

影响条纹图形拼接法测量精度的误差因素主要有：子孔径面形的测量精度、重叠区大小、拼接模式等。子孔径面形的测量精度主要取决于所采用的条纹图形分析法，如条纹直接拟合法，空间载波法或位相分步法等。而以位相分步法的精度最优^[7]。因此，本文着重讨论重叠区大小、面形拟合阶次和拼接模式对测量精度的影响。用计算机模拟和实验方法进行深入分析，以期有助于实现最优拼接，提高测量精度。

2 条纹图形拼接法测量系统

在计算机模拟中，建立了一套模拟测量系统(图 1)，图中 G 为投影光栅，I 为 CCD 摄像系统的出瞳 I 至参考面 RP 的坐标原点 O_1 的距离， d 为 P、I 间的距离， $(x, y, h)_k$ 为第 k 个子孔径参考面坐标， $(x_i, y_i, h_i)_1$ 、 $(x_i, y_i, h_i)_2$ 和 $(x_i, y_i, h_i)_3$ 、 \dots 为物面上第 i 点在子孔径中的坐标。其中被模拟的物体理论面形表达式为抛物面 $h(x, y) = 0.015y^2 + 0.1$ 。用图 2(a) 所示的六个子孔径进行模拟拼接测量(阴影线表示拼接区)，每个子孔径的大小约为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，子孔径面形的获取方法采用文献[8]所述的有限脉冲响应低通滤波器法(FIR 法)。

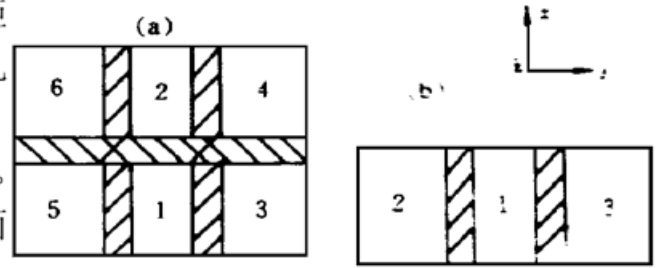


Fig. 2 Subaperture layout for connection. (a) Six-aperture, (b) Three-aperture

按照模拟系统，建立了实际测量系统(见[4]中的图5)。被测物体为圆柱状饼干筒，用图 2(b)所示的三个子孔径进行拼接，孔径大小约为 $80 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ ，也采用有限脉冲响应低通滤波器法对子孔径面形进行处理。

为便于对计算机模拟和实际测量结果的评定，采用较合理的相应点误差最大值 Δh_{\max} 和最小值 Δh_{\min} 、P-V 值和均方根误差值进行评定，以真实地反映条纹图形拼接法所能达到的测量精度。

3 主要影响因素

影响条纹图形拼接法测量精度的主要因素是子孔径面形的测量精度、重叠区的大小、面形拟合阶次的拼接模式。用于计算机模拟量(带脚标 c)和实验的参数分别为： $P_c = 5.0 \text{ mm}$ ， $I_c = 1500 \text{ mm}$ ， $d_c = 300 \text{ mm}$ 和 $P = 5.7 \text{ mm}$ ， $I = 1079 \text{ mm}$ ， $d = 289 \text{ mm}$ (见图1)。

3.1 子孔径面形测量精度

条纹图形拼接法的目的是要将多个子孔径统一到一个参考面上去^[1]，所以拼接后所得的全孔径的精度在很大程度上取决于子孔径测量的精度，也即子孔径面形测量精度直接影响着全孔径面形的测量精度。

以二次模拟拼接来验证这一点：第一次对抛物面 $h(x, y) = 0.015y^2 + 0.1$ 按图 2(b)所示的子孔径 2、1、3 进行测量，第二次对第一次测量出的三个子孔径面形值人为地附加上一个误差项 $\Delta h = 0.02 \sin(x + y)$ 后进行拼接。两次模拟测量子孔径及拼接孔径所得数据如表 1 所示。

在实际拼接实验中，则用两个性能略有相差的有限脉冲响应低通滤波器，分别对图 2(b) 中所示的子孔径进行面形测量，其结果也列于表 1。

Table 1. Results of computer simulations and experimental tests (unit: mm)

explanation		simulated results				experimental results			
	subapertur	Δh_{max}	Δh_{min}	P-V	rms	Δh_{max}	Δh_{min}	P-V	rms
1	1	0.120	- 0.125	0.245	0.058	0.601	-	1.224	0.225
	2	0.127	- 0.121	0.248	0.057	0.685	-	1.402	0.248
	3	0.133	- 0.130	0.263	0.059	0.652	-	1.361	0.242
	full	0.172	- 0.167	0.339	0.070	0.809	-	1.766	0.280
2	1	0.132	- 0.137	0.269	0.058	0.671	-	1.334	0.238
	2	0.141	- 0.134	0.275	0.057	0.705	-	1.437	0.251
	3	0.143	- 0.145	0.288	0.059	0.690	-	1.427	0.253
	full	0.179	- 0.173	0.402	0.073	0.849	-	1.863	0.310

从表1可以明显地看出，子孔径面形测量精度高的拼接过程，其全孔径面形测量的精度也高，说明了在拼接测量过程中要获得较高的全孔径拼接测量精度，应尽量提高子孔径测量的精度。若用位相分步技术作子孔径测量，模拟拼接后的均方根误差优于0.03 mm。

3.2 重叠区的大小

从条纹图形拼接法的原理可以知道，条纹图形拼接法是通过重叠区的面形相关信息来进行拼接转换的^[1]，因此，重叠区的大小对拼接的结果会有很大的影响：重叠区太小，其相关信息不足以完整地表达拼接参数，影响精度；重叠区太大，减小了测量的面积，增加了拼接次数，同时求解非线性方程组的时间成倍增加，而精度却提高不大。

为了便于进行讨论，定义角度重叠系数和线度重叠系数来衡量拼接区的大小：

$$\text{角度重叠系数 } K_D = \frac{\text{重叠区最大中心角}}{\text{实际测量区最大中心角}}$$

$$\text{线度重叠系数 } K_C = \frac{\text{重叠区最大线长度}}{\text{实际测量区最大线长度}}$$

如图3所示的几何位置关系，子孔径1和2的角度重叠系数为 $K_{D12} = \psi_{12}/\psi_1$ ，线度重叠系数为 $K_{C12} = L_{12}/L_1$ ，子孔径1和3的角度重叠系数为 $K_{D13} = \psi_{13}/\psi_1$ ，线度重叠系数为 $K_{C13} = L_{13}/L_1$ 。

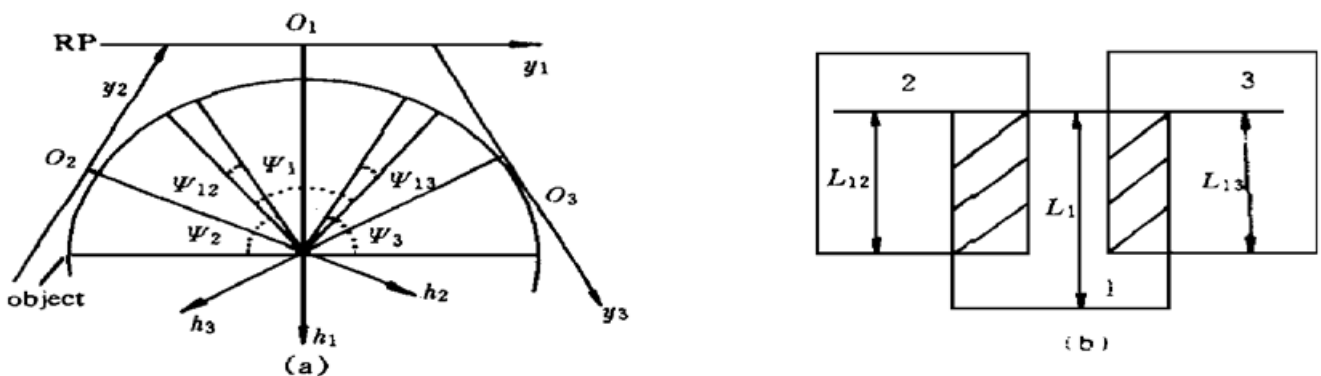


Fig. 3 Overlap geometry. (a) Top view, (b) Side view

由于线度重叠系数在文献[9]有详细的叙述，这里主要讨论角度重叠系数 K_D 。

对抛物面 $h(x, y) = 0.015y^2 + 0.1$ 的三个子孔径[见图2(b)]分别模拟拼接了7次，每次选择不同的角度重叠系数 K_D ，分别为0.13、0.20、0.27、0.34、0.41、0.48、0.59。并记录下每次拼接过程的运算总时间 t_c 。拼接全孔径均方根误差、拼接运算总时间 t_c 与角度重叠系数

K_D 的关系如图4(a)所示。

在实验中,使子孔径2、3相对于子孔径1分别有 10° 、 20° 、 30° 、 40° 的重叠角度,对应的 K_D 为0.167、0.334、0.500、0.667。拼接全孔径均方根误差值、拼接运算总时间 t_c 与角度重叠系数 K_D 的关系如图4(b)所示。

由上图可以看出,随着角度重叠系数 K_D 的增大,拼接全孔径均方根误差值减小,但拼接运算总时间 t_c 增加。此外,当 K_D 增大到一定的程度(如大于0.55)时,拼接全孔径均方根误差值基本保持不变。故实际拼接实验中可选 $K_D = 0.35 \sim 0.55$,使拼接过程处于最佳状态:既保证了全孔径的拼接精度,又减少了拼接运算总时间 t_c 。

3.3 面形拟合阶次

由于在拼接过程中,除了需求解包含 ΔA 、 ΔB 和 ΔC 的非线性方程组外,为获得全孔径面形,需对离散的面形值进行最小二乘法拟合(基底函数采用 $x^n y^m$, $m \leq n$,这种函数具有正交性质和较高的拟合精度),因此,拟合精度(主要取决于拟合阶次 N_f)对拼接结果也是很有影响的。

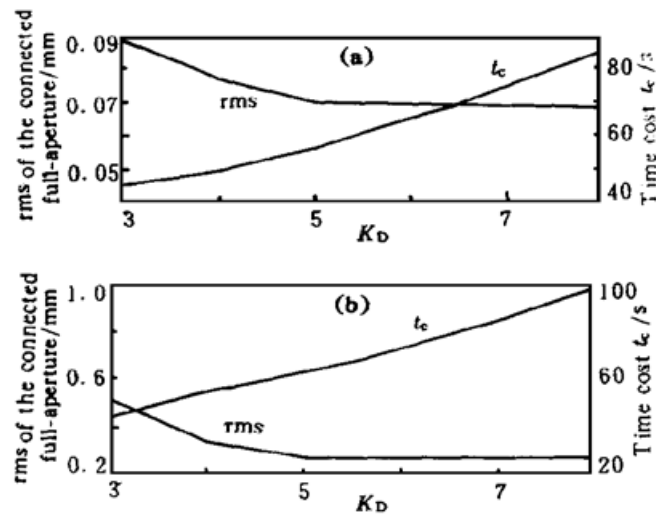


Fig. 5 Influence of N_f on rms and t_c . (a) Simulation results, (b) Experimental results

3.4 拼接模式

拼接模式上指各个子孔径在拼接过程中相互之间的位置关系(见图1),一般是指:子孔径间的拼接路径和拼接次数 N 。拼接次数 N 是指各个子孔径拼接转换到参考母孔径(见表2中的孔径1)所需的最大拼接次数。

首先讨论拼接次数 N 对全孔径拼接精度的影响。对模拟抛物面以六个子孔径[见图2(a)]分别模拟拼接了5次,每次选择不同的拼接次数 N ,

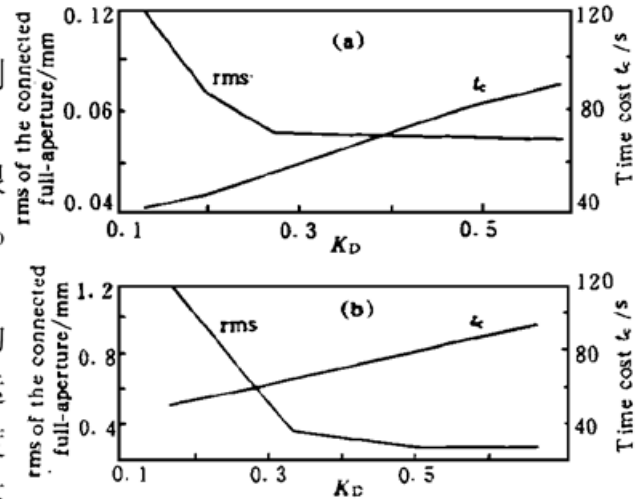


Fig. 4 Influence of K_D on rms and t_c . (a) Simulation results, (b) Experimental results

用计算机模拟和实验的方法对三个子孔径[图2(b)]分别拼接了6次,每次选择不同的面形拟合阶数,分别为3、4、5、6、7、8,并记录下每次拼接过程的运算总时间 t_c 。图5表示了拟合阶次 N_f 、拼接全孔径均方根误差值和拼接运算总时间 t_c 的关系。

可以看出,随着拟合阶次的增加,拼接全孔径的均方根误差值减小,但运算时间增加;当 $N_f > 7$ 时,全孔径均方根误差值趋于平缓。考虑到拼接精度和运算时间的要求,拟合阶次 N_f 取5~7为宜,这样既可以避免因 N_f 太小而不足以反映面形信息,又可以避免因 N_f 太大而将噪声拟合进来。

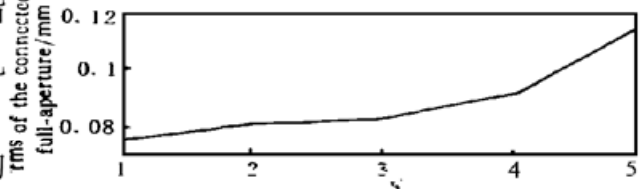


Fig. 6 Relation between N and rms

分别为 1、2、3、4、5。系统结构的移动参数 P_x 、 P_y 和旋转参数 α 、 β 以及拼接过程示意图如表 2 所示(其中箭头表示拼接方向)。拼接次数 N 与拼接全孔径均方根误差值的关系如图 6 所示。从图中可以看出,随着拼接次数 N 的增加,拼接全孔径均方根误差值明显增大。

Table 2. Connection mode and parameters

mode	1	2	3	4	5
layout of subapertures					
N	1	2	3	4	5
parameters	$\alpha = \pm 40^\circ$	$\beta = 0$	$P_x = 35 \text{ mm}$	$P_y = \pm 28 \text{ mm}$	/

其次,保持拼接次数 N 不变,对同一抛物面考虑如表 3 所示的两次拼接过程(移动/旋转参数与上面相同)。从表 3 可以看出,尽管拼接的最大次数 N 一样(皆为 2 次),但由于拼接过程中子孔径相对位置不一样,其结果也不相同。

Table 3. Influence of connection route of sub-apertures

mode	layout	N	P-V/mm	rms/mm
1		2	0.413	0.0799
2		2	0.447	0.0811

所以,在选择拼接模式时,首先应尽量使该拼接模式的拼接次数 N 最少;在拼接次数 N 不能改变的情况下,应选择合理的路径,如使相对位置处于水平的两个子孔径先拼接,然后再考虑旋转拼接。实验也验证了这一点。

4 讨 论

用计算机模拟和实测方法分析、研究了诸如子孔径面形测量精度、重叠区大小、面形拟合阶次和拼接模式等因素对拼接精度的影响,结果表明,二者是相吻合的。

为了提高全孔径拼接测量精度,关键是选择一个好的单孔径面形获取方法;其次,重叠区大小的选择将会在很大程度上影响拼接测量的效果,一般,角度重叠系数取为 0.35~ 0.5 左右可以满足实际测量要求;另一个重要因素是面形拟合阶次,它直接影响着拼接算法求解的结果,在考虑测量精度要求和运算时间的前提下,拟合阶次可在 5~ 7 范围内选取,以获取较佳拼接效果;最后,当拼接孔径数目在两个以上时,拼接模式的选取对拼接测量的结果有很大的影响。为了得到较高的拼接测量精度,应尽量使最大拼接次数 N 最少;在拼接次数 N 不能改变的情况下,使相对位置处于水平的两个子孔径先拼接,然后再考虑旋转拼接。

此外,非线性方程组的求解算法和面形拟合算法等都会对测量结果有影响,须予以认真对待。

参 考 文 献

- [1] Mingyi Chen, Weiming Cheng, Multi-aperture overlap-scanning technique for large aperture test. *Proc. SPIE*, 1991, **1553** ·626~ 635
- [2] Weiming Cheng, Mingyi Chen, Transformation and connection of subapertures in the multi-aperture overlap scanning technique for large optics tests. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(8) ·1947~ 1950
- [3] Mingyi Chen, Dezhu Wu, Multi-aperture overlap-scanning technique for moire metrology. *Proc. SPIE*, 1996, **2861** ·107~ 113
- [4] 陈明仪, 吴德柱, 程维明等, 用条纹图形拼接法测量三维大物体面形. *光学学报*, 1998, **18**(1) ·74~ 79
- [5] D. Shough, Beyond fringe analysis. *Proc. SPIE*, 1993, **2003** ·208~ 223
- [6] H. E. Cline, W. E. Loeson, A. S. Holik, Automatic moire contouring. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(10) ·1454~ 1459
- [7] Guangjun Zhang, Method of establishing general mathematical model of structured light 3-D vision. *Proc. SPIE*, 1996, **2899** ·662~ 666
- [8] Shouhong Tang, Y. Y. Hang, Q. Zhu, Fast profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(20) ·3012~ 3018
- [9] 程维明, 林有略, 陈明仪等, 多孔径扫描波面恢复技术的精度评定及影响因素. *光学学报*, 1993, **13**(8) ·711~ 716

Factors Influencing on Accuracy of 3-D Shape Measurement Using the Fringe-Pattern Connection Method

Wu Dezhu Chen Mingyi

(*Fine Mechanical Engineering Department, Shanghai University, Shanghai 201800*)

(Received 4 April 1997; revised 11 August 1997)

Abstract The fringe-pattern connection method (FPCM) is an effective method in 3-D shape measurement of a large object without annoyance of illumination and read-out shadows. It has shown that the main factors that effect the final accuracy of 3-D shape measurement using the fringe-pattern connection method include the measurement error of subapertures the overlap-coefficient K_D , the order N_f of polynomial-fitting and the mode of aperture connection.

Key words error factors, fringe-pattern connection method, 3-D shape measurement.