

文章编号 1004-924X(2007)04-0599-05

# 用干涉条纹图像重建反射镜的三维面形

曹华梁,程祖海,余亮英

(华中科技大学 武汉光电国家实验室激光科学与技术研究部,湖北 武汉 430074)

**摘要:**给出了用干涉条纹图像重建反射镜三维面形的方法,用泰曼-格林干涉仪采集被测镜面的干涉条纹图像,通过对干涉条纹图像进行处理得到镜面高度采样,采用泽尼克多项式拟合镜面的曲面函数,测量到了镜面的三维高度数据。干涉条纹图像上相邻条纹与参考面之间的距离相差一个标准光源波长,因而该测量方法的关键是得到条纹波峰或波谷的精确位置,从而达到了镜面相对高度的采样的目的。采用巴特沃斯低通滤波对条纹图像进行滤波,去掉噪声的影响,然后对图像二值化分割出亮条纹,用数学形态法对二值条纹图像细化得到条纹的中心线,结果表明,低通滤波方法能有效地减少细化条纹的分支和断裂。最后定义每条条纹中心线的相对高度,利用前 39 项泽尼克多项式对镜面高度进行最小二乘法拟合,计算了镜面被测区域的曲面高度数据。该方法可以用来测量强激光引起的镜面热变形。

**关键词:**干涉条纹;图像处理;去噪;泽尼克多项式

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A

## Reconstruction of 3-D surface of mirror by processing fringe pattern

CAO Hua-liang, CHENG Zu-hai, YU Liang-ying

(*Department of Laser Science and Technology, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*)

**Abstract:** The fringe patterns of a measured mirror are captured by Twyman-Green interferometer, the sampling height of the mirror surface is obtained by image processing of fringe patterns, Zernike polynomial is adopted to fit the function of the mirror curved surface and get the 3D measurement of the mirror surface height. The distances between two adjacent fringes to reference mirror space is a standard light source wavelength apart, so the key of this measurement method is to locate the wave crest or wave hollow of fringe pattern accurately, thus the task of sampling height of mirror surface is completed. A Butterworth low-pass filter is used to remove the noise of fringe image, then the bright fringe is segmented by binary conversion and is thinned into its centerline by morphologic method. The thinning result indicates that low-pass filter could reduce the amount of branches and breaks of center lines. Finally, giving the relevant height of every center lines and using the pre-39 items of Zernike polynomial to fit the mirror surface height by least square solution, the 3D data of sample surface of mirror is calculated. This method can be use to measure the laser-induced deformation of mirror.

**Key words:** fringe pattern; image processing; noise removal; Zernike polynomial

收稿日期:2006-07-03;修订日期:2006-11-02.

基金项目:973 国家重大基础研究项目

# 1 引言

光学镜面的测量一般有干涉法<sup>[1]</sup>、激光三角法<sup>[2]</sup>、全息法<sup>[3]</sup>等,被测光学表面的三维形状一般采用泽尼克多项式<sup>[4]</sup>和样条插值<sup>[5]</sup>等方法表示。本文采用干涉条纹法进行测量,用泽尼克多项式重建镜面变形的三维形状来分析反射镜的热变形,该方法不仅可以分析热变形的大小,而且能直观地反映镜子热变形的形状。

重建反射镜三维面形的关键在于寻找合适的条纹图像处理算法,提高干涉条纹图像处理的自动化程度和精度。本文针对泰曼-格林干涉仪获得的反射镜干涉条纹图像,给出了条纹图像数据重建反射镜三维面形的算法依次为图像的去噪、二值化、细化、定级以及反射镜镜面三维形状的拟合。其中图像细化对噪声比较敏感,去噪效果不好会直接导致细化产生很多分支,计算量大。采用巴特沃斯(Butterworth)低通滤波和数学形态细化算法,迅速准确地得到条纹骨架,减少了人工参与,同时也提高了条纹波峰或波谷的定位精度;细化条纹定级后,干涉图表示的是反射镜上一个分级的等高线,本文采用泽尼克多项式来全局拟合每个像素点对应的高度,以重建镜面的三维图。

# 2 干涉条纹图像采集系统

反射镜热变形的干涉条纹图像采集系统如图 1 所示。用高功率 2 kW 的 CO<sub>2</sub> 激光器照射被测样品镜(Sample mirror), He-Ne laser 为泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪标准激光源, Refer-

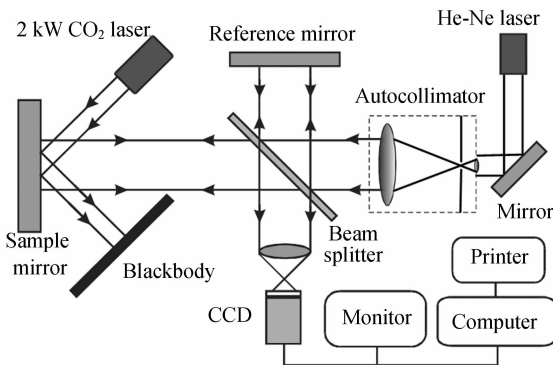


图 1 干涉条纹图像采集系统

Fig. 1 Image capture system of fringe pattern

ence mirror 为参考镜, Mirror 为普通反射镜, Beam splitter 为半透半反分光镜, Blackbody 为吸收黑体, Autocollimator 为扩束准直透镜组。CCD 摄像机拍摄样品镜的干涉条纹图像,计算机负责干涉条纹图像的采集、存贮和处理。

# 3 条纹图像处理

干涉条纹图像的处理流程如图 2 所示。图像去噪的目的是为了去掉噪声对真正条纹信号的影响,图像二值化就是将条纹从图像里分割出来,通过条纹细化即得到干涉条纹波峰的位置,通过上述三个处理过程,得到了反射镜的分级等高线的采样。条纹定级就是定义每条等高线的高度,再将等高线进行曲面拟合,得到镜面变形的三维表达式。以下将对流程图的各个算法作一一解释和说明。

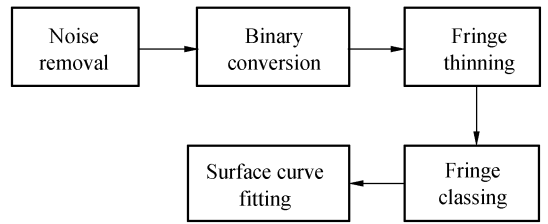


图 2 干涉条纹图像处理流程图

Fig. 2 Flow diagram of fringe pattern processing

## 3.1 图像去噪

在捕获反射镜的干涉条纹图像时,下列原因可能产生噪声: CCD 探测器产生的噪声; 图像数值化过程中产生的量化噪声; CCD 光学镜头上霉点产生的斑点; 其它设备干扰产生的噪声等。在图像二值化时,噪声会使分割出来的条纹不连续、分支较多、也会产生很多孤立点,影响条纹分割的成功率和定位精度。采用空间邻域中值滤波法可以去掉条纹周边的毛刺和随机椒盐噪声,但处理速度慢,对空间区域比较大的噪声要经过多次处理,本文采用巴特沃斯低通滤波。一个阶为  $n$ , 截断频率为  $D_0$  的巴特沃斯低通滤波器的转移函数为<sup>[6]</sup>:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v)/D_0]^{2n}}, \quad (1)$$

式中  $D(u, v)$  为频域半径。对采集到的原始图像  $f(i, j)$  作如下变换得到滤波后的图像  $\tilde{f}(i, j)$ :

$$\tilde{f}(i, j) = F^{-1} [H(u, v) \times F(f(i, j))], \quad (2)$$

式中  $F$  为傅里叶变换,  $F^{-1}$  为傅里叶逆变换。

### 3.2 图像二值化

对于一幅实际的干涉图,如果不考虑噪声、非线性效应等,条纹亮度分布仅仅是某一时刻的干涉图,条纹亮度的表达式为:

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \cos[\Phi(x, y)], \quad (3)$$

式中  $I_1(x, y)$  和  $I_2(x, y)$  为两束干涉光的强度,相位差  $\Phi(x, y)$  和所测量的物理量密切相关,本文中相位差由镜面与参考面的相对距离造成,参考面为平面,干涉条纹可反映反射镜的面形情况。干涉图像由很多灰度值余弦分布的条纹组成,理论上将整幅图像的灰度均值作为二值化阈值就可以准确地分割出条纹,实际上由于背景和噪声的影响,该阈值的二值化效果并不理想。本文采用 Ostu 方法确定初步阈值,再通过人工方法判断最佳阈值。

### 3.3 条纹细化

条纹细化在图像二值化基础上进行,是把一定宽度的条纹变换成单像素宽度的“骨架”过程,所提取出的骨架应能准确地表征条纹中心轴线的位罝,也就是干涉条纹波峰的位置。根据图 1 所示的干涉条纹采集系统可知,相邻两条条纹波峰之间的高度差为半个波长,这样得到的多条条纹中心线就构成了镜面相对高度的采样。图像细化算法很多,这里采用数学形态法对二值图像进行细化<sup>[7]</sup>,数学形态学方法就是对条纹进行不断的腐蚀,并保留内部点,直到剩下条纹的骨架。

图 3 为一幅圆形硅镜  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$  大小的干涉条纹图像,利用不同的去噪方法对该图像依次进行去噪、二值化和细化处理,得到结果如图 4 所示。图 4 中(a)为两次  $7 \times 7$  邻域的中值滤波后的结果,(d)为 3 阶巴特沃斯低通滤波后的结果,其频域半径取 20。(b)和(c)依次为对(a)二值化、细化处理的结果,二值化结果中的黑色条纹为干涉条纹的亮条纹,(e)和(f)依次为对(d)作相同处理的结果。由细化结果可以看出,频域滤波的效果较好,条纹中心线出现分岔、断裂、中空的现象远远低于中值滤波,这是因为条纹的空间尺寸比噪声大得多,对应频域空间上的频率低,低通滤波方法可更有效地抑制高频噪声对提取目标条纹的影响。

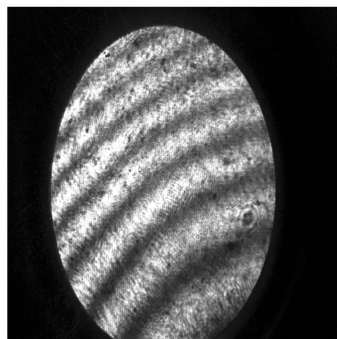
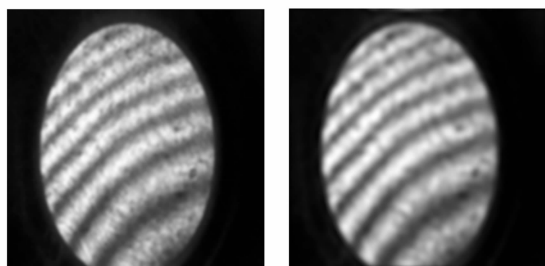


图 3 圆形反射镜的干涉条纹图像

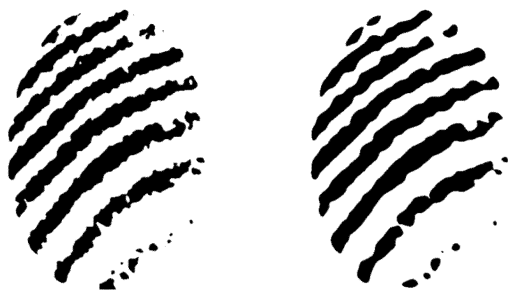
Fig. 3 Fringe pattern of a circular mirror



(a) 中值滤波

(d) 特沃斯低通滤波

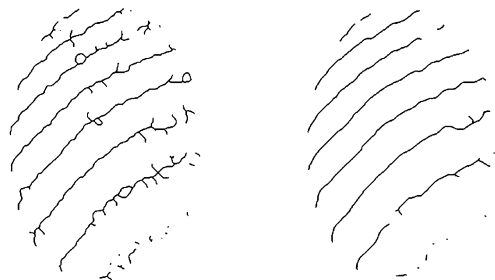
(a) Median filtering (d) Butterworth low-pass filtering



(b) 图(a)二值化

(e) 图(d)二值化

(b) Binary conversion of (a) (e) Binary conversion of (d)



(c) 图(b)细化

(f) 图(e)细化

(c) Thinning of (b) (f) Thinning of (e)

图 4 条纹图像处理结果

Fig. 4 Processing results of fringe pattern

### 3.4 条纹定级

计算机自动无误地完成这一步非常困难,这里采用人工参与方法定级。首先去掉图 4 中(f)上的分枝,连接好断裂处,标定每一条细条纹对应的级别,也就是该条纹处镜面相对于参考镜面之间的距离,相邻两条条纹之间的高度差为半个 He-Ne 激光波长;然后取一圆形区域作为采样区域进行拟合处理和高度计算。图 5 为定级后采样区域内的干涉条纹图。

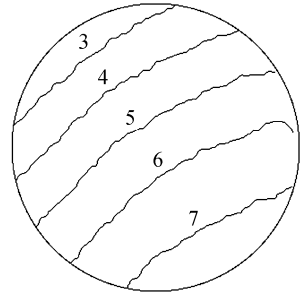


图 5 条纹定级

Fig. 5 Fringe classification

### 3.5 曲面拟合

采用泽尼克多项式来全局拟合反射镜镜面的曲面。镜面的 Zernike 多项式表达式为  $H = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots + a_n Z_n$ , 其中  $H$  为镜面高度,  $Z_n$  为第  $n$  项 Zernike 多项式, 表达式见文献[4],  $a_n$  为第  $n$  项 Zernike 多项式的系数。对所有细化后条纹的  $m$  个点进行采样, 并代入上面的表达式中, 得到方程:

$$\begin{cases} H_1 = a_1 Z_{11} + a_2 Z_{12} + \dots + a_n Z_{1n} \\ H_2 = a_1 Z_{21} + a_2 Z_{22} + \dots + a_n Z_{2n} \\ \dots \\ H_m = a_1 Z_{m1} + a_2 Z_{m2} + \dots + a_n Z_{mn} \end{cases}, \quad (4)$$

上式中  $m$  为采样点的数目, 通常  $m > n$ , 则上述方程为矛盾方程, 利用最小二乘法可以得到多项式的系数, 就得到了整个镜面的高度表达式。

采用前 39 项 Zernike 多项式对图 5 的数据进行方程(4)的计算, 得到多项式系数  $a$ , 再根据  $H = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \dots + a_n Z_n$  计算采样区域里每一点的高度, 结果如图 6 所示, 可以看出镜面基本上是一个平面镜, 该全局拟合方法得到的数据平滑。分别采集反射镜被强激光照射前和照射后的两幅条纹图像, 对两幅图像进行以上处理, 将镜子变形前和变形后镜面的三维数据相减, 就能得到镜子变形的数据。

### 3.6 精度分析

假设被测面形为球面的一部分, 表达式为:

$\alpha Z - 207 = \lambda (\sqrt{256^2 - (x-256)^2 - (y-256)^2})$ ,  $\lambda$  为干涉光的波长,  $x, y$  的单位为 pixel,  $\alpha$  值取决于要生成的条纹数目。根据方程(3)生成一幅干涉灰度图像, 相位的计算方法为  $\Phi(x, y) = 2\pi \times 2Z/\lambda$ 。取干涉图像中间半径为 150 pixel 的区域进行处理, 为了有 7 条以上的条纹,  $\alpha$  取值为 16。

用文中提出方法对生成的干涉图进行处理, 并与 B 样条插值方法相比较, 结果如表 1 所示。

由表可以看出, 上述处理方法的精度比较高, 两种方法的精度基本相同, 但是样条插值方法的计算时间相对较长。值得注意的是测量中条纹中心线的定位精度对测量精度影响也很大, 由高度函数生成的干涉图十分规则, 实际测量的干涉图非常复杂, 条纹中心的精确定位比较困难。

表 1 计算精度

Tab. 1 Calculation accuracy

计算方法	最大误差	最大相对误差	均方差
Zernike 拟合	0.051 5	1.4%	$3.399\ 5 \times 10^{-9}$
B 样条插值	0.034 3	1.0%	$5.200\ 4 \times 10^{-9}$

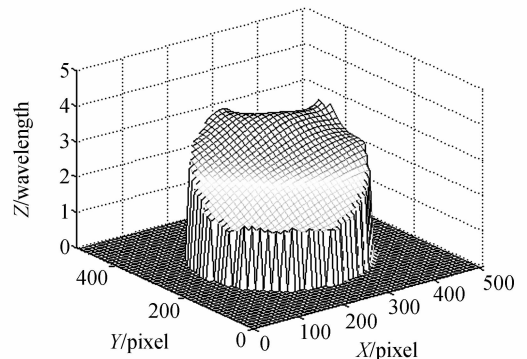


图 6 镜面三维面形图

Fig. 6 3D plot of mirror surface

## 4 结 论

条纹图像自动化处理的研究虽然很多, 但是很难找到一个普遍适用的方法来满足各种干涉条纹的处理。本文针对强激光反射镜的热变形探测问题, 提出了一个从干涉条纹的预处理到重建镜

面三维形状的完整方法,满足了对反射镜镜面热变形分析的需要,但还需要进一步解决计算机自动条纹连接、分支去除和条纹定级的工作。

### 参考文献:

- [1] 李锐钢,郑立功,薛栋林. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学精密工程,2006,14(4):533-538.  
LI R G, ZHEN L G, XUE D L. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):533-538. (in Chinese)
- [2] 高春甫,郭敏. 粗糙表面精度测量系统的研究[J]. 光学精密工程,2005,13(6):697-702.  
GAO CH F, WU M. Study of measurement system for rough surface accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):697-702. (in Chinese)
- [3] 周文静,彭娇,于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. 光学精密工程,2005,13(增):46-51.  
ZHOU W J, PENG J, YU Y J. Deformation measurement via digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp.):46-51. (in Chinese)
- [4] 单宝忠,王淑岩,牛憨笨. Zernike多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程,2002,10(3):318-323.  
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3):318-323. (in Chinese)
- [5] ARES M, ROYO S, CAUM J, *et al.*. Comparison of B-spline and Zernike fitting techniques in complex wavefront surfaces[J]. *SPIE*, 2005, 5856:169-178.
- [6] 章毓晋. 图象处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社.  
ZHANG Y J. *Image Processing and Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press. (in Chinese)
- [7] 盛业华,唐宏,杜培军. 一种保形的快速图象形态细化算法[J]. 中国图象图形学报,2000,5(2):89-93.  
SHENG Y H, TANG H, DU P J. One fast shape preserving morphological thinning algorithm[J]. *J. Image Graphics*, 2000, 5(2):89-93. (in Chinese)

作者简介:曹华梁(1972—),男,华中科技大学图像识别与人工智能研究所博士,主要从事强激光器件、图像处理等方面的工作,E-mail:hlcaomail@sohu.com