

基准光栅重构傅里叶变换轮廓术

杨初平 翁嘉文

(华南农业大学物理系, 广东 广州 510642)

摘要 应用傅里叶轮廓变换术进行三维形貌测量中,为了获得待测物体的高度相位信息,通常需要采集两幅图像。因此当光学系统发生变动时,必须重新采集基准光栅图像,不利于快速测量。提出一种从变形光栅图像中获取基准光栅图像信息的测量方法。首先在变形光栅图像中记录基准光栅信息,然后通过傅里叶分析提取基准光栅频率信息,通过图像分析获得基准光栅相位信息,最后重构出一幅完整的基准光栅图像,实现三维物体形貌测量。实验结果验证了该方法的可行的。

关键词 傅里叶光学; 傅里叶变换轮廓术; 变形光栅; 基准光栅重构

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1287

Fourier Transform Profilometry by Original Grating Reconstruction from Deformed Grating Pattern

Yang Chuping Weng Jiawen

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

Abstract In Fourier transform profilometry (FTP) for three-dimensional (3-D) shape measurement, in order to obtain the height and phase information of a testing object, two images are needed, i. e. original grating pattern and its deformed grating pattern. Therefore, if the optical system is changed, it is necessary to obtain a new original grating pattern. Such arrangement does harm to fast measurement. For overcoming the shortage, a new method is proposed for obtaining the information of the original grating pattern from its deformed grating pattern. First the information of the original grating pattern is recorded in its deformed grating image. Then its frequency and phase are obtained from the deformed grating image by means of image analysis. Finally the complete original grating image is reconstructed and 3-D shape measurement is realized. The experimental results show that the above method is available.

Key words Fourier optics; Fourier transform profilometry; deformed grating pattern; original grating pattern reconstruction

1 引言

自 1983 年提出傅里叶变换轮廓术 (Fourier transform profilometry, FTP) 后^[1], 作为一种无接触、动态的三维面形的测量方法, 一直受到关注, 提出了不共轴非平行时的高度相位算法^[2,3], 采用伸缩傅里叶窗口分析手段^[4~6]、小波变换分析手段^[7~11]提取相位信息, 应用于动态瞬时测量过程^[12]。为了实现三维面形测量, 通常需要获取两幅光栅图像, 一幅是基准平面上的基准光栅图像, 另一幅是受测量物体调制后的变形光栅图像, 前者是实现后者的相位测量必不可少的。由于基准平面的基准光栅图像可能受到系统位置变动 (诸如光栅投影机构位置变化、图像摄取机构位置变化) 的影响, 因

此它需要随着系统的变动而重新获取。考虑到傅里叶变换轮廓术的原理和基准光栅的规律性, 本文提出从变形光栅图像中重构基准光栅图像的方法: 只需采集一幅变形光栅图像, 同时把基准光栅图像的信息记录在变形光栅图像里面, 通过变形光栅图像提取基准光栅图像信息, 从而实现测量。这样, 系统的任何变动对基准光栅图像信息的影响都可以记录在变形光栅中, 不必重新摄取基准光栅图像, 从而用一幅变形光栅图像就可以实现三维物体形貌测量。

2 测量原理

测量系统的光路结构采用相交型^[5,6], 图 1 中 FO 和 EO 分别是投影系统和成像系统的光轴, 两光

轴与基准平面相交于 O 点,基准平面与 EO 垂直,它是测量物体表面高度变化的参照面。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,由成像系统获得的变形光栅图像和基准光栅图像分别表示为

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

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

式中 f_0 为基准光栅图像的基频, $r(x, y)$ 为待测物体表面的非均匀反射率, $\phi_n(x, y)$ 为经被测量物体调制后光栅条纹的相位, $\phi_{0n}(x, y)$ 为基准光栅条纹的初相位。固定(1)式所表示的变形光栅图像中的 y 值,对每一行光栅图像进行傅里叶变换得到其频谱分布。在频域中进行滤波处理,提取含有物体高度信息的基频分量,然后进行逆傅里叶变换回到空域,得到变形光栅图像的基频信息

$$g(x, y) = r(x, y) A_1(x, y) \times \exp\{j[2\pi f_0 x + \phi_1(x, y)]\}, \quad (3)$$

改变 y 值,重复上述过程就可以得到整幅变形光栅图像的基频信息。

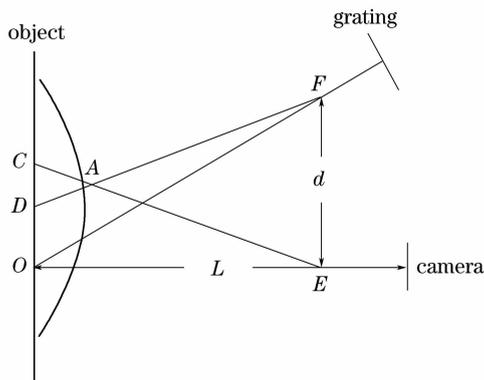


图 1 测量光路图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path

对基准光栅图像进行同样的处理,得到基准光栅图像的基频信息为:

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

将(3)式与(4)式共轭式相乘取对数,得

$$\begin{aligned} \lg[g_{r1}^*(x, y) g(x, y)] = & \lg[|A_1(x, y)|^2 r(x, y)] + \\ & j[\phi_1(x, y) - \phi_{01}(x, y)] = \\ & \lg[|A_1(x, y)|^2 r(x, y)] + \\ & j[\Delta\phi(x, y)], \end{aligned} \quad (5)$$

分离虚部得到纯粹由物体高度所引起的相位调制

$$\begin{aligned} \Delta\phi(x, y) = \text{Im}\{\lg[g_{r1}^*(x, y) g(x, y)]\} = \\ \text{Im}\{\lg[g(x, y)]\} - \text{Im}\{\lg[g_{r1}^*(x, y)]\} = \\ \phi_1(x, y) - \phi_{01}(x, y) = 2\pi f_0 \overline{CD}. \end{aligned}$$

利用图 1 中 $\triangle ACD$ 和 $\triangle AEF$ 的相似关系(h 为物体表面高度),得

$$\overline{CD} = h(x, y) d / [L - h(x, y)], \quad (6)$$

得到相位和物体表面高度的变换关系

$$h(x, y) = L \Delta\phi(x, y) / [2\pi f_0 d + \Delta\phi(x, y)]. \quad (7)$$

3 基准光栅图像信息的获取和重构

考虑到基准光栅图像信息的规律性(比如余弦基准光栅是按余弦规律变化的),如果在获取变形光栅图像时,留出一定大小的空间区域,同时把基准平面上的基准光栅图像也记录下来,再进一步重构取得整幅基准光栅图像的信息,是可以实现测量目的。

设描述纵向基准光栅图像的函数为

$$g_r(x, y) = A[1 + \cos(2\pi f_0 x)], \quad (8)$$

则利用采集的变形光栅图像中的基准光栅图像信息重构的基准光栅图像的函数可表示为

$$g_{cr}(x, y) = A_c[1 + \cos(2\pi f_0 x - ky - \delta)]. \quad (9)$$

式中 δ 为相移参量, k 为光栅条纹的斜率。通常投影出去的电子光栅图像尺寸是 $480 \text{ pixel} \times 640 \text{ pixel}$,在后续图像处理中需要对摄取回来图像截取成 $480 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$,变形光栅图像中基准光栅图像条纹将产生一个相位平移。光栅条纹的斜率 k 是由于考虑到摄取变形光栅图像时,摄像机的转动导致采集回来的纵向光栅条纹不是严格垂直 x 轴,可能存在微小的倾斜。

基准光栅图像重建过程就是获取式(9)中各个参量的过程:

1) 基准光栅的频率 f_0 可以通过对变形光栅图像中基准光栅图像的行像素进行傅里叶分析获得;

2) 相移参量 δ 可以通过比较变形光栅图像中的基准光栅图像的某一行像素点灰度值曲线相对于同一行在(8)式的灰度值曲线的平移量而获得(通常采用第一行像素,原因是除了条纹整体平移外,条纹倾斜也导致条纹相位移动);

3) 斜率 k 可以通过对变形光栅图像中的基准光栅图像的一列像素分析获得,具体作法是:若光栅条纹垂直 x 轴,某一列图像的像素点的灰度值应相等;若光栅条纹不垂直 x 轴,则某一列的像素点的灰度值将出现变化,最后一行的某个灰度值的像素

点的位置,相对于第一行的相同灰度值的像素点将出现平移,像素点位置的平移量 Δ 与该列的像素点数 N 之比就可以获得斜率 $k = 2\pi f_0 \Delta / N$,斜率的正负由条纹倾斜的方向决定。

在重构出来的基准光栅图像中,参量 A_c 与 A 可以不同,只影响重构基准光栅图像的灰度,不会影响相位信息的提取;由于重构出来的描述基准光栅图像的函数中的相移参量 δ 和斜率 k 也在采集的变形光栅图像中出现,也不影响相位信息的提取。

4 实 验

实验采用的是交叉光轴几何光学系统,用计算机产生一个空间周期为 4 pixel、初相位为 0 的纵向余弦电子光栅,通过数字投影仪(DLP)投射到待测

物体上。为了在变形光栅图像中记录有基准光栅图像信息,在待测物体后面的基准平面上方和右侧分别空出几十像素的区域,记录投射在基准平面上的基准光栅条纹,从中可以获得基准光栅条纹的频率、相位移动信息和条纹斜率。为了比较,也记录了一幅完整的基准平面上的基准光栅图像。获得的不含基准光栅信息的变形光栅图像、基准光栅图像和含有基准光栅信息的变形光栅图像分别如图 2(a)~图 2(c)所示;利用图 2(a)、图 2(b)提取的待测物体展开相位用图 3(a)所示;利用图 2(c)重构获得的基准光栅图像提取的待测物体展开相位如图 3(b)所示。实验结果表明,利用重构的基准光栅信息可以实现物体的三维形貌测量。

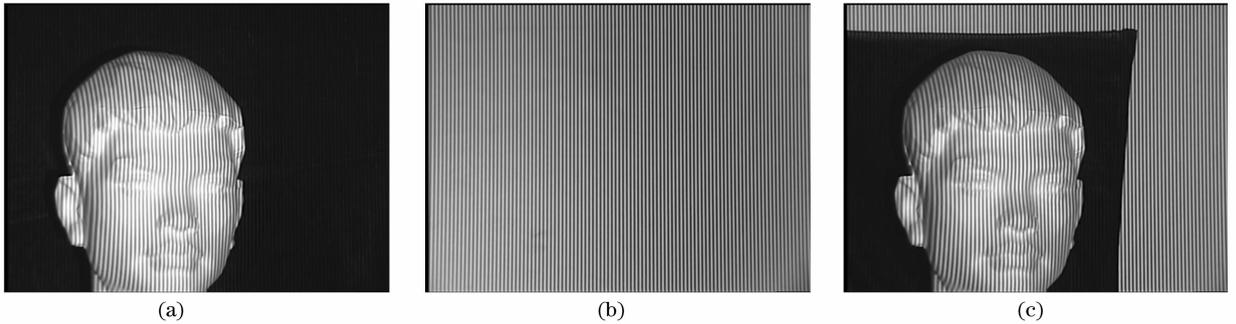


图 2 不含有(a),基准光栅图像(b)和含有基准光栅信息的变形光栅图像(c)

Fig. 2 Deformed grating pattern without (a), original grating pattern (b), and with original grating (c)

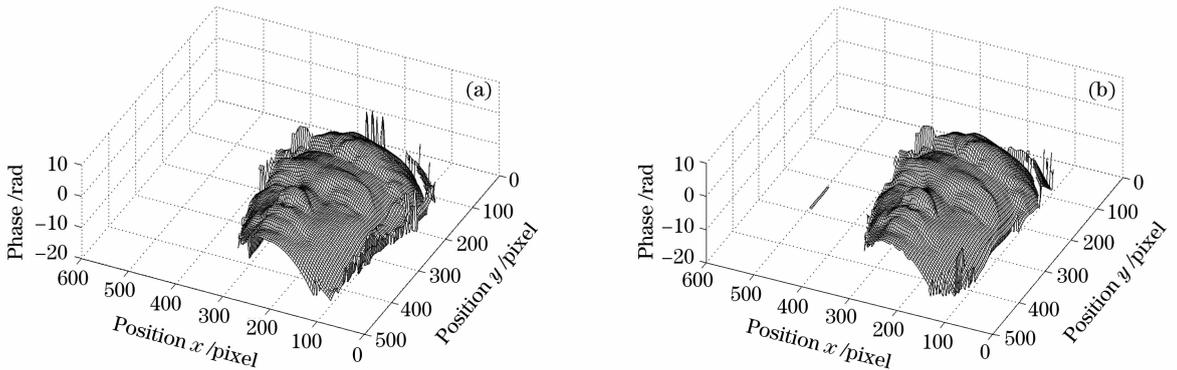


图 3 原始基准光栅(a)和重构基准光栅(b)获得的展开相位

Fig. 3 Wrapped phase obtained by original grating (a) and reconstructed grating (b)

5 结 论

提出一种基于傅里叶变换轮廓术的新基准光栅信息获取方法。在一幅变形光栅图像留出一定的区域用于记录基准光栅图像信息,通过图像分析的手段从变形光栅图像中提取基准光栅的频率、相位信息,并重构出来,从而实现不必另外采集基准光栅图

像,真正用一幅变形光栅实现三维形貌测量。该方法为提高三维形貌测量速度提供一种新手段。

参 考 文 献

1 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982

- 2 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu. Analysis on an improved Fourier transform profilometry [J]. *Chin. 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
- 3 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
- 4 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Dilating Gabor transform for the fringe analysis of 3-D shape measurement[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(4): 895~899
- 5 Jiawen Weng, Jingang Zhong. Application of Gabor transform to 3D shape analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993~996
翁嘉文,钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 993~996
- 6 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of dilating Gabor transform to 3D shape analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 725~729
翁嘉文,钟金钢. 伸缩傅里叶变换在三维形貌测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 725~729
- 7 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan. Instantaneous three-dimensional profile measurement based on temporal wavelet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(12): 1803~1806
陈凡秀,何小元. 基于时域小波变换相位提取的三维形貌测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(12): 1803~1806
- 8 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
- 9 Weng Jiawen, Zhong Jingang. Application of wavelet transform profilometry in Bi-frequency grating fringe [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 603~608
翁嘉文,钟金钢. 小波变换轮廓术在双频光栅条纹中的应用[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 603~608
- 10 Jingang Zhong, Jiawen Weng. Phase retrieval of optical fringe patterns from the ridge of a wavelet transform[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(19): 2560~2562
- 11 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
- 12 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