

doi:10.3788/gzxb20134208.0943

基于权重的子孔径拼接优化算法研究

田爱玲¹, 吴世霞¹, 刘丙才¹, 张鹏飞²

(1 西安工业大学 陕西省薄膜与光学检测技术重点实验室, 西安 710032)

(2 Optical Bioimaging Lab, National University of Singapore Singapore 117574)

摘 要: 为了提高大口径光学元件面形拼接检测准确度, 减少传统子孔径拼接算法带来的误差传递和积累, 并在原有全局优化拼接算法的基础上引入权重系数, 使全口径内各相邻子孔径之间的重叠区域达到最优匹配, 使拼接误差最小化. 利用该优化算法对平面进行了多孔径拼接仿真模拟, 在此基础上对 150mm 口径的平面镜进行了实验, 并提出基于图像边缘轮廓特征提取的子孔径定位新方法, 分析了影响拼接误差的因素. 仿真和实验结果均证明了基于权重的全局优化拼接算法的有效性和可行性.

关键词: 光学面形检测; 子孔径拼接; 全局优化算法; 大口径光学元件

中图分类号: TH744

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)08-0943-7

Global Optimization Algorithm of Sub-aperture Stitching Weight Coefficients

TIAN Ai-ling¹, WU Shi-xia¹, LIU Bing-cai¹, ZHANG Pei-fei²

(1 Shaanxi Province Key Lab of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

(2 Optical Bioimaging Lab, National University of Singapore Singapore, 117574)

Abstract: In order to obtain the whole lens' precision surface information and reduce its errors transfer and accumulation, a new global optimization stitching algorithm based on weight coefficient is presented. The common region of the two neighborhood sub-aperture can reach the optimal match and the stitching error is minimized by using this algorithm. The multi-apertures stitching simulation is carried out, and an actual experiment is carried to the flat lens of 150 mm. A new sub-aperture position method based on the image edge contour feature extraction is introduced and the error factors are analyzed for stitching. Both the simulation and the experiment results show that this global optimization stitching algorithm is good for reducing the transfer and accumulation error, which exist in the traditional method, and realizing the high precision sub-aperture stitching measurement.

Key words: Optical surface shape test; Sub-aperture stitching; Global optimization algorithm; Large-aperture optical components

0 引言

子孔径拼接干涉检测技术最早是在 1982 年由美国 Arizona 光学中心的 C. J. Kim^[1]提出的, 到现在已经经过 30 多年的发展. 实现了从最初的实验室研究转入商业化仪器研制的阶段. 在国内, 该技术的研究始于 20 世纪 90 年代初. 上海科技大学^[2]、南京

理工大学^[1]等单位较早地开展了相关工作. 90 年代中后期, 浙江大学^[3]用该技术检验了某资源卫星的里奇-克莱琴(Ritchey-Chretien, RC)光学系统. 此外, 四川大学、成都光学精密工程研究中心、长春光学精密机械与物理研究所、南京航空航天大学、中国科学院国家天文台、南京天文光学技术研究所、中科院光电技术研究所、长春理工大学^[5~11, 1]等单位的科

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51075322)和陕西省教育厅项目(No. 12JS048)资助

第一作者: 田爱玲(1964—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学加工与检测、精密检测. Email: tian21964@sohu.com

通讯作者: 吴世霞(1986—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学检测. Email: wsx0626@126.com

收稿日期: 2013-02-20; 录用日期: 2013-04-22

研人员也都对子孔径拼接检测大口径光学元件进行了一定的研究.但是与子孔径拼接检测技术产品化、工程化相比还有一定的距离.

拼接测量准确度是子孔径拼接测量方法首要关心的问题.而影响拼接测量准确度的关键是子孔径拼接算法.为了提高拼接算法的准确度和可靠性,本文在综合分析了现有拼接算法优劣的前提下,以全局拼接算法为基础,借鉴双目标函数线性组合的思想,对全局优化拼接算法进行了改进,提出了一种基于权重系数的全局优化拼接新算法.即在原有目标函数的基础上引入权重系数,通过调节权重系数优化拼接结果.同时,本文还采用了基于图像边缘轮廓特征的新定位方法^[4],通过边缘检测法对图像轮廓特征进行提取,然后再对提取到的图像轮廓进行特征配准,进而确定重叠位置.利用这种方法提取的图像轮廓分辨率高,使定位误差缩小到单个像素范围内.并且采用这种定位方法还可避免因过分追求检测准确度而一味提高机构运动准确度带来的成本增加问题.

1 子孔径拼接原理

子孔径拼接基本原理是利用小口径高准确度的干涉仪,用干涉方法分别检测大口径光学元件的一部分,在完成全口径测量后,再利用拼接算法消除各子孔径间相对的平移和倾斜误差,最后将这些子孔径数据统一到同一个坐标系中^[5-6],从而恢复出全口径的面形.设检测的全口径上有 N 个子孔径,每个子孔径区域记为 $S_i (i=1, \dots, N)$,任意两个相邻的子孔径重叠区个数为 M .建立以全口径中心为坐标原点的全局坐标系,则在全局坐标系下,测量得到的第 i 个子孔径的面形数据可表示为

$$W_i(x, y) = P_i + T_{xi}x + T_{yi}y + W_{0i}(x, y) \quad (1)$$

式中: P_i 、 T_{xi} 和 T_{yi} 分别表示第 i 个子孔径相对于全口径坐标 z 方向的平移系数和 x 、 y 方向的倾斜系数, $W_{0i}(x, y)$ 为第 i 个子孔径的理想波前.

对于任一子孔径重叠区域 $j (j \in M)$, 设其误差 δ_j 来自任意一对子孔径 m 和 n , 即

$$\delta_j = W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y) - (P_{mj} - P_{nj}) - x(T_{x_{mj}} - T_{x_{nj}}) - y(T_{y_{mj}} - T_{y_{nj}}) \quad (2)$$

对全口径重叠区域的采样数据建立了误差函数,利用最小二乘法使其相位差的平方和最小,文献^[12]给出了此算法的详细描述,即

$$V = \sum_{i=1}^M \{ W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y) - (P_{mj} - P_{nj}) - x(T_{x_{mj}} - T_{x_{nj}}) - y(T_{y_{mj}} - T_{y_{nj}}) \}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

理论上,根据重叠区域的采样数据寻求使该目

标函数达到最小的所有误差向量,然后消除这些误差,就可实现大口径光学元件的检测.但近几年的研究结果显示,该拼接算法并不能很好地消除这些误差致使检测准确度降低.本文分析了各子孔径测量误差对拼接结果的影响,在式(3)的基础上,借鉴双目标线性组合的概念,引入了权重的思想,通过调节权重系数 μ_1 和 μ_2 实现全局优化拼接,提高拼接准确度.新构建的目标函数为

$$\begin{aligned} \min V = & \mu_1 \sum_{j=1}^M \iint [W_{mj}(x, y) - W_{nj}(x, y) - (P_{mj} - \\ & P_{nj}) - x(T_{x_{mj}} - T_{x_{nj}}) - y(T_{y_{mj}} - T_{y_{nj}})]^2 \\ & dx dy + \mu_2 \sum_{i=1}^N \iint [W_i(x, y) - P_i - T_{xi}x - T_{yi}y]^2 \cdot \\ & dx dy \end{aligned} \quad (4)$$

式中, μ_1 、 μ_2 为正的权重系数,且 $\mu_1 + \mu_2 = 1$. $u_1 < 1$, $u_2 < 1$,合理地选择权重系数可实现子孔径之间平移和倾斜误差的最优化补偿,得到高准确度的全口径检测结果.

式(4)是在文献^[3]的基础上对该算法进行的拓展研究,研究了不同权重系数对拼接结果的影响.其中第一项表示全口径内所有重叠区域数据点的差值平方和,使第一项最小表明全口径内各相邻子孔径重叠区域的匹配程度最好;第二项表示全口径内所有子孔径数据点的平方和,使第二项最小则表明全口径的相位数据整体最小.这样就可避免因过分追求重叠区域的匹配程度造成的全口径拼接结果的峰谷值(Peak Value, PV)增大.

2 计算机仿真与检测实验

为了验证改进的全局优化算法的有效性,进行了基于此新拼接算法的数学仿真实验验证.由于仿真实验不受环境因素、干涉仪随机误差和实验平台机械定位误差等因素的影响,因此可以真实反应该算法的有效性.

2.1 平面拼接仿真

在拼接实验中,子孔径排列模式对拼接结果有直接影响.因此,在规划子孔径排列模式时,既要保证相邻子孔径间有足够的重叠区域,又要尽量减少子孔径数目以降低数据处理难度.本文选择如图1所示的子孔径排列模式,既能满足拼接检测要求,又降低了对检测平台机械设计的难度.假设仿真的被测平面的直径为 310 mm,共划分为 19 个口径 100 mm 的子孔径.其中子孔径按检测顺序编号.面形的干涉拼接检测中有两个坐标系,一个是以全口径中心为原点的全局坐标系,一个是以子孔径中心为原点的子孔径坐标系.除了坐标系的原点不同外,

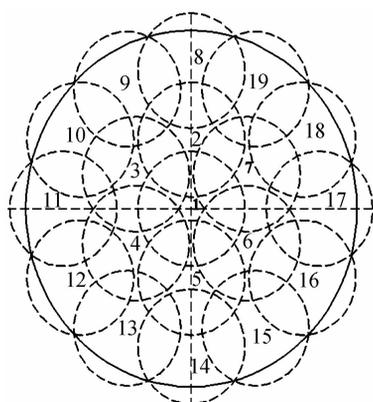


图 1 子孔径排列模式
Fig. 1 Layout of sub-apertures

两个坐标系的 x, y 轴是相互平行的. 为了模拟实际拼接检测中的误差, 分别在各子孔径模拟数据中加上 X, Y 方向倾斜和 Z 方向平移误差. 图 2(a) 是没有经过优化算法处理的子孔径数据直接叠加的结果, 图 2(b) 是采用两两拼接算法得到的拼接结果, 图 2(c) 为采用均化误差拼接算法得到的拼接结果. 很明显, 图 2(a) 拼接后各子孔径之间有明显的 mismatch, 拼接误差很大. 而图 2(b) 和图 2(c) 的拼接误差相对也比较大 (本文假设模拟的全口径平面无限接近理想平面, $PV=1.9102e-8\lambda$, 均方根值 (Root-Mean-Square Value, RMS) = $4.7803e-9\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$).

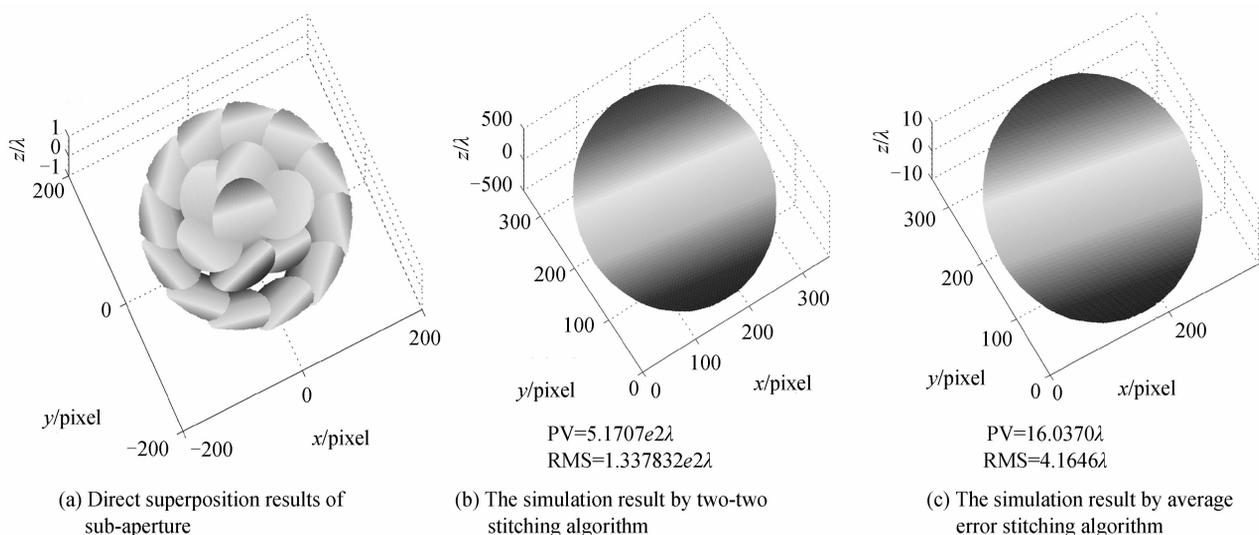
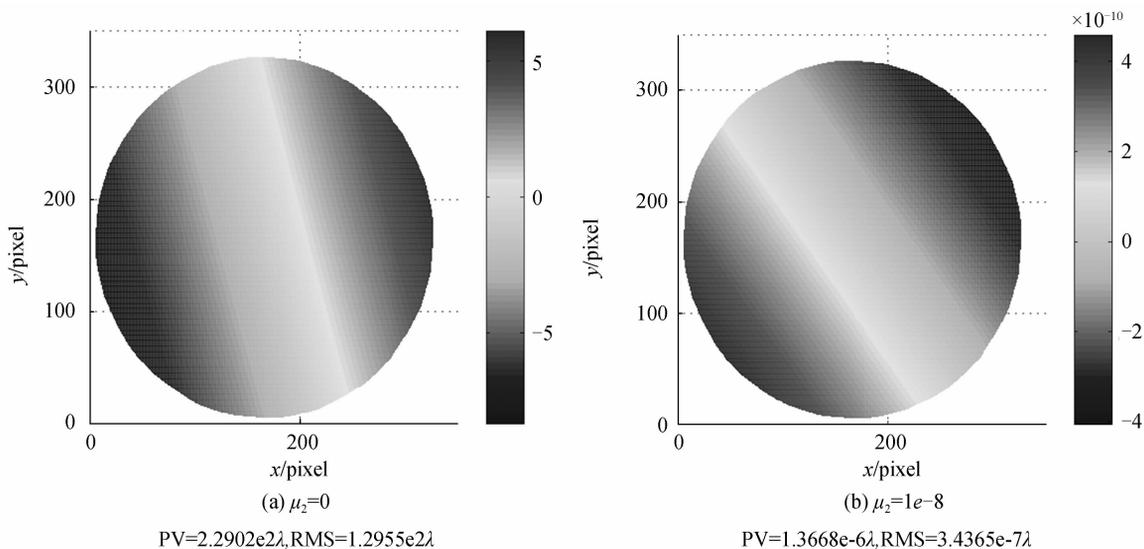


图 2 不同拼接算法下的拼接结果
Fig. 2 The stitching results under different stitching algorithm

采用改进的优化拼接算法对子孔径数据进行拼接计算时, 首先讨论目标函数中两个权重系数对拼接结果的影响. 分别取 $\mu_2=0, 1e-8, 1e-6$ 和 $1e-4$, $\mu_1=1-\mu_2$, 通过调整权重系数 μ_1 和 μ_2 可以补偿所有子孔径之间的平移和倾斜误差. 图 3 为不同权

重系数下的拼接结果. 可以看出, 当 $\mu_2=0$ 时是改进前的目标函数拼接算法, 其拼接结果比较光滑, 但 PV 和 RMS 相对理想平面存在明显的偏差. 随着 μ_2 的增加, 拼接结果得到优化, 其 PV 和 RMS 表现出逐渐减小的趋势, 如图 3(b)~(c). 当 $\mu_2=1e-6$ 时



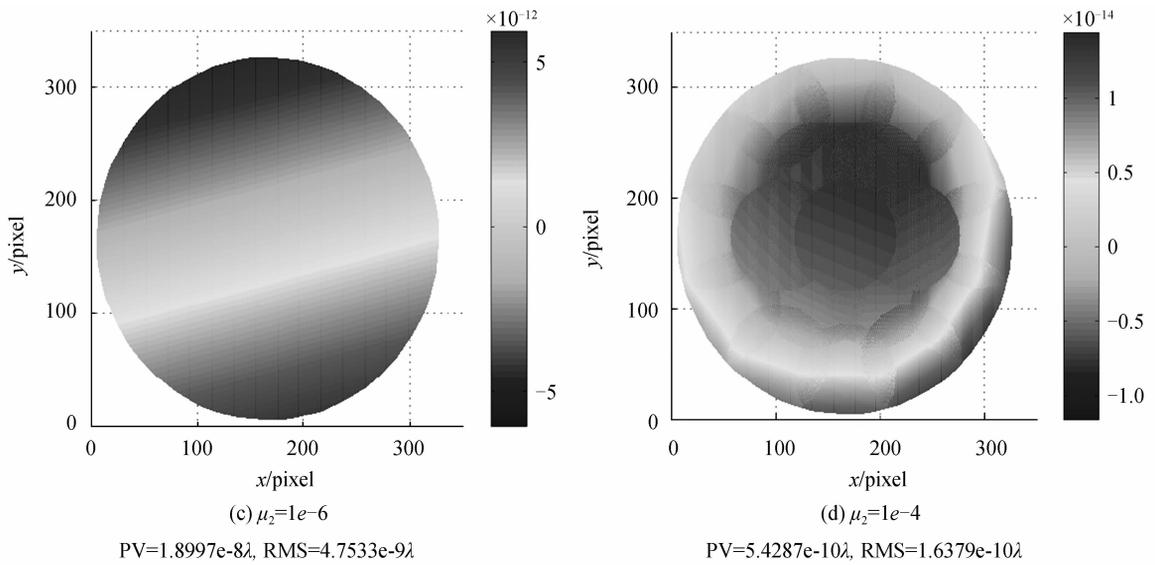


图3 不同权重系数下的拼接结果

Fig. 3 The stitching results under different weight coefficient

达到理想拼接结果,其 $PV=1.8997e-8\lambda$, $RMS=4.7533e-9\lambda$. 与模拟的全口径面形的 PV 和 RMS 值等数量级,偏差 $\Delta PV=0.0105e-8\lambda$, $\Delta RMS=0.027e-9\lambda$. 由此可以看出,基于权重系数的优化拼接算法有效的提高了拼接准确度. 但是,当 μ_2 无限增大时,拼接结果出现明显的子孔径痕迹,拼接误差反过来又增大,如图 3(d). 这是因为该算法是利用重叠区域的数据来消误差,而在 $\mu_2=1e-4$ 的情况下,子孔径本身的相位值占的权重比较大,因此求取的误差系数会使误差越消越大,出现拼接痕迹. 因此,在实际拼接实验中权重系数越小越好,这样可以得到理想的拼接结果,提高检测准确度.

2.2 平面拼接检测实验

为了进一步验证该拼接算法的可行性,进行了实测对比实验. 实验所用的待测元件为 150 mm 的平面光学元件,干涉仪为美国 Zygo 公司的 GPI XP 干涉仪,口径 100 mm,可扩展至 150 mm. 实验中沿

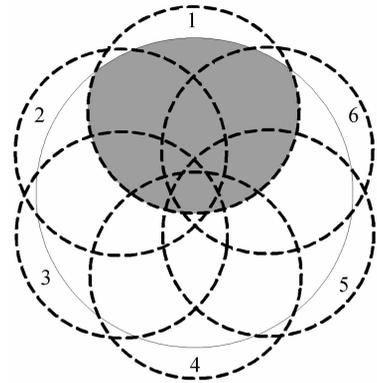


图4 子孔径分布示意图

Fig. 4 Distribution diagram of sub-aperture

用仿真实验中的子孔径排列模式,图4为6个子孔径分布示意图. 其中相邻子孔径的重叠面积达 40%,子孔径的测量顺序为 1 2 3 4 5 6 1.

首先,用未扩展的干涉仪对被测件进行子孔径检测,图 5 为测量得到的各个子孔径的面形数据;然

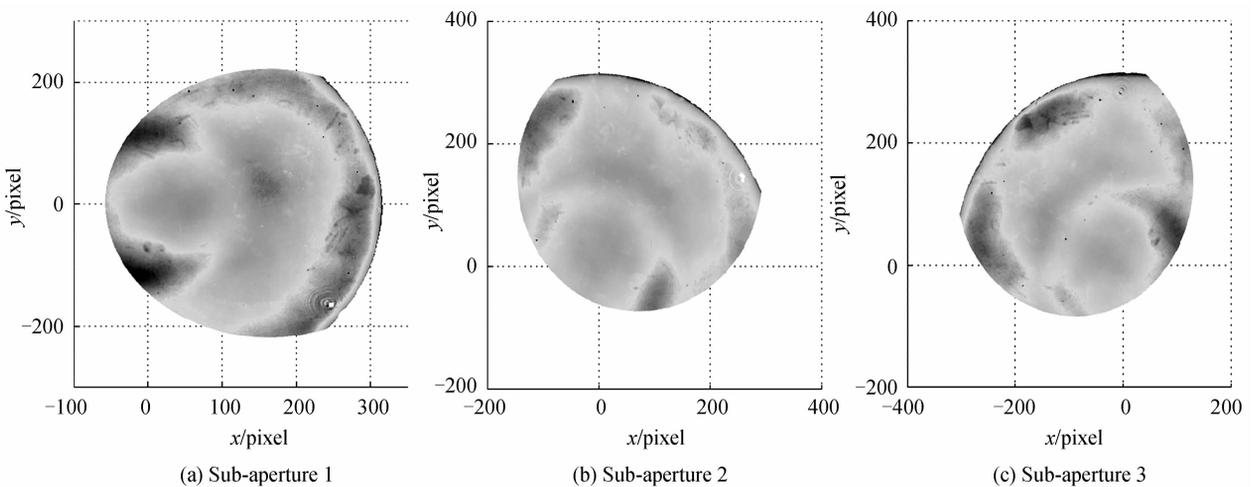
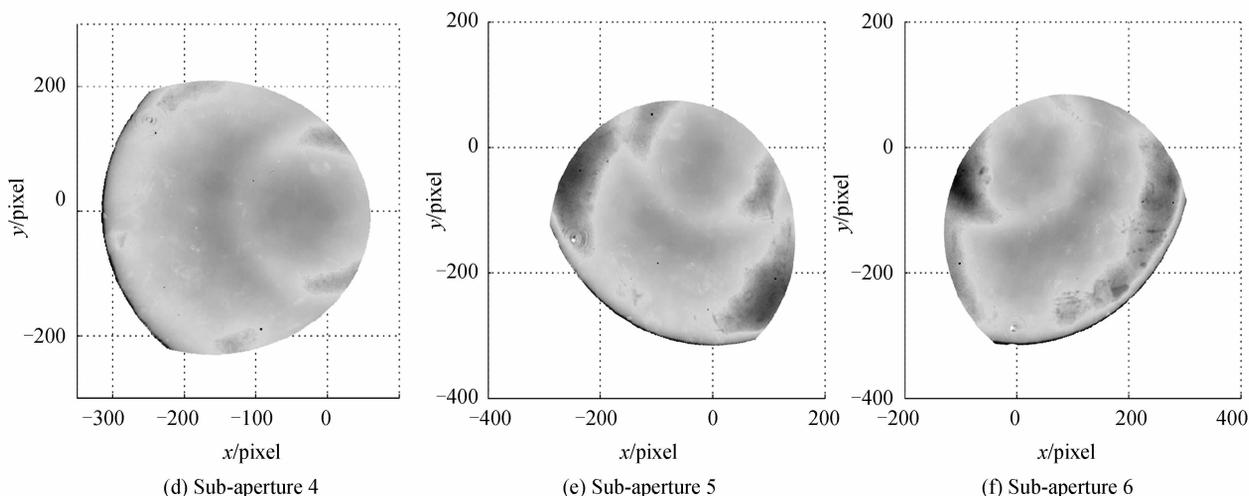


图5 各子孔径实验检测结果

Fig. 5 Result of sub-aperture measurement



后根据文中提出的改进的拼接优化算法求出各子孔径之间的相对平移和倾斜误差系数,并进行消误差处理;最后将其统一到全局坐标系下,通过波面拟合得到全口径重建面形.图 6(a)为利用优化拼接算法对子孔径数据进行拼接的结果,其中 $PV=0.152\lambda$, $RMS=0.02748\lambda$.

图 6(b)为用扩展干涉仪多次全口径检测的平均结果,其中 $PV=0.155\lambda$, $RMS=0.028\lambda$.将拼接检测结果和全口径检测结果在对应像素上进行点对点的对比,面形误差如图 7 所示.其中 PV 和 RMS 分别为 $\Delta PV=0.003\lambda$ 和 $\Delta RMS=0.00052\lambda$.对比实验结果表明,本文给出的平面子孔径拼接检测技术是可行的,可以代替大口径干涉仪直接检测光学元件.

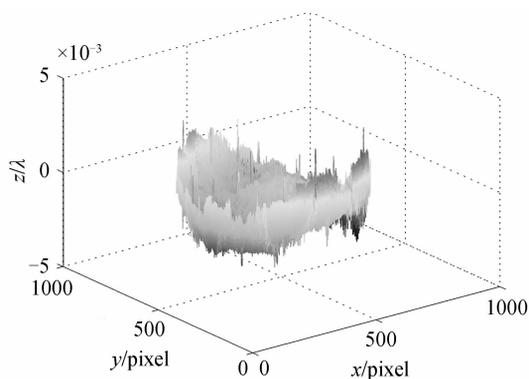


图 7 面形误差图

Fig. 7 Residual error between directed tested and stitched wavefront

3 误差分析与修正

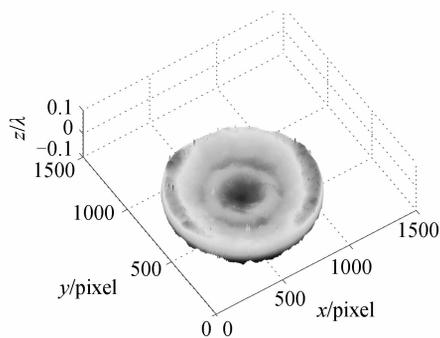
在利用干涉仪检测光学元件时,由于受机械运动和外界环境因素的影响,将引入许多不确定的误差^[13].这里主要讨论随机误差和定位误差.

3.1 随机误差

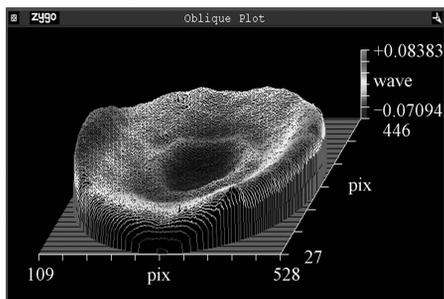
在子孔径拼接检测中,需要通过旋转和平移被测镜才能完成全口径的测量.在移动被测镜的过程中,由于机械运动误差会导致干涉仪与被测镜的光轴不严格平行,因此会在各个子孔径之间产生相对平移和倾斜误差^[7].另外,由于每个子孔径是独立检测的,各子孔径测量时引入的相对倾斜和平移均不同.在拼接处理中,虽然单个子孔径测量时的倾斜和平移误差很微小,但是对最终拼接结果的影响是不可忽略的,主要体现在对 PV 值的影响.所以,在对全口径数据拼接处理前,需对单个子孔径得到的数据进行消倾斜和平移处理,减少随机误差.

首先,将测量得到的子孔径数据进行 Zernike 多项式拟合^[14],即

$$\sum_{n=1}^N a_n Z_n(x_i, y_i) = W(x_i, y_i) \quad (5)$$



(a) Optimized stitched result of 3D



(b) Result of whole aperture test of 3D

图 6 平面镜测试结果
Fig. 6 Plane mirror test results

$$\sum_{i=1}^M \left[\sum_{n=1}^N a_n Z_n(x_i, y_i) - W(x_i, y_i) \right]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

式中, N 为 Zernike 多项式项数, M 为子孔径内的采样点总数, a_n 为第 n 项 Zernike 系数, $Z_n(x_i, y_i)$ 为 Zernike 多项式的各项, $W(x_i, y_i)$ 为子孔径坐标系下的相位. 通过公式(6)的拟合处理得到 Zernike 系数 a_n , Zernike 函数的前三项分别对应沿 z 轴平移和 x 、 y 方向的倾斜. 因此, 利用拟合的 Zernike 多项式消除平移和倾斜误差. 然后对消误差后的各子孔径数据进行拼接计算, 得到精确的全口径检测结果.

另外, 干涉仪在具体实验中, 因受空气振动、气流扰动等的影响, 其检测重复性下降(随机误差增加), 环境温度、重力和装卡应力等也会影响参考平面的面形准确度(系统误差增加). 因此, 检测前需先对干涉仪进行校准, 以保持干涉仪良好的工作状态. 本文采取子孔径多次测量取平均的方法, 减少单次测量中粗大误差的引入, 提高检测准确度.

3.2 子孔径定位误差

在子孔径拼接检测技术中, 子孔径定位误差^[15]是影响拼接准确度的另一重要因素. 为了提高拼接准确度, 降低对移动平台的机械准确度要求, 本文采用一种特殊的定位方法, 即基于图像处理的边缘检测技术, 定位准确度误差小于 0.05 像素.

如图 4 所示的子孔径分布, 由于每个子孔径都含有被测镜边缘, 因此, 可以利用提取图像边缘对子孔径中心进行定位. 首先, 对干涉仪得到的各子孔径数据进行处理, 由各子孔径的边缘求取子孔径的中心坐标, 进而获得各子孔径中心在全口径中的坐标位置及其相对旋转角度; 其次, 通过文中提出的改进的拼接算法对子孔径数据进行消误差处理. 最后将其统一到全局坐标系下, 拼接重建连续波面, 恢复全口径波面形状. 但是, 受机械和干涉仪本身误差因素的影响, 每次子孔径测量的位置与理想位置总是存在偏差. 为了子孔径定位准确, 必须求取各子孔径中心的精确坐标. 如图 8 所示, 首先建立以被测镜中心

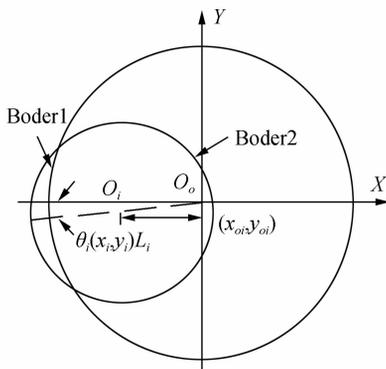


图 8 子孔径定位原理图

Fig. 8 Sub-aperture position schematic diagram

O_o 为原点的全局坐标系, 以及以第 i 个任意子孔径中心 O_i 为原点的子孔径坐标系, θ 是实测时第 i 个子孔径位置与子孔径理想位置的夹角偏差(图 8 假设子孔径的理想中心位置在 x 轴上). 拼接检测的关键是计算子孔径 O_i 在全局坐标系 O_o 中的位置坐标. 设第 i 个子孔径的中心点坐标为 (x_i, y_i) , 被测镜中心 O_o 在第 i 个子孔径中的坐标为 (x_{oi}, y_{oi}) , 则第 i 个子孔径中心到被测镜中心的实际距离 L_i 和第 i 个子孔径相对第一个子孔径需要旋转的实际角度 γ_i 为

$$\begin{cases} L = \sqrt{(x_i - x_{oi})^2 + (y_i - y_{oi})^2} \\ \gamma_i = (i-1)\varphi \pm \underbrace{\arctan \frac{y_i - y_{oi}}{x_i - x_{oi}}}_{\theta_i} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\varphi = 2\pi/N$, 是理论上子孔径检测每次需要被测镜旋转的角度, 即相邻子孔径之间的夹角, N 是子孔径个数.

通过上述式(7), 可以得到各个子孔径的准确定位坐标, 然后将各子孔径数据转换到全口径坐标系下, 得到全口径重建波面. 这种定位方法既提高了拼接检测准确度, 又降低了实际检测中对机械定位准确度的要求, 减少了机械系统成本.

4 结论

本文提出了一种改进的基于权重系数的拼接检测优化算法, 通过仿真分析和实验研究两方面对该算法的有效性和检测准确度进行了分析论证. 研究结果表明, 这种改进的优化算法是有效的, 可以得到高准确度的拼接结果. 此外, 本文提出了基于图像边缘轮廓检测的新子孔径定位方法, 实现了子孔径的高准确度定位. 同时, 这种方法降低了对检测平台机械定位准确度的要求, 降低了系统的成本.

参考文献

- [1] HOU Xi, WU Fan, YANG Li, *et al.* Status and development trend of sub-aperture stitching interferometric testing technique[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(3): 50-53.
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.
- [2] GUO Hong-wei, CHEN Ming-yi. An iterative algorithm of multi-aperture transformation and connection technique in cylindrical coordinates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1047-1052.
郭红卫, 陈明仪. 圆柱坐标系下的多孔径扫描拼接技术的迭代方法[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1047-1052.
- [3] LIU Jun, SHU Xiao-wu, BAI Jian, *et al.* Reserch on technique of large aperture-digital wavefront test[J]. *Optical Instruments*, 2003, **25**(06): 3-7.
刘军, 舒晓武, 白剑, 等. 大口径数字波面检测技术的研究[J]. *光学仪器*, 2003, **25**(06): 3-7.
- [4] ZHANG P, ZHAO H, LIU B, *et al.* Simple method for the

- implementation of subaperture stitching interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(9): 095601-095601-8.
- [5] ZHANG Rong-zhu, SHI Qi-kai, CAI Bang-wei, *et al.* Study on the experiments of the stitching interferometer[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(02): 173-175.
张蓉竹,石琪凯,蔡邦维,等.子孔径拼接干涉检测实验研究[J]. *光学技术*, 2004, **30**(02): 173-175.
- [6] ZHU Li-ming. The research on the testing methods of aspheric mirror based on sub-aperture stitching[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
朱黎明.基于子孔径拼接的非球面检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] ZHANG Ming-yi, LI Xin-nan. Influence of tilt in stitching Interferometry and how to eliminate it[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(08): 117-122.
张明意,李新南.子孔径拼接检验法中倾斜的影响及消除方法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(08): 117-122.
- [8] LI Xin-nan, ZHANG Ming-yi. Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plano-optics[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(04): 514-517.
李新南,张明意.大口径光学平面的子孔径拼接检验研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(04): 514-517.
- [9] WANG Li-hua, WU Shi-bin, HOU Xi, *et al.* Measurement of flat wavefront by sub-aperture stitching interferometry[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(06): 126-130.
汪利华,吴时彬,侯溪,等.子孔径拼接干涉检测大口径平面波前[J]. *光电工程*, 2009, **36**(06): 126-130.
- [10] WANG Xiao-kun, ZHENG Li-gong, ZHANG Xue-jun, *et al.* Testing an off-axis asphere by subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(01): 92-97.
王孝坤,郑立功,张学军,等.子孔径拼接干涉检测离轴非球面研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(01): 92-97.
- [11] YUN Yu, PENG Yong, TIAN Xiao-qiang, *et al.* Large aperture optical components test based on sub-aperture stitching[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(07): 1831-1834.
云宇,彭勇,田小强,等.基于子孔径拼接原理检测大口径光学元件[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(07): 1831-1834.
- [12] BURGE J H, ZHAO C. Applications of subaperture stitching interferometry for very large mirrors[C]. *SPIE*, 2012, **8450**: 84500X-1~10.
- [13] SU P, BURGE J H, PARKS R E. Application of maximum likelihood reconstruction of sub-aperture data for measurement of large flat mirrors[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(1): 21-31.
- [14] HOU X, WU F, YANG L, *et al.* Full-aperture wavefront reconstruction from annular subaperture interferometric data by use of Zernike annular polynomials and a matrix method for testing large aspheric surfaces[J]. *Applied optics*, 2006, **45**(15): 3442-3455.
- [15] YANG Peng-qian, HIPPLER Stefan, YAN Zhao-jun, *et al.* Surface figure measurement of flat mirrors based on the sub-aperture stitching interferometry[C]. *SPIE*, 2012, **8417**: 841723-1~6.