

文章编号: 0253-2239(2007)04-0625-6

散斑条纹图的自适应窗口滤波方法

杨 夏 于起峰 伏思华

(国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘要: 针对散斑噪声很难用常用的滤波方法进行滤除,在已有等值线滤波方法的基础上,提出一种更优的自适应窗口滤波方法。由于等值线窗口是在条纹方向图的基础上得到的,深入研究条纹方向的求取方法,提出了一种更为可靠的条纹方向求取算法,在得到高精度条纹方向的同时,还能估计出条纹的密度。使用等值线窗口技术,保持了窗口形状的自适应能力,然后利用对条纹密度的估计,根据条纹的宽度来确定滤波窗口的大小,实现了滤波窗口大小的自适应。最后,根据条纹方向和滤波后的图像可以直接得到条纹密度变化较大的单幅散斑图的相位结果。

关键词: 光学测量; 散斑干涉测量; 散斑噪声; 条纹方向; 等值线窗口; 自适应窗口

中图分类号: TN713 文献标识码: A

Adaptive Window Filter for Electric Speckle Pattern Interferometry Fringe Pattern

Yang Xia Yu Qifeng Fu Sihua

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Electric speckle pattern interferometry (ESPI) is a modern measuring technology and has many applications. But the high speckle noise makes the signal-to-noise ratio (SNR) of the electric speckle pattern interferometry fringe pattern very low and so limits the applications of electric speckle pattern interferometry. It is hard for usual filters to filter off the high speckle noise. A novel filtering method is proposed based on contoured window filter. Because the contoured window is obtained from fringe orientations, so we proposed a new algorithm to get more precise orientations. This algorithm can calculate the precise orientations and estimate the fringe widths at the same time. Based on this algorithm, adaptive window filter is designed. This new filter can adapt its shape following the fringe orientations and adapt its size according to the density of the local fringe. Last the phase can be obtained from the filtered image whose density varies a lot.

Key words: optical measurement; electric speckle pattern interferometry; speckle noise filtering; fringe orientation; contoured window; adaptive window

1 引 言

散斑干涉测量是现代测量方法中的重要方法之一。但是由于单幅的散斑图往往存在很多的散斑噪声而难以处理^[1]。对于散斑干涉条纹图,散斑噪声总是存在,如何有效地滤除散斑条纹图的噪声,从单幅散斑条纹图中提取相位信息是很有意义的工作^[2,3]。图像滤波的方法也多种多样,如邻域均值滤波、中值滤波、频率域滤波等。但这些通用的滤波

方法没有考虑干涉条纹图的特点,即它的灰度分布具有方向性,因此它们对条纹图的处理或多或少存在一些问题,尤其是对于含有高噪声的散斑干涉条纹图,其空间频率与噪声频率很接近,低通滤波可能损害条纹特征或者不能完全消除噪声。等值线窗口滤波方法考虑了条纹图的特征,沿条纹切线方向进行跟踪得到等值线窗口,然后再在等值线窗口内进行低通滤波^[4~7]。大量应用证明,等值线窗口滤波方法对散

作者简介: 杨 夏(1977—),男,湖北当阳人,博士研究生,主要从事实验力学和图像处理方面的研究。

E-mail: mr_honson@163.com

导师简介: 于起峰(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事实验力学和摄影测量方面的研究。

E-mail: yuqifeng@vip.sina.com

收稿日期: 2006-05-23; 收到修改稿日期: 2006-09-14

斑干涉条纹图随机噪声有很强的抑制能力。

但在实际的应用中,经常会遇到条纹密度不断变化的散斑条纹图,如果使用固定大小的窗口,则很难同时处理好密度大小不同的条纹。例如窗口取得较小时,等值线窗口能够很好保持细条纹的相位信息,但是却不能很好滤除宽条纹的噪声;而窗口取得较大时,可以很好滤除宽条纹的噪声,但是却模糊或者损失了细条纹的相位信息。本文针对散斑条纹图条纹常见的密度变化情况,提出了一种新的算法,该算法在得到更为准确可靠的条纹方向同时,还可以对条纹的密度进行估计。条纹方向可以用来得到更近似等值线的窗口,实现滤波窗口形状的自适应,对

条纹密度的估计可以用来确定等值线窗口的大小,实现滤波窗口大小的自适应。在自适应窗口内利用简单的低通滤波,例如均值滤波,就可以很好地滤除条纹的噪声,同时保持条纹的相位信息。

2 求取条纹方向的平方差累积法

对于条纹图,沿条纹切线方向的图像数据变化最小,而沿条纹法线方向的图像数据差异最大。所以如果能知道沿各个方向的数据差异并找到这些数据差的最小值或者最大值,就可以得到条纹方向。我们采用4个方向:0°,45°,90°和135°,沿着这4个方向的数据差定义为

$$\begin{aligned} d_{0^\circ}(x,y) &= [I(x-1,y) - I(x+1,y)]^2, \\ d_{45^\circ}(x,y) &= [I(x-1,y+1) - I(x+1,y-1)]^2 \times 0.5, \\ d_{90^\circ}(x,y) &= [I(x,y-1) - I(x,y+1)]^2, \\ d_{135^\circ}(x,y) &= [I(x-1,y-1) - I(x+1,y+1)]^2 \times 0.5, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $I(x,y)$ 为指点 (x,y) 处的强度或者图像灰度。因为对于离散的图像点,沿着45°或者135°方向的两点之间的距离是沿0°或者90°方向的两点间距的 $\sqrt{2}$ 倍,所以(1)式中沿45°或者135°方向的数据差需要乘以0.5。在计算窗口内进行平均:

$$D_A(x,y) = \sum_{(i,j) \in S} d_A(x,y), \quad (2)$$

($A = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)

如图1所示,当(2)式中的4个和值被放在一个正方形的4个顶点时,每个值所表示的方向由0°,45°,90°和135°映射到0°,90°,180°和270°。4个顶点在 xy 坐标平面上的位置是一个正方形,各点的 $D_A(x,y)$ 值对应于 z 轴的坐标。对4个顶点进行平面拟合,则拟合平面的法线在 xy 平面的投影所指的方向对应于各个 $D_A(x,y)$ 中的最小值,如图2所示。由于沿条纹切线方向的图像数据变化最小,所以最小的 $D_A(x,y)$ 值对应于条纹切线方向,即条纹

方向。设拟合平面为

$$g(x,y) = a + bx + cy, \quad (3)$$

其中 a, b, c 均为平面拟合时平面的参量。通过最小二乘法可以得到

$$b = \frac{1}{2}(D_{0^\circ} - D_{90^\circ}), \quad c = \frac{1}{2}(D_{45^\circ} - D_{135^\circ}), \quad (4)$$

由于拟合平面的法线矢量为 $(b, c, 1)$, 该法线在 xy 平面的投影矢量为 $(b, c, 0)$, 于是该法线在 xy 平面的投影方向为

$$\theta(x,y) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{b}{c}\right) = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{D_{0^\circ} - D_{90^\circ}}{D_{45^\circ} - D_{135^\circ}}\right), \quad (5)$$

因为方向的范围从0°~180°扩展到0°~360°,所以最后的结果需要除以2。为了衡量所得到的方向的可靠性,本文提出了一种简单的评价准则:如果某区域没有明显的方向信息,(2)式表示的4个值之间的差异将会非常接近而使得用(3)式所拟合的平面几

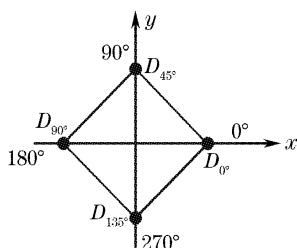


图1 将四个值放到正方形的四个顶点

Fig. 1 Four differences are arranged at four corners

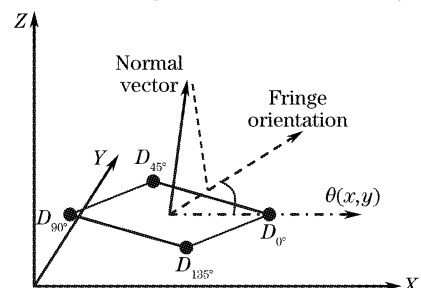


图2 通过平面拟合来确定条纹方向

Fig. 2 Fringe orientation obtained by plane fitting

乎水平。但是对于具有明显方向性的区域,4 个值之间会有明显的差异,拟合得到的平面将会倾斜。于是可以用该拟合平面的法线矢量,即 $(b, c-1)$ 的倾斜程度作为判断所得方向是否可靠的标准:

$$\varphi(x, y) = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{b^2 + c^2 + 1}}\right), \quad (6)$$

为了简化,可以设

$$C(x, y) = b^2 + c^2, \quad (7)$$

如果 $C(x, y)$ 比设定的阈值大,则(6)式中的 $\varphi(x, y)$ 相应较大,这就意味着拟合平面足够倾斜,得到的方向可靠。相反,如果 $C(x, y)$ 太小,说明得到的方向不够可靠,需要在一个更大的窗口内重新求取方向。

图 3(a)是带有高噪声的仿真条纹图像,图 3(b)是对应的真实条纹走向。条纹走向即为(5)式得到的 $\theta(x, y)$ 值,将其由 $0 \sim \pi$ 的角度范围映射到 $0 \sim 255$ 的图像灰度范围,就得到了方向图。仿真条纹的宽度是 28 pixel。为了验证上面的分析,我们用三种方法得到的结果分别与真实值进行对比。方向误差定义为

$$E = \frac{1}{n} \sum_{x, y \in S} |\sin[\theta(x, y) - \theta_T(x, y)]|, \quad (8)$$

其中 n 为计算范围 s 内的像素数, $\theta_T(x, y)$ 为条纹方向的真实值。分别用梯度法、平面拟合法以及本文介绍的平方差累积法,在从 5 pixel \times 5 pixel 到 67 pixel \times 67 pixel 的计算窗口内对同一条纹图像计算了条纹方向。这样不仅可以比较三种方法得到方向结果的精度,还可以比较它们对计算窗口的适应能力。

图 4 是三种方法所得结果误差分析比较,可以看出,即使梯度法使用了 Sobel 算子来计算梯度,本

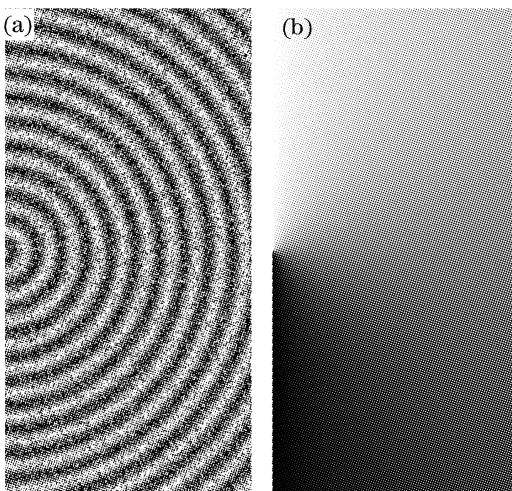


图 3 仿真条纹图(a)及其方向图的真值(b)

Fig. 3 (a) Simulated fringe image with high speckle noise, (b) its true orientation

文介绍的方法所得到的结果依然最精确;平面拟合方法对计算窗口的大小非常敏感,其结果精度随窗口的变化有很大的起伏,只有当窗口大小与条纹宽度接近时才能得到较好的结果。图 5(b)是对真实图像图 5(a)所求的条纹方向图,其 $0 \sim 255$ 的灰度表示 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的角度。

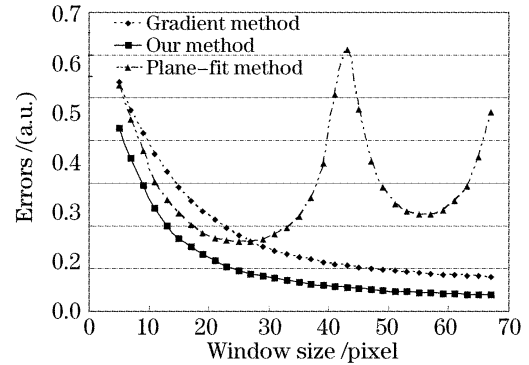


图 4 三种方向求取方法的结果精度对比

Fig. 4 Accuracy comparison of three methods

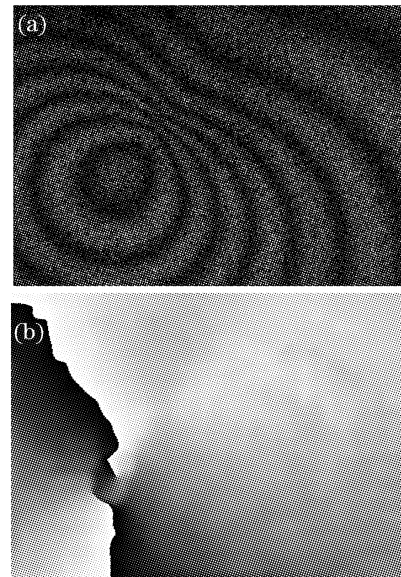


图 5 实际的散斑干涉条纹(a)及其条纹方向图(b)

Fig. 5 (a) Real speckle interferogram, (b) orientation result image

3 条纹密度的估计

在窗口尺寸固定的计算窗口内,条纹越密集,则其窗口内图像的方向特性就越明显, $C(x, y)$ 值也就越大;相反,条纹越宽, $C(x, y)$ 值就越小。所以我们可以用 $C(x, y)$ 的值来对条纹密度进行估计。

设 x 坐标为条纹的法线方向, y 坐标为条纹方向,则沿 x 方向的条纹数据如图 6 所示,其中 L 为计算窗口的尺寸, B 为条纹幅度。可以知道,沿 x 坐标方向的相邻数据差 D_x 的累积具有最大值,而沿 y 坐标方向的数据差 D_y 则可以认为是噪声影响。所

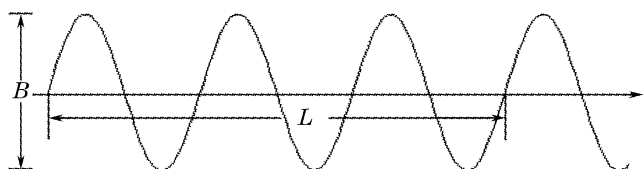


图 6 条纹法线方向的数据示意图

Fig. 6 Section distribution of the fringe along its normal direction

以设

$$D_x - D_y = \sum |I(x+1) - I(x)|, \quad (9)$$

如图 6 所示,对于一级条纹,其条纹幅度为 B ,则其数据差的绝对值得和为 $2B$ 。对于计算窗口内的条纹数据有

$$\sum |I(x+1) - I(x)| = N \times (2 \times B), \quad (10)$$

其中的 N 为条纹级数。由(4)式可以得到

$$b^2 = \frac{1}{4}(D_{0^\circ} - D_{90^\circ}), \quad c^2 = \frac{1}{4}(D_{45^\circ} - D_{135^\circ}), \quad (11)$$

其中 $(D_{0^\circ} - D_{90^\circ})$ 可以认为是沿 0° 方向的由(9)式得到的结果, $(D_{45^\circ} - D_{135^\circ})$ 为沿 45° 方向的由(9)式得到的结果。这里, $D_x - D_y$ 由(12)式估计:

$$D_x - D_y \approx \sqrt{(D_{0^\circ} - D_{90^\circ})^2 + (D_{45^\circ} - D_{135^\circ})^2}, \quad (12)$$

于是可以估计窗口 L 内的条纹级数 N 为

$$N = \frac{1}{B} \sqrt{(b^2 + c^2)}, \quad (13)$$

于是,条纹的密度就可以被正确地估计出来。实际上,计算方向所使用的是(1)式,数据差是由差的平方得到的,并不是(9)式中的绝对值,所以使用的是(7)式,而不是(13)式。实际结果表明,使用(7)式仍然可以很好地对条纹密度进行估计,并且使用(1)式的方法比计算绝对值的方法计算效率要高。

图 7 是模拟的加了散斑高斯噪声的条纹图,图 8 是对图 7 进行的条纹密度估计,其较低的灰度值对应于低密度条纹,即较宽的条纹,较高的灰度值对应于较窄的条纹。计算窗口为 $50 \text{ pixel} \times 50 \text{ pixel}$,为了清楚显示,图 8 已经被增强。

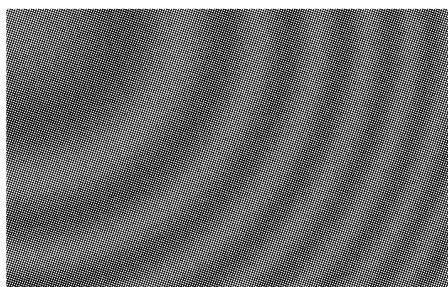


图 7 模拟的散斑条纹图

Fig. 7 Simulated speckle fringe pattern

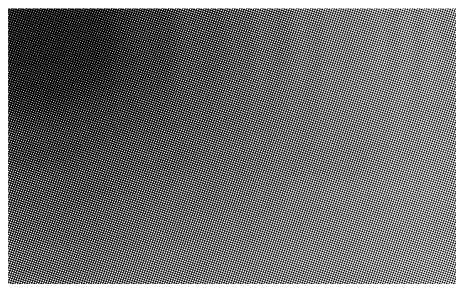


图 8 对图 7 进行的条纹密度估计

Fig. 8 Estimation of fringe density from Fig. 7

从图 8 可以看到,图 7 中条纹的密度可以被正确地估计。这里,我们只需要对条纹密度进行大致的估计,并不是要精确地求出密度。图 9 是对真实条纹图图 5(a)所做的条纹密度估计。

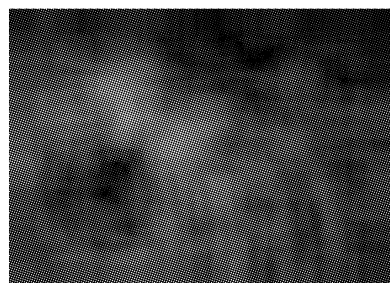


图 9 对真实散斑图图 5(a)进行的条纹密度估计

Fig. 9 Fringe density estimation of the real speckle image of Fig. 5(a)

4 自适应窗口的确定

4.1 窗口形状的确

假定当前点的坐标位置为 $P_0(x_0, y_0)$,当前点的条纹方向为 θ_0 。于是分别沿着条纹方向和条纹相反的方向进行跟踪,就可以得到与当前点相邻的两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_{-1}(x_{-1}, y_{-1})$ 这样就可以得到 $P_n(x_n, y_n)$ 和 $P_{-n}(x_{-n}, y_{-n})$,归结起来便是(14)式[如图 10(a)所示]:

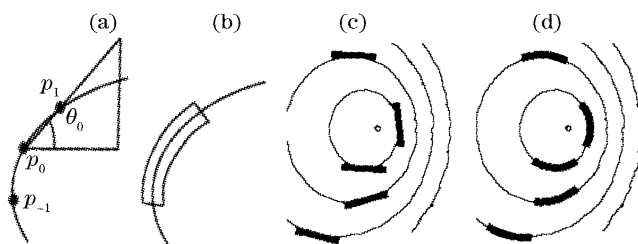


图 10 (a)沿方向跟踪示意图和(b)其跟踪得到的等值线,(c)条纹上沿方向的矩形窗口及(d)其条纹上的等值线窗口

Fig. 10 (a) Tracing procedure and (b) obtained contoured window, (c) directional rectangle window on fringes and (d) its contoured window

$$\begin{cases} x_{\pm i} = x_{\pm(i-1)} \pm \cos \theta_{\pm(i-1)}, \\ y_{\pm i} = y_{\pm(i-1)} \pm \sin \theta_{\pm(i-1)}, \end{cases} \quad (14)$$

其中 $1 \leq i \leq n$, θ_i 为点 (x_i, y_i) 所对应的条纹方向。注意当跟踪到点 (x_i, y_i) 时, 下一步跟踪的方向应该是 θ_i 。这样一点一点的进行亚像素跟踪后, 就得到了一条曲线, 这条曲线非常接近等值线。再通过把这条曲线的两边进行拓宽, 就得到了图 10(b) 所示的等值线窗口。图 10(d) 显示了等值线窗口能够很好的拟合条纹等值线。图 10(c) 是沿方向的矩形窗口, 只能近似于条纹等值线, 特别是在条纹曲率很大的地方, 这种矩形窗口有着很大的误差。图 10(d) 显示了等值线窗口能够很好的拟合条纹等值线。只有在条纹等值线上, 条纹的相位基本保持不变, 仅用一般的低通滤波器就可以把噪声很好地滤除。

4.2 窗口大小的确定

由于对条纹密度进行了估计, 所以可以在条纹较窄的区域使用较小的窗口, 在条纹较宽的区域使用较大的窗口。具体是固定了窗口的长宽比(例如 5:1), 然后根据估计的条纹密度来确定计算窗口的宽度, 如图 11 所示。

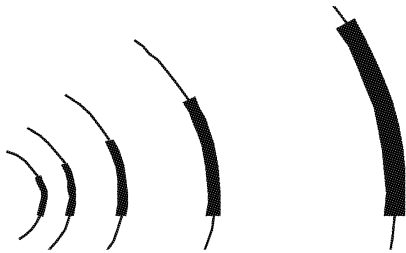


图 11 随条纹密度变化的等值线窗口

Fig. 11 Contoured windows changed with fringe density

若当前点的窗口长度为 25 pixel, 定长宽比为 5:1, 则窗口宽度为 5 pixel。确定点的窗口时, 先以该点为起始点(窗口中心)沿条纹方向搜索 12 pixel(窗口长度的一半), 再沿反方向搜索 12 pixel, 就得到了条纹等值线。然后从等值线上各点沿条纹法线方向(条纹方向加减 45°)向两边各搜索 2 pixel(窗口宽度的一半)。所有这些搜索到的点的集合就构成了以当前点为中心的等值线窗口。

5 实验结果

在构造了自适应窗口后, 就可以对散斑条纹图进行很好的滤波。由于自适应窗口内的条纹数据近似相等, 所以在窗口内用简单的低通滤波, 如均值滤波, 就可以取得很好的效果。图 12 是对真实散斑图图 5(a) 进行自适应窗口滤波后的结果图, 自适应窗口的长宽比为 5。

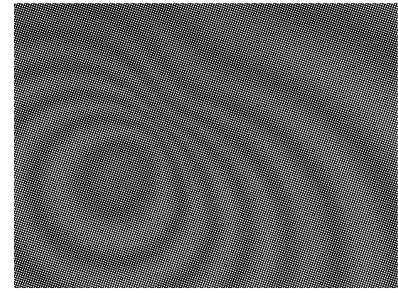


图 12 图 5(a) 进行自适应窗口滤波的结果图

Fig. 12 Filtering result of Fig. 5(a) with our adaptive window method

图 13 是从上至下依次为矩形窗口、等值线窗口和自适应窗口滤波效果的对比。矩形窗口大小为 $13 \text{ pixel} \times 13 \text{ pixel}$, 等值线窗口大小为 $7 \text{ pixel} \times 35 \text{ pixel}$, 自适应窗口的长宽比为 5:1。可以看到, 矩形窗口对细条纹有明显的模糊; 等值线条纹能很好地保持条纹细节, 但是对于粗条纹的噪声却不能较好地滤除; 自适应窗口既能较好地保持条纹信息, 又能较好地滤除各种密度条纹的噪声。

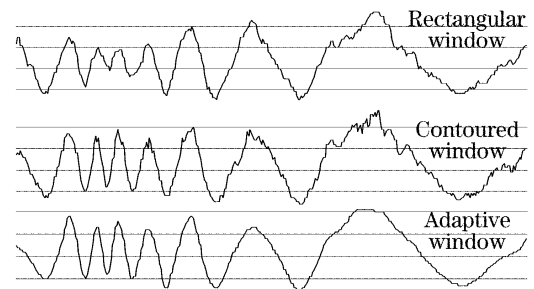


图 13 三种滤波方法的效果对比

Fig. 13 Comparison of three filtering methods

因为自适应窗口滤波可以得到质量很高的条纹图, 所以可以对滤波后的条纹图直接进行处理得到相位信息^[8,9]。本文采用的是先对图像进行正则化^[10], 再由正则化图像直接求取条纹相位的方法。图 14 是由图 12 得到的相位结果。在后续处理中, 条纹方向、条纹密度估计和自适应窗口仍然能够得到很好的应用, 所以单幅散斑图像得到的相位结果非常理想。

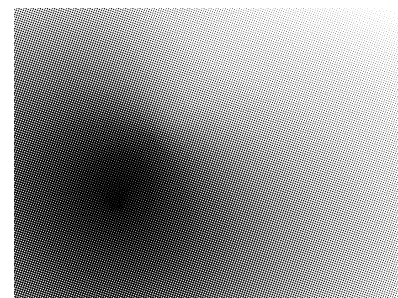


图 14 由滤波结果图(图 12)得到的相位结果

Fig. 14 Phase result obtained from Fig. 12

为了进一步验证本文方法的有效性,我们对一幅质量较差的条纹图像进行了滤波处理。原始散斑条纹图如图 15 上半部所示,噪声很高并且斑点很大,条纹有间断现象。经过滤波,得到的结果图像如图 15 下半部所示。可以看到,对于质量较差的条纹图像,本文方法依然可以得到较好的滤波结果。但是过高水平的大颗粒散斑噪声还是对方向图的求取和条纹密度的估计造成影响,所以图 15 中滤波的效果不如图 12 的好。

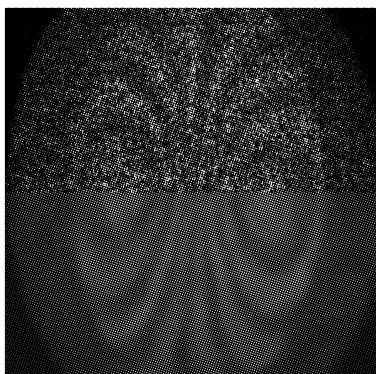


图 15 质量较差的散斑图滤波的结果,上半部为原始图,下半部为滤波结果

Fig. 15 Filtering result of low quality speckle fringe pattern.
top: original pattern, low: filtered pattern

6 结 论

散斑条纹图因其高的散斑噪声而难以处理,所以很好地滤除噪声并保持原有的条纹信息是散斑条纹处理中非常重要的一步。等值线窗口能很好地滤除散斑噪声并同时保持条纹信息,由于等值线窗口由条纹方向得到,提出了一种更精确的方向提取方法。条纹方向一般变化缓慢,是比较容易提取的信息,所以对条纹图像的质量没有很高要求,较差的图

像也可以得到相对较好的滤波效果。该算法在得到方向的同时对条纹密度进行估计,减小了整个方法的复杂度。而在实际工作中得到的条纹密度往往是不不断变化的,所以对条纹密度的估计使计算窗口的选取能够自动适应各种的条纹,对于条纹的自动化处理是非常适用的。实验结果表明本文的自适应窗口滤波方法能够取得很好的滤波效果,并有助于实现从单幅散斑图直接得到相位。

参 考 文 献

- 1 K. Creath. Speckle; signal or noise? [C]. *Proc. FRINGE 93*, W. Jueptner, W. Osten, ed., 1993. 97~102
- 2 K. Creath. Phase-measurement interferometry techniques [C]. *Progress in Optics*, Edited on E. Wolf, Amsterdam; Elsevier Science Publishers, 1988. 349~393
- 3 G. Kaufmann, A. Davila, D. Kerr. Interview-smoothing of speckle interferometry fringe-patterns [J]. *Optical Testing Digest*, 1997, **2**(4): 4504~4509
- 4 Qifeng Yu. Spin filtering process and automatic extraction of fringe center-lines from interferometric patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(18): 3782~3784
- 5 Qifeng Yu, Xiaolin Liu, Klaus Andresen. New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(17): 3705~3711
- 6 Qifeng Yu, Xiangyi Sun, Xiaolin Liu. Spin filtering with curve windows for interferometric fringes [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(14): 2650~2654
- 7 Qifeng Yu, Xia Yang, Sihua. Fu *et al.*. Two improved algorithms with which to obtain contoured windows for fringe patterns generated by electronic speckle-pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(33): 7050~7054
- 8 D. Kerr, F. Mendoza Santoyo, J. R. Tyrer. Extraction of phase data from electronic speckle pattern interferometric fringes using a single-phase-step method; a novel approach [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, **7**(5): 820~826
- 9 Qifeng Yu, Xiaolin Liu, Xiangyi Sun *et al.*. Double-image and single-image phase-shifting methods for phase measurement [J]. *Optik*, 1998, **109**(2): 89~95
- 10 Qifeng Yu, Klaus Andresen, Wolfgang Osten *et al.*. Noise-free normalized fringe patterns and local pixel transforms for strain extraction [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(20): 3783~3790