

# 一种提取单幅散斑干涉条纹图中心线的可靠方法

杨夏<sup>1)</sup> 于起峰<sup>1)</sup> 伏思华<sup>1)</sup> 孟令晶<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073) <sup>2)</sup>(中国人民解放军91550部队240所,大连 116023)

**摘要** 在光测力学中,如何从单幅散斑干涉条纹图中高精度地自动提取方向信息是一项较困难的工作。为了可靠地提取单幅散斑干涉条纹图的中心线,提出了一种简单可行的方法,该方法先通过平面拟合的方法来得到散斑干涉条纹图的条纹方向;然后在条纹方向上,利用条纹切面的倾斜度来提取散斑干涉条纹图的中心线。实验表明,此方法可靠、实现简单,对高噪声的散斑干涉条纹图非常有效。

**关键词** 散斑 条纹方向 条纹倾角 条纹中心线

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)07-1335-06

## A New Method to Extract Fringe Skeletons from A Single Speckle Fringe Image

YANG Xia<sup>1)</sup>, YU Qi-feng<sup>1)</sup>, FU Si-hua<sup>1)</sup>, MENG Ling-jing<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(College of Aerospace and Material Technology, NUDT, Changsha 410073) <sup>2)</sup>(240 Institution, 91550 Department PLA, Dalian 116023)

**Abstract** In the field of optical deformation measurement, obtaining the fringe phase information from one speckle interferometry high accurately and automatically is a difficult problem. In this paper, a novel method is proposed to extract the skeletons precisely. We estimate the fringe orientation firstly and use a special filter to depress orientation noises. Then with the fringe orientations, the fringe slope angles are computed. In the slope angle map, great jumps of the slope intensity values occurred at fringe peaks and fringe valleys. At last, the fringe skeletons are easily extracted from the slope angle map. This method has been tested by real speckle fringe pattern images, and the results show that this method is efficient and robust for ESPI even with high speckle noise.

**Keywords** speckle interferometry, fringe orientation, fringe slope, fringe skeletons

## 1 引言

散斑干涉测量法(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)是光测力学中一种重要的测量方法。它具有灵敏度高、全场非接触、便于现场应用等突出优点。与其他干涉方法相同,散斑干涉法的信息载体也是散斑干涉条纹图,但是这种散斑干涉条纹图充满了散斑噪声,不仅信噪比很低,而且噪声与条纹对比度在同一量级,这就给散斑干涉条纹图的处理带来了很大的困难,传统的条纹图处理方法

难以直接用于散斑干涉条纹图的处理<sup>[1]</sup>。目前比较成功的散斑干涉测量方法是相移法,但是这种方法不但需要3幅以上经过移相的散斑图,而且移相装置复杂,这给它的应用带来不便。如何从单幅散斑干涉条纹图中消除散斑噪声,以便高精度地自动提取方向信息,是一个较困难的问题。

文献[2]先运用改进的旋滤波方法对散斑干涉条纹图进行处理,较好地消除了散斑噪声,然后就可以运用通用的条纹图处理方法进行处理,如通过求极值或应用文献[2]的导数符号二值图提取条纹中心线等。文献[3]在上述方法的基础上进行了改

基金项目:(10472133)

收稿日期:2006-10-19; 改回日期:2007-01-08

第一作者简介:杨夏(1977~),男。2007年获国防科技大学博士学位,现为国防科技大学讲师。主要从事实验力学和光学测量等方向的研究。E-mail:mr\_honson@sina.com

进,提出了先直接对散斑干涉条纹图求条纹方向<sup>[4]</sup>,再从条纹方向图中直接提取条纹中心线的方法。文献[5]和文献[6]分别提出了基于 Hessian 矩阵的亚像素条纹中心线提取方法和改进的 Hilditch 细化算法,但是这两种算法对噪声都较为敏感。

本文提出了一种通过计算条纹切面的倾角余弦值来确定条纹中心线的方法,即先利用平面拟合的方法求出条纹的切平面,然后求出切面倾角的余弦值。因为在条纹波峰或者波谷位置,条纹切面的倾角为零,所以所求余弦值会有 1 到 -1 之间的跳变,这样便可以清楚准确地得到条纹中心线。

对提取散斑条纹的中心线而言,由于其散斑噪声很高,从而用导数符号二值图方法难以得到很好的提取结果,而且文献[3]提出的利用条纹方向算子提取中心线的方法也容易受到方向跳变的影响。而本文提出的计算条纹切面倾角的余弦值方法,则不仅能克服散斑大噪声的影响,而且不易受到方向跳变的影响,并且对于质量较差的散斑干涉条纹图,也能够提取好的条纹中心线。本文提出的方法也可用于激光全息、云纹等一般条纹图的处理。

## 2 条纹方向的获取

光测力学中,干涉方法的信息载体通常是干涉条纹的光强分布图,其可以表示为

$$I(x, y) = A(x, y)N_1(x, y)\cos(\phi(x, y)) + B(x, y) + N_2(x, y) \quad (1)$$

式中,  $A(x, y)$  为条纹对比度,  $B(x, y)$  为背景光强,  $N_1(x, y)$ ,  $N_2(x, y)$  分别为图像的乘性噪声和加性噪声,  $\phi(x, y)$  为待求的相位场。

干涉条纹的方向可定义为条纹相位场的方向导数为零的方向<sup>[3,5]</sup>,即

$$(\cos\theta, \sin\theta) \nabla \phi(x, y) = 0 \quad (2)$$

但因为实际相位场是待求的,所以实际上并不能直接用上式求得条纹的方向。可以近似取与相位场有直接对应关系的已知条纹图光强来代替上式的相位场,即用条纹图光强的方向导数为零的方向作为条纹的方向,如下式所示:

$$(\cos\theta, \sin\theta) \nabla I(x, y) = 0 \quad (3)$$

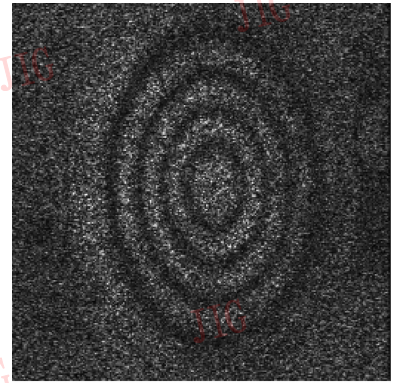
在忽略了条纹对比度、背景光强影响后,在有效抑制住条纹噪声的条件下,并且在除条纹中心外的其他区域,就可以根据式(3),利用条纹图的光强分布来近似求得条纹的方向。条纹方向为

$$\theta(x, y) = \arctg\left[\frac{\partial I(x, y)}{\partial y} / \frac{\partial I(x, y)}{\partial x}\right] \quad (4)$$

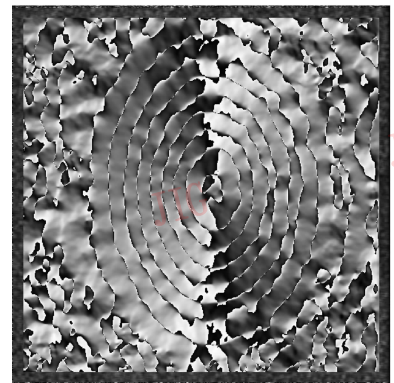
然后就可利用局部平面拟合抑制噪声影响的方法,先对图像当前点进行局部平面拟合,再确定拟合平面的方向导数为零的方向,并定义此方向为条纹方向。这种方法可以得到一种求条纹方向的简洁的算子,即

$$\theta = \arctg\left(\frac{\sum_{i,j} f_{i,j}i}{\sum_{i,j} f_{i,j}j}\right) \quad (5)$$

式中,  $i, j$  为计算窗口内的参考坐标,  $f_{i,j}$  为此计算窗口内对应于点  $(i, j)$  的图像灰度值。为了计算方便,可以取矩形计算窗口的中心作为参考坐标系的原点,这样矩形的计算窗口在参考坐标系下便是对称区域。由上式可以得到  $0^\circ \sim +180^\circ$  范围内连续取值的条纹方向图。应用该算法,对实际散斑干涉条纹图(见图 1(a))进行了处理。图 1(b) 是用  $35 \times 35$  窗口的条纹方向算子求得的如图 1(a) 所示的  $512 \times 512$  大小的散斑干涉条纹图的条纹方向图。



(a) 散斑干涉条纹图



(b) 条纹方向图

图 1 散斑条纹图及其条纹方向图

Fig. 1 Speckle interferometry image and its fringe orientations image

条纹方向图用灰度代表条纹方向,灰度值 0 代表 0°,灰度值 255 代表 180°。

### 3 条纹方向图滤波

条纹方向图中的方向值是定义在矩形网格上的离散值,即

$$\varphi_{i,j} = \varphi(i,j) \quad -\pi \leq \varphi < \pi \quad (6)$$

式中,  $i = 0, \dots, M-1; j = 0, \dots, N-1$ 。这里  $M$  和  $N$  是计算窗口的尺寸,以像素数表示,  $(i,j)$  是像素点的坐标。为简单起见,下面以 1 维情形为例来说明。

图 2(a) 为 1 维情形的真实方向值的变化曲线,这里选取的仅是 0°到 2π 的取值范围。图 2(b) 为对应于图 2(a) 的卷叠的方向值变化曲线。如图 2

所示,当真实的方向值  $\Phi_k$  从 0°变化到 2π 时,对应的卷叠的方向值则会在 π 处有一个 2π 的方向跳跃,即卷叠的方向值先从 0°连续变化到 π,然后跳到 -π,再连续变化到 0°。由此可以看到,卷叠的方向值  $\varphi_k$  在区间  $[-\pi, \pi)$  内的变化还是连续的,每当真实的方向值  $\Phi_k$  经过 π 的整数倍时,卷叠的方向值  $\varphi_k$  才发生方向跳跃(从 π 到 -π,或从 -π 到 π)。所以,可对卷叠的方向值  $\varphi$  做如下的映射:

$$\{(\varphi)\} \longrightarrow \{(\cos\varphi, \sin\varphi)\} \quad (7)$$

也就是对条纹方向图中的每一个像素,即对每一个条纹方向值都计算其相应的余弦值和正弦值,若将卷叠的方向值  $\varphi$  映射到一个 2 维向量空间,则两个分量分别为  $\cos\varphi$  和  $\sin\varphi$ 。对应于图 2(b) 的映射图如图 3(a) 和图 3(b) 所示:

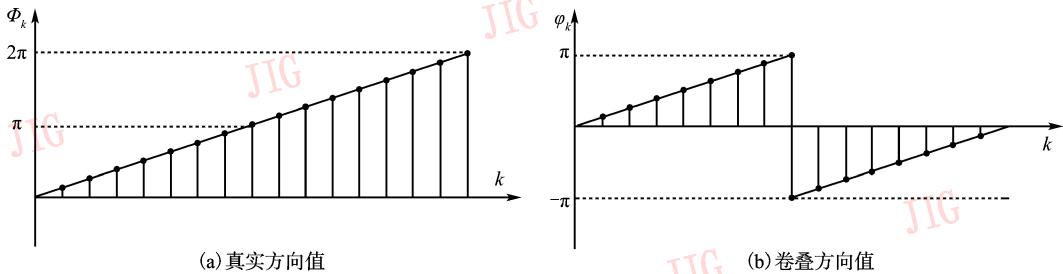


图 2 真实方向值和卷叠方向值示意图

Fig. 2 Original phase and wrapped phase

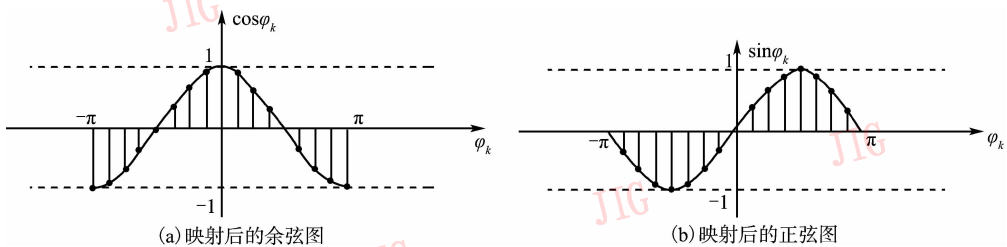


图 3 映射后的余弦图和正弦图

Fig. 3 The mapped cosine value and the mapped sine value

图 3(a) 为对应于图 2(b) 的余弦图,图 3(b) 为对应于图 2(b) 的正弦图。注意,这里表示出的余弦图和正弦图仅是 -π 到 π 的部分,由于三角函数具有周期性,因此其他部分可推理得到。显然,做了这样的映射之后,  $\cos\varphi$  和  $\sin\varphi$  在原来卷叠的方向值  $\varphi$  的方向跳跃处就呈现连续周期性变化的了。令

$$t_1 = \cos\varphi, t_2 = \sin\varphi \quad (8)$$

这时就可以选择任何一种方法对余弦和正弦图像分别进行滤波。例如选择以下简单易行的均值滤波法来进行滤波:

$$T_1(i,j) = \frac{1}{w^2} \sum_{x,y=1,2,\dots,w} t_1(x,y)$$

$$T_2(i,j) = \frac{1}{w^2} \sum_{x,y=1,2,\dots,w} t_2(x,y) \quad (9)$$

式中,  $T_1$  和  $T_2$  分别是滤波后的余弦图像和正弦图像在点  $(i,j)$  处的像素值,  $w$  是以  $(i,j)$  为中心的 正方形滤波窗口  $W$  的尺寸。

最后,通过如下的逆映射便可得到滤波后的干涉条纹方向值  $\varphi$  :

$$\begin{cases} \{(T_1, T_2)\} \rightarrow \{\varphi\} \\ \varphi = \text{arctg}(T_1/T_2) \end{cases} \quad (10)$$

当对图 1(b)先用  $11 \times 11$  大小的窗口进行条纹方向中值滤波,再用  $25 \times 25$  大小的窗口做条纹方向的均值滤波后,则所得到的结果如图 4 所示。

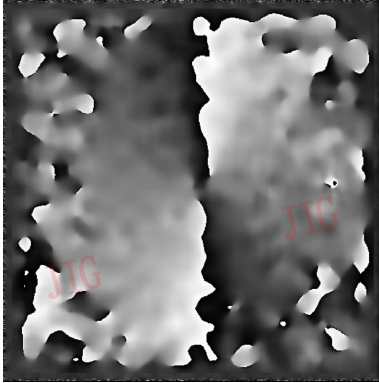


图 4 对图 1(b)进行滤波后的结果图  
Fig. 4 The filter result of Fig. 1 (b)

## 4 中心线提取

### 4.1 条纹梯度图

如图 5 所示,  $AB$  是条纹的一个切面在纸平面上的投影,  $\theta$  为  $AB$  与条纹法向的夹角, 这样通过求取角  $\theta$  的余弦值(称之为条纹梯度), 并将其从  $0^\circ \sim 180^\circ$  的余弦值映射到  $0 \sim 255$  的灰度值, 便可得到条纹梯度图(如图 6 下半图所示)。在条纹波峰的位置,  $AB$  与条纹法向的夹角  $\theta$  由  $0^\circ$  跳变到  $180^\circ$ , 其余弦值也由 1 跳变到  $-1$ 。同样在条纹波谷位置, 角  $\theta$  的余弦值也由  $-1$  跳变到 1, 而在条纹的其他位置, 角  $\theta$  仍保持连续变化。由于条纹梯度只在波峰和波谷位置产生 1 与  $-1$  之间非常明显的跳变(如图 7 所示), 所以在条纹梯度图上, 中心线非常清楚, 用普通的边界提取算子就能够很容易地将其提取出来。

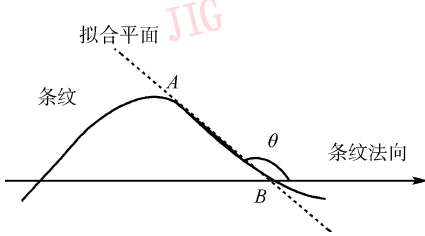


图 5 切面示意图  
Fig. 5 Tangent plane

但是由于在散斑干涉条纹图上, 条纹的切面很难求取, 因此本文用平面拟合的办法, 通过拟合平面来近似条纹切面。设在图像上某点的图像灰度值为  $f_{x,y}$ , 取拟合平面方程为

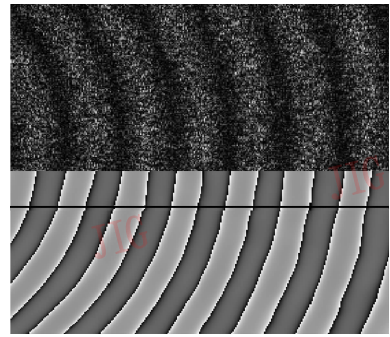


图 6 散斑干涉条纹图(上)和条纹梯度图(下)  
Fig. 6 ESPI image(up) and slope image(down)

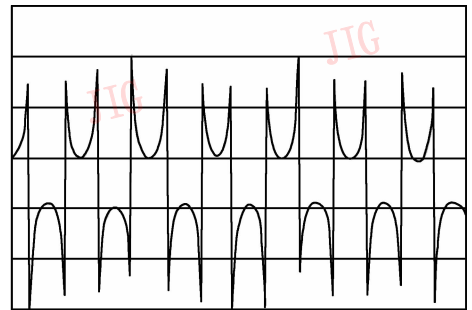


图 7 条纹梯度图灰度分析(图 9 中黑线位置)  
Fig. 7 Profile analysis of the dark line in Fig. 9

$$g(x,y) = a + bx + cy \tag{11}$$

若用最小二乘法在此邻域上进行平面拟合, 则可得

$$\begin{cases} a \sum_{(x,y) \in W} 1 + b \sum_{(x,y) \in W} x + c \sum_{(x,y) \in W} y = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y} \\ a \sum_{(x,y) \in W} x + b \sum_{(x,y) \in W} x^2 + c \sum_{(x,y) \in W} xy = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y}x \\ a \sum_{(x,y) \in W} y + b \sum_{(x,y) \in W} xy + c \sum_{(x,y) \in W} y^2 = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y}y \end{cases} \tag{12}$$

取邻域为对称区域, 并取条纹法向作为  $x$  坐标, 则上式中包含  $\sum_{(x,y) \in W} x$ ,  $\sum_{(x,y) \in W} y$  和  $\sum_{(x,y) \in W} xy$  的项都为 0; 若取  $x, y$  为同样的范围, 则  $\sum_{(x,y) \in W} x^2 = \sum_{(x,y) \in W} y^2$ 。代入上式得

$$\begin{cases} a \sum_{(x,y) \in W} 1 = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y} \\ b \sum_{(x,y) \in W} x^2 = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y}x \\ c \sum_{(x,y) \in W} y^2 = \sum_{(x,y) \in W} f_{x,y}y \end{cases} \tag{13}$$

因为拟合平面为  $a + bx + cy$ , 所以该平面的法线方向为  $n = (b, c, -1)$ 。因为  $x$  为条纹垂向(即条纹法向), 所以夹角  $\theta$  即为拟合平面的法线方向与水平面的夹角为

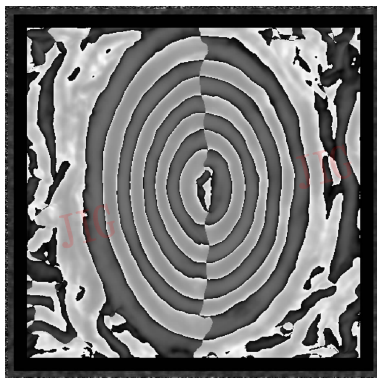
$$\theta = \arctg \frac{b}{-1} = -\arctg \frac{\sum_{(x,y) \in w} f_{x,y} x}{\sum_{(x,y) \in w} x \cdot x} \quad (14)$$

由此就可以得到条纹切面的倾角  $\theta$ , 再将  $\theta$  的余弦值从  $-1 \sim 1$  映射到图像灰度值  $0 \sim 255$ , 便可得到条纹梯度图(如图 6 下方所示)。

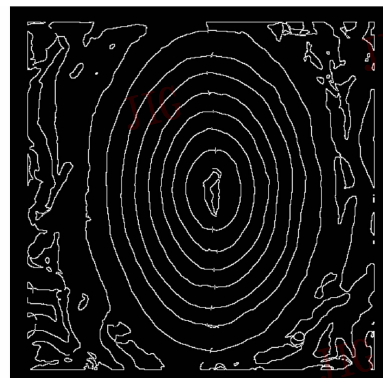
这里进行平面拟合所选取的窗口是基于文献[7]的曲线窗口思路,即以当前点条纹方向的垂向作为横坐标选取的矩形窗口。选取这样的窗口不仅可使平面拟合的公式得到大大的简化,而且可使所选点的方向值更加接近,这样得到的拟合平面更为近似条纹的切面,从而提高了所提取结果图的精度。其窗口内各点的灰度值可采用双线性插值的方法得到(如式(15)所示)。

$$I(\alpha, \beta) = I_{00}(1 - \alpha)(1 - \beta) + I_{01}\alpha(1 - \beta) + I_{10}(1 - \alpha)\beta + I_{11}\alpha\beta \quad (15)$$

式中,  $I_{00}, I_{01}, I_{10}$  和  $I_{11}$  为待插值点所处方格的 4 个顶点,  $\alpha, \beta$  分别为插值点到方格左下边线的距离值。



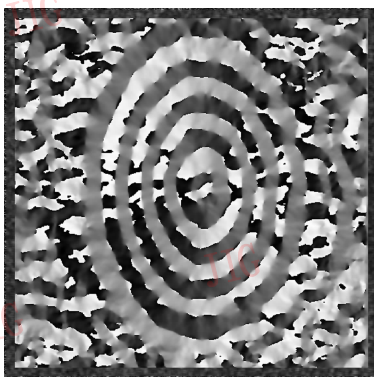
(a) 条纹梯度图



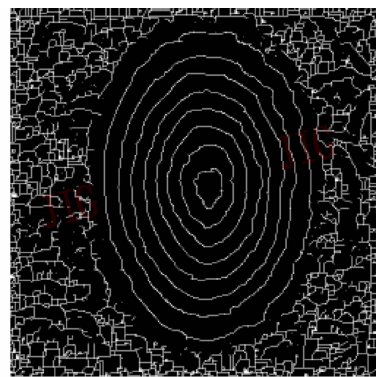
(b) 骨架线结果图

图 8 用本文算法求得的条纹梯度图和提取的骨架线结果图

Fig. 8 The fringe slope map and skeletons obtained by our method



(a) 条纹走向图



(b) 由条纹走向得到的中心线图

图 9 文献[3]方法得到的条纹走向图及由条纹走向图得到的条纹中心线

Fig. 9 The fringe orientation map and skeletons obtained by method proposed in reference [3]

### 4.2 试验及结果

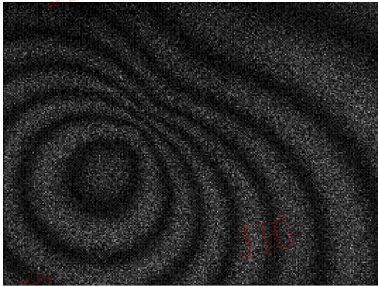
为验证本文算法效果,选同一幅散斑干涉条纹图,分别用本文算法和文献[3]的方法进行了处理,并对两种方法的提取结果进行了对比。

对于散斑干涉条纹图(图 1(a)),本文方法首先求取其条纹方向图(图 4),然后根据其条纹方向求取条纹梯度图(图 8(a))。图 8(a)中的竖线为方向跳变线,可以先从条纹方向图(图 4)中辨别此线,再利用简单的边界提取算子(这里使用 Robert 算子)就可以方便地提取出条纹中心线(如图 8(b)所示)。

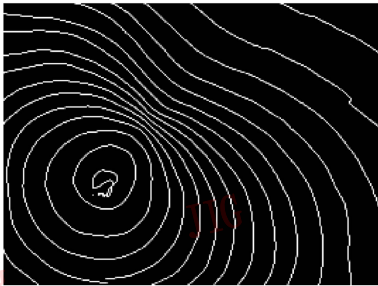
文献[3]是使用条纹方向来判定条纹中心线。但是如图 9(a)所示,其条纹方向由于受到噪声的影响,精度很低,并且图像上存在大量  $2\pi$  跳变线,因此影响了中心线的提取。该方法得到的中心线如图 9(b)所示。相对于文献[3]的方法,由于本文方法首先通过方向图滤波得到了更为精确的条纹方向,然后利用等值线窗口降低了噪声对提取结果的影响,

最后在条纹梯度图上确定中心线,则可以避免大量 $2\pi$ 跳变线的干扰,所以本文得到的中心线精度很高,方法可靠。

通过对比图8(b)和图9(b)的中心线结果可以清楚地看到,图8(b)中心线位置比图9(b)的中心线更清楚、更准确。用本文方法对另一幅条纹图(图10(a))进行处理的结果如图10(b)所示。由于图10(a)条纹密度变化较大,尽管一般的处理方法难以取得理想结果,但是本文方法仍然可以得到非常精确的条纹中心线。



(a) 条密度ESPI条纹图



(b) 图10(a)的条纹中心线图

图10 用本文方法对图10(a)进行处理所得到的条纹中心线结果

Fig. 10 Another ESPI fringe image and its skeletons obtained by our method

## 5 结论

由于散斑干涉条纹图具有高噪声,使得从单幅散斑图中提取条纹中心线非常困难,因此通用的提

取条纹中心线的方法,如灰度极值法、导数过零点方法等,难以得到有用的结果。本文首先对条纹光强分布图进行曲面拟合,并使用三角变换来进行方向图滤波,得到了较精确的条纹方向图;然后通过平面拟合来近似条纹切面,并计算出条纹切面与水平面夹角的余弦值;最后利用该余弦值在条纹波峰和波谷位置1到-1之间的跳变来方便而准确地提取出条纹中心线。实际应用表明,本文提出的方法能从单幅散斑干涉条纹图中很好地提取条纹中心线。

## 参考文献 (References)

- 1 Creath K. Speckle: Signal or Noise [A]. In: Jueptner W, Osten W, eds: Proceedings of FRINGE'93 [C], Berlin, German: Akademin Verlag, 1993: 97 ~ 102.
- 2 Yu Qi-feng, Liu Xiao-lin, Sun Xiang-yi. Generalized spin filtering and an improved derivative-sign binary image method for the extraction of fringe skeletons [J]. Applied Optics, 1998, 37(20): 4504 ~ 4509.
- 3 Sun Xiang-yi, Yu Qi-feng. A new method to extract speckle fringe skeletons by fringe orientations [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(4): 427 ~ 432. [孙祥一, 于起峰. 一种通过条纹方向图提取散斑条纹中心线的方法[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 427 ~ 432.]
- 4 Zhou Xiang, Baird John P, Arnold John F. Fringe-orientation estimation by use of a Gaussian gradient filter and neighboring-direction averaging [J]. Applied Optics, 1999, 38(5): 795 ~ 804.
- 5 Hu Kun, Zhou Fu-qiang. A fast extrication method for sub-pixel center of structured light stripe [J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(6): 60 ~ 63. [胡坤, 周富强. 一种条纹中心线快速亚像素提取方法[J]. 光电技术应用, 2005, 20(6): 60 ~ 63.]
- 6 Chen Rui-gai, Chen Huai-xin. A new method for interference fringe skeletonizing and thinning [J]. Laser Journal, 2005, 26(5): 40 ~ 41. [陈瑞改, 陈怀新. 干涉条纹中心线提取与细化的新方法[J]. 激光杂志, 2005, 26(5): 40 ~ 41.]
- 7 Yu Qi-feng, Sun Xiang-yi, Liu Xiao-lin. Spin filtering with curve windows for interferometric fringes [J]. Applied Optics, 2002, 41(14): 2650 ~ 2654.