

# 频率域数字散斑相关方法的研究

亓东平\* 滕树云 程传福  
(山东师范大学物理系, 济南 250014)

**摘 要** 提出一种利用二维快速傅里叶变换(FFT)经频率域匹配滤波实现数字相关运算以提取散斑图携带位移信息的频率域数字散斑相关方法。该方法因采取快速傅里叶变换、散斑限幅、滤波器优化等措施而减弱了空间域相关方法中不利因素对相关波峰的影响,提高了相关点定位的时效性和精确性。

**关键词** 散斑分析, 数字相关, 散斑限幅, 相关滤波器。

## 1 引 言

数字散斑相关方法是在 80 年代初期由 Yamaguchi<sup>[1]</sup>和 Peters、Ranson<sup>[2]</sup>独立提出的散斑位移分析方法。它直接从物体表面的随机斑点或由其引起的散斑场中提取信息,避免了传统的逐点和全场分析法利用干涉条纹提取信息的不便,其测量精度和灵敏度不受条纹对比度的影响。目前,公开发表的文献中,数字相关运算大都是在空间坐标系中对数字散斑图用模板匹配法进行匹配搜索来实现的,称之为空间域数字散斑相关方法<sup>[3, 4]</sup>。本文提出一种在频率域匹配滤波以实现数字相关运算的频率域数字散斑相关方法。这两种相关方法具有以下不同特点: 1) 在空间域进行匹配搜索时,无法避免图像噪声对相关波峰的影响;频率域数字相关方法可以通过散斑限幅、滤波器优化等措施减小图像噪声的影响。2) 空间域匹配搜索中,在最佳匹配位置邻域内选择目标子区并逐渐趋近于最佳匹配位置时,相关性逐渐增大,因此相关波峰平滑,这给精确定位带来困难;在频率域实现相关运算时则可通过优化滤波器得到尖锐化的相关波峰。3) 在空间域进行匹配搜索时,每选定一样本子区都要在整个位移后散斑图中搜索一遍目标子区,因而搜索重复,运算量大,耗时长;而频率域数字相关法通过三次傅里叶变换实现相关运算,提高了相关运算的时效性。

## 2 频率域数字散斑相关原理

从物体变形前的实拍数字散斑图中选取一小块区域  $w(x, y)$  作为样本散斑子区,其余部分为其补区,用  $w^-(x, y)$  表示。则该物体变形前整个散斑图可表示为

$$A_0(x, y) = w(x, y) + w^-(x, y),$$

\* 现通讯地址: 山东工业大学数理系, 济南 250061。

收稿日期: 1998-10-23; 收到修改稿日期: 1999-01-11

同样, 物体变形后数字散斑图可表示为

$$A_{in}(x, y) = w(x + u_0, y + v_0) + w_-(x + u', y + v'),$$

式中  $(u_0, v_0)$ 、 $(u', v')$  分别为样本散斑子区及其补区的位移, 由于样本散斑子区较小,  $(u_0, v_0)$  可视为常数。对物体变形前的散斑图  $A_0(x, y)$  的样本散斑子区  $w(x, y)$  作傅里叶变换并取复共轭得

$$W^*(u, v) = \mathcal{F}[w(x, y)] = |W(u, v)| \exp[-j\Phi(u, v)], \quad (1)$$

$W^*(u, v)$  称为复数型匹配滤波器(CMF), 在以下的推导中以它为例对数字散斑图进行滤波变换。以变形后散斑图  $A_{in}(x, y)$  作为输入数字散斑场, 对其作傅里叶变换并由傅里叶变换平移定理得

$$A_{i0}(u, v) = \mathcal{F}[w(x + u_0, y + v_0) + w_-(x + u', y + v')] = W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)] + \mathcal{F}[w_-(x + u', y + v')], \quad (2)$$

用  $W^*(u, v)$  乘(2)式, 即对  $A_{i0}(u, v)$  进行滤波, 得频率域数字散斑场

$$A_i(u, v) = W^*(u, v)W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)] + W^*(u, v)\mathcal{F}[w_-(x + u', y + v')], \quad (3)$$

对  $A_i(u, v)$  作傅里叶变换, 得输出散斑场

$$A_{out}(x, y) = \mathcal{F}\{W^*(u, v)W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)]\} + \mathcal{F}\{W^*(u, v)\mathcal{F}[w_-(x + u', y + v')]\}, \quad (4)$$

根据卷积定理, 并用  $\odot$  表示卷积运算, 上式右端的第二项可写成

$$w(x, y) \odot w_-(-x - u', -y - v'),$$

它是一卷积模糊项。根据自相关定理和卷积定理, 上式右端的第一项可写成

$$\mathcal{F}\{W^*(u, v)W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)]\} = [w(x, y) \odot w(-x, -y)] \odot \delta(x - u_0, y - v_0) = C_{ww}(x - u_0, y - v_0), \quad (5)$$

式中  $C_{ww}(x, y)$  是  $w(x, y)$  的自相关运算。该项代表输出散斑场中一个相关亮点。因此, 在输出散斑场中与样本散斑子区相匹配处是一亮点, 其余部分是卷积模糊的; 由该相关亮点位置可以确定物体变形后散斑图中相应目标散斑子区的位置, 进而可求出样本子区与目标子区之间位移大小和方向。上述频率域数字散斑相关算法可简化为如图 1 所示流程。

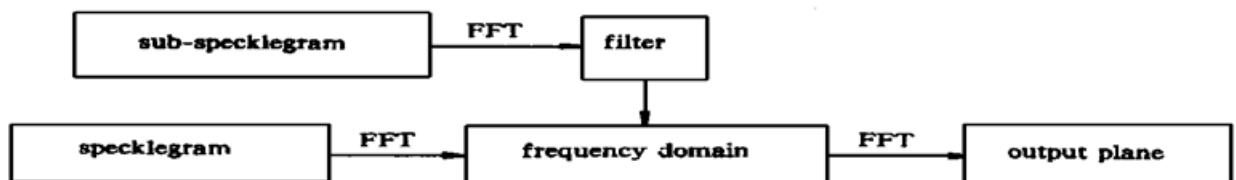


Fig. 1 Diagram of digital speckle correlation in frequency domain

### 3 频率域数字散斑相关处理程序的编制

根据上述基本原理, 作者用 C 语言编制了频率域数字散斑相关处理程序。为了减小散斑图像噪声对相关结果的影响, 得到尖锐化的相关波峰, 在程序编制过程中注意解决了以下两个问题。

#### 3.1 对常规散斑图进行限幅预处理

在相关计算中, 光学与硬件噪声往往会使相关输出具有比较严重的噪声背景, 从而影响

相关点的精确定位。因此，首先对常规数字散斑图进行限幅预处理，以消除绝大部分噪声。散斑限幅<sup>[10, 11]</sup>是对散斑强度的一种非线性处理，其定义为

$$I_c(x, y) = \begin{cases} 1 & I(x, y) \geq C, \\ 0 & I(x, y) < C. \end{cases}$$

式中  $I_c$  为限幅散斑， $I$  为常规散斑， $C$  为限幅常数。当  $C$  取散斑图的平均光强即  $C = \langle I \rangle$  时，限幅散斑的相关输出结果与常规散斑的相关输出结果完全一致<sup>[12]</sup>。作者先在  $\langle I \rangle$  附近取不同的  $C$  值进行整幅散斑图的限幅相关识别；取使相关峰值最大的  $C$  值作为实际的限幅常数；然后在限幅散斑图中选取子区域作相关识别，实验证明是可行的。图 2 显示出散斑限幅与否对输出相关峰值的不同效果。不难看出散斑限幅能消除绝大部分图像噪声对相关波峰的影响。

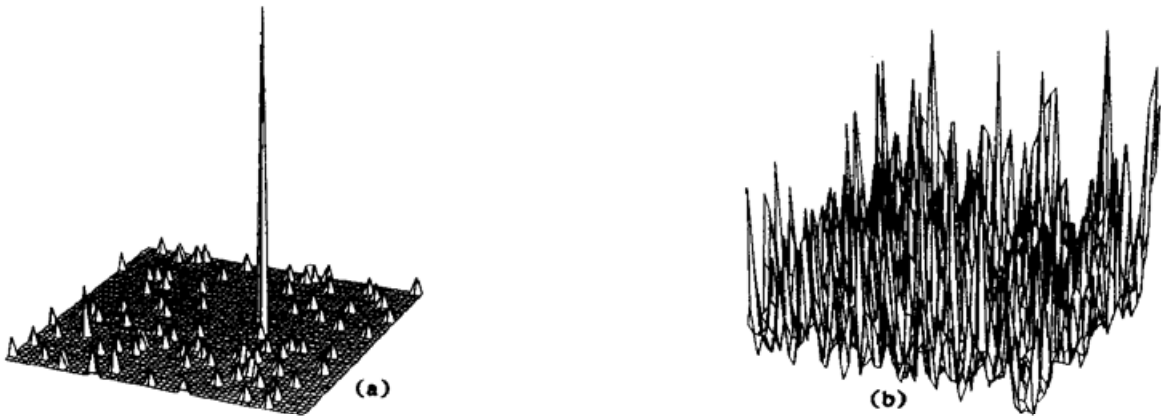


Fig. 2 Correlation results of (a) clipped specklegram and (b) unclipped specklegram

### 3.2 匹配滤波器的优化及制备

在频率域实现相关运算，设计合理的滤波器是减弱散斑图噪声对相关波峰影响、提高处理精度的关键。在前面的推导中，(1) 式的  $W^*(u, v)$  为复数型的匹配滤波器(CMF)<sup>[5]</sup>；若分别取  $W^*(u, v)$  的振幅  $|W(u, v)|$  和相位  $\exp[-j\phi(u, v)]$ ，可制得纯振幅型的滤波器(AOF)和纯相位型的滤波器(POF)<sup>[6]</sup>；若取  $W^*(u, v)$  的复共轭的倒数  $[W(u, v)]^{-1}$  和经调制振幅相位  $[|W(u, v)| + a]^{-1} \exp[-j\phi(u, v)]$  则可分别制得倒置型滤波器(IF)及调制振幅相位型滤波器(AMPOF)<sup>[7]</sup>。用这几种滤波器进行匹配滤波，并观察了不同相关输出结果。倒置型滤波器虽然相关波峰最尖细，但其信噪比及抑噪能力都较差；复数型匹配滤波器的抑噪能力很强，但其相关波峰较宽，难以精确定位；纯振幅型滤波器相关波峰最宽。相比较而言，纯相位型滤波器既具有良好的信噪比和抑噪能力，又具有尖细的相关波峰，调制振幅相位型滤波器与之差别不大。图 3 给出三种不同滤波器进行相关识别的结果。

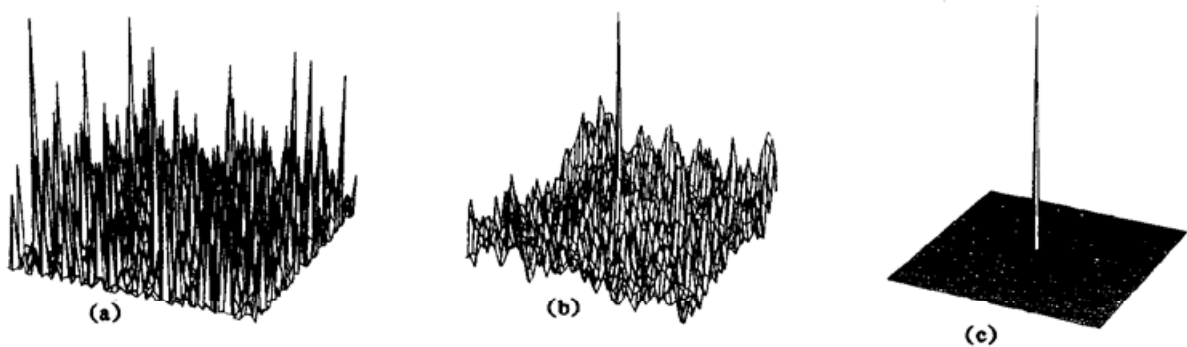


Fig. 3 Filtering results of different kinds of filter: (a) IF, (b) CMF, (c) POF

由上述比较可见,纯相位型滤波器是进行数字散斑相关运算理想的滤波器,因此本文选用它来进行实际的相关运算。通过优化滤波器,既使相关波峰尖锐化又减少了图像噪声对相关波峰的影响,提高了测量的精确性。这在空间域相关运算中是无法做到的。

数字匹配滤波器制备的关键有两个方面:

1) 必须将样本散斑子区精确地放置在傅里叶变换输入平面中心位置。否则,根据傅里叶变换平移定理,样本散斑子区的微小错位将使快速傅里叶变换后得到的“匹配滤波器”有一附加相位;滤波后的相关波峰将发生偏移,从而给测量带来误差。

2) 选取大小合适的样本散斑子区。根据散斑相关理论<sup>[8, 9]</sup>,散斑交叉相关的退相关因子  $r_d = \gamma\psi\Omega$ 。其中  $\gamma$  是由物体变形引起散斑形状变化导致的退相关因子,  $\psi$  为散斑位移导数退相关因子,  $\Omega$  为散斑位移退相关因子,三者均小于 1。散斑位移导致一部分散斑颗粒移入或移出散斑子区而使  $\Omega$  小于 1。一般说来,散斑子区越大,  $\Omega$  的值也越大。 $\psi$  作为散斑位移导数退相关因子,它是由子区内各点散斑位移的差别决定的。子区取得越大,它所包含的散斑颗粒之间的位移差别就越大,  $\psi$  就越小。因此,在选取散斑子区大小时要同时考虑到  $\psi$  和  $\Omega$  对  $r_d$  影响。在实际运算中,预先估计一下散斑位移大小,取子区边长约为散斑位移的 2 倍,这样可同时保证  $\psi$  和  $\Omega$  都具有较为理想的值。应该指出,  $\gamma$  是由物体变形特性所决定的,它难以通过对散斑图的处理来改善。

## 4 测量实例

为了检验本文所提出的频率域数字散斑相关方法的可行性,对试件平移、均匀拉伸和平面转动三种典型情况进行了测试。实验中,用 CCD 摄像机摄取经斑化处理的试件表面变形前后的数字散斑图。用 C 语言编制了频率域数字散斑相关处理程序,对数字散斑图进行处理;程序中散斑子区大小取  $20 \times 20$  个像素。相关运算后所获得的位移按逐点方式输出。将数据输入绘图软件可绘制出相应位移和应变等值线图。图 4(a) 为由处理程序运算结果绘得的试件平移位移场,图中纵横轴坐标均以 CCD 像素为单位,可以看到各点位移是相同的;相关运算的结果和由百分表测得的位移的相对误差为 0.38%。图 4(b) 为一左端固定、右端加以均匀拉伸载荷的带裂纹橡胶板试件的位移场。图中位移由左至右逐渐增大,其中左下角区域的位移存在竖直方向的分量,这是由试件本身右下角的裂纹引起的。此外,还用动态白光数字散斑照像术对由微机风扇电机带动的斑化圆盘转动的动态位移进行了测试,分别摄取了电机启动前圆盘的散斑图和启动后  $200 \mu\text{s}$  时的瞬时散斑图。图 4(c) 为经频率域数字相关处理后所获得的圆盘在该瞬时的位移场。它是典型的圆盘转动的位移分布。由上述测试实验可以看到,用

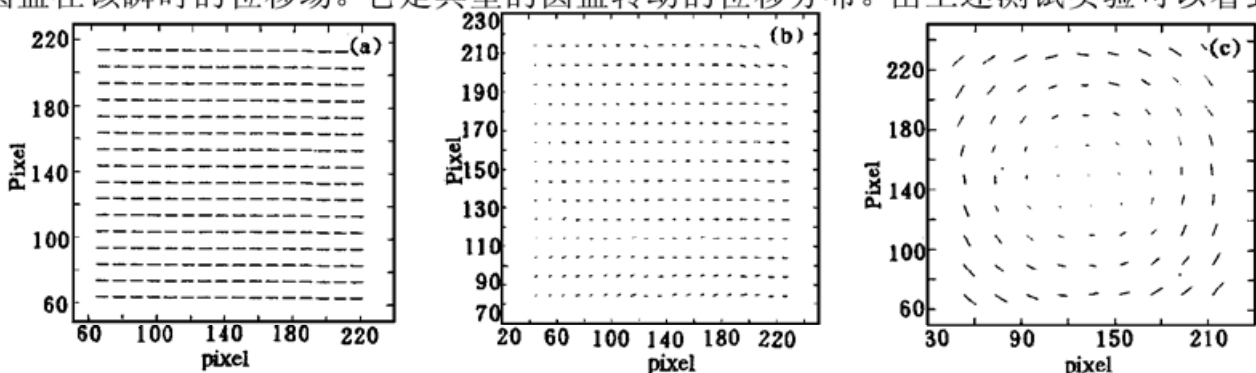


Fig. 4 Displacement fields of (a) translation, (b) stretch and (c) rotation

频率域数字散斑相关法所提取的位移与试件的实际位移是相符的。

**结 论** 本文提出的频率域数字散斑相关法用二维快速傅里叶变换实现相关运算, 避免了空间域相关运算中的重复搜索, 所采取的散斑限幅及匹配滤波器优化措施减弱了图像噪声对相关波峰的影响, 因此能够快速、精确地定量提取散斑场所携带的物体变形位移信息。

### 参 考 文 献

- [1] Yamaguchi I. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation. *Optica Acta*, 1981, **28**(10) : 1359~ 1376
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental mechanics. *Opt. Engng.*, 1982, **21**(5) : 427~ 431
- [3] 芮豪白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用. *力学学报*, 1994, **26**(5) : 599~ 607
- [4] 高建新, 周辛庚, 章玮宝等. 用数字图像法测量砗成形早期的变形特性. *实验力学*, 1996, **11**(3) : 334 ~ 338
- [5] Vander Lugt A B. Signal detection by complex spatial filtering. *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1964, **IT-10** : 139~ 145
- [6] Horner J L, Ianino P D G. Phase-only matched filtering. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(6) : 812~ 816
- [7] Awwal A A S, Karim M A, Jahan S R. Improved correlation discrimination using an amplitude-modulated phase-only filter. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(2) : 233~ 236
- [8] Li D W, Chen J B, Chiang F P. Statistical analysis of one-beam subjective laser-speckle interferometry. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(5) : 657~ 666
- [9] Sjodahl M. Accuracy in electronic speckle photography. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13) : 2875~ 2885
- [10] Pederson H M. Theory of speckle-correlation measurements using nonlinear detectors. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1984, **1**(8) : 850~ 855
- [11] Marron J, Morris G M. Correlation properties of clipped laser speckle. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(9) : 1403~ 1410
- [12] 汪柳生, 伍小平. 散斑与数字技术. *实验力学*, 1989, **4**(4) : 341~ 352

## Digital Speckle Correlation in Frequency Domain

Qi Dongping Teng Shuyun Cheng Chuanfu

(Department of Physics, Shandong Normal University, Jinan 250014)

(Received 23 October 1998; revised 11 January 1999)

**Abstract** An algorithm for the extraction of speckle displacement is presented. It performs the two-dimensional discrete cross-correlation of the sub-specklegrams from different specklegrams in the frequency domain and thus improves considerably the speed of a cross-correlation calculation. For more accurate measurements of the displacement field the level-limiting technique is introduced to reduce the noise, and to optimize the correlation filter for obtaining a narrower and higher correlation peak to provide the optimum estimate of the peak position.

**Key words** speckle analysis, digital correlation, clipped speckle, correlation filter.