

基于 Curvelet 变换的 ESPI 图像散斑噪声抑制算法研究

李欣¹, 张文茂¹, 曾启林²

(1. 华南理工大学广州汽车学院电子信息工程系, 广东 广州 510800; 2. 广州华工百川自控科技有限公司新品开发部, 广东 广州 510640)

摘要:重点研究了 Curvelet 变换的去噪原理及方法, 并结合 ESPI 条纹图中散斑乘性噪声的特性, 提出了改进的 Curvelet 变换去噪方法, 即在去噪之前, 先将图像进行对数变换, 使得乘性噪声变成加性噪声, 然后再进行 Curvelet 变换去噪, 这样会更有利于噪声与边缘信息的分离。并把该方法应用在对轮胎的激光无损检测图像处理系统中, 实验结果表明该方法在有效去除散斑噪声的同时, 较好地保持了条纹图的边缘细节信息。

关键词: ESPI; 散斑噪声; Curvelet 变换; 条纹图滤波

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.09.023

Study on speckle noise filter in the ESPI image based on curvelet transform

LI Xin¹, ZHANG Wen-mao¹, ZENG Qi-lin²

(1. Guangzhou Auto College South China University of Technology, Guangzhou 510800, China;

2. New Product Developments Department, SCUT Bestry Company, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper studies the de-noising principle of curvelet transform. Combined with the characteristics of ESPI fringe pattern, the improved Curvelet de-noising method is proposed. That is, making the logarithmic transformation to the image at first, then the multiplicative noise is changed to additive noise. After that, the Curvelet transform is made, which is beneficial to separate the noise and edge information. The experimental results show that this method is effective to remove speckle noise, and simultaneously keep fringe pattern edge information.

Key words: electronic speckle pattern interferometry; speckle; Curvelet transform; filtering method of fringe pattern

1 引言

在现代数字散斑测量方法中, 一般采用减模式来产生数字散斑条纹图, 它是进一步图像处理的信息载体, 同时不可避免地附带有大量的乘性噪声。为了保证测量精度, 在进一步图像处理前必须对其进行降噪, 为此, 选择合适的滤波方法显得尤为重要。近年来, 小波分析在信号处理中的应用取得了很大的发展, 主要得益于其对信号的时、频局域分析能力及对一维有界变差函数类的最优逼近性能^[1]。但是, 由一维小波所张成的可分离小波只具有有限的方向, 无法最优表示含线奇异或者面奇异的高维函数。为了克服这一局限性, 多尺度几何分析应运而生, 其代表就是脊波变换 (Ridgelet Transform) 和 Curvelet 变换^[2-3]。尤其对 Curvelet 变换而言, 其基

底支撑区间满足各向异性尺度关系, 可以很好地逼近图像中的奇异曲线。所以, Curvelet 变换在图像的去噪, 对比度增强以及边缘检测等领域得到了广泛的应用^[4-5]。而且, 已有文献将 Curvelet 变换应用于合成孔径雷达 (SAR) 图像去除斑点噪声, 由于合成孔径雷达与光学干涉相仿, SAR 图像中的斑点噪声也是乘性噪声, 因此研究 Curvelet 变换及其在 ESPI 图像处理中的应用具有很重要的意义。

2 Curvelet 变换去噪原理及实现

2.1 Curvelet 变换

Curvelet 变换是 1999 年由 Stanford 大学的 Candes

作者简介: 李欣 (1982 -), 硕士, 讲师, 主要研究方向为数字信号及图像处理。E-mail: lixin-820701@163.com

收稿日期: 2011-03-18; 修订日期: 2011-04-14

和 Donoho 提出的,它是在研究小波变换的基础上发展起来的,由于小波变换在某些应用中长期受到沿边缘信息表达能力不足的困扰,虽然研究人员提出了不少改进方法,但都没有从本质上进行革新。在 Curvelet 变换之前,Candes 和 Donoho 提出了 Ridgelet 变换^[6],它是一种能有效处理二维线奇异的强有力的分析工具。其本质在于,使用 Radon 变换把线奇异映射为点奇异,然后在 Radon 域中使用小波变换来处理点奇异。有实验证明,对于具有直线状特征的模型,Ridgelet 方法比 Wavelet 方法具有更高的比较精度和更好的还原效果,然而对于曲线状特征的图像,Ridgelet 变换则显得力不从心,由此可以采用类似积分运算的思想——以直代曲,由若干条较短直线段来近似代替整条曲线,分别对每条小直线段进行 Ridgelet 变换,这就是 Curvelet 变换的基本原理。可以认为 Curvelet 变换是一种多尺度的 Ridgelet 变换。Curvelet 变换和小波变换一样,也是一种多尺度变换,它的结构元素也包括尺度和位置参数,但和小波变换不一样的是,它还包括方位参数,使得 Curvelet 变换具有良好的方位特性。在图像处理中,首先将图像用滤波器分成不同尺度的子带,在不同的子带上,边缘信息和噪声信息就比较清楚的分离开,再对每个子带的分块后的图像应用 Ridgelet 变换。图 1 是 Curvelet 变换的过程定义^[7]。

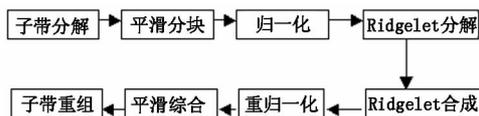


图 1 Curvelet 变换分解和重建过程

2.2 Curvelet 变换的仿真实现

(1) 图像大小

在此建议图像的大小应该为 $n \times n$ 的正方形矩阵。且 n 的选择最好以 4 的乘方,这对算法的实现是非常方便的,如 $n = 4^4 = 256, n = 4^5 = 1024$ 。

(2) 子带定义

Curvelet 子带和小波子带的对应规则可用以下的式子来描述:Curvelet 子带 $s \leftrightarrow$ 小波子带 $j \in \{2s, 2s + 1\}$ 。由此,对 $n = 1024$ 的数字图像,能被分解为 4 个 Curvelet 子带,当 Curvelet 子带 $s = 4$ 时则对应于小波子带 $j = 8, 9$ 。

(3) 子带滤波器

由前面的子带定义可知,可以采用小波分解的方法来实现 Curvelet 的子带分解, MATLAB 上有现成的小波工具箱,所以采用小波分解进行 Curvelet 子带分解比较方便。把滤波后每个 Curvelet 子带结

果矩阵记为 \bar{D}_s 。

(4) 平滑分块

当对图像进行分块处理时,不可避免地会出现边界效应,所以在对图像进行分块时,对图像的每个块进行平滑。这个过程可由下式来表示: \tilde{Q} 的一般表达式是 $\tilde{Q}(s, k_1, k_2, n) = [I_{s, k_1} + 1, I_{s, k_1 + 1}] \times [I_{s, k_2} + 1, I_{s, k_2 + 1}]$;这里 $I_{s, k} = k \times n/2^s$; k_1, k_2 分别为该图像块在纵向和横向上的序号, n 为子带图像的任一维数上的像素个数。

定义一个窗口 w_Q ,然后通过 w_Q (它的窗口宽度是相关的 \tilde{Q} 的两倍)来平滑每一个 \tilde{Q} 所代表的块。

$$w_Q = [I_{s, k_1} - n/2^{s+1}, I_{s, k_1 + 1} + n/2^{s+1}] \times [I_{s, k_2} - n/2^{s+1} + 1, I_{s, k_2 + 1} + n/2^{s+1}] \quad (1)$$

式中, w_Q 须满足以下式以保持平滑分块前后的能量不变:

$$\sum_{i_1, i_2} w_Q(i_1, i_2)^2 = 1, \forall 1 \leq i_1, i_2 \leq n \quad (2)$$

对 $s = 2, 3$, 将子带 \bar{D}_{s-1} 进行平滑分块,得到每个子带的每一个块 \bar{g}_Q :

$$\bar{g}_Q(i_1 - I_{s, k_1}, i_2 - I_{s, k_2}) = w_Q(i_1, i_2) \cdot (\bar{D}_{s-1})(i_1, i_2) \quad (3)$$

在这种应用方法中,用 \bar{D}_{s-1} 和 \tilde{Q}_s 的关系代替了前面提到的 $\Delta_s f$ 和 Q_s 之间的关系。

(5) 离散 Ridgelet 变换

整个算法最核心的一个步骤就是应用离散 Ridgelet 变换到分割后的每一个块 \bar{g}_Q 。这里应用前面提到的数字 Ridgelet 变换。

3 基于改进的 Curvelet 变换的 ESPI 图像抑噪应用

3.1 实验对象及装置

实验装置所采用的是相移电子散斑剪切光路^[8],其中 CCD 分辨率是,光源用的是波长为 780 nm 的红外激光源,检测的对象是轮胎等橡胶复合型材料,主要研究其内部缺陷情况。而 ESPI 对于轮胎内部缺陷无损检测这个特例,其加载的方式是,把整个轮胎放于一个大真空室中,在常压下摄取第一幅图像,然后对真空室抽真空,再摄取第二幅图像。这时有脱层或者气泡的地方就会在内压的作用下发生膨胀,该膨胀使表面产生的位移属于离面位移。采用对橡胶缺陷板进行人为加载的方式可以很好地模拟这个变形过程,因此本节先对橡胶缺陷板这一代表性的实验图片进行 Curvelet 变换滤波研究,也就是图 3(a)。

3.2 改进的 Curvelet 变换实现方案

考虑到 ESPI 条纹图中的散斑噪声和条纹的关

系是乘性的,本文对 Curvelet 变换进行了改进,在去噪之前,先将图像进行对数变换,使得乘性噪声变成加性噪声,然后再进行 Curvelet 变换去噪,这样会更有利于噪声与边缘信息的分离,下面把改进的 Curvelet 变换去除散斑噪声的步骤描述如下:

(1) 对含噪图像进行同态变换,即取对数;

(2) 对(1)中变换后的图像进行 Curvelet 变换,得到 Curvelet 变换系数;

(3) 对图像的 Curvelet 变换系数按式(4)进行软阈值^[9]操作;

$$T^{\text{soft}}(y) = \begin{cases} 0, & \text{if } |y| \leq T \\ \text{sgn}(y)(|y| - T), & \text{if } |y| > T \end{cases} \quad (4)$$

其中,阈值 $T = m\sigma^2$, m 是一个常数; σ^2 是含噪声图像的均方差的估计值。Curvelet 变换硬阈值去噪法对噪声造成了“过扼杀”的现象,而软阈值去噪法则在去除噪声的同时较好地保护了图像的细节特征,使得去噪图像更接近原图的视觉效果^[10]。

(4) 对处理后的 Curvelet 变换系数进行 Curvelet 反变换;

(5) 对(4)的结果图像进行指数变化,得到消噪后的图像。

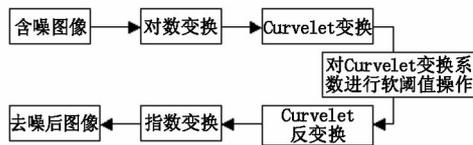


图2 改进的 Curvelet 变换去除散斑噪声算法流程图

由于 Curvelet 变换在处理图像时建议图像的大小应该为 $n \times n$ 的正方形矩阵。而采用本文实验装置所获得的图片大小为 1376×1024 , 所以从中截取 1024×1024 的图片作为本实验处理对象。对 $n = 1024$ 的数字图像,能被分解为4个 Curvelet 子带,当 Curvelet 子带 $s = 4$ 时则对应于小波子带 $j = 8, 9$ 。用 MATLAB 上现成的小波工具箱,可以很方便地实现 Curvelet 子带分解。对于本实验中阈值的选择,通过测试,当采用软阈值时,对于 $s = 2$ 的子带,应取 $m = 40$; 对于 $s = 3$ 的子带,取 $m = 10$; 对于 $s = 4$ 的子带,取 $m = 3$ 。

3.3 改进的 Curvelet 变换实验研究

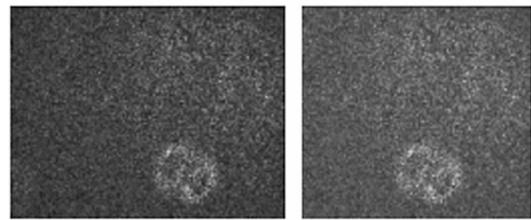
3.3.1 改进的 Curvelet 变换算法对橡胶缺陷板 ESPI 条纹图的滤波实验研究

(1) 对橡胶缺陷板 ESPI 条纹图,如图3(a)所示,截取大小为 1024×1024 的条纹(如图3(b)所示)进行滤波对比实验。

(2) 首先采用曲波软阈值去噪法对图像进行处

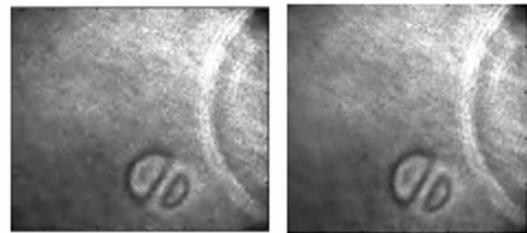
理,然后再采用本文提出的改进算法,即在曲波去噪前,先对条纹图进行同态变换。

(3) 对比两种方法的滤波效果如图3所示。



(a) ESPI 条纹图

(b) 截取后的条纹图



(c) 曲波软阈值去噪

(d) 改进的曲波去噪

图3 橡胶缺陷板 ESPI 条纹图滤波对比结果

(4) 实验分析

通过实验,从图3中可以清楚地看出,两种滤波算法都能够获得比较清晰的条纹对比度,较好地保持了图像的边缘,但在曲波软阈值去噪结果中还残留了少量噪声,而采用了本文改进的曲波去噪法则把噪声滤除得很干净。为了客观地对比两种算法的去噪能力,在表1中列出了散斑指数和峰值信噪比的数据。

表1 两种滤波算法的客观参数评价表

评价参数	散斑指数	峰值信噪比 PSNR
滤波方法		
曲波软阈值去噪法	0.1255	24.8564
改进曲波去噪法	0.0928	25.7283

从客观参数对比中,可以更进一步地验证了本文改进曲波去噪法的优势。改进的方法不仅拥有更高的峰值信噪比,而且拥有更强的散斑抑制能力,这说明改进的算法在有效滤除噪声的同时又能很好的保持 ESPI 条纹图的边缘信息。良好的保持边缘的能力是因为 Curvelet 变换的多尺度,多分辨特性,可以很好地逼近条纹图的曲线骨架,从而更好的保持了条纹图的边缘信息;优秀的去噪能力是由于本文改进算法采用了同态变换,将 ESPI 条纹图中的散斑乘性噪声转化为加性噪声,再用 Curvelet 变换去噪,这样就更加利于噪声与细节信息的分离,从而在保持边缘的同时更有效地去除散斑噪声。

3.3.2 改进的 Curvelet 变换算法在激光无损检测系统中的应用研究

为了得到轮胎内部缺陷的变形信息,还需要对轮胎激光无损检测系统的条纹图进行如下图像处理工作:条纹图滤波、相位提取和相位解包裹。检测结果如图4所示。

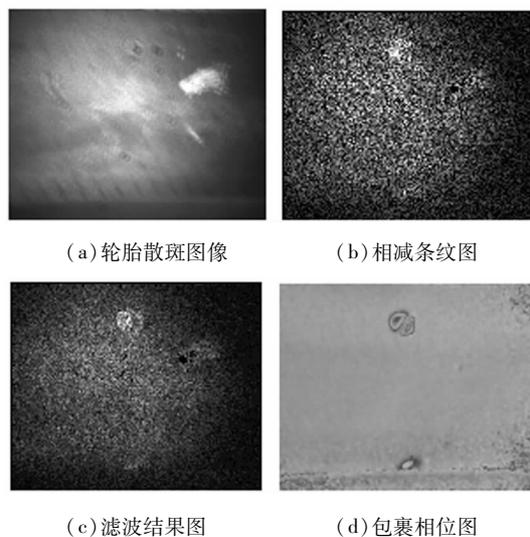


图4 轮胎激光无损检测条纹图滤波对比结果

从实验中看出,图4(a)是对轮胎内胎侧拍摄的激光散斑干涉图像,图4(b)是对轮胎变形前后的图片相减得到的散斑条纹图,其间充满了大量的散斑噪声,严重影响待测信息的提取,经过本文改进的 Curvelet 变换算法滤波之后,不仅条纹信息清晰可见,而且轮胎内侧的纹理特征也很明显,由于轮胎的激光无损检测是在密闭的真空室内进行,因此图像灰度低,不方便观察滤波效果,因此通过对滤波图像解包裹运算后得到的包裹相位图中背景区域平滑,条纹的边缘保持得很好,就更能说明该方法的优越性。

4 结论

本文主要研究了 Curvelet 变换应用在 ESPI 条纹图上的去噪效果,并结合散斑乘性噪声的特性,提出了改进的 Curvelet 变换去噪方法,即在滤除散斑噪声之前,先对条纹图进行同态变换,再进行 Curvelet 变换去噪。实验结果证明该方法在去除散斑噪声的同时保持了较高的 PSNR,即较好地保护了条纹图的边缘信息,并将改进的曲波变换法应用在实际工业检测的图像处理中,去噪效果良好。

但是还存在一定的不足:

(1)阈值的选取:本文只是对软阈值 Curvelet 变换去噪法进行了实验,但是对有些文献中提到的软硬折中的阈值选取法,并没有进行深入地研究。考虑更适合 ESPI 条纹图的阈值选取规则,将更有利于

提高去噪效果。

(2)提高 Curvelet 变换算法的计算速度,以提高系统的图像处理效率和应用实时性。

参考文献:

- [1] Jiao Licheng, Tan Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1975 - 1981.
焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望 [J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975 - 1981.
- [2] Emmanuel J Candes, David L Donoho. Continuous curvelet transform; resolution of the wavefront Set [EB/OL]. Available: www-stat. stanford. edu/-donoho/Reports/2003/Cont Curvelet Transform-I. pdf, 2003 - 5 - 6/2004 - 8 - 15.
- [3] Emmanuel J Candes, David L Donoho. Continuous curvelet transform; discretization and frames [EB/OL]. Available: www-stat. stanford. edu/-donoho /Reports/2003/Cont Curvelet Transform-II. pdf, 2003 - 5 - 6/2004 - 8 - 15.
- [4] Jeanluc Starck, Emmanuel J Candes, David L Donoho. The curvelet transform for image denoising [J]. IEEE Trans Image Proc, 2002, 11(6): 670 - 684.
- [5] Jeanluc Starck, Fionn Murtagh, Emmanuel J Candes, et al. Gray and color image contrast enhancement by the curvelet transform [J]. IEEE Trans Image Proc, 2003, 12(6): 706 - 716.
- [6] M N Donoho, M Vetterli. The finite ridgelet transform for image representation [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2002, 12(1): 16 - 28.
- [7] D L Donoho, Mark R Duncan. Digital curvelet transform; strategy, implementation and experiment [R]. Department of Statistics, Stanford University, 1999.
- [8] Xiao Xiangyi, Huang Daoping, Zeng Qilin. ESSPI tyre inspection system based on liquid crystal [J]. Control Engineering of China, 2007, (S3): 128 - 130. (in Chinese)
肖祥益, 黄道平, 曾启林. 基于液晶相移的电子剪切散斑轮胎检测系统 [J]. 控制工程, 2007, (S3): 128 - 130.
- [9] Donoho D L. Denoising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41: 613 - 627.
- [10] Ma Yunfei, He Wenzhang, Liu Huiyan. Image denoising by fast discrete curvelet transform [J]. Journal of Tianjin University of Technology and Education, 2008, 18(4): 37 - 39. (in Chinese)
马云飞, 何文章, 刘惠燕. 基于快速离散曲波变换的图像去噪 [J]. 天津工程师范学院学报, 2008, 18(4): 37 - 39.