

误差均化的拼接技术

李国培, 于瀛洁, 陈明仪

(上海大学 精密机械工程系, 上海 200072)

摘要: 利用相关拼接技术实现光学波面检测, 可以用较小的测量口径实现较大面积的测量, 并保持高的测量精度、高的空间分辨率和系统的低成本。获得高精度的子孔径波面分布和有效的拼接方法是这一技术的关键。最简单的两两拼接的方法由于在拼接过程中存在误差积累, 对全孔径拼接精度有很大的影响。采用误差均化的拼接方法, 要求所有拼接区中相差值的平方和同时达到最小。从本质上看, 这是一种并行算法。给出了在平面直角坐标系下误差均化拼接的数学模型和求解方法, 进行了计算机仿真。结果证明该方法是切实有效的。

关键词: 光学波面检测; 拼接技术; 误差均化
中图分类号: TG806 **文献标识码:** A

1 引言

相关拼接技术是根据物体的相同区域具有相同信息这一边界条件产生的, 基本思想是在拼接区提取相关信息将多次测量结果拼接起来, 得到被测物体的全部信息^[1]。这种相关拼接测量技术, 对扩大空间测量范围、保持高空间分辨力、高测量精度和低成本有重要意义。

现在商业化的干涉仪很容易达到 0.2mm 的像素尺寸, 而大尺寸干涉仪仅能达到 1.2mm~1.6mm。由采样定理可知, 不可能得到小于 2.4mm~3.2mm 周期变化的面形, 而对于有些光学元件, 同时得到中、低周期变化, 尤其是 1mm~10mm 是非常必要的。就此而言拼接干涉仪是有优势的。同时, 拼接干涉仪对测量中的温度变化、环境振动等的抑制能力比标准尺寸的干涉仪要好^[2]。因此, 目前国内外除了采用可调谐半导体激光器作为光源研制大尺寸干涉仪外, 也同时在积极研制拼接干涉仪。

最早提出的相关拼接模型是基于齐次坐标变化, 利用这种拼接模型做了很多工作, 取得了一些积极成果^[3]。进一步, 又引入了映射的概念, 提

出了圆柱坐标系下对回转体的拼接模型^[4]。这种模型更符合拼接的物理意义。这些模型采用了两两拼接的方法, 由于在拼接过程中存在误差积累, 对全孔径拼接精度有很大的影响, 不同的拼接模式对结果的影响也很大^[5]。本文采用了误差均化的拼接方法^[6], 要求所有拼接区中相差值的平方和同时达到最小。从本质上看, 这是一种并行算法。本文给出了在平面直角坐标系下误差均化拼接的数学模型和求解方法, 进行了计算机仿真证明该方法的有效性。

2 拼接模型

2.1 两个子孔径拼接

对于一被测工件, 其面形由多个孔径拼接而成。设工件上两个孔径 I 和 II, 彼此之间有重叠区, 如图 1 所示。测得各自坐标系中的面形分别为 $\phi(x, y)$ 、 $\phi(x', y')$ 。

以图 1 为例, 设以子孔径 I 所在坐标系为基准坐标系, 需将子孔径 II 统一到 I 上。因为工件为刚性的, 可设将 II 变换到 I 的关系表达式为:

$$\phi_I(x, y) = \phi(x', y') + ax + by + c \quad (1)$$

式中 $x' = x - x_0$, $y' = y - y_0$

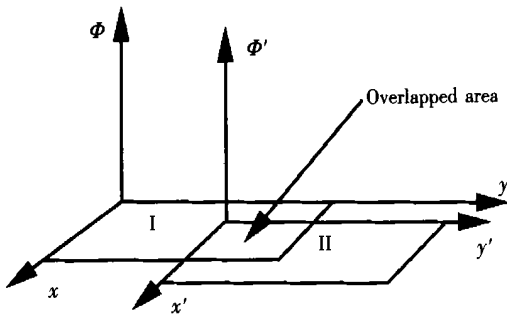


Fig. 1 Two measured sub apertures with an overlapped area.

式中: a, b —II 相对于 I 在 x, y 方向的斜率

c —II 相对于 I 在垂直方向的变动量

x_0, y_0 —II 坐标相对于 I 的坐标沿 x, y 方向的变动量, x', y' 为导轨读数值 a, b, c 的解对于重叠区内的点应满足

$$s = \sum \{ \varphi(x, y) - [\varphi(x', y') + ax + by + c] \}^2 = \min \quad (2)$$

其中 $\sum \{ \}^2$ —两个子孔径在重叠区中位相差值的平方和。

利用最小二乘法可以求解出 a, b 和 c 。实际计算时依次对所有子孔径进行两两拼接, 由于在拼接过程中存在误差积累, 所以不同的拼接模式(拼接路径和最大拼接次数)对全孔径拼接精度有很大影响。

2.2 误差均化的拼接方法

设在 整个 测量 平面上, 有子孔径 ($A_1 \dots A_m \dots A_M$), 以 A_m 为基准孔径, 每个子孔径相对它的变换系数为 (a_1, b_1, c_1), \dots ($a_{m-1}, b_{m-1}, c_{m-1}$), ($a_{m+1}, b_{m+1}, c_{m+1}$), \dots (a_M, b_M, c_M), 这些变换系数应满足:

$$S = \sum \{ \varphi(x, y) - [\varphi_1(x_1, y_1) + a_1x + b_1y + c_1] \}^2 + \dots + \sum_{m-1} \{ \varphi(x, y) - [\varphi_{m-1}(x_{m-1}, y_{m-1}) + a_{m-1}x + b_{m-1}y + c_{m-1}] \}^2 + \sum_{m+1} \{ \varphi(x, y) - [\varphi_{m+1}(x_{m+1}, y_{m+1}) + a_{m+1}x + b_{m+1}y + c_{m+1}] \}^2 + \dots + \sum_M \{ \varphi(x, y) - [\varphi_M(x_M, y_M) + a_Mx + b_My + c_M] \}^2 = \min \quad (3)$$

式中 $\sum \{ \}^2$ —子孔径 A_n ($n = 1, \dots, m-1, m+1 \dots M$) 与相邻孔径在重叠区中位相差值的平方和。

公式(3)对各个系数分别求偏导, 并令偏导数为零, 可得到如下矩阵:

$$\left[\left[\sum_{k=1}^M P_{ik} \right]_i \right] = \left[\left[Q_{ij} - \delta_{ij} \sum_{k=1}^M Q_{ik} \right]_{ij} \right] [(R_i)_i] \quad (4)$$

$i, j = 1, \dots, m-1, m+1 \dots M; k = 1, \dots, m, \dots M$

式中

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases}$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x (\varphi_i(x_i, y_i) - \varphi_j(x_j, y_j)) \\ \sum_{i \cap j} y (\varphi_i(x_i, y_i) - \varphi_j(x_j, y_j)) \\ \sum_{i \cap j} (\varphi_i(x_i, y_i) - \varphi_j(x_j, y_j)) \end{bmatrix}$$

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} \sum_{i \cap j} x^2 & \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} x \\ \sum_{i \cap j} xy & \sum_{i \cap j} y^2 & \sum_{i \cap j} y \\ \sum_{i \cap j} x & \sum_{i \cap j} y & \sum_{i \cap j} 1 \end{bmatrix} R_i = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix}$$

3 仿真实验

用 MATLAB 对一方形测量件进行了模拟拼接。首先利用 Kinslake 方程模拟一幅全口径为 220×300 的方形波面图, 方程系数分别为 $A = -10, B = -4, C = -2, D = -1, E = 0, F = 0$ 。按图 2 方式将全口径分成 9 个 $\varphi 150$ 的子孔径 1~9 (重叠系数 0.67, 指拼接区宽度和子孔径半径之比), 以中心子孔径 5 为拼接基准。为了模拟实际测量中各坐标系之间相对倾斜和平移, 按表 1 中的数据对 1~9 各子孔径加以不同的倾斜量和平移量。图 3 为各子孔径条纹图, 图 4、5 为拼接结果。拼接得到的波面和原始模拟波面的差值为 10^{-11} rad。

Table 1 Tilt and piston in each sub aperture

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α (rad)	0.0172	- 0.012	- 0.016	0.0151	0.0125	0.0161	- 0.0129	- 0.032	- 0.0142
β (rad)	0.0115	- 0.0128	0.0132	- 0.018	0.0172	- 0.0136	0.014	- 0.01	0.019
Pw	- 0.2	0.2	0.4	0.6	- 0.8	0.1	- 0.5	0.3	- 0.7

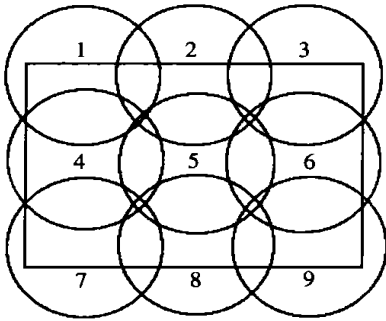


Fig. 2 Sub aperture array.

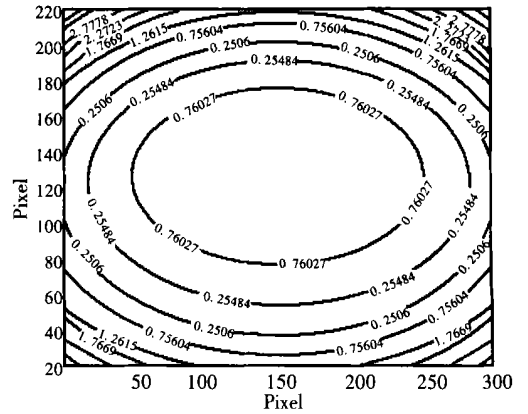


Fig. 5 Contour of wave front.

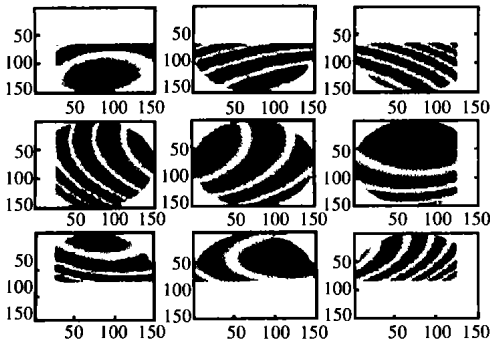


Fig. 3 Interferogram of sub aperture.

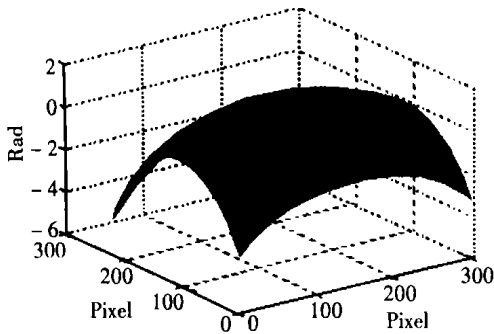


Fig. 4 Stitched wave front.

4 结 论

相关拼接技术为扩大测量范围, 同时保持高的空间分辨率、高空间精度开辟了新思路。拼接测量模型的建立和求解, 是实现相关拼接技术的两个重要环节。本文在两两拼接模型的基础上采用了误差均化的拼接模型。从模拟情况看, 该拼接模型有效地解决了两两拼接过程中误差累积的问题, 大幅度提高了拼接精度, 是一种切实有效的方法。

参考文献:

[1] Chen Ming Yi, et al., Multi aperture overlap scanning technique for large aperture test [J]. SPIE, 1991, 1553: 626-635.

[2] Bray Michael. Stitching interferometry: side effects and PSD [J]. SPIE, 1999, 3782: 443- 452.

[3] Cheng Weiming, Chen Mingyi. Transformation and connection of subapertures in the multi- aperture overlap scanning technique for large optics tests [J]. Opt. Eng. 1993, 32: 1947- 1950.

[4] 郭红卫, 陈明仪. 圆柱坐标系下的多孔径扫描拼接技术 [J]. 光学学报, 2000, 20: 1047- 1052.

[5] 程维明, 林有略, 陈明仪. 多孔径扫描波面恢复技术的精度评定及影响因素 [J]. 光学学报, 1993, 13: 711- 716.

- [6] Otsubo M, Okada K. Measurement of large plane surface shapes by connecting small aperture interferograms[J]. Opt. Eng. 1994, 33(2): 608- 613.

Stitching Technique by Error Averaging

LI Guo-pei, YU Ying-jie, CHEN Ming-yi

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In the measurement of optical wavefront, a large scale area can be measured with an interferometer of small aperture by correlative stitching technique, in which high measurement precision, high spatial resolution and low price can be maintained. In this technique, a way to get high precision phase distributions of sub-apertures and effective stitching method are important. Stitching between two sub-apertures is simple, but its accumulation error may reduce stitching precision greatly. The paper presents an error averaging method, which requires that the sum of the squared differences of all common areas should be minimized simultaneously. This method is a parallel one in essence. A math model and a solution in Cartesian coordinates are presented. Their validity has been examined by computer simulation.

Key words: optical wavefront measurement; stitching technique; error averaging

作者简介: 李国培(1976-),男,河北唐山人。现为上海大学精密机械工程系硕士研究生,从事光学检测方面的研究工作。E-mail: ligup76@etang.com