

文章编号 2095-1531(2014)03-0389-07

## 散斑干涉相位条纹图的频域滤波处理

王永红<sup>1\*</sup>, 李骏睿<sup>1</sup>, 孙建飞<sup>1</sup>, 刘佩<sup>1</sup>, 杨连祥<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电学院, 安徽 合肥 230009;

2. 美国奥克兰大学 机械工程系, 密歇根 罗切斯特 48309)

**摘要:**为了解决在数字散斑干涉技术测量时,散斑干涉相位条纹图像中大量噪声对相位解包裹结果和精度产生严重影响的问题,介绍了一种条纹正余弦分解和频域低通滤波结合的方法,实现了散斑干涉相位条纹图的高精度滤波。该方法的基本思路是在对相位图像进行滤波处理前,先将相位图通过正余弦函数进行映射转换成两幅图,分别经过频域滤波,然后再合成为相位图。这种分解频域滤波方法可以在滤波的同时,有效保留相位跳变信息。实验结果表明:与传统的图像降噪方法相比,该方法能够在保留图像“尖峰”信息的基础上,较好地滤除图像中的散斑噪声,方法简单有效,有效解决了传统滤波方法应用在相位条纹图中,相图灰度信息丢失10%~40%的问题。

**关键词:**干涉测量;散斑干涉;相位图;频域滤波;噪声

**中图分类号:** O436.1; TP394.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20140703.0389

## Frequency domain filtering for phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry

WANG Yong-hong<sup>1\*</sup>, LI Jun-rui<sup>1</sup>, Sun Jian-fei<sup>1</sup>, LIU Pei<sup>1</sup>, YANG Lian-xiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,

Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Oakland University, Rochester 48309, USA)

\* Corresponding author, E-mail: yhwang@hfut.edu.cn

**Abstract:** In order to solve the problem of serious influence of much noise in the phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry on the result and accuracy of phase unwrapping, an effective method of stripe sine/cosine decomposition combined with frequency domain low-pass filtering is introduced in this paper, and the high precision filter of phase fringe patterns of digital speckle pattern interferometry is realized. Basic idea of this method is that phase fringe patterns is mapped into two patterns by the sine/cosine function before the phase image filter processing, and then is synthesized into phase fringe patterns through frequency domain filter. This decomposition frequency domain filtering method can retention phase jump information effectively when filtering. Experimental results show that compared with the traditional image noise reduction method,

收稿日期:2013-12-13;修订日期:2014-02-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51075116, No. 51375136);安徽省国际科技合作计划资助项目(No. 12030603012);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(No. 2011JYLH1150)

this method can filter out the speckle noise in images better on the basis of reserving “rush” image information, and it is simple and effective, which solves the problem of loss from 10% to 40% for phase fringe patterns gray level information when traditional filtering methods are used in stripe phase fringe patterns.

**Key words:** interference measure; digital speckle pattern interferometry; phase map; frequency domain filtering; noise

## 1 引言

散斑干涉测量技术利用激光散斑作为位移信息的载体,对物体的表面形变、位移、震动进行测量,是一种非接触、测量精度高的实时全场光学测量技术<sup>[1-3]</sup>。利用时间相移技术<sup>[4-5]</sup>生成的干涉相位条纹图被包裹于 $[-\pi, \pi]$ 之间,为了获得真实的相位分布,需要进行相位解包裹计算。但是生成的包裹相位图含有大量的噪声,严重影响了相位解包裹的结果和精度,甚至会因噪声过大而造成相位解包裹的失败。图1(a)为利用时间相移技术得到的一幅原始包裹相位图像,可以看出图中存在大量的散斑噪声。图1(b)为其沿 $x$ 轴截面上的相位分布图,从图中可以看出,此时的相位图含有大量的噪声干扰,这样的相位图无法实现解包裹处理。因此,在相位解包之前,需要对包裹的相位图进行滤波去噪处理。如何有效地去除条纹图的散斑噪声成为电子散斑干涉测量技术的关键问题。

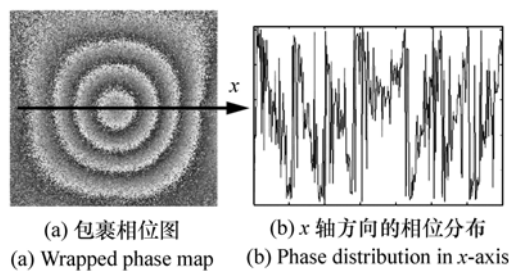


图1 原始相位图及 $x$ 向相位分布

Fig.1 Raw phase map and phase distribution in  $x$  direction

近年来国内外许多学者做了大量的研究工作,如中值滤波、均值滤波、傅里叶变换滤波等<sup>[6-8]</sup>。传统的滤波方法,在滤掉散斑噪声的同时,也会滤

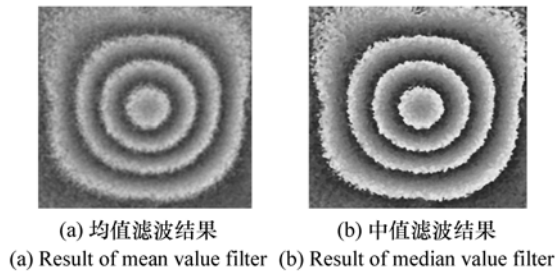


图2 传统滤波效果图

Fig.2 Filtered phase map using conventional methods

掉、模糊许多有用的信息。如均值滤波丢失了原始相位图中的相位跳变信息和“尖峰”信息,模糊了条纹的边界(见图2(a))。中值滤波虽然保留了相位跳变信息(见图2(b)),但是由于基于双侧指数函数的噪声统计分布假设,对于噪声水平高的场合并不适用,且需要对滤波窗口中每个像素值的大小进行排序,计算时间较长; Annalisa Capanni 等人提出了改进的中值滤波法<sup>[9]</sup>,但存在误判现象; H. A. Aebischer 等人提出正余弦滤波方法,保留了图像中的“尖峰”信息<sup>[10]</sup>; 秦玉文等人提出一种基于回归算法的条纹滤波技术<sup>[11]</sup>; 杨磊等人提出一种基于残差点干涉相位图自适应滤波方法<sup>[12]</sup>; 于起峰等人提出一种带门限的旋滤波方法<sup>[13]</sup>,但是这些方法仅通过选取直线窗口内数据求均方差值进行比较判别,因此它受到噪声的影响较大; 当图像的噪声水平较高时,必须去较大的窗口才能消除噪声; 王开福等人提出一种基于同态滤波原理的条纹滤波方法,对相位图去噪的同时可以增强图像的对比度<sup>[14]</sup>; 李凯等人提出一种基于 Gabor 滤波的平滑方法<sup>[15]</sup>等。本文采用一种条纹正余弦分解和频域滤波结合的方法,可以更好地提高滤波的精度和速度。实验研究证明,与传统的图像降噪方法对比,这种分解频域滤波方法能够在保留图像“尖峰”信息的基础上,较好地滤除图像中的散斑噪声,方法简单有

效。

## 2 条纹频域滤波原理

图像处理方法可以分为空域分析法和频域分析法。空域分析法主要是对图像矩阵进行处理,而频域分析法则通过傅里叶变换、余弦变换、小波变换等变换方法将图像从空域变换到频域,在频域的角度分析图像的特征并进行处理。傅里叶变换是一种经典的图像变换方法,本文基于傅里叶变换对散斑干涉相位图在频域上进行滤波去噪

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad u = 0, 1, 2, \dots, M-1; v = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad x = 0, 1, 2, \dots, M-1; y = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

通常在进行傅里叶变换之前用  $(-1)^{x+y}$  乘以输入的图像函数,可以将傅里叶变换的原点  $F(0, 0)$  变换到频率坐标下的  $(M/2, N/2)$  上。 $F(0, 0)$  为图像的平均灰度级,也被称为频域谱的直流分量。

### 2.2 频域低通滤波

在傅里叶变换域,一幅图像的能量大部分集中在其频谱的低频和中频段,而图像的边缘和其他尖锐的跳跃(例如噪声)则对傅里叶变换的高频分量有很大贡献。因此,对一幅图像进行傅里叶变换得到频谱后,对其频域上一定范围的高频分量衰减,并使低频分量顺利通过,经过反变换可以达到图像的平滑效果。

然而,由于相位图存在跳变边缘,跳变边缘信息也属于高频分量,能否区分出噪声与正常跳变将对滤波效果造成影响。

由卷积定理,频域低通滤波的表达式为<sup>[17]</sup>:

$$G(u, v) = H(u, v)F(u, v), \quad (3)$$

式中,  $F(u, v)$  为含有噪声的原始图像的傅里叶变换,  $H(u, v)$  为滤波器传递函数。常用的低通滤波器有理想低通滤波器、巴特沃斯滤波器、指数滤波器和梯形低通滤波器等。本文主要采用理想低通滤波器模型对图像进行平滑处理。

一个二维理想低通滤波器的传递函数可以表示为:

处理。

### 2.1 离散傅里叶变换

在计算机上,图像的存储采用数字形式,连续的傅里叶变换不适用于计算机的处理,因此在计算机图像处理中的傅里叶变换一般都采用离散傅里叶变换(DFT)<sup>[16]</sup>。

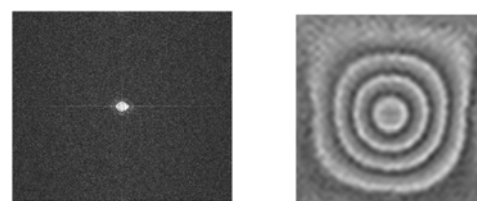
对于图像处理领域,由于图像为二维矩阵数据,故采用二维离散傅里叶变换加以处理。其中,图像尺寸为  $M \times N$  函数的离散傅里叶变换及其反变换的公式为:

$$H(u, v) = \begin{cases} 1 & D(u, v) \leq D_0 \\ 0 & D(u, v) > D_0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $D_0$  为截止频率。理想低通滤波器的特性为:假设傅里叶变换的原点已经处于  $N \times N$  矩阵的中心,以  $D_0$  为半径的圆内的所有频率分量无损通过,圆外的所有频率分量完全衰减。

## 3 干涉相位图的频域去噪处理

对实验获取的原始包裹相位(见图1(a))进行二维傅里叶变换后得到的频谱,如图3(a)所示。根据上述原理,相位图频谱里的高频分量对



(a) 原始相位图的频谱 (b) 直接频域低通滤波  
(a) Frequency domain of raw phase map (b) Low-pass filter

图3 频谱及低通滤波结果

Fig. 3 Frequency domain and low-pass filter result

应着相位图中的噪声和条纹间的跳变信息,因此,如果直接对图像进行频域低通滤波,虽然滤除了原始相位图中的噪声,但是也严重损失了条纹图

中的跳变信息。图3(b)为对图3(a)直接进行传统的频域低通滤波得到的结果,可以看出产生一定的平滑效果,但同时也丢失了原始相位图中的跳变信息。

为了保留原始相位图中的“尖峰”信息,本文采取了一种基于正余弦变换的频域低通滤波方法,得到了很好的平滑效果。该方法的基本思路

$$g_1(i,j) = \{ \sin[g(i,j) \times 2\pi/255] + 1 \} \times 255/2, \quad (5)$$

$$g_2(i,j) = \{ \cos[g(i,j) \times 2\pi/255] + 1 \} \times 255/2, \quad (6)$$

式中: $g(i,j)$ 为原始灰度值, $g_1(i,j)$ 为转换后的正弦灰度值, $g_2(i,j)$ 为转换后的余弦灰度值。

对图1(a)进行转换后的正弦图和余弦图如图4(a)、4(b)所示。分别对其进行傅里叶变换,

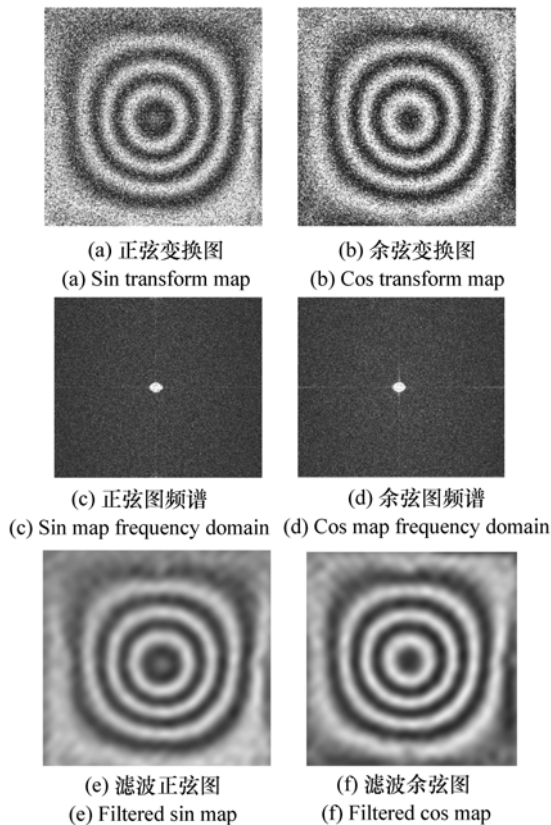


图4 正余弦图及处理效果

Fig.4 Sine and Cosine fringe patterns and filter results

得到的频谱如图4(c)、4(d)所示。可以看出图像的信息主要集中在频谱的低频部分,即图像中心的亮斑。选用上节所介绍的二阶理想低通滤波器对正弦图和余弦图进行频域低通滤波,分别得

是在对相位图像进行频域低通滤波处理前,先将对灰度分布呈锯齿形函数分布的相位图通过正余弦函数进行映射转换成两幅图,分别经过频域滤波,然后再合成为相位图。这样就可以在滤波的同时,有效保留相位跳变信息。映射转换的规则如下式:

到两幅图像的平滑结果,如图4(e)、4(f)所示。

将滤波后得到的正余弦图经过反运算合成一幅图,就得到了最终的平滑结果,如图5(a)所示。图5(b)为其在 $x$ 截面上的相位分布,从图中可以看出,平滑效果比直接进行频域低通滤波的效果更好,在图中间和边缘均取得了很好的滤波结果,图像已经不再有任何散斑噪声,并且很好地保留了条纹间的跳变信息。

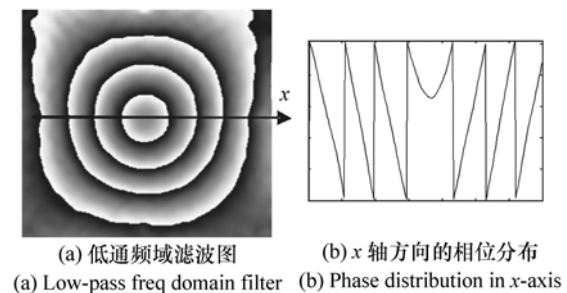


图5 频域滤波相位图及相位分布

Fig.5 Low-pass filtered phase map and phase distribution

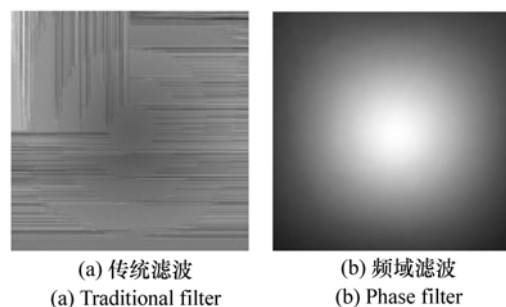


图6 解包裹相位对比图

Fig.6 Contrast of genuine phase map after unwrapping

图6为对频域滤波后的图像进行相位解包得

到的图像,可见滤波后的相位图进行解包裹处理获得的结果也是很好的,证明了本文方法的有效性和可靠性。

#### 4 测量实验与结果

为研究频域滤波方法对相位图去噪的影响,本文分别对滤波次数、滤波窗口和截止频率等参数的影响进行了实验研究。频域滤波的平滑效果可以通过增加滤波次数来实现,滤波次数越多,滤波结果越平滑。但是,滤波处理的时间也会成倍增加,影响了对相位信息提取的速度。图7是采用 $3 \times 3$ 操作窗口进行空域滤波的实验结果图,a、b、c三幅图的滤波次数分别为1次、3次和7次。

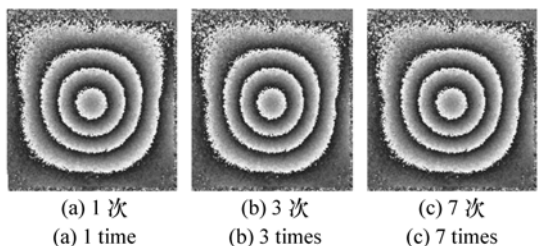


图7 正余弦图及处理效果

Fig.7 Sine and Cosine filtered phase map with different filtering times

另一方面,空域滤波操作窗口的大小也会影响滤波结果的平滑程度,窗口越大,平滑效果越好。因此可以通过增大操作窗口来减少空域滤波的次数,但是相对滤波精度也会有所降低。图8是采用不同操作窗口进行空域滤波的结果。

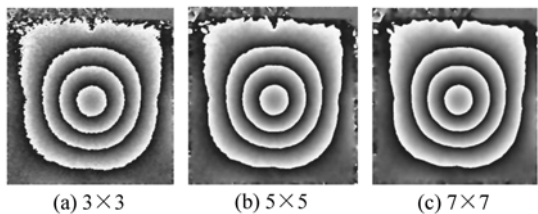


图8 不同滤波窗口的空域滤波结果

Fig.8 Filtered phase map with different size of operate window

选取不同大小截止频率的二维理想低通滤波器,得到的滤波结果如图9所示。比较后可以得

出,频域滤波后图像的平滑程度与低通滤波器的截止频率相关,截止频率越小,滤波结果越平滑。因此只要选择合适的截止频率 $D_0$ ,一次滤波就可以得到理想的滤波效果,这样相比于空域滤波,滤波的效率可以大大提高。

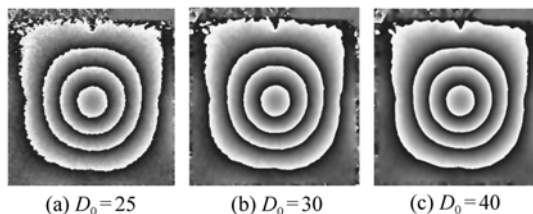


图9 不同截止频率下正余弦变换的频域滤波结果  
Fig.9 Sine and Cosine filtered phase map with different cut-off frequency

通过滤波后相图视觉效果及解包裹结果可以直观地对滤波方法的优劣进行评判,而对滤波前后相位图灰度信息保留比例的计算则可以客观地展现不同方法的优劣。表1分别对原始相位图以3种传统方法与新方法在不同滤波窗口下进行一次滤波处理后的灰度保留比例做了对比。对于传统滤波方法,加大滤波窗口对于灰度信息的丢失影响极大,在 $9 \times 9$ 窗口均值滤波中,损耗已经接近40%。对于相图,由于灰度峰值基本出现在条纹跳跃处,故可以近似认为该处像素的滤波引入误差接近40%。而新的分解频域滤波方法中,灰度损耗仅为0.4%,且与滤波窗口大小无关,这样就充分保护了相图信息。

表1 灰度信息保留比例

Tab.1 Retention rate of gray value after filtering				
窗口尺寸	$3 \times 3$	$5 \times 5$	$7 \times 7$	$9 \times 9$
均值滤波/%	92.58	78.52	69.14	64.06
中值滤波/%	97.61	91.41	87.89	83.2
高斯滤波/%	93.36	82.81	82.03	82.03
相位滤波/%	99.61	99.61	99.61	99.61

#### 5 结论

干涉相位图的降噪处理作为相位解包裹处理前的必要环节,如何在有效地去除条纹图的散斑

噪声的同时,不会丢失和滤掉有用的信息(如相位跳变信息)是散斑干涉条纹处理的关键问题。本文采用相位图正余弦映射分解和频域滤波结合的方法,实现了散斑干涉条纹的高精度滤波,良好的平滑处理避免了噪声对相位解包裹处理的干扰,使其可以顺利的完成解包裹,最终得到正确的相位分布图。实验研究证明了该方法在较好地滤

除图像中散斑噪声的基础上,能够有效保留相位中的“尖峰”信息,将传统滤波方法中10%~40%的灰度损耗降低至1%以下,能够很好地满足解包裹的需要,同时可以通过改变操作窗口大小、滤波次数和滤波器截止频率等参数对不同程度的噪声进行抑制,方法简单有效。

#### 参考文献:

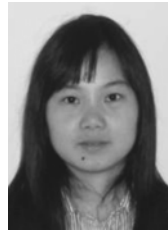
- [1] 王开福. 散斑计量学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.  
WANG K F. *Speckle Metrology*[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2010. (in Chinese)
- [2] GOODMAN G W. 光学中的散斑现象-理论和应用[M]. 北京:科学出版社,2010.  
GOODMAN G W. *Speckle Phenomena in Optical*[M]. Beijing:Science Press,2010. (in Chinese)
- [3] 王永红,梁恒,王硕,等. 数字散斑相关方法及应用进展[J]. 中国光学,2013,6(4):470-480.  
WANG Y H,LIANG H,WANG SH,*et al.*. Advance in digital speckle correlation method and its applications[J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):470-480. (in Chinese)
- [4] 孙志兵,陈丽. 电子剪切散斑中的相位分析方法[J]. 光子技术,2006,4(14):203-208.  
SUN ZH B,CHEN L. Phase analysis method used in electronic speckle shearing interferometry[J]. *Photonic Technology*,2006,4(14):203-208. (in Chinese)
- [5] BURKE J,HELMERS H. Performance of spatial vs. temporal phase shifting in ESPI[J]. *SPIE*,1999,3744:188-199.
- [6] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2007.  
JIN G CH. *Computer-Aided Optical Metrology*[M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press,2007. (in Chinese)
- [7] 宋凡峰. 电子散斑相位检测的滤波方法研究[J]. 激光杂志,2007,28(3):50-51.  
SONG F F. Investigation of filtering method for phase measurement in electronic speckle pattern interferometry (ESPI) [J]. *Laser J.*,2007,28(3):50-51. (in Chinese)
- [8] 高珊,马艳会. 基于边缘保持的 SAR 图像滤波算法研究[J]. 液晶与显示,2013,28(2):290-294.  
GAO SH,MA Y H. Algorithm research of filtering for SAR images based on edges-preserving[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2013,28(2):290-294. (in Chinese)
- [9] CAPANNI A,PEZZATI L,BERTANI D. Phase-shifting speckle interferometry: a noise reduction filter for phase unwrapping[J]. *Optical Engineering*,1997,36(9):2466-2472.
- [10] AEBISCHER H A,STEPHAN W. A simple and effective method for filtering speckle-interferometric phase fringe patterns [J]. *Opt. Commun.*,1999,162(46):205-210.
- [11] QIN Y W,CHEN J L,FAN H B. The study and application of a new filtering method on electronic speckle pattern . interferometric fringe[J]. *Optics and Lasers in Engineering*,2003,39(4):449-456.
- [12] 杨磊,冯茜,王志刚,等. 基于残差点的干涉相位图自适应滤波[J]. 中国图象图形学报,2007,12(11):1976-1979.  
YANG L,FENG Q,WANG ZH G,*et al.*. Residues-based adaptive approach for phase image noise reduction[J]. *J. Image and Graphics*,2007,12(11):1976-1979. (in Chinese)
- [13] YU Q F,SUN X Y,LIU X L,*et al.*. Span filtering with curve windows for interferometric fringe patterns[J]. *Appl. Optics*,2002,41(14):2650-2654.
- [14] 顾国庆,王开福. 基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理[J]. 激光技术,2010,34(6):750-797.  
GU G Q,WANG K F. Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering[J]. *Laser Technology*,2010,34(6):750-797. (in Chinese)
- [15] 李凯,张青川. 基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. 光学学报,2009,29(10):2751-2755.

- LI K,ZHANG Q CH. Speckle fringe pattern smoothing method based on gabor filtering[J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(10):2751-2755. (in Chinese)
- [16] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2007.  
DING Y M,GAO X Q. *Digital Signal Processing*[M]. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology Publishing House,2007. (in Chinese)
- [17] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 3版. 北京:电子工业出版社,2011.  
GONZALEZ. *Digital Image Processing*[M]. 3rd edition. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2011. (in Chinese)

#### 作者简介:



王永红(1972—),男,安徽合肥人,博士后,教授,研究生导师,1994年于合肥工业大学获得学士学位,1997年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得硕士学位,2004年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail:yhwang@hfut.edu.cn



刘佩(1990—),女,安徽宣城人,硕士研究生,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail:972149801@qq.com



李骏睿(1990—),男,江西南昌人,硕士研究生,2011年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail:junrui.li@gmail.com



杨连祥(1959—),男,浙江绍兴人,教授,博士生导师,长江学者,1982年、1986年于合肥工业大学获得学士、硕士学位,1997年于德国Kassel大学获得博士学位。从2001年至今担任Oakland University机械工程系教授,光学测量实验室主任,国际汽车工程师学会(SAE)材料建模及测试委员会主席,主要从事全场光学检测、散斑测量技术、机器视觉等方面的研究。E-mail:yang2@oakland.edu



孙建飞(1986—),男,河北沧州人,博士研究生,2010年、2013年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密测试技术及仪器、光电检测、机器视觉等方面的研究。E-mail:392520522@qq.com