

基于分形插值的频域散斑相关法面内位移测量

张红颖, 易建军, 于之靖

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 针对传统频域数字散斑相关法在测量物体面内位移测量精度较低的问题, 提出一种基于分形插值的频域数字散斑相关法。该方法在频域数字散斑相关法的基础上, 引入 Hanning 窗函数对图像进行滤波处理, 克服了图像边缘效应对最终位移值的影响; 同时利用散斑图像的子区域与整幅图像在结构形态和灰度特征的自相似性, 采用分形插值的方法进行亚像素插值, 进而能精确定位相关点, 得到更精确的亚像素位移值。实验结果表明: 该方法保持了频域散斑相关法的测量速度, 且将测量的绝对误差降低在 0.01~0.03 pixel 以内, 并进一步通过刚体平移实验测试了算法的可靠性。

关键词: 面内位移测量; 频域; 数字散斑相关法; Hanning 窗函数; 分形插值

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0917004

In-plane displacement measurement based on frequency domain speckle correlation method with fractal interpolation

Zhang Hongying, Yi Jianjun, Yu Zhijing

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: For the low precision of in-plane displacement measurement using traditional digital speckle correlation method in frequency domain, a new frequency domain correlation method based on fractal interpolation was proposed. Based on traditional digital speckle correlation in frequency domain, this method utilizes Hanning window function to filter the images in order to overcome the influence of edge effect on final displacement values. Considering the self-similarity of the sub-region and the whole image in structure morphology and gray characteristics, fractal interpolation was adopted to improve the sub-pixel interpolation, which could locate relevant points and get more accurate sub-pixel displacement values. Experimental results show that this method could reduce the absolute error within 0.01 to 0.03 pixel and maintain the measurement speed as well. Moreover, the reliability of the algorithm is tested through the rigid translation experiments.

Key words: in-plane displacement measurement; frequency domain; digital speckle correlation method; Hanning window function; fractal interpolation

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(U1333105); 中央高校基本科研业务费(3122015C016)

作者简介: 张红颖(1978-), 女, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事图像工程及计算机视觉方面的研究。

Email: carole_zhang0716@163.com

0 引言

数字散斑相关法 (Digital Speckle Correlation Method, DSCM) 是 20 世纪 80 年代由日本的 I. Yamaguchi^[1]和美国南卡罗来纳大学的 Peter W H 等人^[2]几乎同时提出,该方法是通过变形前后物体表面图像的灰度信息进行相关运算来获得物体的形变信息。由于 DSCM 具有光路简单、对环境的要求较低、测量精度高、试验调试及操作方便等优点,可以利用其进行全场、非接触测量。目前该方法已经被广泛应用在实验力学中。

DSCM 可分为空域相关法和频域相关法。近几年,国内外研究者对空域法进行了大量研究,主要是利用模板匹配法对其测量精度和速度进行改进,并取得了相应的成果^[3-5]。但由于空域法在求解位移量时需要进行大量繁琐且重复的相关运算才能找到相关峰值,特别是在计算亚像素位移量时,计算量异常庞大。而频域散斑相关法是散斑照相术和数字散斑图像识别技术相结合的测量方法,与空域相关法相比,频域散斑相关法是利用变形前图像中的子图像作为匹配滤波器,对傅里叶变换后的变形散斑图像进行滤波,其输出的相关点即可求得物体的位移信息。该方法避免了空域相关法中的大量运算以及反复搜索,从而提高了测量速度。周灿林等人在频率域中对物体变形前后散斑图像进行相关搜索,在精度可接受的范围内,避免了重复的相关搜索过程,进而大大提高了测量速度^[6]。杨宇航等人在周灿林的基础上通过优化滤波器得到相对尖锐的相关峰,从而提高了其测量精度^[7]。虽然上述研究者的方法测量速度较快,但精度远不如空域法,因此实用性还并不高。

针对传统频域数字散斑相关法测量精度较低的问题,文中在其基础上进行了两点改进:一是引入 Hanning 窗函数滤波,克服了边缘效应对测量精度的影响;二是利用分形插值算法,将频域数字散斑相关法的测量误差提高到 0.01~0.03 pixel 以内。实验结果表明:该算法在保持与频域相关法测量速度近似的情况下,将其精度提高到与空域法相当水平。

1 频域数字散斑相关法

频域数字散斑相关法是利用 CCD 传感器代替

传统的相机干板来获得被测物体位移前后的散斑图像。该方法是在变形前的散斑图像中取一个点作为中心点,对其周围的子区域进行傅里叶变化作为匹配滤波器;再对变形后的散斑图像进行傅里叶变换同时进行匹配滤波,经过滤波会得到一个相关点;最后通过对相关点的相关运算获得散斑图像的变形信息。其通过匹配滤波测量形变信息的原理如下。

将物体表面变形前散斑图像的样本子区灰度值用 $i_1(x, y)$ 来表示,变形后散斑图像对应的样本子区灰度为 $i_2(x, y)=i_1(x+u, y+v)$,其中 u, v 分别为 x, y 方向上的位移量,对 $i_1(x, y)$ 进行傅里叶变换的方程式如下:

$$I_1(f_x, f_y)=\text{FFT}\{i_1(x, y)\}=|I_1(f_x, f_y)|\exp[j\varphi(f_x, f_y)] \quad (1)$$

对公式(1)取复共轭:

$$I_1^*(f_x, f_y)=|I_1(f_x, f_y)|\exp[-j\varphi(f_x, f_y)] \quad (2)$$

式中: $I_1^*(f_x, f_y)$ 即为复振幅型匹配滤波器。

接着对变形后的散斑图像进行傅里叶变换可得:

$$I_2(f_x, f_y)=\text{FFT}\{i_2(f_x, f_y)\}=\text{FFT}\{i_1(x+u, y+v)\}=|I_1(f_x, f_y)|\exp[j2\pi(uf_x+vf_y)] \quad (3)$$

用公式(2)乘以公式(3)即可实现对变形后散斑图像的滤波:

$$I_3(x, y)=I_1^*(f_x, f_y) \cdot I_2(f_x, f_y)=|I_1^*(f_x, f_y)| \cdot |I_1(f_x, f_y)|\exp[-j2\pi(uf_x+vf_y)] \quad (4)$$

再对滤波后的结果 $I_3(x, y)$ 做傅里叶变换,由自相关定理和卷积定理可得到二次频谱,即:

$$I_4(f_x, f_y)=\text{FFT}[I_3(f_x, f_y)]=\text{FFT}\{I_1^*(f_x, f_y)I_1(f_x, f_y) \cdot \exp[-2\pi j(uf_x+vf_y)]\}=i_1(x, y) \otimes i_1(-x, -y) \otimes \sigma(x-u, y-v)=H_1(x, y) \otimes \sigma(x-u, y-v)=H_1(x-u, y-v) \quad (5)$$

式中: $H_1(x-u, y-v)$ 在 (u, v) 处有一峰值,即变形前后散斑图像相匹配处的相关点,其他部分是卷积的模糊项。通过相关点的位置便可以确定物体表面位移信息。

该方法省去了空域法的反复搜索以及大量复杂运算,提高了信息的提取速度,有很高的实时性。同时它作为一种不同于其他光学分析的纯数学算法,避免了传统数字散斑相关法对实验条件的限制,从而更适合实际应用。

2 分形插值的亚像素位移测量方法

传统频域数字散斑相关法的测量精度只能达到整像素,而在实际应用中这样的精度往往是不够的,

为了能在亚像素水平上求解位移需要得到整像素之间位置上的灰度值。考虑到数字散斑图像拥有灰度特性和结构细节方面与整体结构的自相似，而采集散斑图像时会受到光学设备、模数转换以及噪声的影响，导致了图像的有些灰度信息和部分细节丢失。文中利用分形插值法求得位移点的亚像素值，可以很大程度上恢复图像的灰度信息，从而得到更高的精度。同时由于频域散斑相关法中傅里叶变换拥有周期性，所以散斑图像在边缘处可看作是环绕的，为了消除边缘效应其对测量精度的影响，在进行图像插值前需要对参考图像进行滤波处理。

2.1 Hanning 窗函数滤波

在实际应用中，两幅图像的实际位移量是未知的。当位移量较大时，两幅图像的边缘部分出现明显的差异，导致计算位移量时会出现较大的误差，而这种情况在位移量较参考图像小很多的情况下是不存在的可以忽略。但是如果两幅图像的边缘灰度值始终趋于零，根据傅里叶变换理论可知，无论位移量多大，都不会影响其测量精度。因此，可以对两幅图像进行加窗函数处理，选择合适的窗口尺寸让图像的边缘灰度趋于零，然后再进行相关计算，即可消除边缘效应影响。由于 Hanning 窗函数具有普适性好、选择性高以及泄露小等特点，因此文中选用 Hanning 窗函数进行滤波处理。Hanning 窗函数的表达式为：

$$W(n) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), (n \leq N) \quad (6)$$

式中： N 为 Hanning 窗的宽度。文中 Hanning 窗的窗口宽度是由算法的收敛范围决定的。如图 1 所示不同初始值时迭代的收敛过程不同，文中算法分别在 $(-7, 0)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(10, 0)$ 、 $(15, 0)$ 多个假设的位移量作为初始位移值进行运算，经过两次迭代后都稳定在实际位移值 $(5, 0)$ 附近，而在 $-7 \leq \Delta x \leq 15$ pixel 范围外的假设初始值，通过算法迭代结果会收敛于一个不正确的位移值，所以可得出该算法的收敛范围大约为 22 pixel。因此文中选择的窗口宽度为 $N = 0.2 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ，迭代过程如图 1 所示。

上述方法适合一般的微小位移测量，当初始假设位移值为 $(0, 0)$ 时，最大的 Hanning 函数窗口宽度为 $N = 0.2 \times M$ (M 为待测散斑图像的尺寸)，即如果真实位移值在待测散斑图像尺寸大小的 20% 以内，该方法总是可以计算出正确的位移值。若位移值是在

收敛范围之外的较大位移测量，则需要更大的散斑图像以及更大的窗口尺寸。

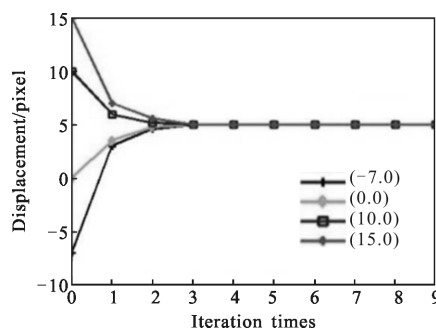


图 1 不同初始位移值下文中算法迭代过程图

Fig.1 Illustration of iteration algorithm with different initial displacement values

2.2 分形插值

分形是指具有自相似性和尺度不变性的不规则形体，其中尺度不变性是界定分形的主要指标，即覆盖的尺寸在一定范围内变化时其形态的复杂度和不规则性是不变的。而复杂度和不规则性通常用盒维数来表示，其表达式如下：

$$d = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)} \quad (7)$$

式中： $N(\epsilon)$ 表示覆盖住分形边长为 ϵ 的正方形盒子数。文中通过采用 RDBC (Relative Differential Box-Counting) 的方法^[6]，来验证数字散斑图像的分形性质，其计算 $N(\epsilon)$ 的表达式如下：

$$N(\epsilon) = \sum_{m=1}^n \frac{g_{\max} - g_{\min}}{\epsilon} \quad (8)$$

式中： g_{\max} 和 g_{\min} 分别代表第 m 个覆盖内的最大、最小灰度值； n 是边长为 ϵ 的全部覆盖数。如图 2 所示

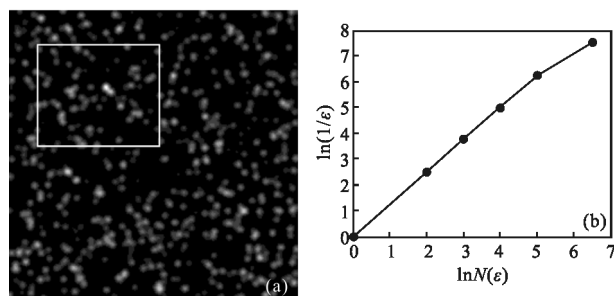


图 2 散斑图像和 $\ln N(\epsilon) - \ln(1/\epsilon)$ 曲线图

Fig.2 Speckle image and graph of $\ln N(\epsilon) - \ln(1/\epsilon)$

散斑图中，用方框选定的是研究分形的范围，当 ϵ 的长度分别选为 11、9、7、5 和 3 个像素，可看出盒维数

曲线基本成线性变化, 通过对其曲线拟合得出盒维数 $d=1.2376$, 其相关系数为 0.9989, 可见线性度非常好, 因此可得出该范围属于尺度不变区域。同时结合数字散斑图像具有的自相似性, 可推出该图像具有分形性质。正是该图像具有这一性质, 才有了采用分形插值来进行精确定位的基础。通过在散斑图像中已知像素点之间添加新的像素点的信息, 即取相邻 4 个已知点, 采用随机中点法计算其中心点的像素值, 然后按照原理图所示不断递归。相比传统的插值法对相邻两个数据点间采用直线或者光滑的曲线连接, 容易丢失纹理特征, 而分形插值可以得到两个数据点之间的局部变化, 能得到相对精细结构的研究图像, 因此通过分形插值能够在亚像素位移测量中取得较好的效果。其原理图如图 3 所示。

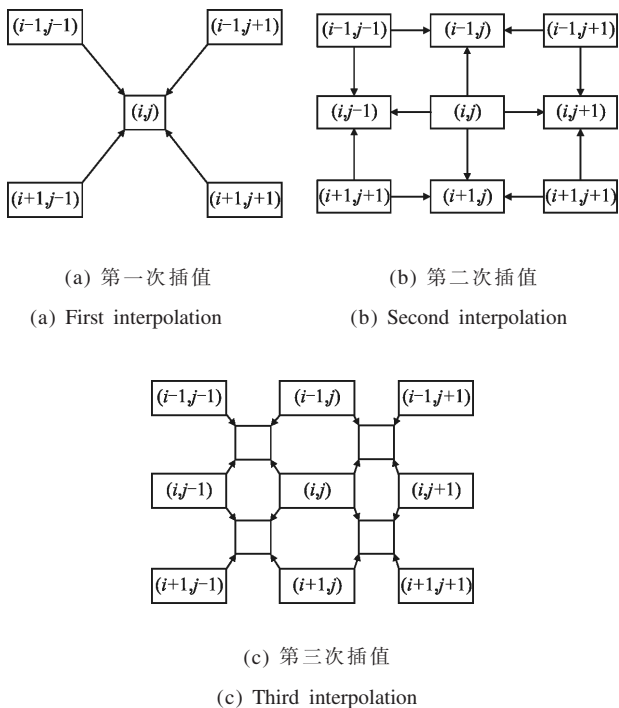


图 3 分形插值法的原理图
Fig.3 Schematic of fractal interpolation

分形插值的递归公式如下, 对图像中的像素点 (i, j) , 假设当 i 和 j 均为偶数时, 它的灰度值 $I(i, j)$ 已经确定。则

(1) 当 i 和 j 同为奇数时:

$$I(i, j) = [I(i-1, j-1) + I(i-1, j+1) + I(i+1, j-1) + I(i+1, j+1)] / 4 + \Delta I \quad (9)$$

(2) 当 i 和 j 为一个奇数一个偶数时:

$$I(i, j) = [I(i-1, j) + I(i, j+1) + I(i, j-1) + I(i+1, j)] / 4 + \Delta I \quad (10)$$

式中: $\Delta I = \sqrt{1-2^{2h-2}} h\sigma g \cdot (1/2^{h/2})^{n-1}$, $x, y \in k+1/2^n$ (k 为正整数); n 为插值次数; h 为分形参数; σ 为像素亮度的均方差; g 为高斯随机变量, 服从 $N(0, 1)$ 分布。 ΔI 通过乘以 $1/(2^{h/2})$ 进行循环迭代, 直到获得预期的插值精度, 其精度直接影响最终测量的精度。从理论上讲, 经过 n 次插值以后测量精度能到达 $1/2^n$ 。但 h 和 σ 均需要用最小二乘法求解, 计算量较大, 影响实时性, 文中根据参考文献[9]对上式进行简化, 将 ΔI 简化为 $A \log I(i, j)$, 其中 A 为权系数, 当 A 取值为 2 时, 即进行两次迭代, 然而结果就能接近预期的插值精度。

3 实验及结果

3.1 实验流程图

根据上述理论分析, 要测量变形前后散斑图像的亚像素位移量, 首先需要读取两幅待测散斑图像, 分别对位移前后的两幅图像进行滤波处理; 然后再进行分形插值, 对插值后的图像进行第一次傅里叶变换, 选取参考图像的复共轭形式作为匹配滤波器进行滤波; 利用上一步的实验数据再进行第二次傅里叶变换, 从而得到相关亮点并计算出亚像素位移值; 然后用计算出的位移值对图像进行重新加窗函数处理和计算位移值, 由此循环迭代, 最终将位移值收敛到一个稳定的值, 即所求的精确位移值。该方法流程图如图 4 所示。

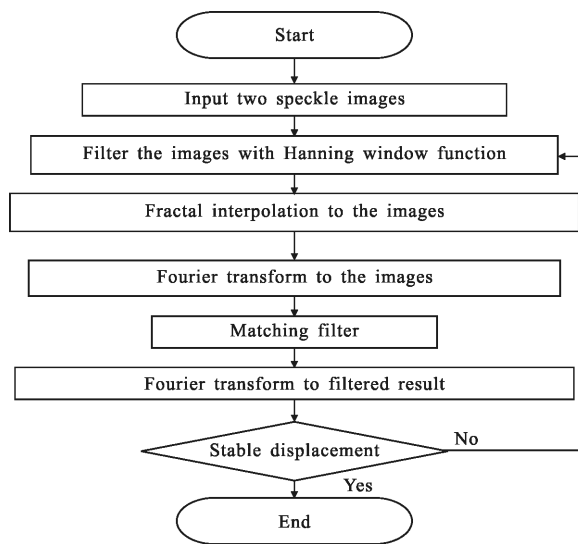
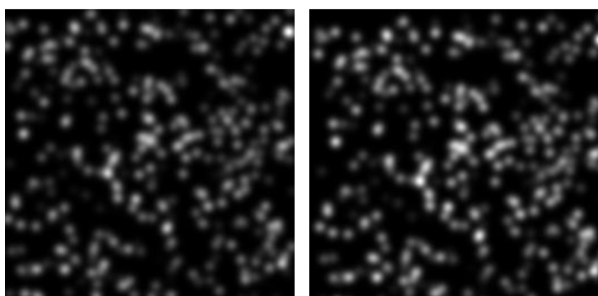


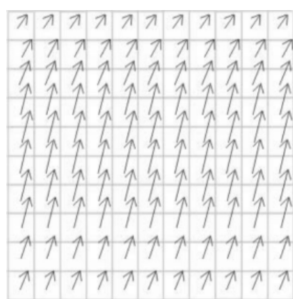
图 4 文中算法流程示意图
Fig.4 Flow diagram of the proposed algorithm

3.2 模拟散斑图像及算法的验证

文中采用 P Zhou^[10]的方法来生成仿真散斑图像,该方法不仅可以更加精确的得到散斑图像的位移信息,而且能消除实际试验中可能受到的多种干扰。因此该方法已成为模拟散斑图像常用的一种方法,利用 Matlab 模拟的散斑图如图 5 所示。



(a) 参考图像 (a) Reference image
(b) 目标图像 (b) Target image



(c) 位移矢量
(c) Displacement vector

图 5 散斑图像的位移矢量分布图

Fig.5 Displacement vector distribution of speckle images

散斑图像的大小为 128 pixel×128 pixel,散斑点为 400 个,散斑半径尺寸在 3 pixel 左右时其测量误差最小^[11]。算法验证所用计算机配置如下:系统为 32 位 Windows7,CPU2.20 GHz,所用编程工具为 MatlabR2009b。首先将模拟的散斑图像平移 3.78、5.46、7.91、9.23 个像素,在 41 pixel×41 pixel 计算窗口下^[12],分别用空域数字散斑相关法(Digital Image Correlation,DIC)、频域散斑相关法(Frequency Domain,FD)以及文中所述方法(Fractal Interpolation and Frequency Domain,FI-FD)对其进行精度和耗时的计算,三种不同方法在不同位移下计算时间和测量精度的比较如表 1 和表 2 所示。

表 1 测量时间的比较

Tab.1 Comparison of the measured time

Actual/pixel	DIC/s	FD/s	FI-FD/s
3.78	10.66	0.018	0.025
5.46	10.31	0.021	0.028
7.91	10.89	0.022	0.029
9.23	10.1	10.024	0.029

表 2 三种方法在不同位移下的测量精度

Tab.2 Measurement accuracy of three methods at different displacements

Actual/pixel	DIC/pixe	FD/pixel	FI-FD/pixel
3.78	3.76	3.90	3.79
5.46	5.45	5.55	5.44
7.91	7.91	7.76	7.90
9.23	9.21	9.12	9.26

从表 1 可看出,传统数字散斑相关法的计算时间始终在秒级以上,而文中方法的平均耗时为 0.0278 s,较传统数字散斑相关法测量速度有了明显提高。表 1 的结果是基于文中选定条件下计算所得,还可以改变子图像的大小和搜索区域等因素,但这不会影响实验的结果。由表 2 可知,传统数字散斑相关法和文中方法在不同位移下的绝对误差值都保持在 0.01~0.03 pixel 范围内,而频域相关法的平均误差为 0.135 pixel。实验结果表明文中提出的方法与传统数字散斑法有相同水平的测量精度,较频域散斑相关法有所提高。

3.3 文中算法在刚体平移上的测试

实验中所用器件如图 6 所示,主要有 CCD 传感器和涂有散斑的铁片试件。其中 CCD 传感器是加拿大的 Point Grey 工业相机,型号为 Flea3FL3-GE-50S5M,分辨率为 2 048 pixel×2 448 pixel,最大帧速率为 5.5 frame/s。

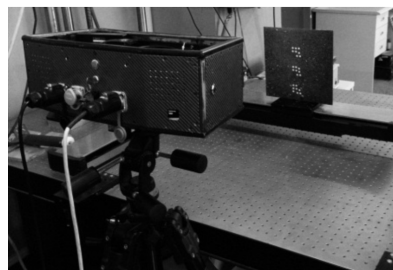
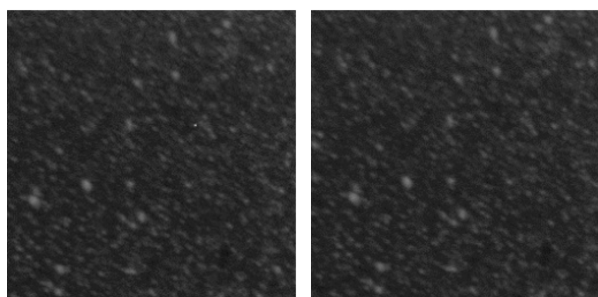


图 6 CCD 相机采集散斑图像

Fig.6 CCD camera for speckle imaging

实验首先采用 CCD 传感器记录最初位置的散斑图像, 然后对铁片试件进行平移同时记录每次平移后的散斑图像。最后分别从平移前后的散斑图像中取一子区域, 综合图像包含的信息量以及测量速度对测量结果的影响, 实验中散斑图像的大小选为 128 pixel×128 pixel, 如图 7 所示。实验中平台上铁片的移动速度是 1 mm/min, CCD 传感器的采集图像频率为 2 frame/s, 放大率为 53 pixel/mm, 因此可计算出两幅图像的间隔是 0.442 pixel。表 3 是铁片在水平方向上不同位移的实验结果。



(a) 平移前的子区域 (b) 平移后的子区域

(a) Sub-region before translation (b) Sub-region after translation

图 7 平移前后的散斑图像子区域

Fig.7 Sub-regionsof speckle image before and after translation

表 3 刚体平移实验数据

Tab.3 Experimental data for rigid translations

Actual/mm	0.1	0.2	0.3	0.4
Measurement/mm	0.099 51	0.200 38	0.300 53	0.400 47
Measurement/pixel	5.274 0	10.620 1	15.928 1	21.224 9
Error/μm	0.49	0.38	0.53	0.47

由表 3 可看出, 在不同位移下通过多次实验进行测量, 误差均在 0.53 μm(0.028 pixel)以内, 其结果与模拟散斑测量的相吻合, 进一步验证了算法的可靠性。

4 结 论

针对传统数字散斑相关法在位移测量速度和精度上的不足, 文中在频域数字散斑相关法的基础上, 通过引入 Hanning 窗函数和分形插值法, 对变形物体面内位移的测量精度以及计算速度进行了研究。实验结果表明, 三种测量方法在不同位移下的测量速度有着明显的差异, 文中所用方法与频域散斑相关法的计算时间相当, 但远比传统数字散斑相关法快很

多。而在测量精度方面, 文中所用方法与传统数字散斑相关法的精度十分接近, 测量误差均在 0.03 pixel 以下, 较原有频域散斑相关法要高很多。并且通过刚体平移实验对算法做了进一步进行验证, 证明该方法可应用于对测量速度和精度方面都有较高要求的场合。

参 考 文 献:

- [1] I Yamaguchi. A laser-speckle strain gauge [J]. *Journal of Physics*, 1981, 14(11): 1270-1273.
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental mechanics [J]. *Optical Engineering*, 1982, 21 (3): 427-437.
- [3] Liang Zhijing, Wang Kaifu, Gu Guoqing, et al. Digital speckle image correlation method base on particle swarm optimization algorithm [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(5): 603-607. (in Chinese)
- [4] Pan B, Yu L P, Wud F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification [J]. *Experimental Mechanics*, 2013, 53(9): 1719-1733.
- [5] Wang B, Pan B. Random errors in digital image correlation due to matched or overmatched shape functions [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(9): 1717-1727.
- [6] Zhou Chanlin, Qi Dongping. Frequency domain digital speckle correlation method and its applications [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, 27(3): 65-68. (in Chinese)
- [7] Yang Yuhang, Chen Yu, Li He, et al. In-plane micro-displacement measurement based on digital speckle correlation method in frequency domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1301-1305. (in Chinese)
- [8] Ying Yuzheng, Shi Qinyun. Fractional box-counting and fractal dimension estimation [J]. *PR & AI*, 1997, 10 (4): 357-361.
- [9] Zhang Yuying, Mao Zhongming. Image magnification with fractal interpolation based on wavelet transformation [J]. *Computer Engineering and Design*, 2006, 27 (18): 3248-3430. (in Chinese)
- [10] Zhou P, Goodson K E. Sub-pixel displacement and deformation gradient measurement using digital image speckle correlation (DISC)[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [11] Yu Zhijing, Tao Hongwei. Investigation of the optimal light condition on digital image correlation method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(11): 101201. (in Chinese)
- [12] Pan Bing, Chen Ding, Feng Juan. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *Acta Metrological Sinica*, 2005, 26(2): 128-134. (in Chinese)