

投影栅相位法三维形体检测 精确解相方法的研究

由志福 钟约先 袁朝龙 许庆红 曹起骧

(清华大学机械工程系, 北京 100084)

摘 要 根据投影栅相位法三维检测实际应用中所遇到的频域处理的移频问题和被测物体与参考面的对应关系问题, 分析了它们对解相精度的影响, 提出了不移频和全场参考面的解决方法。经实例验证, 它们在工程应用中取得了满意的效果。

关键词 相位, 主频, 移频, 参考面。

投影栅相位法是将物体的三维信息调制到载波信号的相位变化中。因此, 如何从系统模型中精确解调出相位值就成为该方法的关键技术之一。1982 年, Taketa 提出了傅里叶时频变换的方法来解调相位值, 从而使投影栅相位法向实际的应用迈出了坚实的步伐^[1, 2]。本文根据投影栅相位法三维检测应用中所遇到的频域处理中主频点确定和被测物体与参考面的对应关系问题分析了它们对解相精度的影响, 相应地提出解决方法, 并给出实例检测结果。

1 投影栅相位法检测系统频域解相中的主要问题

该方法的基本原理是将被测物体的高度信息调制在光强信号的相位中, 之后通过傅里叶频域分析技术解调出相位信息从而获得物体三维信息。因此, 如何精确地从灰度分布信息解调出相位值是本系统中关键的环节。

在实际解相中遇到以下两个比较重要的问题, 即在频域进行移频时确定主频点是很复杂的, 而且在某些情况下主频点本身就是不可确定的。另外, 从高度公式的推导过程可见, 所拍摄的畸变栅线的图像与参考面上栅线的图像必须一一对应, 否则以下的推导是不成立的。

1.1 主频 f_{x_0} 、 f_{y_0} 的确定和移频

经被测物体调制后的灰度分布可表示为:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos [2\pi(f_{x_0}x + f_{y_0}y) + \phi(x, y)] \quad (1)$$

经频域移频处理后得到

$$c(x, y) = [b(x, y)/2] \exp [i\phi(x, y)] \quad (2)$$

由于要在频域内作频移, 就必须找准主频点。否则, 解出的相值就不准确。其影响可由下式给出。由傅里叶变换的频移特性^[3, 4]

$$F(w - w_0) \Leftrightarrow f(t) \exp(iw_0 t) \quad (3)$$

如果在寻找主频点时存在偏差 w_0 , 则得到的相位值为

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + w_0(x, y) \quad (4)$$

其中 $w_0(x, y)$ 是关于 x, y 的线性函数, $\phi(x, y)$ 和 $\Phi(x, y)$ 分别为真实相位值和所求得的相位值。从(3)式可见, 所求的相位值是在真实的相位值上附加了一个线性成分。主频点的确定一般是选取有用频带内的能量最高点或以左右截止频率为端点的左右面积相等的点。假设参考面上栅线图像的主频点是 p_0 , 经过物体高度的调制其频率必发生变化。设畸变栅线的图像的主频点是 $p_0 + \Delta p$, 这两幅图像分别按上述过程求得相位值后相减, 可得相位差为

$$\Delta\Phi(x, y) = \Delta\phi(x, y) + \Delta p(x, y) \quad (5)$$

可见, 所求得的相位差包含了系统误差。而且在某些情况下, 判断主频点的偏差是无法避免的。这是由于采用的是离散的数字信号处理方法, 选取的主频点必然是整数点。当主频点是一个小数时, 偏差就无可避免地发生了。图 1 是栅线节距为 6 个像素点、每行 512 个像素点、相值为零的构造栅线的图像。图 2 是它的二维能谱, 中心亮点是背景光强的能量, 左右对称的亮点就是一次谐波的能量。根据理论推算它的主频点应该位于 85.33 处, 但是实际解相时主频点只能取 85 或 86, 相应的相值分别如图 3、图 4 所示。

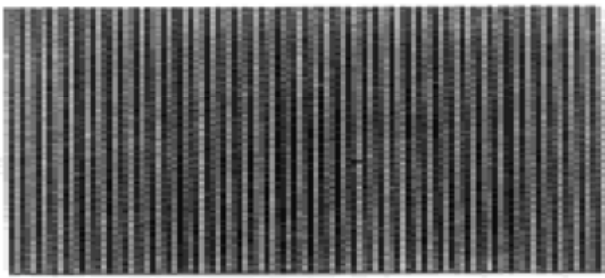


Fig. 1 The map of constructed image with grating (512×512 pixels)

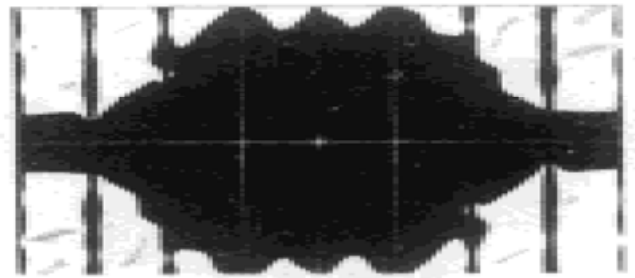


Fig. 2 The map of two-dimension power spectrum

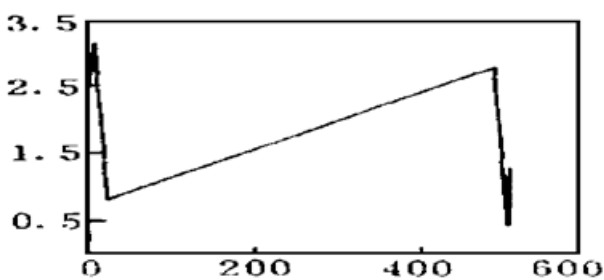


Fig. 3 The phase value (choose 85 as main frequency)

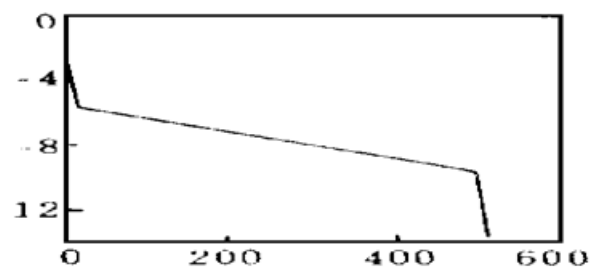


Fig. 4 The phase value (choose 86 as main frequency)

当选取主频为 85 进行移频时, 相当于移动到 0.33 处, 得到的相值就成了斜率为正的直线。相反当选取主频为 86 进行移频时, 相当于移动到 -0.66 处, 得到的相值就成了斜率为负的直线。经过以上的分析可以得出以下的结论: 主频点的偏移必然带来系统误差, 但是由于傅里叶变换是一种线性变换, 因此系统误差也是线性的。根据这一特性本文提出一种新方法, 即绕过频移, 在频域进行窗口滤波之后不进行频移而是直接进行傅里叶反变换, 则得到一个不同于 $C(x, y)$ 的新向量。对应于参考面上的图像

$$q_0(x, y) = c_0(x, y) \exp[2\pi i(f_{x_0}x + f_{y_0}y)] = \{b_0(x, y) \exp[2\pi i(f_{x_0}x + f_{y_0}y) + i\phi_0(x, y)]\} / 2 \quad (6)$$

相应地对畸变栅线的图像进行同样处理, 可得

$$q(x, y) = c(x, y) \exp [2\pi i(f_{x_0}x + f_{y_0}y)] = \{b(x, y) \exp [2\pi i(f_{x_0}x + f_{y_0}y) + i\phi(x, y)]\} / 2 \quad (7)$$

对(6)式和(7)式作点积运算得

$$Q(x, y) = q(x, y)q_0(x, y) = (1/2)b(x, y)b_0(x, y) \exp [i\Delta\phi(x, y)] \quad (8)$$

则有

$$\phi(x, y) = \arctan^{-1}\{\text{Im}[Q(x, y)]/\text{Re}[Q(x, y)]\} \quad (9)$$

1.2 参考面的对应

从检测系统的原理及高度公式的推导来看, 图像中物体每一点的高度是与该点的相位差一一对应的。而相位差是畸变栅线的图像与参考面栅线的图像的对应点的相位差。可见, 在两幅图像间建立严格的对应关系十分必要。否则, 高度转换公式就失去了其存在的理由。

过去普遍的做法是选取图像中垂直于栅线方向不经过被测物体的一个截面上的灰度来代替整个面上的灰度分布。也就是说参考面的信息也来自于畸变栅线的图像, 只是选取其未发生畸变的部分, 即通常所说的整个处理过程只需要一幅图像。其依据是在满足检测系统要求的前提下, 可以通过调整摄像机的角度获得与栅线完全垂直的图像。在实际应用中, 这样苛刻的条件是难以满足的, 而且调整起来十分繁琐。实际上栅线经常会偏斜, 而且投影用的栅板经常有断线、污点等缺陷, 这样如仍旧用一个截面上的灰度来代替整个面上的灰度分布是不妥当的, 必然会造成较大的误差。甚至有时整个视野被测物体充满或者难于找到用于构成参考面的截面, 上述方法就无法实施。

根据以上的分析, 本文提出全场参考面的概念。即在拍摄畸变栅线的图像前先拍一幅整个参考面的图像。在计算相位值时参考面图像上的点与畸变栅线图像的点一一对应。

2 实例应用

图 5 和图 6 是新旧两种解相方法结果的对比。显然, 用归解相法得到的图 6 发生了畸变, 因此主频点的漂移是必须要解决的问题; 新方法绕过了寻找主频点和频移而取得较好的效果(如图 5 所示)。当然, 也可以在处理相对应的两幅图像时用相同的主频点进行频移, 这样由于频移对相位值影响的线性特性, 在求解相位差时也可以消除主频偏差的影响。但是, 它与本文所提出的方法相比, 不如本文的方法简洁、直接。



Fig. 5 The map of wrapped phase value by avoid frequency-moving method



Fig. 6 The map of wrapped phase value by frequency-moving method

图 8 和图 9 给出了在栅线发生倾斜时, 两种不同参考面的解相结果对比。显然, 图 8 发生了明显的错位, 而图 9 则在克服实际应用中的具体问题方面有较好的表现。虽然系统解相

需要两幅图像,但是全场参考面图像可以作为系统标定的一部分。只要系统不发生变化,就不必每次检测都拍摄它,并不增加系统的复杂程度。



Fig. 7 Original image with slant grating



Fig. 8 The map of wrapped phase value using one image



Fig. 9 The map of wrapped phase value using full-field reference plane

结 论 本文根据投影栅相位法三维检测实际应用中所遇到的问题,即频域处理的移频问题和被测物体与参考面的对应关系问题。从理论上分析了它们对解相精度的影响,分析了现行方法的不足并提出了相应的解决方法,也给出了对比的实例检测结果。结果证明所提出的不移频和全场参考面方法很好地解决了在实际应用投影栅相位法进行检测时的具体问题。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda, H. Ina, S. Kpbayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and the interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~ 160
- [2] M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic easurement of 3D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(4): 3977~ 3982
- [3] 陶德元, 黄本淑. 数字信号处理原理及应用. 成都: 四川大学出版社, 1991. 7~ 75
- [4] 张颜仲, 沈乃汉. 快速傅里叶变换及沃尔什变换. 北京: 航空工业出版社, 1989. 8~ 10

Study on Accurate Phase-Demodulating of Phase-Approaching of Projected Grating Used in 3D Detection

You Zhifu Zhong Yuexian Yuan Chaolong Xu Qinghong Cao Qixiang
(Mechanical Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 4 October 1997; revised 22 January 1998)

Abstract The problems are analysed in practical 3D detection by phase approaching of projected grating that frequency-moving in frequency domain and the correspondence between measured surface and reference plane have great effect on the accuracy of phase-demodulating. An appropriate method for avoiding frequency-moving and a new concept of full-field reference plane are proposed. Their perfect perfomance has been verified.

Key words phase, main frequency, frequency-moving, reference plane.