

基于小波变换的解相技术研究

许庆红 钟约先 由志福

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘 要 提出一种基于小波变换的频域解相技术。对调制栅线图像进行小波变换, 生成被测物体背景图像, 两幅图像相减得到相对变形栅线图像, 分析基频谱, 由于背景成分基本消除, 利于有用频带的提取, 可以实现大梯度变化曲面和复杂形面的自动轮廓测量。

关键词 解相, 频域处理, 频谱, 小波变换。

1 引 言

为了获得物体三维信息, 通常把光栅投影到被测物体的表面, 光栅投影场由于受物体三维形状的调制而发生变形, 通过对变形的栅线进行处理解调出代表物体高度的相位信息^[1]。自 Taketa 提出傅里叶时频变换方法解调相位值以来, 由于其只需要单幅图像、实施方便、拍摄图像时间短且设备成本较低的特点, 频域处理方法成为解相技术研究和应用的主要方法^[2]。

频域解相的基本原理是通过傅里叶变换将时域信号变换到频域, 在频域中不同频率成分产生分离, 通过频域滤波提取有用频带, 经移频和傅里叶反变换得到所需要的相位值。在实际中, 发现其应用范围受很大限制。一方面, 有一个曲面可测梯度极限的要求。如果被测曲面的高度变化率超过该极限值时, 那么调制栅线图像在频域中的各次谐波成分就不能很好地分离, 传统频域处理方法就不能检测出这类大梯度变化的曲面。另一方面, 用于复杂形面检测时效果很不理想, 物体边界模糊, 解相精度低且不稳定。究其原因, 主要是在被测物体形状复杂的情况下, 在频谱中体现为能量分布弥散且代表背景光强信息的直流分量的频带较宽, 和有用的一次谐波发生混迭, 因此滤波时区分有用频带和无用频带, 确定截止频率十分困难, 而且能量损失较多。二者归一, 问题集中于有用的载波频率分量和代表背景光强信息的直流分量发生混迭。本文提出用小波变换方法处理调制栅线图像, 得到被测物背景图像, 将两幅图像相减, 把背景光强信息去掉, 再对相减后的图像进行频域处理。由于直流分量被抑制, 容易提取载波频率成分, 从而解决了上述问题, 提高了可测梯度, 改善了解相的精度和稳定性, 使频域解相技术在实际应用中取得更好的效果, 扩大了应用范围。

2 基于小波变换的频域解相技术

小波变换是近年来兴起的热门信号处理技术, 它的良好时频局部特性及多尺度性非常适合于图像处理^[4,5]。

小波函数 $\Psi(t)$ 满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (\text{波动性})$$

和

$$\Psi(t) \in L^2(R) \quad (\text{小})$$

两个条件, $\Psi(t)$ 通常称为母小波, 当 $\Psi(t)$ 通过 a 伸缩和 b 平移后, 并将其归一化, 可得通常意义下的小波函数

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \Psi\left[\frac{t-b}{a}\right], \quad a, b \in R, a \neq 0. \quad (1)$$

小波变换

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t) dt = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi\left[\frac{t-b}{a}\right] dt \quad (2)$$

C_1	D_1^1	D_0^1
D_1^2	D_1^3	
D_0^2		D_0^3

Fig. 1 The map of image division by wavelet transform

利用小波变换的多尺度特性, 对图像进行二维小波变换, 可得到四幅子带图像, C_0 表示图像纵横二向的低频信息, D_0^1, D_0^2, D_0^3 分别对应不同方向的高频信息。在更粗糙一级的分辨率上, C_0 又可分解为 $C_1, D_1^i (i=1, 2, 3), \dots$ 。图 1 是图像经过两级分辨率分解后的子带划分情况。本文选用德比契斯(Daubechies)正交小波、马拉特(Mallat)算法实现图像分解。

在调制栅线图像中, 背景的被测物体相对于畸变栅线是低频成分, 因此可以利用对调制栅线图像的小波分解, 分离得到被测物体的背景图像。对原始图像进行多级小波分解, 利用最粗分辨率上获得的低频子带成分构造被测物体背景图像, 将原始图像和被测物体背景图像相减, 得到相对变形栅线图像。由于小波变换时的边界条件采用镜面投影处理, 因此在图像边缘会产生失真, 而且随着尺度的增大, 失真越严重。所以, 为了保持边界的准确性, 一般尺度数不宜超过 4。经这样处理, 就将对应于频域中直流分量的背景光强信息抑制掉了。对相减后得到的相对变形栅线图像进行频域处理, 由于直流分量基本消除, 频谱中直流分量的带宽很窄, 很容易将有用的载波频率分量滤取出来, 因此可以提高可测梯度, 改善解相精度和稳定性, 实现对大梯曲面和复杂形面的检测。

3 可测梯度极限的研究

经理论分析的实验研究证明, 传统频域解相方法为了在频域内有效地滤出调制栅线图像的变形相位信息, 必须使得反映栅线变形信息的有用成分和其它成分如背景光强分离开来, 因此被测物理曲面可测梯度必须满足

$$\left| \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{1}{3} \frac{l_0}{d}, \quad (3)$$

式中, l_0 为投影光源镜头至被测物体基准参考面的垂直距离; d 为投影光源光轴和 CCD 摄像机光轴的距离。

本文提出基于小波变换的频域解相方法, 从理论上可以将曲面可测梯度极限提高 3 倍。经

被测物体调制后的栅线图像灰度分布表示为

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \Phi(x, y)], \quad (4)$$

式中, $a(x, y)$ 代表背景光强函数, $b(x, y)$ 是被测物体反射面反射系数, f_0 是载波频率, $\Phi(x, y)$ 为畸变相位。

背景光强 $a(x, y)$ 对应于频域中的直流分量, 它容易和载波频率成分发生混迭, 影响有用频带的提取, 从而限制了曲面可测梯度。将原始调制栅线图像和通过小波变换生成的背景图像相减, 得到相对变形栅线图像。假定背景光强完全消除, 则相对变形栅线图像的灰度分布可表示为

$$g(x, y) = b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \Phi(x, y)]. \quad (5)$$

将其进行傅里叶变换后, 频谱中代表背景光强的直流成分为零, 有用的载波频率成分很容易提取出来。通过推导, 可以得到此时的曲面可测梯度极限为

$$\left| \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{l_0}{d}. \quad (6)$$

比较式(3)与式(6)可知, 在检测系统光路参数保持不变的情况下, 基于小波变换的两幅图像相减后的最大可测梯度比传统频域解相方法提高了 3 倍, 因此是提高曲面可测梯度极限的有效方法。

以一个平板斜面为例, 进行实验研究。将光栅投影装置距被测物体参考面的距离设置为 $l_0 = 1351 \text{ mm}$, 光栅投影镜头与 CCD 的水平距离设置为 $d = 283 \text{ mm}$, 用 5 1/mm 的光栅投影到被测平板表面。由传统频域解相方法的可测梯度条件不等式(3)可得

$$\left| \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{1}{3} \frac{l_0}{d} \approx 1.591. \quad (7)$$

因此曲面最大可测梯度角近似为 57.85° 。

分别将被测平板倾斜 0° 、 40° 、 60° 与 70° 四个位置进行实验检测。将四个位置的四幅调制栅线图像进行傅里叶变换, 都取一典型的中间截面进行频谱分析, 如图 2 所示。

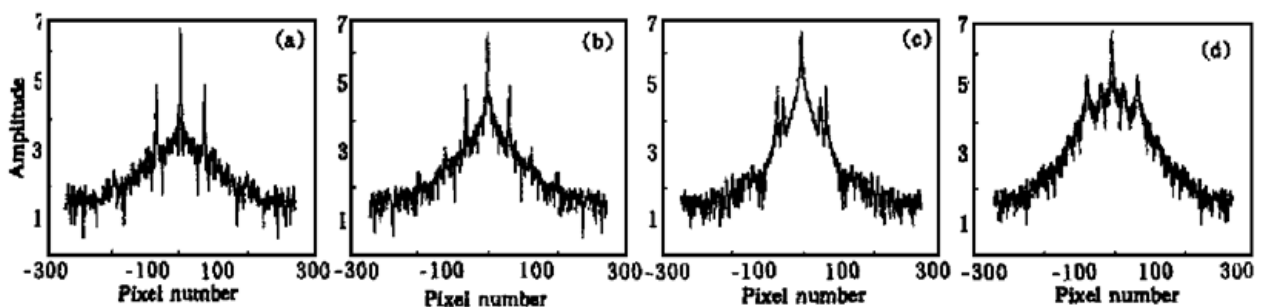


Fig. 2 The map of swing-frequency characteristic of original modulated grating image. (a) 0° obliquity; (b) 40° obliquity; (c) 60° obliquity; (d) 70° obliquity.

分析图 2, 当被测面梯度为零时, 直流分量与载波频率分量之间能很好地分离, 因此最有利于滤波和解相处理。当梯度角达到 40° 时, 载波频率分量与直流分量有所接近, 但仍然能有效地分开。所以, 梯度角为 40° 时, 仍然能够精确地解调出相位值分布, 结果如图 3 所示。当梯度角为 60° 以上时, 各种频率成分之间不能有效分离, 因而采用传统的频域解相方法无法解调出反映面形特征的相位值。采用本文的基于波变换频域解相方法, 得到相对变形栅线图像, 然后进行傅里叶频谱分析, 可以解决上述问题。梯度角为 70° 时, 相对变形栅线图像的频谱如图 4

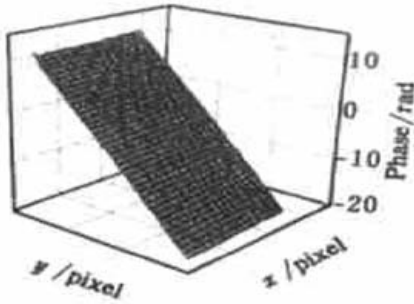


Fig. 3 The map of phase distribution at 0° obliquity

所示。

由图 4 可知,当梯度角为 70° 时,相对变形栅线图像的频谱中,直流成分受到明显抑制,有利于有用频率成分的滤波提取。在图 4 基础上进行滤波和解相,处理得到图 5 所示的相位值分布。

对频域解相方法可测梯度的研究,四川大学的李建和重庆大学的伊江曾先后提出一些改进方法^[2,3],其结果和本文方法基本一致。但是在这些方法中,均采用了相移和傅里叶分析相结合的方法。即在拍摄图像时需要

拍摄两幅图像,这两幅图像的载波相位相差 π ,将这两幅图像相减,就将对应于频域中直流分量的背景光强信息去掉了。对相减后的图像进行频域处理,由于直流分量被抑制,在频域中直流分量的带宽很窄,所以可以提高最大可测梯度。由于两幅图像之间进行相差为 π 的相移,所以需要一套移相装置,而且因此也就丧失了频域解相方法所具有的只需单幅图像、实施方便、拍摄图像时间短且设备成本较低等优势,在实际使用中不如直接应用相移解相方法来更加方便且效果好。本文提出的方法,只需要拍摄单幅图像,利用小波变换的数学方法实现背景光强的消除,方便快捷,保留了频域解相方法的长处,特别适合于相移解相方法无法完成的如产品在线质检、真人头像的复制等诸多要求实时拍摄的实际应用领域,取得良好的实际效果。

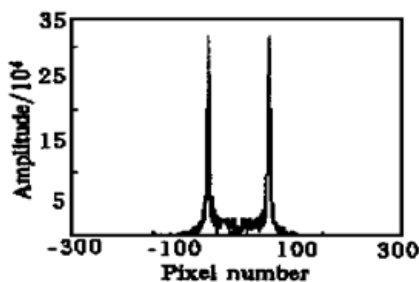


Fig. 4 The map of swing-frequency characteristic of relative distorted grating image at 70° obliquity

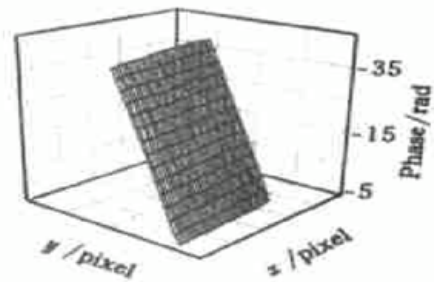


Fig. 5 The map of phase distribution at 70° obliquity by wavelet transform method

4 复杂形面检测的高精度解相

本文方法在复杂形面的检测中,能够克服传统方法解相精度低且不稳定的弱点,提高频域解相技术的应用水平。

以真人头像的检测为例,实验验证传统频域解相方法和本文基本小波解相方法的检测效果。图 6 是基于小波变换提取相对变形栅线图像的情况。从图可以看出:在相对变形栅线图像中,虽然背景人脸依然可见,但其光强受到很大程度的弱化,而畸变栅线相对得到加强。

在完成了相对变形栅线图像的提取之后,通过傅里叶变换将时域信号变换到频域,得到图像的频谱。图 7 表示了原始的调制栅线图像和相对变形栅线图像各自的频谱。由于被测物体人头像的表面形状比较复杂,其原始调制栅线图像的频谱中能量分布弥散,代表背景的直流分量频带较宽,和有用的载波频率分量发生混迭,因此在进行滤波时区分有用频带和无用频带、确定截止频率十分困难,目前仍没有有效的手段将有用成分完整地提取出来,不是混入了无用成分,就是损失了有用的能量,从而影响到解相精度。而在相对变形栅线图像的频谱中,能量分

布相对集中,背景直流成分基本消除,不同频率成分较好地分离,因此在滤波时能够很容易地提取有用频带,减少了其它成分的干扰,提高了解相的精度和稳定性。图 8 是传统频域解相方法和本文的小波解相方法对人头像检测的解相结果对比。显然,用传统方法得到的图 8(a) 发生了畸变,边界轮廓模糊,解相分辨率低。新方法解决了频谱混迭的问题,使有用成分能够完整提取,因此取得较好的效果,如图 8(b) 所示。



Fig. 6 Example of relative distorted grating image created by wavelet transform. (a) Original modulated grating image; (b) Background image by wavelet transform; (c) Relative distorted grating image.



Fig. 7 The map of frequency spectrum of grating image modulated by face. (a) Frequency spectrum of original image; (b) Frequency spectrum of relative image.

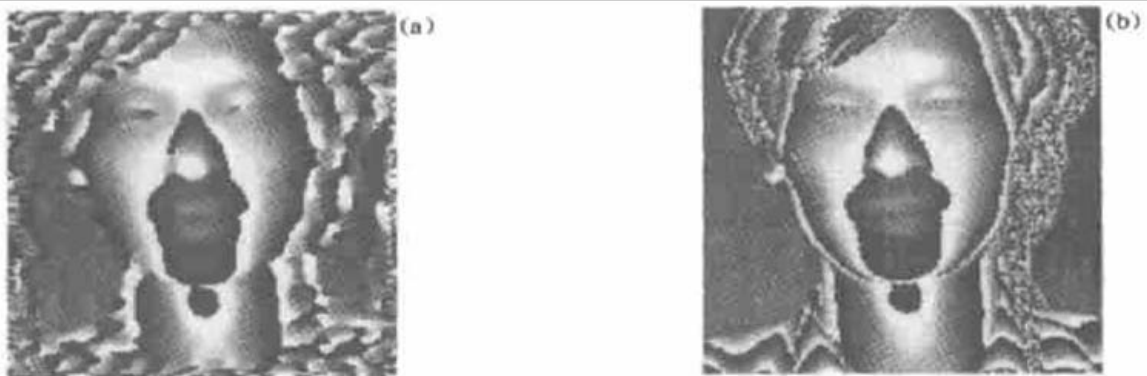


Fig. 8 The map of demodulated result contrast. (a) Result by traditional method; (b) Result by wavelet transform method.

结 论 本文在分析了传统频域解相方法存在频谱混迭问题的基础上,提出了基于小波变换的频域解相技术。它利用小波变换的数学方法消除背景光强的影响,使有用频带易于提取,提高了曲面可测梯度极限,改善了解相的精度和稳定性,实现大梯度变化曲面和复杂形面的三维形状检测,并得到了较好的测量结果。该技术提高了频域解相技术的实际应用水平,扩大了应

用范围。

参 考 文 献

- [1] Halioua M, Liu H C. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry. *Opt. Lasers in Engng.*, 1989, **11**(3): 185~ 215
- [2] Li Jian, Su Xianyu, Guo Lurong. Improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12): 1439~ 1444
- [3] Yi Jiang, Huang Shanglian. Modified Fourier transform profilometry for the measurement of 3-D steep shapes. *Opt. Lasers in Engng.*, 1997, **27**(5): 493~ 505
- [4] Mallat S G, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE T-PAMI*, 1992, **14**(7): 710 ~ 732
- [5] Mallat S, Hwang W. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1992, **38**(2): 617~ 643

Study on Phase Demodulation Technique Based on Wavelet Transform

Xu Qinghong Zhong Yuexian You Zhifu

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 1 June 1999; revised 6 September 1999)

Abstract A novel phase demodulation technique in frequency domain based on wavelet transform is introduced. Handling the original modulated grating image with wavelet transform, the object background image is created. And subtracting these two images, a relative distorted grating image is obtained. The background components in spectrum of the relative image are basically removed and the useful one is leached easily. The steep gradient and complex object shapes can be measured automatically with this technique.

Key words phase demodulation, processing in frequency domain, spectrum, wavelet transform.