

热传导方程在散斑条纹图相位提取中的应用

张 芳^{1,2} 刘文耀^{1,2} 李 磊^{1,2} 任 丽^{1,2} 袁 理^{1,2}

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; ² 天津大学教育部光电信息重点实验室, 天津 300072)

摘要 去除电子散斑干涉条纹图中的噪声是提取条纹图相位的关键问题。利用热传导方程去除条纹图中的噪声, 定性和定量分析了该方法的滤波性能。在此基础上, 进一步将 MBO 算法和热传导方程应用于条纹二值化和相位图平滑过程中, 并成功地从单幅模拟条纹图中提取了条纹图的相位。研究表明, 热传导方程能有效减少散斑条纹图中的噪声, 改善二值条纹图的边界, 进而获得准确的相位分布。

关键词 电子散斑干涉; 滤波; 热传导方程; MBO 算法; 相位提取

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082808.1475

Application of Heat Conduction Equation in Phase Extraction of Speckle Fringe Pattern

Zhang Fang^{1,2} Liu Wenyao^{1,2} Li Lei^{1,2} Ren Li^{1,2} Yuan Li^{1,2}

(¹ College of Precise Instrument and Optical Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)
(² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical Science, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract Denoising is a key problem in phase extraction for electronic speckle pattern interferometry (ESPI) fringe. The heat conduction equation (HCE) is applied to denoise for ESPI fringe patterns and its filtering performance is analyzed qualitatively and quantitatively. Based on the HCE filtered result, MBO algorithm and HCE are applied further to binarization and phase map smoothing respectively. And the phase map of the fringe is extracted successfully from a single fringe pattern. The research shows that HCE can efficiently reduce the noise of speckle fringe pattern, improve the edge of binary fringe pattern, and perform phase recovery rather accurately.

Key words electronic speckle pattern interferometry; filtering; heat conduction equation; MBO algorithm; phase extraction

1 引 言

电子散斑干涉 (Electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 测量技术广泛应用于光学粗糙表面的变形测量和无损检测^[1,2], 其优点是测量灵敏度高、全场非接触。在处理干涉条纹时, 条纹图相位的确定对物体的位移、应变、振动等测量具有重要意义^[3]。由于干涉条纹图中总是附带有散斑噪声, 给相位提取造成了一定的困难, 因此, 有效地去除条纹图和相位图的噪声, 成为电子散斑干涉技术的关键问题。近年来, 国内外学者在这方面做了大量工作^[4,5]。

基于偏微分方程的图像处理是图像处理领域中的一个重要分支, 具有灵活、速度快、结果准确、易于

操作等优点。近年来, 有关的内容日益成为相关领域研究人员关注的一个热点^[6~8]。1983 年, Witkin 注意到将信号在各个尺度下与高斯函数作卷积等价于一个求解热传导方程 (Heat conduction equation, HCE) 的过程^[6]。1992 年, Merriman 等^[7] 提出一种利用热传导方程改善图像边界的方法 (Merriman-Bence-Osher algorithm, MBO 算法), 该方法能使图像形状变得规则, 从而引发了人们对动态边界问题的关注。

鉴于偏微分方程能够有效滤除图像噪声, MBO 算法可以显著改善图像边界, 本文提出将热传导方程滤波法和 MBO 算法应用于 ESPI 测量技术。为了验证方法的有效性, 本文对实验获得的条纹图和计算机

收稿日期: 2007-12-27; 收到修改稿日期: 2008-03-17

作者简介: 张 芳 (1981—), 女, 博士生, 主要从事电子散斑干涉图像处理技术方面的研究。E-mail: hhzhangfang@126.com

导师简介: 刘文耀 (1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电图像信息处理方面的研究。E-mail: wyl@tju.edu.cn

模拟的条纹图进行了测试,结果表明本文方法在条纹图滤波、二值化和相位图滤波方面效果显著。

2 热传导方程在电子散斑干涉条纹图相位提取中的应用

2.1 热传导方程滤波方法

滤波是电子散斑干涉技术的关键步骤,处理结果直接影响着相位提取的精度。利用偏微分方程进行图像处理的方法是把待处理的图像作为初始条件,把图像处理变换看作偏微分方程的算子,利用偏微分方程把初始图像变形,从而将偏微分方程的解与结果图像联系起来,通过求解偏微分方程实现图像滤波等操作。

热传导方程滤波方法是最早被提出的偏微分方程图像处理方法,具有操作简单的优点和明确的物理意义。将原始图像 I 作为初始信号,方程可写作

$$\partial_t u = \nabla^2 u, \quad u(x, y, 0) = I(x, y). \quad (1)$$

该方程的解 $u(x, y, t)$ 恰好是在尺度 t 下对原始图像进行高斯滤波的结果,即

$$u(x, y, t) = G(x, y, t) \cdot I(x, y), \quad (2)$$

其中 $G(x, y, t)$ 是二维高斯滤波器。 t 是与高斯函数的方差有关的参量,不同的 t 定义不同的平滑程度。

作为最早的偏微分方程模型,热传导方程是这类图像处理方法的基础。在此基础上,提出了许多滤波模型,充分显示出这类方法的灵活性和有效性^[7,8]。

2.2 改善图像边界的 MBO 算法

对滤波后的条纹图像进行阈值化分割,就得到二值图像,进而可以提取条纹的骨架线以确定相位。然而,有些二值图像条纹边界较粗糙,得到的骨架线有许多分支,还需要进行剪枝操作,这无疑增加了工作量和处理难度。为了解决二值图像边界粗糙的问题,去除边界上的多余信息,这里引入 MBO 算法。MBO 算法是在热传导方程滤波方法的基础上得到的,它是多次迭代过程,其中的一次迭代可以描述如下^[7]:

设 1_x 表示定义在二值图像区域 X 上的特征函数:

$$1_x = \begin{cases} 1, & x \in X \\ 0, & x \notin X \end{cases} \quad (3)$$

1) 以 1_x 为初值,利用热传导方程(1)式,求其解 $1_{x,t}$;

2) 定义 $X_1 = \{x | 1_{x,t}(x) \geq T\}$,得到新的二值图像 1_{x_1} ,其中 T 是二值化阈值;

3) 令 $X = X_1$,再返回 1)。

可见,MBO 方法的实质,就是在每次执行热传导方程后,将迭代结果二值化。

2.3 条纹图相位的提取

从单幅条纹图中提取相位,传统的处理方法是先对条纹图进行预处理,消除散斑图像中颗粒噪声的影响,增强图像清晰度;然后对预处理后的图像经过阈值化分割得到二值图像;接着用细化方法提取出二值图像的骨架线,骨架线与相位密切相关;再对条纹的骨架图像进行级数标定和插值得到三维相位图;最后,为了得到较精确的相位信息,一般要对相位图进行平滑处理。至此就可以从平滑后的三维相位图中读取任意一点的相位,进而可以得知物体的位移和形变。本文利用热传导方程对散斑条纹图滤波,用 MBO 算法改善二值条纹图像边缘。另外,由于插值得到的三维相位图仍然存在少量噪声,本文也利用热传导方程对其进行滤波。整个处理过程如下:

第一步,利用热传导方程对初始条纹图滤波;

第二步,以第一步得到的滤波后图像为初值,利用 MBO 算法多次迭代得到二值条纹图;

第三步,利用 Hilditch 细化方法^[9]提取条纹的骨架线;

第四步,对骨架线进行条纹级数标定。先设定某一条纹级数 n ,且条纹满足封闭式,相邻条纹的最大相差级数为 ± 1 ,其中向峰顶方向为 $+1$,向峰谷方向为 -1 ^[10];

第五步,根据标定后的骨架图,利用 C 样条插值方法^[11],初步得到三维相位图;

第六步,以第五步得到的相位图为初值,执行热传导方程,得到平滑后的相位图。

3 实验结果

首先对热传导方程的滤波性能进行了测试,并与传统的均值滤波和 Lee 滤波^[12]方法作对比。图 1(a)是一幅实验图像^[2],图 2(a)是一幅计算机模拟的电子散斑干涉条纹图^[1],其理想相位 $\varphi(x, y)$ 为

$$\varphi(x, y) = \frac{27\pi}{2} - 27\pi \left[\left(\frac{x - M/2}{M} \right)^2 + \left(\frac{y - N/2}{N} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中 M 和 N 分别是图像的行列数。图 1(b)~图 1(d)和图 2(b)~图 2(d)分别显示了对它们进行热

传导方程滤波、均值滤波和 Lee 滤波的结果。由图 1 和图 2 可以看出,热传导方程滤波方法能更有效地滤

除散斑噪声,其滤波性能优于传统的滤波方法。

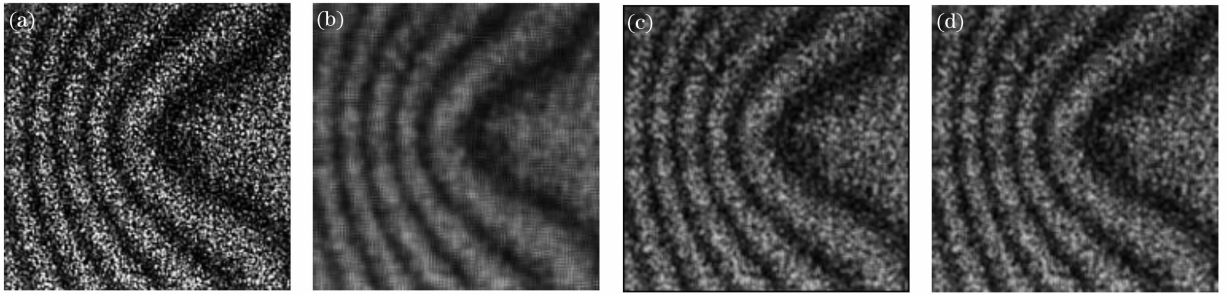


图 1 实验获得的电子散斑干涉条纹图及其滤波结果。(a)原始图像,(b)热传导方程滤波结果,(c)均值滤波结果,(d) Lee 滤波结果

Fig. 1 Experimentally obtained fringe pattern by ESPI and its filtered results. (a) Initial image, (b) HCE filtered result, (c) mean filtered result, (d) Lee filtered result

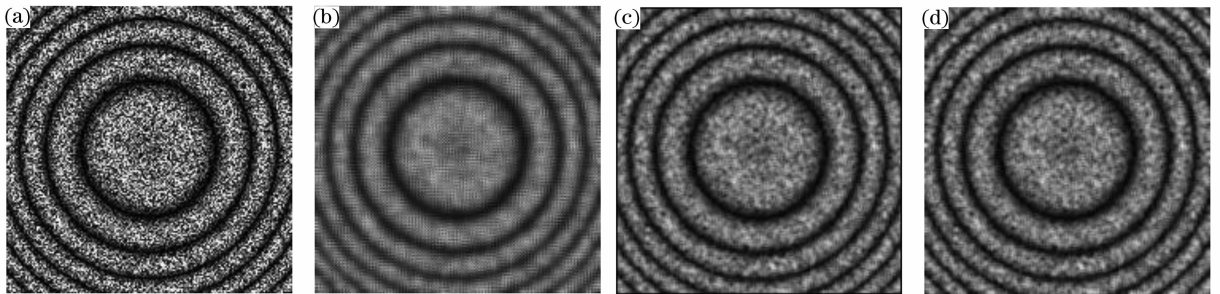


图 2 计算机模拟的电子散斑干涉条纹图及其滤波结果。(a)原始图像,(b)热传导方程滤波结果,(c)均值滤波结果,(d) Lee 滤波结果

Fig. 2 Computer-simulated ESPI fringe pattern and its filtered results. (a) Initial image, (b) HCE filtered result, (c) mean filtered result, (d) Lee filtered result

为了定量地评估热传导方程滤波模型的性能,这里用散斑指数 s 来衡量条纹图像的局部平滑程度^[5]

$$s = \frac{1}{M \times N} \sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N \frac{\sigma_{k,l}}{\langle I_{k,l} \rangle}, \quad (5)$$

其中, $\langle I_{k,l} \rangle$ 为像素点 (x, y) 的 $(2m+1) \times (2n+1)$ 邻域灰度平均值,该窗口内的局部标准偏差定义为

$$\sigma_{k,l} = \sqrt{\frac{1}{(2m+1) \times (2n+1) - 1} \sum_{i=-m}^m \sum_{j=-n}^n (I_{k-i,l-j} - \langle I_{k,l} \rangle)^2}. \quad (6)$$

由(5)式可知,如果将 $\langle I_{k,l} \rangle$ 看作信号,将 $\sigma_{k,l}$ 看作噪声,则散斑指数 s 可看作图像平均信噪比(SNR)的倒数。因此,具有较小 s 值的条纹图较平滑。本文采用 3×3 窗口计算散斑指数。表 1 列出了图 1 和图 2 中各幅图像的散斑指数。

表 1 热传导方程滤波前后的散斑指数对比

Table 1 Speckle index comparison of ESPI fringe patterns before and after HCE filtering

	Experimental		Simulated
Fig. 1(a)	0.7452	Fig. 2(a)	0.7917
Fig. 1(b)	0.1678	Fig. 2(b)	0.2401
Fig. 1(c)	0.2854	Fig. 2(c)	0.2773
Fig. 1(d)	0.2739	Fig. 2(d)	0.2665

从表 1 可以看出,三种滤波方法中,以热传导方程滤波效果最佳,经该方法滤波后散斑指数大幅度降低,图像噪声得到有效抑制。

为了显示 MBO 算法的有效性,将该方法与传统的直方图微分阈值化方法^[13]作了对比,图 3(a)和图 3(b)分别是直方图微分法和 MBO 算法得到的二值条纹图。由于滤波过程中采用了差分格式,因此滤波后的条纹图内部仍含有一些噪声[图 2(b)]。对比结果可以看出,如果采用传统的阈值化方法,二值化后的条纹质量很差[图 3(a)];而采用 MBO 算法,在二值化过程中进一步平滑条纹内部灰度信息,噪声被有效抑制,条纹边界也得到显著改善[图 3(b)]。

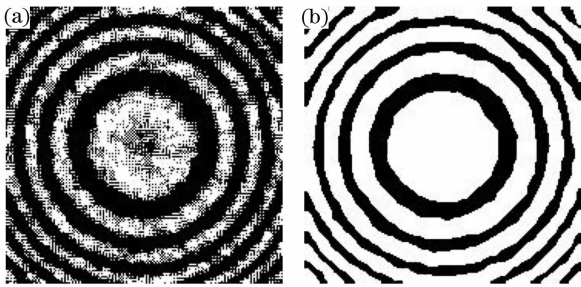


图3 图2(b)的二值化条纹图。(a)直方图微分阈值化结果,(b)MBO算法二值化结果

Fig.3 Binary fringe patterns of Fig. 2 (b). (a) Threshold result by histogram differential method, (b) binary result by MBO algorithm

图4是在图3(b)的基础上利用Hilditch细化方法提取的条纹骨架线。由于条纹都是整数级,因此首先指定最外侧的条纹骨架线为一级;对于其它骨架线,沿着相位增加的方向,即向条纹中心级数逐渐增加。因为相邻黑白骨架线上的相位间隔为 π ,所以在对条纹骨架线进行整数级数标定之后,在这些整数值的基础上统一乘以 π ,就得到了各条骨架

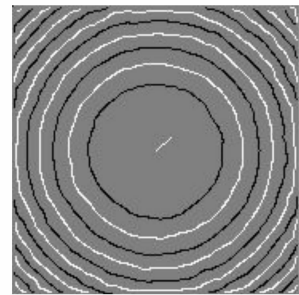


图4 二值化条纹图3(b)的骨架线

Fig.4 Skeleton of binary fringe pattern in Fig. 3(b)

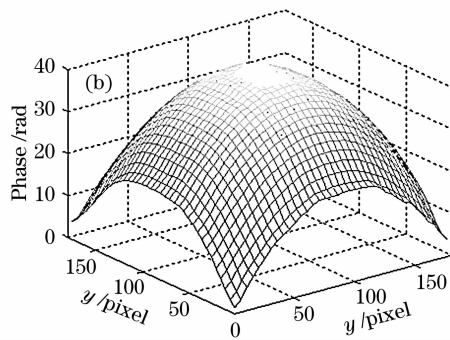
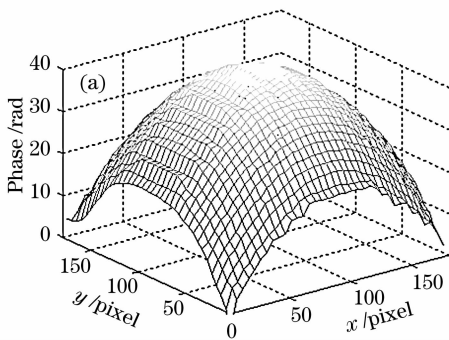


图5 (a) C样条插值得到的三维相位图,(b)热传导方程平滑结果

Fig.5 (a) Three-dimensional (3D) phase distribution obtained by C spline interpolation, (b) its HCE smoothed result

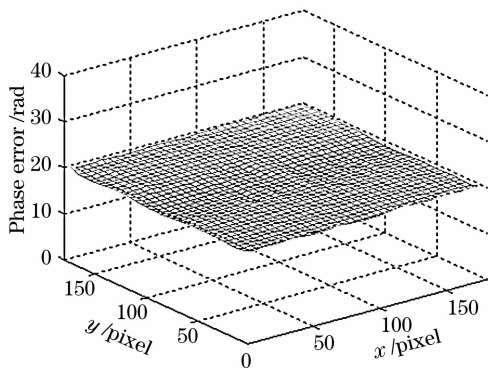


图6 本文提取的三维相位图[图5(b)]和理想三维相位的绝对误差

Fig.6 Absolute error of 3D phase map between the extracted phase [Fig. 5(b)] and the ideal phase

线上的相位值。而后,利用文献[11]中介绍的C样条插值方法获得全场的相位值,图5(a)给出了利用C样条插值方法得到的三维相位图。图5(b)是对图5(a)中的数据执行热传导方程滤波后的相位图,也就是利用热传导方程进行相位提取的最终结果。至此,就可以从平滑后的三维相位图中读取任意一点的相位,进而可以得知物体的形变或位移。图6显示的是提取的三维相位图[图5(b)]和理想三维相位[式(4)]的绝对误差。由图6可见,借助热传导方程能够准确地从单幅条纹图中提取出物体的变形信息。

4 结 论

提出将热传导方程应用于提取单幅电子散斑干涉条纹图相位的过程中。首先利用热传导方程对电子散斑干涉条纹图进行滤波,以去除条纹图中的颗粒性噪声;然后执行MBO算法,得到具有良好边界的二值条纹图;接着经过提取骨架线、级数标定、C样条插值一系列操作,初步得到三维相位图;再次利用热传导方程对相位图滤波,最终得到平滑后的相位图。分别对实验获得的条纹图和计算机模拟的条纹图执行热传导方程滤波,与传统方法进行比较发现,该方法能有效抑制图像噪声;进一步利用该滤波方法对上述计算机模拟的散斑干涉条纹图提取了三

维相位, 结果准确, 表明热传导方程滤波方法是一种行之有效的散斑条纹图处理方法。

参 考 文 献

- 1 N. A. Ochoa, F. M. Santoyo, A. J. Moore *et al.*. Contrast enhancement of electronic speckle pattern interferometry addition fringes[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13): 2783~2787
- 2 Sun Ping, Han Qing, Wang Xiaofeng. Large-shearing electronic speckle pattern interference system with carrier-frequency modulation technique[J]. *J. Applied Optics*, 2006, **27**(5): 380~384
孙 平, 韩 青, 王晓凤. 载频调制大剪切电子散斑干涉系统[J]. *应用光学*, 2006, **27**(5): 380~384
- 3 Yang Fujun, Yun Dazhen. Phase recovery from a single speckle fringe pattern based on statistical filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 952~956
杨福俊, 云大真. 基于统计滤波的单幅散斑条纹图的相位恢复技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 952~956
- 4 Sun Ping, Li Aihua, Zhang Li *et al.*. Three-dimensional displacement measurement in electronic speckle pattern interferometry by using reversed phase calculation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 193~196
孙 平, 李爱华, 张 丽 等. 在电子散斑干涉中利用反相位法进行三维变形测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 193~196
- 5 A. Dávila, G. H. Kaufmann, D. Kerr. Scale-space filter for smoothing electronic speckle pattern interferometry fringes[J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(12): 3549~3554
- 6 A. P. Witkin. Scale-space filtering [C]. *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, ACM Inc. 1983. 1019~1021
- 7 B. Jawerth, P. Lin. Shape recovery by diffusion generated motion[J]. *J. Visual Communication and Image Representation*, 2002, **13**(1): 94~102
- 8 Qian Weixin, Liu Ruigen, Wang Wanli *et al.*. The anisotropic diffusion methods based on the directions of the image feature [J]. *J. Image and Graphics*, 2006, **11**(6): 818~822
钱伟新, 刘瑞根, 王婉丽 等. 基于图像特征方向的各向异性扩散滤波方法[J]. *中国图象图形学报*, 2006, **11**(6): 818~822
- 9 L. Hayat, M. B. Sandler. Image compression algorithm for fast parallel thinning of binary images[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(14): 1056~1058
- 10 Jin Guanchang. *Computer-Aided Optical Metrology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. 74
金观昌. *计算机辅助光学测量* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 74
- 11 Chen Qianrong, Lu Qisheng, Cheng Lizhi. Identification of motion blur direction from motion blurred image by direction derivation method[J]. *J. Image and Graphics*, 2005, **10**(5): 590~595
陈前荣, 陆启生, 成礼智. 基于方向微分的运动模糊方向鉴别[J]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(5): 590~595
- 12 Hou Jianhua, Tian Jinwen, Liu Jian. Wavelet and spatial domain method for image filtering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 122~126
候建华, 田金文, 柳 健. 一种小波域与空域相结合的图像滤波方法[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 122~126
- 13 Miao Dong. *Recognition and Application of QR Code* [D]. Beijing: University of Beijing Science and Technology, 2004. 18~19
苗 东. *二维条码的识别与应用* [D]. 北京: 北京科技大学, 2004. 18~19