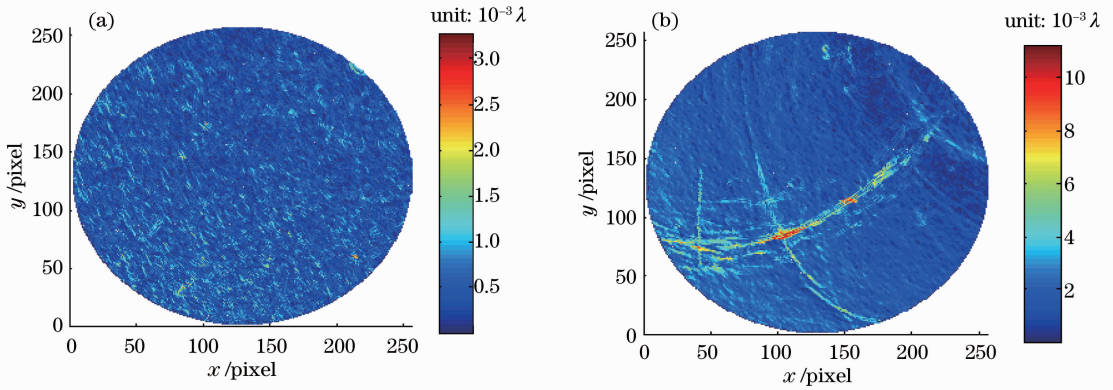


图 2 梯度幅值图

Fig. 2 Gradient norm picture

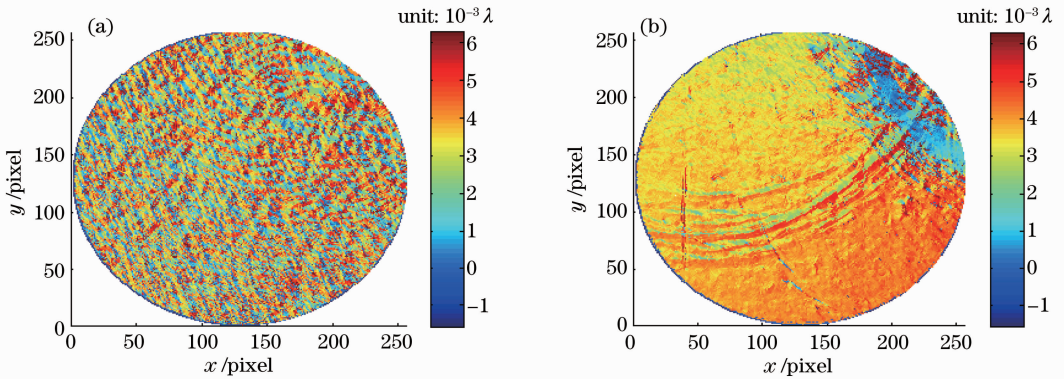


图 3 梯度方向图

Fig. 3 Gradient direction picture

拟子孔径的定位误差。接着,分别根据用原图像进行拼接的算法和基于梯度的子孔径拼接新算法计算定位误差的补偿量(迭代 5 次),并进行补偿。列出补偿后的  $x$ 、 $y$  坐标平均误差(表 2 对应第一个面形图,表 3 对应第二个面形图)以衡量算法的优劣,各进行 5 次仿真,结果分别如表 2、3 所示。用 Original 代表用原图像进行拼接的算法,用 New 代表基于梯度的子孔径拼接新算法。

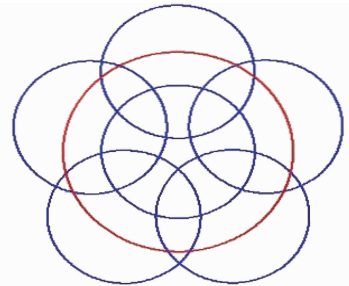


图 4 子孔径规划

Fig. 4 Layout of sub-apertures

表 2 子孔径的定位平均误差(第一个面形图)(单位: pixel)

Table 2 Mean location error of sub-aperture (the first surface) (unit: pixel)

Simulation	1	2	3	4	5
Initial error	0.2500813	0.2715764	0.2660521	0.2440978	0.2240877
Original	0.2457419	0.2286995	0.2382313	0.2188534	0.2078551
New	0.1748770	0.2039693	0.1914135	0.1350735	0.1648352

表 3 子孔径的定位平均误差(第二个面形图)(单位: pixel)

Table 3 Mean location error of sub-aperture (the second surface) (unit: pixel)

Simulation	1	2	3	4	5
Initial error	0.2203061	0.2569451	0.2660439	0.2453825	0.1836838
Original	0.2023282	0.1365131	0.2037501	0.1383671	0.0735116
New	0.0172663	0.0672513	0.0447497	0.0358570	0.0292946

从表 2 和 3 中不难看出,在这几次数值模拟中,基于梯度的子孔径拼接新算法明显好于用原图像进行拼接的算法(第一幅图中,新算法比原算法提高了 23.6%;第二幅图中,新算法比原算法提高了 74.2%);由于第二幅图的梯度特征较为明显(见图 2 和图 3),基于梯度的子孔径拼接新算法效果较第一幅图好些。

#### 4 实验验证

用 100 mm 口径的拼接干涉仪对 150 mm 口径的平面镜进行测量,子孔径规划如图 4 所示。对一个平面[面形 PV 值  $f_{PV}=0.092\lambda$ ,均方根(RMS)值  $f_{RMS}=0.020\lambda$ ]分别采用直接拼接、定位补偿算法(基于梯度的子孔径拼接新算法)拼接和使用 200 mm 的大口径干涉仪进行全口径直接测量得到面形图,结果分别如图 5~7 所示。

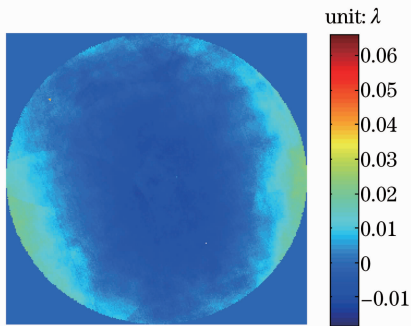


图 5 直接拼接  
Fig. 5 Directly stitched

可以明显地看到,在直接拼接的结果上有拼接的痕迹,而用定位补偿算法(基于梯度的子孔径拼接新算法)拼接的结果没有明显的拼接痕迹,后者好于前者。事实上,以全口径测量的结果为标准,进行残差

的计算,前者[图 8(a)]的 RMS 值为  $0.0032173\lambda$ ,后者[图 8(b)]的 RMS 值为  $0.0029327\lambda$ ,后者好于前者(由于个别坏点的存在,使得拼接图中个别像素的测量值的幅值过大,用定位补偿算法进行拼接后残差的 PV 值较大。而直接拼接的结果由于存在相对平移和倾斜的失调量,使得前者偶然地部分补偿了个别坏点,故残差的 PV 值比定位补偿算法好)。因此,实验验证了算法的有效性。

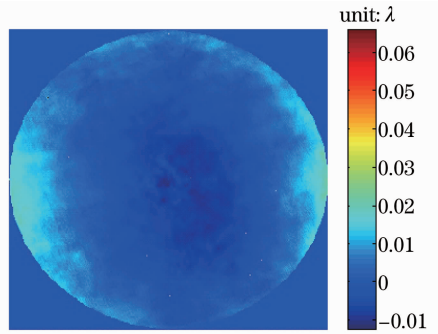


图 6 定位补偿算法拼接  
Fig. 6 Stitched by location compensation algorithm

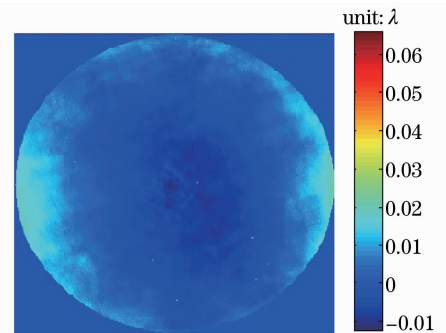


图 7 全口径直接测量结果  
Fig. 7 Full-aperture direct testing result

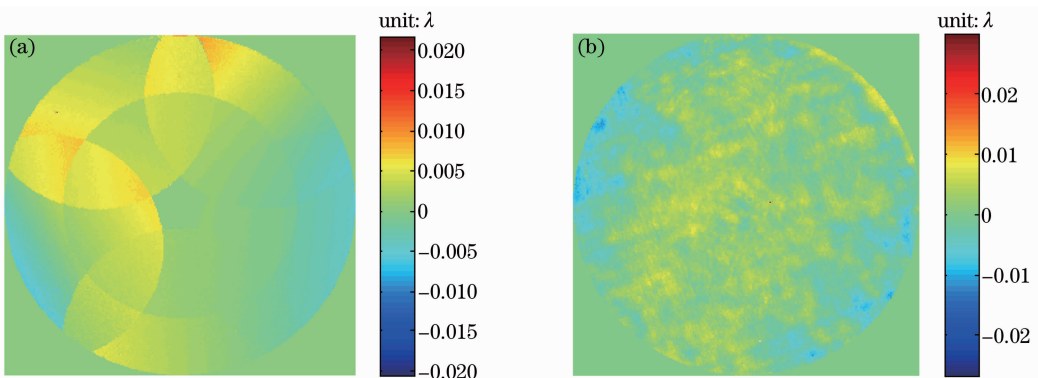


图 8 残差图  
Fig. 8 Residual error picture

## 5 结 论

提出了基于变换的子孔径拼接算法的新思想,设计了一种基于梯度拼接的新算法,目的是为了提  
高拼接算法的精度。模拟计算表明,在一定的条件  
下新算法的确能够提高拼接精度。以全口径测量为  
标准,实验验证了算法的有效性。对于针对各种情  
况下应该采取什么样的变换比较好,是下一步的研  
究方向。

## 参 考 文 献

- 1 He Yingwei, Li Ping, Feng Guojing, *et al.*. Analysis of a sub-aperture scanning machine with double-rotating arms for large-aperture optical system transmittance measurements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0112004.  
赫英威, 李平, 冯国进, 等. 大口径光学系统测试用双回转子孔径扫描装置设计与误差分析 [J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0112004
- 2 Han Juan, Duan Jiayou, Chen Jianjun, *et al.*. An alignment of primary and secondary mirrors for optical system in large telescopic [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0716001.  
韩娟, 段嘉友, 陈建军, 等. 大口径望远系统中主次镜系统的装调方法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0716001.
- 3 C J Kim. Polynomial fit of interferograms [J]. *Appl Opt*, 1982, 21(24): 4521—4525.
- 4 Wang Yuezhu, Tian Yi, Li Hongyu, *et al.*. Sub-aperture stitching interference measurement method based on marker location and global optimization [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(5): 83—87.  
王月珠, 田义, 李洪玉, 等. 基于标记点的子孔径全局优化拼

- 接检测方法 [J]. *光电工程*, 2009, 36(5): 83—87.
- 5 P Zhang, H Zhao, X Zhou, *et al.*. Sub-aperture stitching interferometry using stereovision positioning technique [J]. *Opt Express*, 2010, 18(14): 15216—15222.
- 6 M Otsubo, K Okada, J Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shape with interferometric aperture synthesis [C]. *SPIE*, 1992, 1720: 444—447.
- 7 M Otsubo, K Okada, J Tsujiuchi. Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture [J]. *Opt Eng*, 1994, 33(2): 608—613.
- 8 Wang Lihua, Wu Shibin, Ren Ge, *et al.*. Location error compensation algorithm for measure optical system wave front [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112003.  
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.
- 9 Donald Golini, Greg Forbes, Paul Murphy. Method for Self-Calibrated Subaperture Stitching for Surface Figure Measurement [P]. *US Patent*: 6956657B, [2005-10-18].
- 10 M Sjö Dahl, B F Oreb. Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components [J]. *Opt Eng*, 2002, 41(2): 403—408.
- 11 S Chen, S Li, Y Dai, *et al.*. Iterative algorithm for subaperture stitching test with spherical interferometers [J]. *J Opt Soc Am A*, 2006, 23(5): 1219—1226.
- 12 Ding Lingyan, Dai Yifan, Chen Shanyong. Experiments of sub-aperture stitching interferometry for flat mirrors [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2008, 16(6): 979—985.  
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): 979—985.
- 13 S Chen, S Li, Y Dai, *et al.*. Experimental study on subaperture testing with iterative stitching algorithm [J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 4760—4765.

栏目编辑: 何卓铭