

文章编号: 0253-2239(2005)06-767-5

# 基于复合光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术\*

岳慧敏<sup>1</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 李泽仁<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系, 成都 610064  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 在实际傅里叶变换轮廓术测量中, 获取条纹图的零频分量对傅里叶变换轮廓术的测量精度和测量范围有很大影响, 甚至妨碍三维面形的正确重建。 $\pi$  相移技术常被用来消除零频分量对傅里叶变换轮廓术测量的影响, 但它需要采集两帧具有  $\pi$  相位差的条纹图, 这影响了傅里叶变换轮廓术测量方法的实时性。提出采用复合光栅投影来实现从一帧条纹图中消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响, 该复合光栅是由两个不同频率的载频分别调制与其方向垂直的两帧具有  $\pi$  相位差的条纹并叠加形成的。实验表明, 同传统的  $\pi$  相移方法相比, 提出的新方法没有明显降低  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术的测量精度, 因此能真正实现实时高速测量。

**关键词:** 图像处理; 复合傅里叶变换轮廓术; 复合光栅;  $\pi$  相移

中图分类号: O432.2; TN206 文献标识码: A

## Improved Fast Fourier Transform Profilometry Based on Composite Grating

Yue Huimin<sup>1</sup> Su Xianyu<sup>1</sup> Li Zeren<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu 610064  
<sup>2</sup> Institute of Fluid Physics, The China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

**Abstract:** In Fourier transform profilometry (FTP), zero frequency of the captured patterns influences the measuring range and measuring precision, and even makes the reconstruction of three-dimensional surface incorrect.  $\pi$  phase shifting technique is usually used to eliminate the zero component. But this method needs capturing two fringe patterns with  $\pi$  phase difference, which influences the real-time application of the method. Now a novel method is proposed, in which a composite pattern is projected. The composite pattern is formed by modulating two separate fringe patterns with  $\pi$  phase difference along the orthogonal direction of the two distinct carrier frequencies. The method can eliminate zero frequency by using only one fringe pattern. The experiments show that there is no distinct decrease in the precision of the novel method compared with the traditional  $\pi$  phase shifting technique. So, the novel method can allow for real-time and high-speed implementation.

**Key words:** image processing; composite Fourier transform profilometry; composite grating;  $\pi$  phase shifting technique

## 1 引 言

基于条纹投影的傅里叶变换轮廓术(FTP)具有单帧获取、全场分析和高分辨率等优点, 因此自 Takeda 等<sup>[1]</sup>提出此测量方法以来, 受到人们的广泛关注。人们对如何提高其测量范围和测量精度的问题进行了深入研究<sup>[2~7]</sup>。傅里叶变换轮廓术通过从

频域中滤出包含被测物体高度信息的基频分量, 并进行逆傅里叶变换, 来获得被测物体的高度分布, 因此频谱混叠对测量的影响不可忽视。采用正弦投影和  $\pi$  相移技术可以消除零频和高次谐波对傅里叶变换轮廓术测量的影响, 大大提高测量精度和测量范围<sup>[3,5]</sup>。但是它需要采集两帧具有  $\pi$  相位差的条纹

\* 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金(10376018)资助课题。

作者简介: 岳慧敏(1979~), 女, 河南鹤壁市淇县人, 四川大学博士研究生, 主要从事三维传感方面的研究。

E-mail: yuehuiminer@yahoo.com.cn

收稿日期: 2004-09-07; 收到修改稿日期: 2004-11-01

图,这影响了傅里叶变换轮廓术测量方法的实时性。

最近文献[8]报道了一种新的只需要一帧图像就可以恢复物体三维面形的相位测量轮廓术,称之为复合相位测量轮廓术,该方法只需要投影一帧复合光栅就可以测量物体的面形。本文将文献[8]的思想应用到傅里叶变换轮廓术测量中,提出在傅里叶变换轮廓术测量中投影一帧复合光栅图像到被测物体表面来测量物体的面形,该复合光栅是由两个不同频率的载频分别调制与其方向垂直的两帧具有 $\pi$ 相位差的条纹并叠加形成的,利用它可完成从一帧条纹图中消除零频对包含有用信息的基频的影响,本文将该方法称之为复合傅里叶变换轮廓术(CFTP)。与传统的采用 $\pi$ 相移技术的傅里叶变换轮廓术测量方法相比较,本文提出的方法只需要采集一帧条纹图就可以非常好地消除零频分量。该技术的应用使傅里叶变换轮廓术能真正实现动态和瞬态测量,因而更具有实用意义。

## 2 $\pi$ 相移傅里叶变换轮廓术基本原理

$\pi$ 相移傅里叶变换轮廓术方法中投影的正弦光栅为:

$$I_n^p(x^p, y^p) = A^p + B^p \cos(2\pi f_n y^p - \pi n), \quad (1)$$

$A^p$  和  $B^p$  为投影常数,  $(x^p, y^p)$  为投影坐标,  $y^p$  为相位变化方向,称为相位方向,  $x^p$  方向为垂直于相位方向,称为垂直方向,  $n$  为相移因子,  $n = 0, 1$ 。光栅投

影后,物体表面的光强为

$$I_n(x, y) = R(x, y) \times$$

$$[A + B \cos(2\pi f_n y^p + \phi(x, y) - \pi n)], \quad (2)$$

$(x, y)$  为像素坐标,  $R(x, y)$  为反射率,  $A$  为背景强度,  $B/A$  代表条纹对比度,  $f_n$  为投影光栅的基频。当(2)式中的第一项  $R(x, y)A$  通过  $\pi$  相移技术消除后,对条纹进行傅里叶变换得到其频谱分布,通过从频域中滤出基频分量并进行逆傅里叶变换,可以计算出相位分布,表示为  $2\pi f_n y^p + \phi(x, y)$ , 去除载频分量  $2\pi f_n y^p$ , 即得到由被测物体高度变化引起的相位。利用相位与高度之间的映射关系可计算出物体的三维面形。

## 3 复合傅里叶变换轮廓术测量方法

让每一个  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术光栅的垂直方向被不同频率的载频调制,然后将它们叠加,就得到一帧复合光栅(见图1)。被调制的条纹为

$$I_n^p = C + \cos(2\pi f_n y^p - \pi n), \quad (3)$$

这里  $C$  要选择合适的值以使得  $I_n^p$  为非负值。余弦载频调制后,得到的复合光栅为

$$I^p = A^p + B^p \sum_{n=1}^N I_n^p \cos(2\pi f_n^p x^p), \quad (4)$$

这里,  $f_n^p$  为垂直方向的载频,  $n$  仍为相移因子,取值为  $0, 1$ 。投影常数  $A^p$  与  $B$  的选择如下<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} A^p = I_{\min} - B^p \min \left[ \sum_{n=1}^N I_n^p \cos(2\pi f_n^p x^p) \right], \\ B^p = (I_{\max} - I_{\min}) / \left\{ \max \left[ \sum_{n=1}^N I_n^p \cos(2\pi f_n^p x^p) \right] - \min \left[ \sum_{n=1}^N I_n^p \cos(2\pi f_n^p x^p) \right] \right\}, \end{cases} \quad (5)$$

这样可使得投影复合光栅的强度范围为  $[I_{\min}, I_{\max}]$ ,  $[I_{\min}, I_{\max}]$  和投影仪的强度范围是一致的。物体上的光强分布为

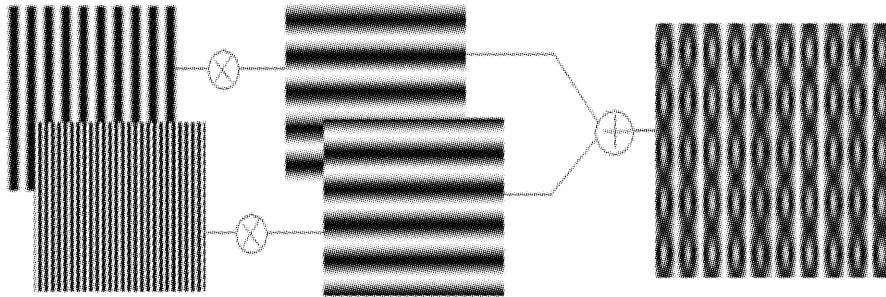


图1 沿垂直方向调制传统 $\pi$ 相移傅里叶变换轮廓术光栅的复合光栅图(为清晰表示复合光栅原理,被调制的条纹以5个条纹为例)

Fig. 1 A composite pattern formed by modulating traditional  $\pi$  shifting FTP patterns along the orthogonal direction (for explicit show, fringe number of the modulated FTP pattern is five)

$$\begin{cases} I_{CP}(x, y) = R(x, y) \left[ A + B \sum_{n=1}^N I'_n(x, y) \cos(2\pi f_n x) \right], \\ I'_n(x, y) = C + \cos(2\pi f_n y^p + \phi(x, y) - \pi n). \end{cases} \quad (6)$$

为使载频  $f_n$  不受物体面形调制, 必须仔细调整像机和投影仪的位置, 使得它们在垂直方向具有相同的世界坐标。选择合适的载频频率  $f_n$  非常重要,  $f_n$  的选择和投影仪及相机的分辨率有关。若载频  $f_1$  和  $f_2$  的值太小, 会导致载频频谱与零频频谱之间的混叠; 若载频  $f_1$  和  $f_2$  的值相隔很小, 会导致两载频的频谱之间的混叠; 但这两个载频若选择太大, 受投影仪和相机分辨率的限制, 会产生条纹欠抽样的情况; 这些都会导致相移条纹的解调不正确。因此  $f_n$  选择的原则是, 在满足抽样定理的前提下, 为

减少载频频谱的混叠,  $f_1$  和  $f_2$  应尽量分得比较开, 并且都远离零频。

复合傅里叶变换轮廓术相位的解调过程可用图 2 表示。首先对获取到的图像进行二维傅里叶变换, 然后分别对两个载频频谱进行二维带通滤波, 滤波器的中心点为两个频谱峰的极大值点, 截止频率为相邻两峰之间的中间点。滤波以后, 分别对滤出的频谱进行逆傅里叶变换, 并取其模, 就得到了两帧具有  $\pi$  相位差的条纹图。

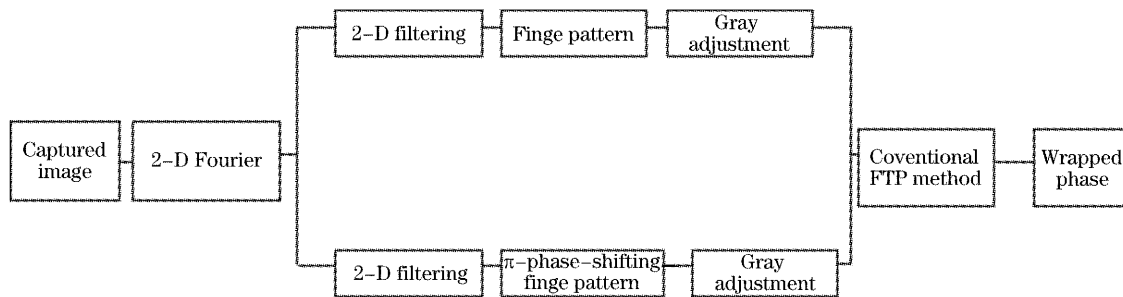


图 2 相位解调流程图

Fig. 2 Block diagram of the phase decoding process

在实验中, 两个载频频谱的强度峰值不相同, 这导致解调出来的两帧具有  $\pi$  相位差的条纹的强度也不同。因此要想得到正确截断相位, 必须对两帧具有  $\pi$  相位差的条纹的强度进行灰度校准。灰度校准包括平均值校准和对比度校准两个步骤<sup>[9,10]</sup>。当整幅图上的背景光强都均匀时, 通过以上的灰度校准便得到了两组具有相同背景和对比的  $\pi$  相位差条纹。条纹校准后, 就可以利用通常的  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术方法的相位获取过程来得到相位。由此可见, 通过投影一帧复合光栅图, 就可以实现  $\pi$  相移消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响。

## 4 实 验

投影仪采用的是数字微反射镜器件(DMD)的数字光投影机(DLP), 型号为 PLUS U3-880, 分辨率为  $800 \times 600$ 。像机采用的是 Canon A80, 该款数码相机手动功能较强, 曝光时间、光圈大小、感光度、焦距、像素均可调。实验采用了两台计算机, 其中一台连接数字光投影机用来投出光栅, 另外一台连接相机, 并控制相机拍摄物体上的图像。投影的复合

傅里叶变换轮廓术的两个载频的频率  $f_1$  和  $f_2$  分别为  $3/40$  line/pixel、 $6/40$  line/pixel。相位方向的条纹频率为  $600/32$  line/pixel。为了更清楚的说明该方法的有效性, 在同样的实验条件下还采用传统的  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术方法进行了测量, 条纹的频率为  $600/32$  line/pixel。

在同样的测量装置上分别采用傅里叶变换轮廓术方法和复合傅里叶变换轮廓术方法对锥形物体进

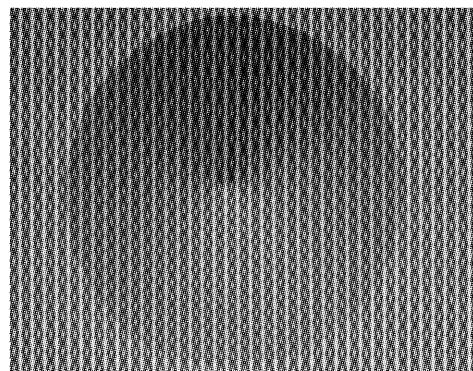


图 3 实验中获取的复合光栅条纹图

Fig. 3 The composite patterns attained from experiments

行了测量。实验中相机获取的复合光栅条纹图和通过滤波提取到的两帧具有  $\pi$  相位差的条纹图分别如图 3 和图 4 所示。采用复合傅里叶变换轮廓术方法,解调得到的两帧具有  $\pi$  相位差的条纹经灰度校准并

相减后的频谱分布见图 5。由图可见,零频分量已被消除,因此采用本文所提出的方法,利用采集的一帧复合光栅图实现了  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术。

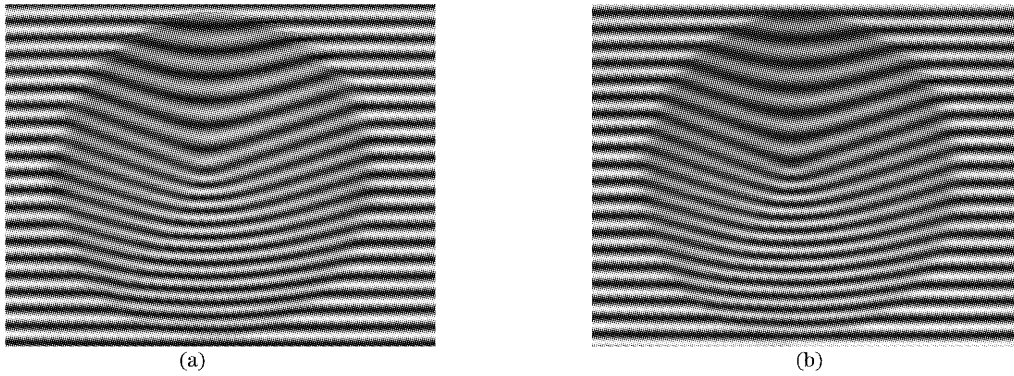


图 4 实验中通过滤波提取的两帧具有  $\pi$  相位差的条纹图

Fig. 4 The two fringe patterns with  $\pi$  phase difference attained by filtering in experiment

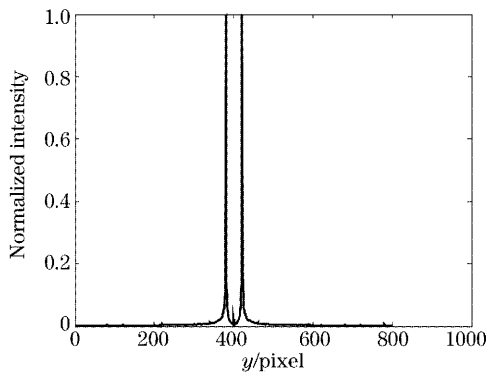


图 5 解调得到的条纹经灰度校准并相减后的频谱分布  
Fig. 5 Spectrum of extracted fringes after gray revision and eliminated the zero component

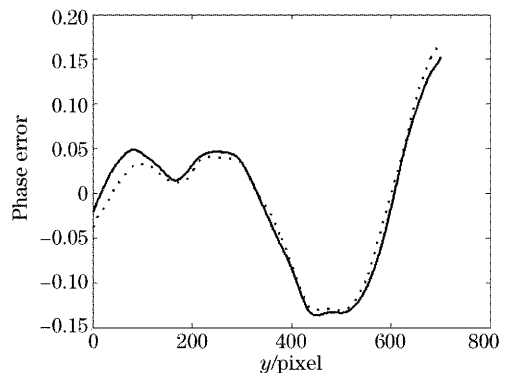


图 6 参考平面某一列的相位误差图,实心线为傅里叶变换轮廓术,点线为复合傅里叶变换轮廓术

Fig. 6 The phase error of one of rows of the reference, the solid line denotes FTP, the dotted line denotes CFTP  
别为 0.0884 与 0.0811。因此,就参考平面的绝对误差和标准偏差而言,这两种方法很接近。对锥面物体测量的相位图的三维网格图及中间一列的剖面见

同时,分别采用傅里叶变换轮廓术和复合傅里叶变换轮廓术对参考平面进行了测量。平面的测量值与最小二乘拟合值相减得到测量误差。其中某一列的测量误差见图 6,该列测量误差的标准偏差分

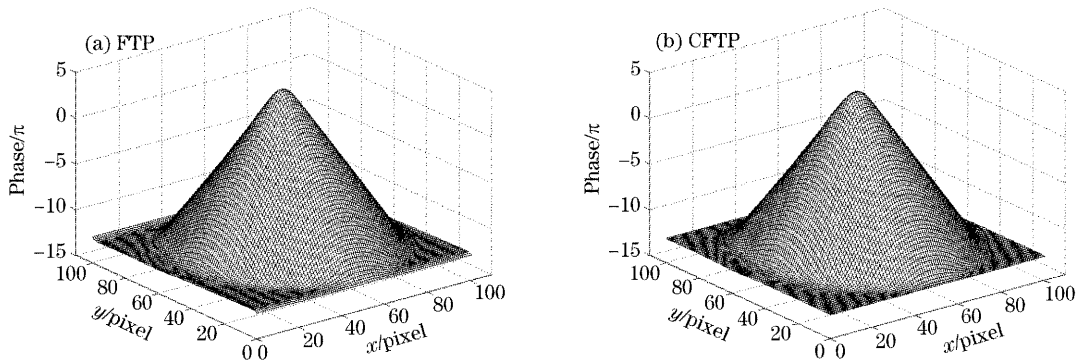


图 7 对圆锥物体测量的三维相位图。(a)傅里叶变换轮廓术,(b)复合傅里叶变换轮廓术

Fig. 7 The measured three-dimensional phase of a conic object. (a) FTP, (b) CFTP

图 7 和图 8。实验结果表明,复合傅里叶变换轮廓术方法的测量精度并没有因为载频的应用而明显降低。

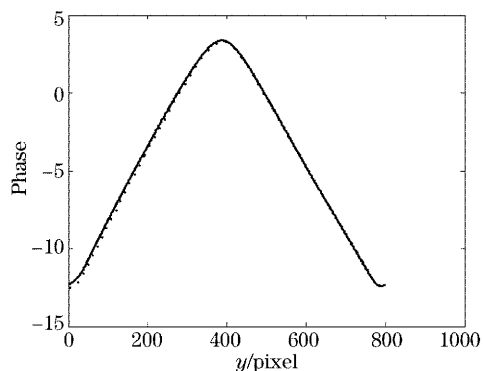


图 8 图 7 的剖面图,实心线为傅里叶变换轮廓术,点线为复合傅里叶变换轮廓术

Fig. 8 Sections of Fig. 7, the solid line denotes FTP, the dotted line denotes CFTP

## 5 结 论

采用复合光栅投影来实现从一帧条纹图中消除零频对傅里叶变换轮廓术测量的影响。对该方法进行了理论分析和实验研究,并将之与传统的  $\pi$  相移傅里叶变换轮廓术方法相比较,结果表明,复合傅里叶变换轮廓术方法的测量精度并没有因为载频的应用而明显降低。但它同传统的  $\pi$  相移方法相比有一个很大的优点,即它只需要一帧复合光栅图就可以恢复物体的三维面形,这使傅里叶变换轮廓术真正实现实时高速测量。

## 参 考 文 献

- 1 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 2 Wenjing Chen, Hu Yang, Xianyu Su *et al.*. Error caused by sampling in Fourier transform profilometry [J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(6): 1029~1034
- 3 Jian Li, Xianyu Su, Lurong Guo. Improved Fourier transform profilometry of the automatic measurement of three-dimensional object shapes [J]. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(12): 1439~1444
- 4 Yang Hu, Chen Wenjing, Lu Chengqiang *et al.*. Influence of sampling on Fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 929~934 (in Chinese)  
杨 虎,陈文静,陆成强等. 抽样对傅里叶变换轮廓术的影响 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(7): 929~934
- 5 Su Xianyu, Tan Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233 (in Chinese)  
苏显渝,谭松新,向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术的复杂物体三维面形测量 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- 6 Chen Wenjing, Su Xianyu. A new method for improving measuring accuracy of Fourier transform profilometry [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(1): 19~23 (in Chinese)  
陈文静,苏显渝. 提高 Fourier 变换轮廓术测量精度的新方法 [J]. *光电工程*, 2002, **29**(1): 19~23
- 7 Fu Shuang, Wang Yunshan, Han Guangbing *et al.*. Fourier transform profilometry in 3-D measurement based on wavelet digital Filter [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(2): 205~207 (in Chinese)  
傅 爽,王蕴珊,韩广兵等. 基于小波数字滤波的傅里叶变换轮廓法 [J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(2): 205~207
- 8 C. Guan, L. G. Hassebrook, D. L. Lau. Composite structured light pattern for three-dimensional video [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(5): 406~417
- 9 Wan-Song Li, Xian-Yu Su. Application of improved phase-measuring profilometry in nonconstant environmental light [J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(3): 478~485
- 10 Chen Wenjing, Su Xianyu, Cao Yiping *et al.*. Improved FTP based on Bi-color fringe projection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1153~1157 (in Chinese)  
陈文静,苏显渝,曹益平等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1153~1157