

轮胎激光错位散斑干涉图像缺陷检测及定位方法

张岩, 李涛, 李庆领*

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 结合 Curvelet 变换和 Canny 边缘检测算子对轮胎激光剪切图像进行分析, 从而检测轮胎缺陷。利用 Curvelet 变换使图像中的边缘信息可以通过频域中次高频带中的较大系数来表征的特点, 筛选相应的 Curvelet 系数, 达到增强图像边缘信息、滤除图像背景噪声的目的; 通过剔除低于 Curvelet 阈值的系数, 缩短计算时间, 提高缺陷检测和定位效率。

关键词: 轮胎; 激光剪切图像; Curvelet 变换; Canny 算子; 缺陷检测; 定位

中图分类号: TQ336.1; TP271 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2013)04-0247-04

自激光发明以来, 光学技术作为一种有效的检测方法广泛地应用于轮胎的表面和内部缺陷检测。激光全息技术为胎侧区域的钢丝帘线排列异常情况, 如帘线搭接、接头断开、稀线和交叉以及气泡、脱层等缺陷的检测提供了方案。然而, 环境振动对激光全息技术的干扰是一个长期存在的难题。为了减少不利影响, Y. Y. Hung 等^[1-2]提出一种基于散斑剪切干涉技术的错位散斑干涉方法。激光数字剪切散斑轮胎无损检测技术是对轮胎表面进行无损检测的新型技术, 集现代激光技术、散斑干涉技术、图像采集及处理技术、计算机技术和精密测试技术于一体。

本研究以轮胎激光错位散斑干涉图像为试验对象, 针对数字激光错位散斑干涉图像的特征, 结合 Curvelet 变换的方向性和多尺度以及强烈的各向异性等特点, 对图像进行降噪和检测目标的边缘信息增强, 在保证较低的均方误差基础上, 实现较理想的图像数据精简性与精确性的平衡^[3]。对处理后的干涉图像进行改进的 Canny 算子边缘检测运算, 从而检测出轮胎缺陷。

1 Curvelet 变换及边缘检测技术

1.1 Curvelet 变换

出于图像分析的需求, E. J. Candes 等^[4]首次

提出了 Curvelet 变换。Wavelet 变换对点奇异性有很好的效果, 但对于含有随机边缘的目标却未能很好地描述^[5]。而 Curvelet 变换对线奇异性的敏感特性使得其能用极少的非零系数精确表达图像边缘信息。

第 2 代 Curvelet 变换有两种实现方法, 非等间隔快速傅里叶变换方法和频率 Wrapping 方法^[6]。本研究采用频率 Wrapping 方法来实现。对于给定 $f[t_1, t_2]$, $0 \leq t_1, t_2 < n$, 可将其视为一个笛卡尔阵列, 则采用频率 Wrapping 方法来实现快速 Curvelet 变换的步骤如下。

(1) 对 $f[t_1, t_2]$ 进行二维快速傅里叶变换得到 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 。

(2) 对每一个尺度 j 和角度 l , 计算 $\tilde{U}_{j,l}[n_1, n_2]\hat{f}[n_1, n_2]$, 这里 $\tilde{U}_{j,l}[n_1, n_2]$ 是离散局部窗。

(3) 将以上结果进行卷积:

$$\tilde{f}_{j,l}[n_1, n_2] = W(\tilde{U}_{j,l}\hat{f})[n_1, n_2] \quad (1)$$

$$0 \leq n_1 < L_{1,j}, 0 \leq n_2 < L_{2,j}, \theta \in (-\pi/4, \pi/4)$$

(4) 对每一个 $\tilde{f}_{j,l}$ 进行二维快速傅里叶反变换获取离散系数 $c^D(j, l, k)$ 。

1.2 边缘检测技术

边缘检测技术是图像处理和计算及视觉中最重要的基本技术之一, 尤其在图像特征检测和提取中得到广泛应用。下面仅对几种经典的边缘检测算子进行介绍, 详细阐述见参考文献[7-8]。

1.2.1 Sobel 算子

Sobel 算子是众多得到广泛应用的梯度算子

作者简介: 张岩(1980—), 男, 山东菏泽人, 青岛科技大学在读博士研究生, 主要从事传热设备及节能技术研究。

* 通信联系人

之一,通过计算每一个像素点的梯度给出具有最大梯度变化的方向和在该方向上的变化率。

1.2.2 LOG 算子

LOG 算子是第 1 个基于高斯拉普拉斯最常用的检测算子。对于给定图像,将其在某一尺度与高斯核函数卷积,从而给出在尺度空间的表达,然后计算拉普拉斯算子。

1.2.3 Canny 算子

Canny 算法目前依然是最有效的方法之一^[9]。首先利用高斯滤波器对图像进行滤波:

$$M(x, y) = G(x, y, \sigma) \cdot f(x, y) \quad (2)$$

其中, $f(x, y)$ 为原始图像, $G(x, y, \sigma)$ 为高斯平滑算子。Canny 算法使用 4 个 mask 检测水平、垂直以及对角线方向的边缘:

$$S(x, y) = \sqrt{P^2(x, y) + Q^2(x, y)} \quad (3)$$

$$\theta(x, y) = \arctan |Q(x, y)/P(x, y)| \quad (4)$$

$$P(x, y) \approx [M(x, y+1) - M(x, y) + M(x+1, y+1) - M(x+1, y)]/2 \quad (5)$$

$$Q(x, y) \approx [M(x, y) - M(x+1, y) + M(x, y+1) - M(x+1, y+1)]/2 \quad (6)$$

$S(x, y)$ 反映了图像的边缘强度, $\theta(x, y)$ 反映了图像的边缘方向。使 $S(x, y)$ 取得局部最大值的方向角 $\theta(x, y)$ 反映了边缘的方向。为确定边缘,必须保留局部梯度最大的点,而抑制非极大值。对非极大值抑制图像作用两个阈值 τ_1 和 τ_2 , $\tau_1 = 0.4\tau_2$ 。将梯度值小于 τ_1 的像素的灰度值设为 0, 得到图像 1。然后把梯度值小于 τ_2 的像素的灰度值设为 0, 得到图像 2。图像 2 的阈值较高, 去除了大部分噪声, 但同时也损失了有用的边缘信息。而图像 1 的阈值较低, 保留了较多的信息, 以图像 2 为基础, 以图像 1 为补充来连接图像的边缘。

连接边缘的具体步骤如下: 对图像 2 进行扫描, 当遇到一个非零灰度的像素 $P(x, y)$ 时, 跟踪以 $P(x, y)$ 为开始点的轮廓线, 直到轮廓线的终点 $Q(x, y)$ 。考察图像 1 与图像 2 中 $Q(x, y)$ 点位置对应的点 $S(x, y)$ 的 8 个邻近区域。如果在 $S(x, y)$ 点的 8 个邻近区域中有非零像素 $S(x, y)$ 存在, 则将其包括到图像 2 中, 作为 $R(x, y)$ 点。

从 $R(x, y)$ 开始, 重复第 1 步, 直到在图像 1 和 2 中都无法继续为止。当完成对包含 $P(x, y)$ 的轮廓线的连接之后, 将这条轮廓线标记为已经访问。回到第 1 步, 寻找下一条轮廓线。重复第 1 步、第 2 步、第 3 步, 直到图像 2 中找不到新轮廓线为止。至此, 完成 Canny 算子的边缘检测。

2 基于 Curvelet 变换和 Canny 算子的轮胎缺陷检测

Curvelet 对图像的边缘, 如曲线、直线等几何特征的表达更加优于小波。因此, 利用 Curvelet 变换对图像边缘进行增强, 通过改变次高频带中的大系数以实现图像增强的目的。改变系数的函数如下^[10]:

$$y_c(x, \sigma_n) = \begin{cases} 1 & x < \sigma_n \\ y_c(x, \sigma_n) = \frac{x - \sigma_n}{\sigma_n} \left(\frac{m}{c\sigma_n} \right)^p + \frac{2\sigma_n - x}{c\sigma_n} & x < 2\sigma_n \\ y_c(x, \sigma_n) = \left(\frac{m}{x} \right)^p & 2\sigma_n \leq x \leq m \\ y_c(x, \sigma_n) = \left(\frac{m}{x} \right)^s & x \geq m \end{cases} \quad (7)$$

式中, c 为归一化参数, σ_n 为噪声标准差, 非线性度由 p 确定, 动态范围压缩由 s 给出; 参数 m 控制 Curvelet 系数的放大程度, m 值的大小由 Curvelet 尺度中的像素值决定, 有两种方法可以从数据中确定该值。

(1) 通过噪声标准差获得 m 值, $m = K_m \sigma_n$, K_m 独立于 Curvelet 系数值, 因而易于设定。

(2) 通过相应频带中最大 Curvelet 系数 M_c 获得 m 值, $m = lM_c$, $l < 1$ 。

当系数被放大后, 用修改后的 Curvelet 系数重建图像, 然后对其进行高斯滤波 ($\sigma_n = 4$), 计算梯度后进行八邻域双线性插值非最大抑制, 从而获得轮胎激光剪切干涉图像中缺陷的边缘。为了进行改进的非最大抑制, 将像素的 8 个邻域根据其梯度角度 $\theta(i, j)$, $-90^\circ \leq \theta(i, j) \leq 90^\circ$ 分到 4 个象限中, 验证像素的梯度值是否为最大。计算方法详见参考文献[11]。

改进的非极值抑制过程利用了当前像素梯度方向上像素的水平、垂直双线性插值, 更加精确地定位了边缘。最后采用与传统 Canny 算法相同的双门限方法实现散斑条纹图像的边缘提取。

3 试验结果

以含有缺陷的轮胎激光剪切图像为试验对象, 将本文方法与 Sobel, LOG 和 Canny 边缘检测算子进行试验对比。Canny 边缘检测参数设置如下:

FILTER_SIZE=10

SIGMA=4

LOW_THRESHOLD_FACTOR=0.1

HIGH_THRESHOLD_FACTOR=0.3

LOG 算子中参数设置使用了高斯函数的标准差和阈值来抑制伪边缘。在对图像预处理后使用卷积方法进行快速 Curvelet 变换, 并对 Curvelet 高频自带系数进行筛选和处理。进行 Curve-

let 反变换后使用改进的 Canny 边缘检测算法完成缺陷检测。图 1 示出了测试图像的 Curvelet 变换和其部分重建图像(1%系数重建)。

图 2 示出的是本文方法得出的检测结果, 轮胎缺陷被清晰、准确地检测定位出来。图 2(b)是原始图像利用 0.1% 的 Curvelet 系数重建的结果。将 Curvelet 域中小于测定阈值的小系数置零, 本例中阈值取 15。图 2(c)为对(b)进行高斯滤波后的图像, 本例中取 $\sigma_n=4$ 。图像的梯度计算以及非极大抑制在图 2(d)和(e)中给出。最后, 通过阈值计算去除伪边缘, 得到轮胎缺陷边缘。由图2可以看出, 轮胎中的缺陷经过处理被

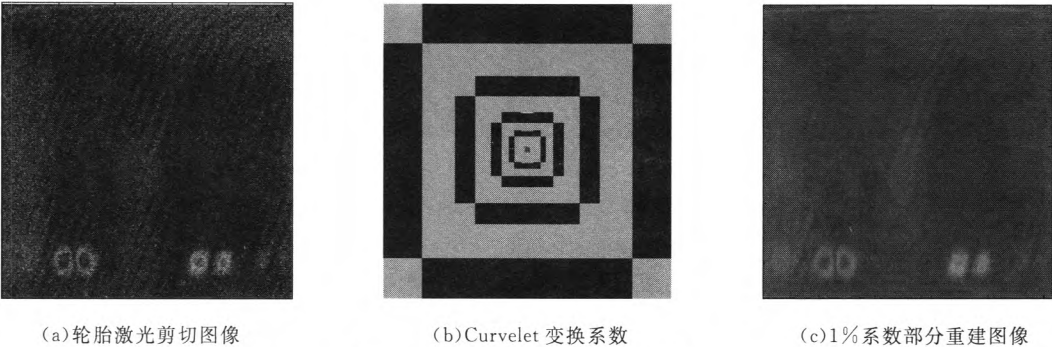


图 1 Curvelet 变换与部分重建图像

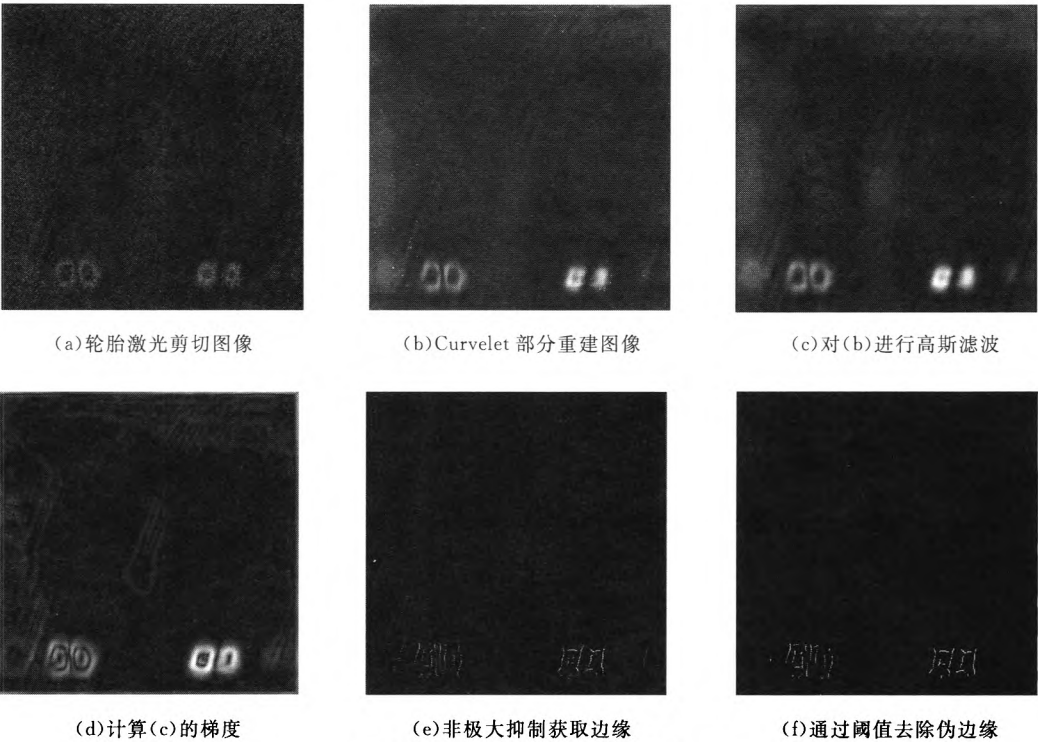


图 2 本文方法得出的检测结果

完整地检测定位出来。通过阈值计算去除了绝大部分伪边缘,少量残余伪边缘信息在后续的处理中会被自动丢弃。

对于Canny和LOG检测算法而言,在小尺

度时边缘信息会对噪声非常敏感,此时若通过提高阈值来降噪则会造成边缘信息的缺失;在大尺度时边缘的定位精度则会下降。本文方法与传统边缘检测方法检测结果对比如图3所示。尽管传

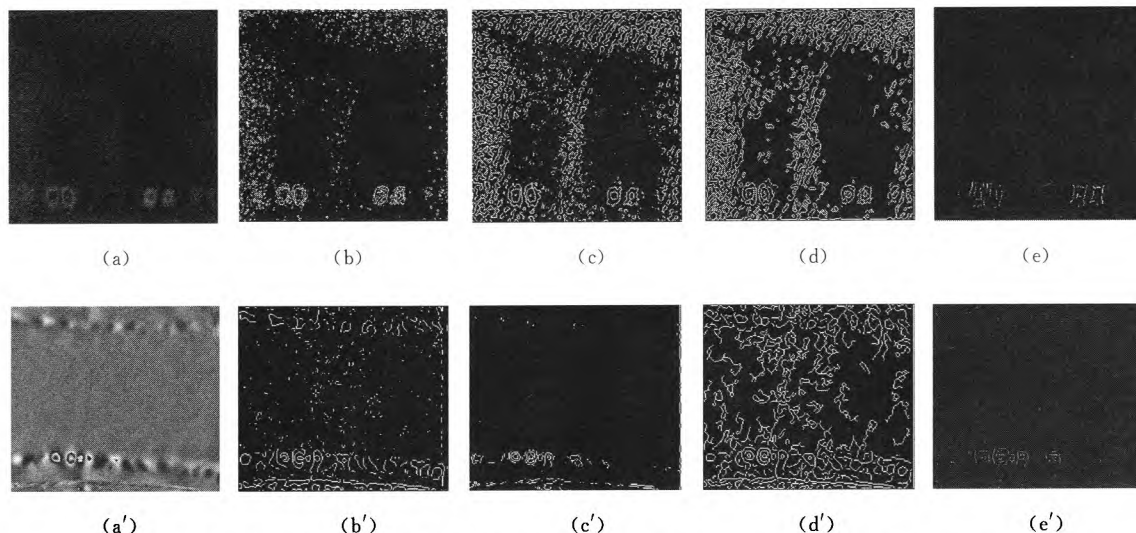


图3 本文方法与传统边缘检测方法的检测结果对比
(a),(a')—原始图像;(b),(b')—标准 Sobel 方法检测结果;(c),(c')—标准 LOG 方法检测结果;
(d),(d')—标准 Canny 方法检测结果;(e),(e')—本文方法检测结果。

图3 本文方法与传统边缘检测方法的检测结果对比

统方法检测出了测试图像中绝大部分的边缘信息,但其中包含了大量伪边缘,无法检测并分离出轮胎缺陷的边缘。本文方法将轮胎缺陷部分的边缘信息清晰而准确地检测出来,绝大多数的伪边缘得到了很好的抑制和消除,定位的精确性和边缘的连接性也取得了令人满意的效果。

4 结语

研究了基于 Curvelet 变换和 Canny 边缘检测算法的轮胎激光剪切图像中的缺陷目标检测和定位。试验结果表明,与传统的 Sobel,LOG 和 Canny 算子边缘检测方法相比,本文方法能够有效地检测定位缺陷的边缘信息。

参考文献:

- [1] Hung Y Y, Tang S, Hovanesian J D. Real Time Shearography for Measuring Time Dependent Displacement Derivatives[J]. Exp. Mech., 1994, 34(1): 89-92.
- [2] Hung Y Y. Recent Development in Practical Optical Nondestructive Testing[J]. SPIE, 1991, 1554(B): 29-45.
- [3] 隆刚,肖磊,陈学伦. Curvelet 变换在图像处理中的应用综述[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(8): 1331-1337.
- [4] Candes E J, Donoho D L. Curvelets—A Surprisingly Effec-

tive Nonadaptive Representation for Objects with Edges[M]. Nashville: Vanderbilt University Press, 2000: 105-120.

- [5] Zhang Y, Yu B, Gu H M. Face Recognition Using Curvelet Based Two-dimension Principle Component Analysis[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 26(3): 13.
- [6] Candes E J, Demanet L, Donoho D L, et al. Fast Discrete Curvelet Transform[J]. Multiscale Modeling and Simulation, 2006, 5(3): 861-899.
- [7] Basu M. Gaussian-based Edge-detection Methods—A Survey[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2002, 32(3): 252-260.
- [8] Senthilkumaran N, Rajesh R. Edge Detection Techniques for Image Segmentation—A Survey of Soft Computing Approaches[J]. International Journal of Recent Trends in Engineering, 2009, 1(2): 250-254.
- [9] Shapiro L G, Stockman G C. Computer Vision[M]. London: Prentice Hall, 2001: 326.
- [10] Starck J, Murtagh F, Candes E J, et al. Gray and Color Image Contrast Enhancement by the Curvelet Transform[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(6): 706-717.
- [11] 李庆领,金常鑫. 轮胎散斑干涉图像边缘检测[J]. 橡胶工业, 2011, 58(4): 246-249.

收稿日期: 2012-10-24