

文章编号: 1001-3806(2010)06-0750-03

基于同态滤波的电子散斑干涉图像处理

顾国庆, 王开福*, 燕新九

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 南京 210016)

摘要: 由于散斑具有可测的强度和确定的相位, 正逐渐被人们重视和进一步研究, 现广泛应用于无损检测领域。电子散斑干涉条纹图上总是附带大量的随机散斑颗粒噪声。一般来说, 散斑图像记录的变形信息主要集中在低频部分, 而噪声主要在高频部分。为了得到变形物体的连续相位分布, 需要用适当的方法对散斑干涉条纹图像进行滤波降噪处理。同态滤波是一种将亮度范围压缩和对比度增强的频域处理方法。采用基于同态滤波原理设计出的新的低通滤波器, 将其运用于3步相移电子散斑干涉条纹图像处理, 并从理论上进行了详细的论述。结果表明, 运用该滤波器处理散斑条纹图像, 过滤了大量的散斑颗粒噪声, 增强了散斑干涉条纹的对比度。

关键词: 图像处理; 电子散斑干涉; 同态滤波; 3步相移

中图分类号: TN911.74 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.009

Electronic speckle interferometry image processing based on homomorphic filtering

GU Guo-qing, WANG Kai-fu, YAN Xin-jiu

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: More attention was paid to research of speckles because of their measurable intensity and certain phase. Now speckles are used extensively in the field of non-destructive test. The electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is always full of a lot of noise. Generally, the information about deformation recorded by the fringe is mainly distributed in the low frequency domain, whereas the noise is in the high frequency part. In order to obtain the continuous phase distribution of the deformed object, it is necessary to take some proper methods to remove the noise in the fringe. Homomorphic filtering is a frequency domain operation to compress image intensity area and enhance contrast. A new filter based on the principle of homomorphic filtering was designed, which was used for three-step phase-shifting electronic speckle image processing. A theoretical analysis was also proposed in detail. The experimental results show that the speckle noise was removed to the large extent and the contrast of ESPI fringes can be increased by the proposed method.

Key words: image processing; electronic speckle pattern interferometry; homomorphic filtering; three-step phase-shifting

引言

散斑干涉测量技术是现代光测技术的一个分支。它是一种全场非接触式的测量技术, 对被测物体没有附加质量的影响和材料的要求, 也不需要模型化, 可以直接对实物进行测量, 而且测量系统光路简单, 不需要隔振台, 对光源功率要求不高, 测量范围大, 精度高, 因此, 广泛应用于振动、位移、形变、断裂和粗糙度的测量中, 是无损检测领域的重要工具。对于散斑图像的处理, 首先要将物体变形前后的散斑图进行相减、相加或

者相关的处理, 得到散斑干涉条纹图; 然后通过滤波的方法滤掉高频噪声, 保留低频散斑条纹信息; 最后运用相移算法以及解包裹算法得到变形物体的连续位相分布, 进而计算出位移量^[1-5]。

同态滤波是一种将频率过滤和灰度变换相结合的图像处理方法。它是将图像的照明反射模型作为频域处理的基础, 利用压缩亮度范围和增强对比度来改善图像的一种处理技术^[3,6]。作者在巴特沃斯低通滤波器的基础上, 设计出一个新的基于同态滤波原理的低通滤波器, 对散斑条纹图中的高频噪声进行滤波处理。实验结果表明, 散斑条纹图中高频噪声得到了很好的抑制, 而且得到的散斑条纹轮廓比较清晰, 对比度也很好, 很好地满足了工程实践要求。

1 同态滤波原理

同态滤波是一种在频域中同时将图像亮度范围进

基金项目: 教育部留学回国人员基金资助项目(M0762)

作者简介: 顾国庆(1984-), 男, 博士研究生, 现主要从事工程力学测试以及图像处理等方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: kfwang@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-02-02

行压缩和将图像对比度进行增强的方法。一幅图像 $f(x,y)$ 可以用它的照明分量 $i(x,y)$ 和反射分量 $r(x,y)$ 来表示,即: $f(x,y) = i(x,y) \cdot r(x,y)$ (1) 入射光取决于光源,而反射光取决于物体的性质,就是说景物的亮度特征主要取决于反射光。另一方面,由于入射光较均匀,随着空间位置变化小。而反射光,由于物体性质和结构特点不同,反射强弱很不同的光,随着空间位置变化较剧烈,所以在空间频率中,入射光占据低频频段,反射光占据相对高频段比较宽的范围。为此,只要能把入射光和反射光分开,然后分别对他们施加不同的影响,那么便能使反映物体性质的反射光得到增强,而压缩不必要的入射光成分。

由于傅里叶变换是线性变换,所以对(1)式中具有相乘关系的两个分量无法分开。如果首先将(1)式两边取对数,就可以将式中的乘性分量变为加性分量,而后进一步处理,即:

$$z(x,y) = \ln i(x,y) + \ln r(x,y) \quad (2)$$

然后对(2)式两边取傅里叶变换,即:

$$\mathcal{F}\{z(x,y)\} = \mathcal{F}\{\ln i(x,y)\} + \mathcal{F}\{\ln r(x,y)\} \quad (3)$$

式中, $\mathcal{F}\{\}$ 为傅里叶变换。令 $Z(u,v) = \mathcal{F}\{z(x,y)\}$, $I(u,v) = \mathcal{F}\{\ln i(x,y)\}$, $R(u,v) = \mathcal{F}\{\ln r(x,y)\}$, 则:

$$Z(u,v) = I(u,v) + R(u,v) \quad (4)$$

若用一个传递函数为 $H(u,v)$ 的滤波器来处理 $Z(u,v)$, $[\gamma_l, \gamma_h]$ 为 $H(u,v)$ 的映射区间,而 $\gamma_l < 1$ 且 $\gamma_h > 1$, 常数 c 被引入用来控制滤波器函数斜面的陡度。如图

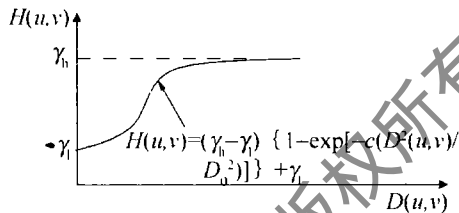


Fig. 1 Homomorphic filtering transfer function characteristic curve

1 所示,则有:

$$S(u,v) = H(u,v) \cdot Z(u,v) = H(u,v) \cdot I(u,v) + H(u,v) \cdot R(u,v) \quad (5)$$

处理后,将(5)式进行傅里叶逆变换,则有:

$$s(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u,v) \cdot I(u,v)\} + \mathcal{F}^{-1}\{H(u,v) \cdot R(u,v)\} \quad (6)$$

式中, $\mathcal{F}^{-1}\{\}$ 表示傅里叶逆变换。令 $i'(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u,v) \cdot I(u,v)\}$, $r'(x,y) = \mathcal{F}^{-1}\{H(u,v) \cdot R(u,v)\}$, 则(6)式可写作:

$$s(x,y) = i'(x,y) + r'(x,y) \quad (7)$$

因为 $z(x,y)$ 是 $f(x,y)$ 的对数,为了得到所要求的增强图像 $g(x,y)$,还要进行一次相反的运算,即:

$$g(x,y) = \exp\{s(x,y)\} = \exp\{i'(x,y)\} \cdot \exp\{r'(x,y)\} \quad (8)$$

若令 $i_0(x,y) = \exp\{i'(x,y)\}$, $r_0(x,y) = \exp\{r'(x,y)\}$, 则: $g(x,y) = i_0(x,y) \cdot r_0(x,y)$ (9)

式中, $i_0(x,y)$ 是处理后的照射分量, $r_0(x,y)$ 是处理后的反射分量。这样就可以获得增强后的图像。

显然,针对图像本身特性以及实际需要选择不同形状的传递函数,就会对整个图像灰度级范围进行不同程度的压缩,而对感兴趣的景物灰度级进行不同程度的扩展,可以得到合适的层次细节^[6]。

上述处理过程即为同态滤波的原理和基本步骤。

2 同态滤波应用于电子散斑图像处理

双光束电子散斑干涉可以分别用来测量面内位移、离面位移。图2所示是测量离面位移的散斑干涉

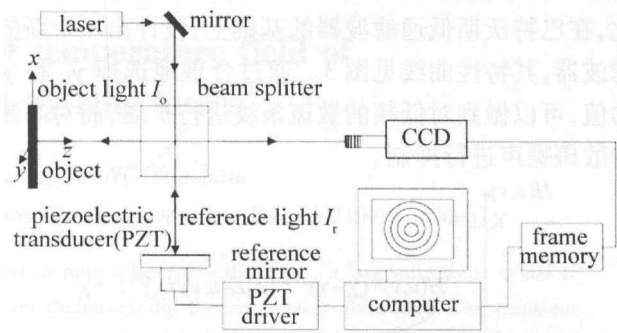


Fig. 2 Schematic for dual beam electronic speckle pattern interferometry

光路图。图2中物光 I_0 和参考光 I_r 是由同一光源发出的光波经分光镜分成两束相干光。物光照射被测物体表面,由物体表面散射回来的光透过分光棱镜到达 CCD 像面。由参考平面反射回来的参考光经分光棱镜反射后也到达 CCD 像面。这样,在 CCD 像面上物光散斑场与光滑参考光干涉形成散斑干涉场。

物体变形前像平面上任意一点 (x,y) 的光强可表示为:

$$I_1(x,y) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos\phi \quad (10)$$

式中, I_0 和 I_r 分别为物光和参考光强度, ϕ 是一个随机散斑相位。

当物体某点 (x,y) 沿观测方向(与像平面垂直)发生 d_z 的离面变形后,将引起 $\Delta\phi$ 的相位改变,这时候像面上点 (x,y) 的光强可以表示为:

$$I_2(x,y) = I_0 + I_r + 2\sqrt{I_0 I_r} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (11)$$

这里采用相减模式对变形前后的散斑干涉场图像进行处理,相减并取绝对值之后点 (x,y) 的光强为:

$$I(x,y) = |I_1 - I_2| = 4\sqrt{I_0 I_r} \cdot \left| \sin\left(\phi + \frac{1}{2}\Delta\phi\right) \right| \cdot \left| \sin\frac{1}{2}\Delta\phi \right| \quad (12)$$

(12)式有两个互相调制的函数项,第1项变化的频率高,表示高频噪声;第2项变化的频率较低,表示散斑

干涉条纹信息^[7]。令 $m(x,y) = \left| \sin \frac{1}{2} \Delta\phi \right|$, $n(x,y) = 4\sqrt{I_0 I_r} \cdot \left| \sin \left(\phi + \frac{1}{2} \Delta\phi \right) \right|$, 则散斑条纹图也可表示为:

$$f(x,y) = m(x,y) \cdot n(x,y) \quad (13)$$

由此可见,散斑条纹图的处理也可以采用类似同态滤波原理的方法。不同的是同态滤波是一种高通滤波器,它对高频分量采取扩展的手段,对低频分量采取压缩的手段。而对于散斑干涉条纹图,人们感兴趣的是低频的散斑干涉条纹,希望滤掉的是高频噪声,与同态滤波的方法刚好相反。通常对散斑条纹图的处理都是采用简单的滤波处理,对高频成分采取滤除的方法,这样处理方法虽然能够有效地去除高频成分,但同时也会造成低频成分的损失,得到的结果并不理想^[8]。因此,在巴特沃斯低通滤波器的基础上,设计出一个新的滤波器,其特性曲线见图3。通过合理地选择 γ_h 和 γ_l 的值,可以做到对低频的散斑条纹进行扩展,而对高频的散斑噪声进行抑制。

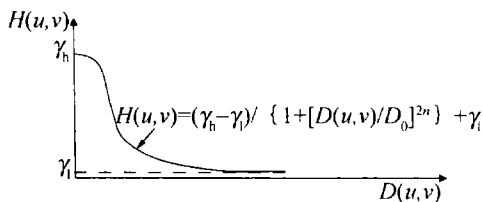


Fig. 3 The filtering transfer function characteristic curve after transformation

3 实验结果分析

实验中采用3步相移法来求被测相位,相移步长分别取 $0, \pi/2, \pi$, 被测对象是一块半径为26mm、厚度为3mm的圆形铝板,周边固支,在其上施加均匀载荷,试验光源是功率为30mW,波长为632.8nm的He-Ne激光器,得到的试验结果如图4a^[9]所示。

图4b~图4d所示为不同截止频率时采用本文中构造的同态滤波器处理后的散斑条纹图,取 $\gamma_h = 1.5$, $\gamma_l = 0.005$ 。可见这种方法处理所得到的散斑条纹图视觉效果很好,当选择合适的滤波器阶数($n=4$)和截止频率($D_0=5$)时,得到的散斑条纹图不仅高频的散斑噪声得到了很好的抑制,而且得到的散斑条纹轮廓比较清晰,对比度也很好。

滤波的效果的好坏可以从通过3步相移计算公式求得的相位分布图来观察^[3,10]。相位分布图的差别反映了滤波效果的好坏,因此,可以根据相位分布图的效果来观察滤波的效果。由于空间相位分布反映了相位在空间的变化,相位的变化是由变形引起的,所以,也可以从空间相位图中看出物体变形的情况^[11]。图5为滤波器阶数($n=4$)和截止频率($D_0=5$)时求得的散斑相位分布图。由图4、图5可看出,这种滤波方法去

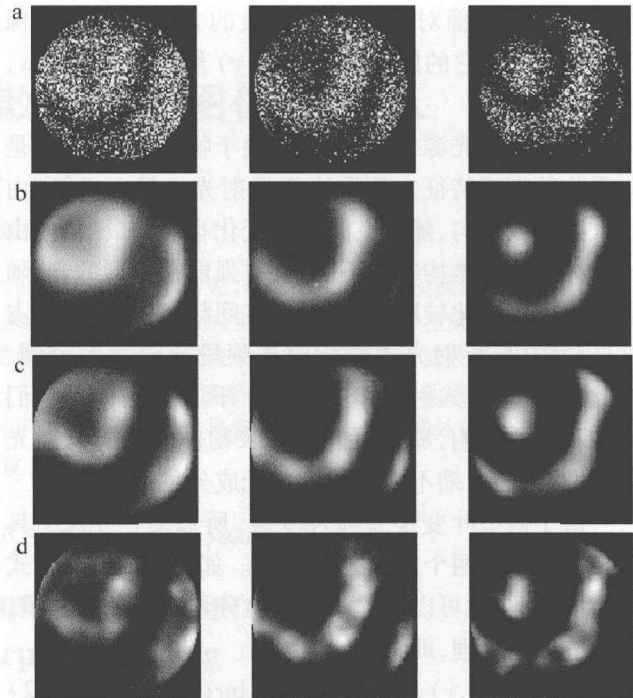


Fig. 4 The speckle fringes processed by homomorphic filtering a—original speckle fringes with phase shifts of $0, \pi/2, \pi$, respectively b— $n=4, D_0=3$ c— $n=4, D_0=5$ d— $n=4, D_0=8$

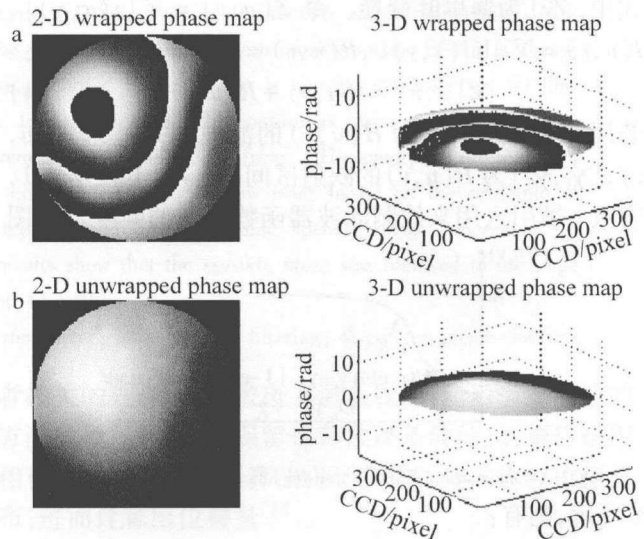


Fig. 5 The distribution of the speckle fringe phase processed by homomorphic filtering

除了大量散斑随机颗粒噪声,使条纹图呈现明显的亮带和暗带,相位分布图由亮区到暗区过渡平滑,反应了变形由大到小的变化;而且这种方法兼顾了散斑图的高频和低频分量,使处理结果更接近实际值。

4 结论

同态滤波是采取不同信息不同对待的方法对图像进行滤波,通过运用基于同态滤波原理设计的滤波器处理散斑干涉条纹图像,可以做到对有用信息进行扩展,对无用信息进行压缩。这样处理的结果不仅使散

(下转第797页)

小波变换对原始光谱进行了特征信息提取,数据维数压缩,创建了概率神经网络,以此对预测样本进行识别,准确率达到98.33%。该方法融合了荧光光谱分析,小波变换以及概率神经网络的优点,为方便、准确地识别无醇啤酒和普通啤酒提供了一种新方法。本文中虽然以青岛无醇啤酒为例,但是所采用的方法同样适用于其它品牌无醇啤酒的识别。

参 考 文 献

- [1] GU E D, SHI A M, ZHU T, *et al.* Study on three-dimensional fluorescence spectra of yanghe classical distilled spirits[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(12): 2916-2920(in Chinese).
- [2] LIU Zh Y, ZHU T, GU E D, *et al.* Study on fluorescence spectra of Chinese rice wine[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(10): 2409-2412(in Chinese).
- [3] TAN K, DU P J. Hyperspectral remote sensing image classification based on radical basis function neural network[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(9): 2009-2013(in Chinese).
- [4] WANG Y Y, HE Y, SHAO Y N, *et al.* Discrimination among different brands of coffee by using vis-near infrared spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 24(4): 702-706(in Chinese).
- [5] HAN Y Zh, LI S M, ZHANG Y X, *et al.* Neural network generalization analysis of recognition for gas impurity in air[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16(6): 718-721(in Chinese).
- [6] LI Q B, LI X, ZHANG G J, *et al.* Application of probabilistic neural networks method to gastric endoscope samples diagnosis based on FT-IR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1553-1557(in Chinese).
- [7] DONG Ch H. MATLAB neural network and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 127(in Chinese).
- [8] JIANG J F, XIAO Sh P, YANG D Q. Texture image recognition based on modified probabilistic neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(10): 48-50(in Chinese).
- [9] ZHANG W, HAO J F, XIANG J P, *et al.* Predicting type of protein-protein interaction based on probabilistic neural network[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(10): 98-103(in Chinese).
- [10] YUAN J, ZHOU Y. Damage identification by probabilistic neural networks based on latent components for time-varying structure system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 47(3): 402-407(in Chinese).
- [11] DONG Y H, BAI W X, ZHANG J P. Research on application of probability neural network in hyperspectral image classification[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2008, 26(2): 122-125(in Chinese).
- [12] CHRISTENSEN J, LADEFOGED A M, NØRGAARD L. Determination of bitterness in beer using fluorescence spectroscopy and chemometrics[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2005, 111(1): 3-10.
- [13] SIKORSKA E, GÓRECKI T, KHMELINSKII I V, *et al.* Fluorescence spectroscopy for characterization and differentiation of beer[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2004, 110(4): 267-275.
- [14] APPERSON K, LEIPER K A, MCKEOWN I P, *et al.* Fluorescence and the isolation, characterization and silica adsorption of haze-active beer proteins[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2002, 108(2): 193-199.
- [15] ZHAO M H, YOU Zh Sh, ZHAO Y G, *et al.* Face recognition based on NSA multiscale model[J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 107-109(in Chinese).
- [16] HE Ch T, MA Z, CHEN J G, *et al.* Recognition of film laser damage based on wavelet transform[J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 131-136(in Chinese).
- [17] LIU D M, SHEN J Y, WANG L J. Application of the wavelet transform to pattern correlation recognition[J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 641-644(in Chinese).

(上接第752页)

斑条纹信息得到了增强,同时对高频噪声加以抑制,而不是简单的滤除,这样兼顾高频和低频成分,既达到了滤波的目的,也保护了图像中的轮廓和细节信息。因此,通过对散斑干涉条纹图的滤波降噪处理,可以大大降低变形位移场测量的误差,提高测量精度,很好地满足工程实际测量的需要。

参 考 文 献

- [1] JIN G Ch. Computer-aided optical metrology[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 119-126(in Chinese).
- [2] WANG K F, GAO M H, ZHOU K Y. Modern photomechanics technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2009: 79-81(in Chinese).
- [3] RASTOGI P K. Digital speckle pattern interferometry and related techniques[M]. New York: John Wiley and Sons Ltd., 2001: 141-224.
- [4] SIROHI R S. Speckle metrology[M]. New York: Marcel Dekker, 1993: 157-194.
- [5] LIU B H. The technique of NDT with multifunctional DSPI and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 10-18(in Chinese).
- [6] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2007: 152-154(in Chinese).
- [7] WANG K F, TIEU A K. Volume-grating phase-shifting digital speckle pattern interferometry used for measurement of out-of-plane displacement[J]. Opt & Laser Technol, 2004, 36(2): 117-120.
- [8] YU J W. A system of image processing based on ESPI[J]. Information Technology, 2003, 27(4): 41-43(in Chinese).
- [9] ZHANG Y P, WANG K F. Application of LabVIEW and MATLAB in ESPI image processing[J]. Laser Technology, 2009, 33(6): 582-585(in Chinese).
- [10] QIAN K M, XU B Q, WU X P. Phase measurement methods in optical interferometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2001, 16(3): 239-247(in Chinese).
- [11] WANG X, JIA Sh H, CHEN G D. A review of the study on phase unwrapping[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 665-668(in Chinese).