

文章编号: 0253-2239(2009)11-3078-04

从变形光栅条纹提取基准光栅信息

杨初平 翁嘉文 赵 静 杨 意

(华南农业大学物理系, 广东 广州 510642)

摘要 基于傅里叶变换轮廓术, 提出一种直接从变形光栅条纹中提取基准光栅条纹信息并重建基准光栅的测量方法。分析了基准光栅条纹和参考平面的功能, 揭示变形光栅条纹和基准光栅条纹的关系; 应用窗口傅里叶变换对变形光栅条纹中的各个微小区域进行频谱分析, 从中识别并提取基准光栅的频率和相位信息; 重构出一幅完整的基准光栅条纹, 实现三维物体形貌测量。实验结果表明该方法是可行的, 为三维形貌测量提供一种新手段。

关键词 信息光学; 基准光栅重建; 窗口傅里叶变换; 傅里叶变换轮廓术

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3078

Extract Original Grating Information from Deformed Grating Pattern

Yang Chuping Weng Jiawen Zhao Jing Yang Yi

(Department of Physics, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract Based on fourier transform profilometry(FTP), a new method is proposed for extracting the fundamental frequency information of the original grating pattern from its deformed grating pattern and reconstructing the original grating pattern. Firstly, the functions of original grating pattern and reference plane are described, and the relation between original grating pattern and its deformed grating pattern is revealed. Then the spectrum distribution of the deformed grating pattern is analyzed by use of 1-D dilating Gabor transform, and the fundamental frequency information is distinguished and extracted from the spectrum. Finally, a full original grating pattern is reconstructed to realize 3-D shape measurement. Experimental results show the validity of the above method.

Key words information optics; original grating pattern reconstruction; dilating Gabor transform; Fourier transform profilometry(FTP)

1 引 言

三维轮廓测量技术一直受到人们的重视, 为提高测量速度, 相继提出相位测量轮廓术(Phase measurement profilometry)^[1]和傅里叶变换轮廓术(Fourier transform profilometry, FTP)^[2], FTP作为一种无接触、动态的三维面形测量方法, 在理论研究^[3,4]、调制相位信息提取^[5~13]和动态瞬时测量应用^[14]等方面一直受到关注。FTP 为了实现三维面形测量, 通常需要采集参考平面上的基准光栅条纹和受测量物体调制后的变形光栅条纹。为了提高测量速度, 文献[15]提出过在变形光栅图像中留出一定区域记录参考平面上的基准光栅信息, 从而实现在一幅图像中同时记录两种条纹信息的目的。

本文研究直接从变形光栅条纹信息中提取基准光栅信息实现三维形貌测量的可能性和方法。首先, 参考平面和它上面的基准光栅条纹是用来计算待测物体面形的调制相位分布和高度分布的; 实际上, 参考平面的位置是可以沿着摄像机光轴平移到任何一个位置, 即参考平面的位置是可以改变的; 当然, 这时高度与相位换算公式中的调制相位量及参考平面到摄像机光瞳中心的距离也相应地改变, 但不影响物体面形测量。其次, 从理论上任何一个有凹面和凸面的待测面形可以分解为由一系列处于不同高度、具有不同面积、平行于参考平面的小平面组成的, 对 these 小平面的而言, 光栅投射到它们上面后, 光栅条纹的频率与参考平面上基准光栅的频率是一

收稿日期: 2008-12-24; 收到修改稿日期: 2009-01-28

基金项目: 广东省自然科学基金(9151064201000035)和华南农业大学校长基金(4900-k07281)资助项目。

作者简介: 杨初平(1970—), 男, 副教授, 主要从事光学信息处理方面的研究。E-mail: yangchp@scau.edu.cn

样的,只是对于不同高度的小平面,产生与高度对应的相位移动,而采集到变形光栅条纹实际上是这一系列具有不同相位移动的条纹的集合。采用伸缩傅里叶变换对变形光栅条纹中的一个微小区域进行频谱分析,提取基准光栅的基准频率信息,重构出一幅完整的基准光栅条纹,从而实现用一幅光栅图像就可以实现物体三维形貌测量。

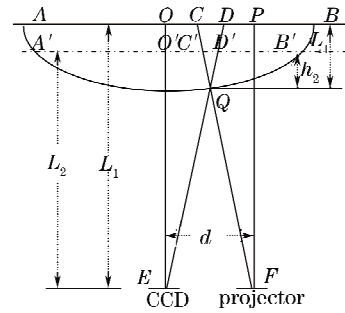


图 1 测量光路图

Fig. 1 Optical path of measurement

2 傅里叶变换轮廓术

测量系统的光路结构采用光轴平行型^[2],图 1 中 FP 和 EO 分别是投影系统和成像系统的光轴,分别与参考平面 AOB 垂直。光栅由投影系统投影在

待测物体表面。以纵向光栅(光栅线垂直 x 轴方向)为例。成像系统采集的变形光栅条纹和参考平面上基准光栅条纹分别表示为

$$g_d(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(x, y) \exp\{j[2\pi n f_0 x + \varphi_n(x, y)]\}, \quad (1)$$

$$g_r(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n(x, y) \exp\{j[2\pi n f_0 x + \varphi_{0n}(x, y)]\}, \quad (2)$$

式中 f_0 是基准光栅条纹的基频, A_n 是 n 次谐波的振幅, $r(x, y)$ 是待测物体表面的非均匀反射率, $\varphi_n(x, y)$, $\varphi_{0n}(x, y)$ 分别是变形光栅条纹和基准光栅条纹的相位。分别对(1)式、(2)式中每行光栅图像进行傅里叶变换得到其频谱,通过滤波在频谱提取含有物体高度信息的基频分量,傅里叶逆变换回到空域,分别得到变形光栅和基准光栅的基频信息:

$$g_{d1}(x, y) = r(x, y) A_1(x, y) \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi_1(x, y)]\}, \quad (3)$$

$$g_{r1}(x, y) = A_1(x, y) \exp\{j[2\pi f_0 x + \varphi_{01}(x, y)]\}. \quad (4)$$

联立(3)式、(4)式,得

$$\lg[g_{r1}^*(x, y) g_{d1}(x, y)] = \lg[|A_1(x, y)|^2 r(x, y)] + j[\varphi_1(x, y) - \varphi_{01}(x, y)], \quad (5)$$

(5)式中虚部正是物体表面不同高度所引起的调制相位 $\Delta_1\varphi(x, y; L_1)$

$$\Delta_1\varphi(x, y; L_1) = \varphi_1(x, y) - \varphi_{01}(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD}.$$

考虑图 1 中 $\triangle QCD$ 和 $\triangle QEF$ 的相似关系

$$\overline{CD} = -h_1(x, y; L_1) d / [L_1 - h_1(x, y; L_1)], \quad (6)$$

得到各点调制相位和高度的变换关系为

$$h_1(x, y; L_1) = L_1 \Delta_1\varphi(x, y; L_1) / [\Delta_1\varphi(x, y; L_1) - 2\pi f_0 d]. \quad (7)$$

3 在变形光栅条纹提取基准光栅信息

3.1 参考平面和基准光栅的功能

在三维面形测量中,参考平面和基准光栅相当于位置测量中的坐标系。参考平面 AOB 上的基准光栅条纹用来计算变形光栅条纹调制相位量,而它在参考平面与摄像机光瞳中心的垂直距离 L_1 则用来计算待测面形的高度分布 h_1 。实际上参考平面的位置是可以变化的,它可以沿摄像机光轴方向平移到任意一个位置在图 1 中,若参考平面平移到 $A'O'B'$,则(7)式将改变为

$$h_2(x, y; L_2) = \frac{L_2 \Delta_2\varphi(x, y; L_2)}{[\Delta_2\varphi(x, y; L_2) - 2\pi f_0 d]}. \quad (8)$$

参考平面位置的改变只是导致参数 $L_1, \Delta_1\varphi$ 和 h_1 分别改变为 $L_2, \Delta_2\varphi$ 和 h_2 ,对物体面形不产生影响, h_1 相对 h_2 产生一个整体平移 $\delta h \approx -L_1 \delta\varphi / 2\pi f_0 d$,其中 $L_1 \gg h_1, \delta\varphi$ 表示平面 $A'O'B'$ 相对于 AOB 的调制相位。

3.2 伸缩傅里叶变换从变形光栅中提取基准光栅信息

理论上任何一个三维连续面形可以分解为由一

系列处于不同高度、具有不同面积、平行于参考平面的小平面组成的集合;对于这些小平面的而言,投射到它们上面的光栅条纹形状与参考平面的条纹形状一样,但产生与小平面高度对应的条纹移动即相位移动;通过成像系统采集的变形光栅条纹实际上是这一系列具有不同相位移动的条纹的集合。在变形光栅条纹中选择一个微小一维区域进行频谱分析,就可以提取里面所包含的、位于微小区域所对应高度的小平面上的基准光栅条纹的基频信息,从而重构出位于这个平面上的一幅完整的基准光栅条纹,并以该平面为新参考平面实现物体三维形貌测量。

伸缩窗口傅里叶变换可以根据条纹的分布特点对变形光栅条纹的某个局部进行频谱分析^[7],提取基准频率信息。一维函数 $f(x)$ 的伸缩窗口傅里叶变换的定义为

$$(g_a^b F)(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g_a^b(x) \exp(-j\omega x) dx, \quad (9)$$

$$g_a^b(x) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \exp[-(x-b)^2/(2a^2)],$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_a^b(x) dx = 1, \quad (10)$$

(10)式是伸缩高斯窗口,其中 a 是变化的,确定窗口的大小和形状; b 是窗口中心平移因子,随着 b 的变化窗口的位置相应变化。 $f(x)$ 、 $g_a^b(x)$ 的频谱分别为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j\omega x) dx, \quad (11)$$

$$G_a^b(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_a^b(x) \exp(-j\omega x) dx, \quad (12)$$

根据傅里叶变换性质, $(g_a^b F)(\omega)$ 和 $F(\omega)$ 、 $G_a^b(\omega)$ 的关系为

$$(g_a^b F)(\omega) = F(\omega) \otimes G_a^b(\omega). \quad (13)$$

用窗口函数提取得到的变形光栅频谱 $(g_a^b F)(\omega)$ 是窗口里面变形条纹的实际频谱 $F(\omega)$ 与窗口函数自身频谱 $G_a^b(\omega)$ 的卷积,卷积的结果只是把窗口里面变形条纹的实际频谱平滑化,但不改变窗口里面变形条纹实际频谱中基频的峰值位置,这个基频就是基准光栅的频率。提取这个基频信息,傅里叶逆变换就可以获取基准光栅条纹,但它是位于以该窗口内局部对应的物体面形上实际小面积所在平面为参考平面上的。接着就可以对变形光栅各点的调制相位量进行计算。

为了准确地识别和提取基准光栅的基频,在对

每行变形光栅条纹进行窗口傅里叶变换后,先找出局域基频相等的那些像素点,把相邻的点放在一起,分成几组,只有这些点的局域基频,才有可能等于基准光栅的基频,因为这些点要么位于一个平行参考平面的小平面上,要么位于一个小斜面上。然后检测每组几个点的初始相位,如果不仅局域基频相同,而且初始相位也不变,说明该区域所在的小面积是平行于参考平面,这个组的局域基频就是基准光栅的基频。否则,该区域是一个斜面(尽管斜面上相邻点的局域基频是一样,但采用它们的基频信息重构出来的基准光栅条纹的初始相位值是不同的,因为相邻点具有高度差,必定产生相位差。这是区别斜面和平面的特征)。

4 实 验

采用平行光轴几何光学系统, $L_1 = 230$ cm, $d = 24$ cm, $h < 25$ cm。用计算机产生一个空间周期为 4 个像素正弦电子光栅,通过数字投影仪(DLP)投射到待测物体上。图 2 表示获得的变形光栅条纹,尺寸是 640 pixel \times 480 pixel。

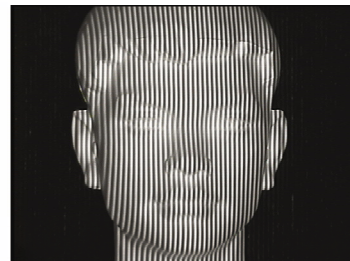


图 2 变形光栅条纹

Fig. 2 Deformed grating pattern

通过移动窗口中心位置,在变形光栅图像中心像素位置(320,240)(该位置处于鼻梁顶部)采用高斯窗口函数分析,提取该位置附近的小区域中的基准频率为 73/640 及相位,结合傅里叶逆变换,产生一幅位于新参考平面上的基准光栅条纹。为了比较,也记录了位于原来参考平面上的基准光栅图像,利用相同的高斯窗口傅里叶变换对基准光栅条纹进行分析,获得的基准频率为 73/640。

图 3(a)表示利用原来参考平面上的基准光栅条纹获得的待测物体展开相位图,图 3(b)表示采用从变形光栅中提取的基准光栅条纹信息获取待测物体展开相位图。两个相位图比较,产生一个整体平移,这是因为新参考平面相对于原来参考平面沿摄像机光轴平移的结果。

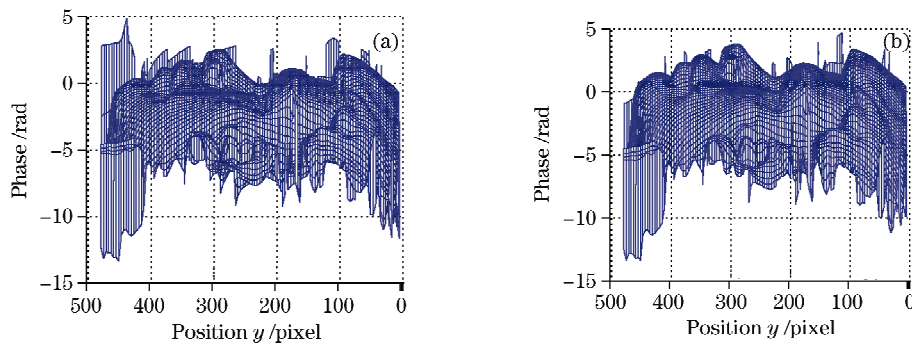


图3 展开相位。(a)用原始基准光栅;(b)用重建基准光栅

Fig. 3 Unwrapped phase (a) By original grating; (b) by reconstructed grating

5 结 论

本文采用伸缩窗口傅里叶变换,考虑到变形光栅条纹与基准光栅条纹的关系,直接从变形光栅条纹中识别,提取基频信息并重建基准光栅,实现基于用一幅变形光栅条纹的三维形貌测量技术。实验结果表明这种方法是可行的,即记录基准光栅条纹是不必要的,为三维形貌的测量提供了一种新手段。

参 考 文 献

- Zheng Ruihua, Wang Yuxiao, Zhang Xueru *et al.*. Two-dimensional phase-measuring profilometry [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(6): 954~958
- Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved fourier transform profilometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 97~102
毛先富,陈文静,苏显渝. 傅里叶变换轮廓术新理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 97~102
- Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in fourier transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229
毛先富,陈文静,苏显渝等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 225~229
- Tang Songxin, Su Xianyu. Utilization of cellular automata phase unwrapping method in 3-D sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(1): 112~116
谭松新,苏显渝. 细胞自动机位相展开算法用于三维传感[J]. *光学学报*, 1997, **17**(1): 112~116
- Su Xianyu, Tang Songxin, Xiang Liqun *et al.*. Complex object shape measurement using FTP method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(9): 1228~1233
苏显渝,谭松新,向立群等. 基于傅里叶变换轮廓术方法的复杂物体三维面形测量[J]. *光学学报*, 1998, **18**(9): 1228~1233
- Zhong Jingang, Weng Jiawen. Dilating Gabor transform for the fringe analysis of 3-D shape measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(4): 895~899
- Weng Jiawen, Zhong Jingang. Apply wavelet transform phase analysis of spatial carrier-fringe patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 454~459
翁嘉文,钟金钢. 小波变换在载频条纹相位分析法中的应用[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 454~459
- Zhong Jingang, Weng Jiawen. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2560~2562
- Sun Juan, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Study the measurement range of wavelet transform profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 647~653
孙娟,陈文静,苏显渝等. 小波变换轮廓术的测量范围研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 647~653
- Liu Huiqiang, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Fast fourier transform profilometry based on two-frequency grating projection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 39~42
刘慧强,陈文静,苏显渝等. 采用双拼光栅投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 39~42
- Zheng Suzhen, Chen Wenjing, Su Xianyu. 3D measurement techniques using adaptive window Fourier transform [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(9): 51~54
郑素珍,陈文静,苏显渝. 自适应窗口傅里叶变换三维面形检测技术[J]. *光电工程*, 2005, **32**(9): 51~54
- Tang yan, Chen Wenjing. Neural network applied to three-dimensional measurement of complex objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1435~1439
唐燕,陈文静. 应用神经网络的复杂物体三维测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1435~1439
- Chen Fanxiu, He Xiaoyuan. Instantaneous three-dimensional profile measurement of continually vibrating cantilever beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1647~1650
陈凡秀,何小元. 连续振动悬臂梁的瞬时三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1647~1650
- Yang Chuping, Weng Jiawen. Fourier transform profilometry by original grating reconstruction from deformed grating pattern [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1287~1290
杨初平,翁嘉文. 基准光栅重构傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1287~1290