

# 一种新的双频光栅轮廓术

李方<sup>1</sup> 周灿林<sup>2</sup>

(1 中山大学生命科学院, 广州 510275)

(2 山东大学物理与微电子学院, 济南 250061)

**摘要** 物体含突变部分时, 包裹相位很难准确恢复. 若用双频光栅技术分两次测量, 测量次数增加, 不符合实时要求. 提出用软件方法生成含两种不同频率的复合光栅, 用液晶投影仪投影. 针对不同物体突变情形, 生成各种不同灵敏度的复合光栅. 只一次采集, 就达到过去双频多次采集的效果. 两幅不同灵敏度的相位图可同时获取, 相位去包裹时高精度光栅相位不确定性由粗光栅对应相位修正. 最后, 进行了实验测试. 结果表明, 新方法具有速度快、精度高、测试范围广等特点.

**关键词** 形貌检测; 傅里叶变换; 相位分布; 相位去包裹; 双频光栅

**中图分类号** O348; O43      **文献标识码** A

## 0 引言

光学三维传感技术由于其具有非接触、精度高、速度快、自动化程度高等特点而在三维形貌测量和光学元件的质量检测等领域得到广泛应用. 国内外许多学者对此进行了卓有成效的研究<sup>[1-10]</sup>, 目前常用方法有傅里叶变换法和相移法, 其中 Takeda 提出的傅里叶轮廓术, 已成为广泛使用的经典形貌检测方法. 但是, 该方法有一定的不足, 主要是对于含有非连续部分的突变面型, 无法准确测量. 为此, 文献[4~7]分别采用了两种不同频率的光栅, 将两种不同频率的光栅测得的结果进行合成, 取得了不错的结果. 但是他们的方法需要进行两次测量, 在实际应用中测试速度慢, 不能满足在线检测和动态测试等实时性工程测量的要求. 在此基础上, 本文提出在计算机中通过软件编程将两种不同灵敏度的正弦光栅合成为复合光栅, 利用液晶投影仪将光栅投影到待测物体表面, 通过对采集到的受物体面型调制的变形复合光栅进行傅里叶变换, 在空频域中这两个频率成分相分离, 提取相应的频率成分, 于是达到只要一次采集就能获得两种不同灵敏度的测试结果. 由粗光栅测量出物体非连续的突变部分, 由精细光栅得到物体突变前后各部分的精确轮廓, 将两者结果有机组合起来, 合成得到含有突变面型物体的精确形貌.

## 1 原理

光栅投影轮廓测量系统根据摄像机光轴和投影装置光轴的空间位置不同, 有相交轴系和平行轴系. 我们以相交轴系为例来说明

如图1, 用一象差很小的投影设备, 将一栅线平行且方向与Y轴平行的光栅 Grating 斜向投影到与Z轴垂直的平面R上时, R上图象栅线仍然是平行的(图2(a)). 由于是斜向投影, 当我们垂直在方向上观察R上的光栅图象时, 其上栅线是平行的. 若用正弦光栅投影, 则平面上具有相同Y值的直线上的光强近似为正弦变化. 其上任一点具有相应的相位值  $\phi_0(x, y)$ . 如光栅投向的不是平面, 而是一个与参考平面R有一定高度差的不平物体表面时, 虽然在投影方向上看, 栅线仍是平行的, 但在垂直方向上观察时, 则栅线是弯曲的(图2(b)). 栅线的弯曲程度与表面相对参考平面R的高度差有关. 此时, 平面上具有相同Y值的直线上的光强不再是周期相同的正弦变化. 有的区域频率高, 有的区域频率低. 这时, 各点的相位值  $\phi_1(x, y)$  与平面时的显然不同. 如图1, 原来投射到参考平面上C点的光线, 由于被测曲面的存在而只照到B点. 这样, 在摄像机看到B点的相位实际上与参考光栅象中D点的相位一样, 即由于曲面高度对相位的调制, 相当于把C点移相到了D点, 移相值为  $\Delta\phi(x, y)$ . 设参考平

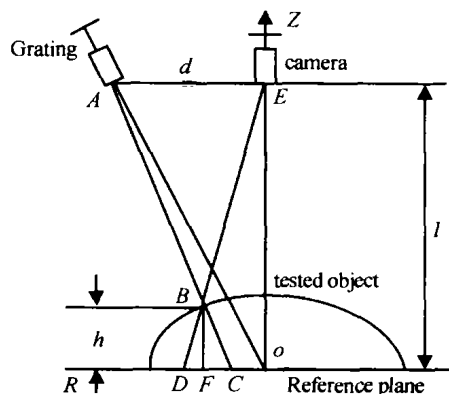


图1 测量系统光路图  
Fig. 1 Optical geometry for measurement system

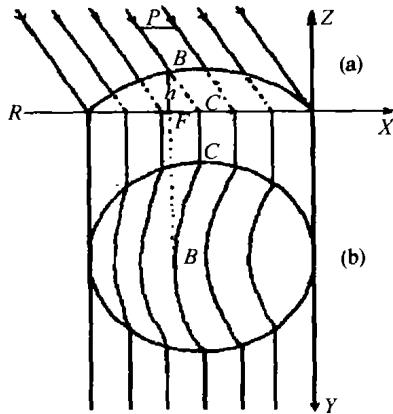


图2 光栅变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grating deformation

面上光栅的频率为  $f_0$ , 则  $\Delta\phi(x, y) = 2\pi f_0 DC$ . 由于  $\triangle ABCD \sim \triangle ABE$ , 有

$$\frac{DC}{d} = \frac{h(x, y)}{l - h(x, y)} \quad (1)$$

由于在实际测量中, 物体高度  $h(x, y)$  与摄像机光心到参考面的距离  $l$  相比很小, 因此, 简化处理可得

$$h(x, y) = \frac{DCl}{d} = \frac{\Delta\phi(x, y)l}{2\pi f_0 d} = k\Delta\phi(x, y) \quad (2)$$

式(2)中,  $f_0$  为投影光栅的频率,  $d$  为投影系统光心与摄像机光心的距离,  $k$  为由系统结构决定的常数. 可以通过系统标定得到. 于是只要得到相移值  $\Delta\phi(x, y)$ , 就可求得曲面距参考平面的高度值, 从而得到物体形貌. 通过对采集的变形光栅图像的傅里叶变换, 将空域信号变换到频谱域, 在频谱域中不同频率成分将被分离, 通过频域滤波提取需要的频带成分, 再经移频和傅里叶逆变换得到所需相位值. 由于在计算过程中, 相位值是通过反正切函数求得的, 因此, 相位值被包裹在  $[-\pi, \pi]$  的范围以内, 需要进行去包裹处理, 以求得连续的真实相位分布.

$$\Delta\Phi = \Delta\phi + 2\pi n(x, y)$$

其中,  $n(x, y)$  为整数. 去包裹的过程就是确定  $n(x, y)$  的过程. 对于含有突变部分的物体面型, 由于突变部分的真实相位本身就分布不连续, 存在很大的相位跳跃. 因此, 要确定  $n(x, y)$  十分困难. 但是如果用双频光栅进行测量可以较好解决该问题. 当然对两个光栅频率的设计有一定的要求. 这就是: 低频光栅, 必须保证只有半个周期的光栅条纹落在待测物体突变部分, 这样, 利用低频光栅所求得的相位无需进行去包裹处理就是真实的连续相位分布, 当然它的测量精度很低, 不能反映物体面型的细节. 采用满足测试精度要求的高频细光栅, 由于不止一个周期的光栅条纹被投影到待测物体的突变部分, 因此出现相位包裹, 要确定  $n(x, y)$  很难. 但是高频光栅的测量精度高, 可以较高精度获取物体面型. 结合粗、细光栅的优点, 将两者的数据融合得到物体

突变部分的精确轮廓.

假设由粗光栅所获得的相位数据为  $\Delta\phi_1$ , 而由细光栅所获得的包裹相位为  $\Delta\phi_2$ , 其真实的连续相位为

$$\Delta\Phi_2 = \Delta\phi_2 + 2\pi n(x, y) \quad (3)$$

由于两种频率下测得的物体表面同一点的高度应该是相同的. 也就是

$$h(x, y) = k_1 \Delta\Phi_1 = k_2 \Delta\Phi_2 = k_2 [\Delta\phi_2 + 2\pi n(x, y)] \quad (4)$$

其中

$$k_1 = \frac{1}{2\pi df_1}, k_2 = \frac{2}{2\pi df_2}, \Delta\Phi_1 = \Delta\phi_1$$

所以

$$n(x, y) = \text{INT}\left(\frac{f_2 \Delta\phi_1}{2\pi f_1}\right)$$

其中 INT 是取整运算符. 用普通光学方法制作精确的正弦光栅比较困难, 但如果用计算机编程制作各种栅频的光栅很容易. 考虑到 matlab 编程的简单、快捷, 用 matlab 编制光栅生成软件, 制作满足需求的复合双频光栅, 通过液晶投影仪进行投影, 用图像采集系统进行采集. 所采集的参考面上的光栅象  $g_0(x, y)$  和放置被测曲面后的变形光栅象  $g(x, y)$ , 可分别用傅里叶级数表示为

$$g_0(x, y) = A_1 \exp[i2\pi f_1 x + \phi_{01}] + A_2 \exp[i2\pi f_2 x + \phi_{02}] \quad (5)$$

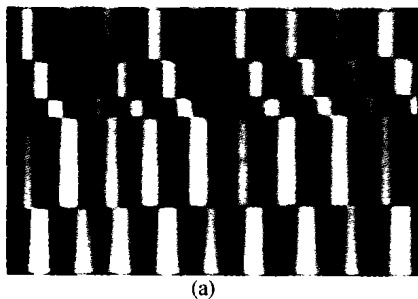
$$g(x, y) = r(x, y) \{A_1 \exp[i2\pi f_1 x + \phi_1] + A_2 \exp[i2\pi f_2 x + \phi_2]\} \quad (6)$$

对采集的光栅像按一般傅里叶变换轮廓术的方法处理, 也就是: 首先对光栅图像进行傅里叶变换, 于是在频谱空间中不同频率的两种成分被分离开, 然后经过滤波、频移、逆变换等处理, 可以求得两种频率对应的相位数值, 然后用本文方法对包裹相位作“去包裹”处理, 求得精确相位差, 在标定出测试系统的相位与高度映射关系后, 求得待测物面对应的高度, 从而实现含高度突变成分的复杂物体形貌检测.

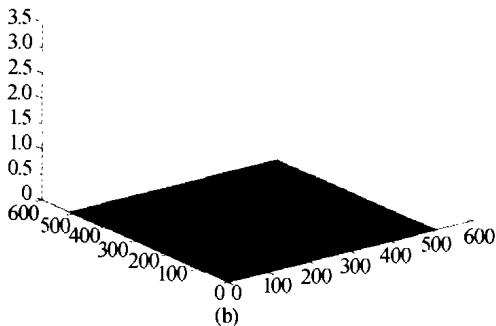
## 2 实验

为了验证本方法的有效性, 利用搭建的测试系统进行了实际测量. 系统硬件为 Epson E 液晶投影仪、摄像机、图象卡、微机等组成, 分析软件用 visual c++ 语言编制, 投影光栅生成软件用 matlab 编制. 为便于后续图像处理, 将高调制度变形光栅图被采集到图像处理系统中, 通过软件制作的复合双频光栅调制度理论上为 1, 双频光栅的振幅比理论上为 1, 当然由于投影系统的非线性响应特性以及投影光源系统的非完全均匀性等许多因素的影响, 最后实

实际采集的光栅图像调制度不会等于1. 栅线频率经光栅生成软件人机交互调节. 最后采集到的栅线图象大小及质量跟光学采集系统视场大小、投影系统放大倍率、成像镜头畸变等因素有关. 变形光栅图由图象卡采集并转为256级灰度数据文件, 然后进行处理. 在处理过程中通过选用合适的滤波器, 分别选取与 $f_1$   $f_2$ 对应的频率成分, 按傅里叶变换轮廓术的频谱移中、傅里叶逆变换, 求取与 $f_1$   $f_2$ 相对应的包裹相位. 最后, 对求得的包裹相位“去包裹”. 对一个含突变部分的铝板模型进行了实际测量. 下面图形显示了测量情况, 图3(a)为采集的变形栅线图, 3(b)傅里叶变换后频谱图(显示的是模值), 图4试件高度三维显示图. 由此可见, 本文方法能较好测出有突变部分的形貌分布.



(a)



(b)

图3 (a)变形栅线图;(b)频谱图  
Fig.3 (a) Deformed grating pattern; (b) Spectrum

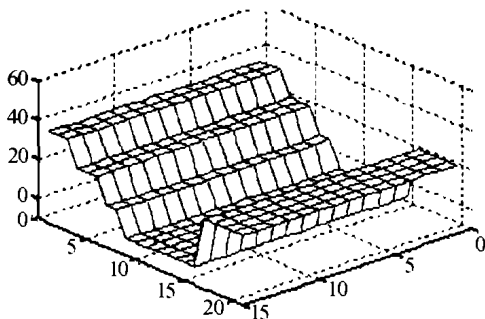
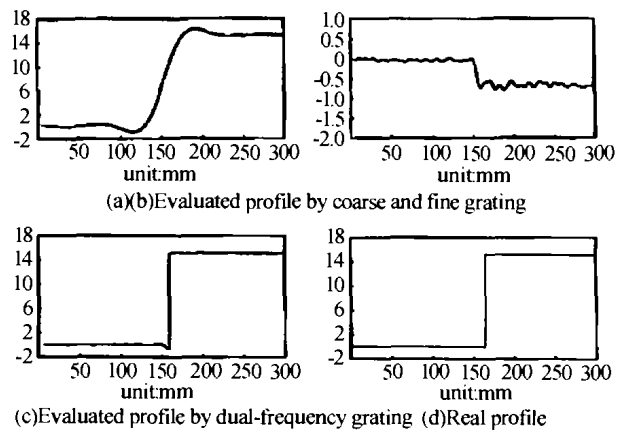


图4 试件形貌的三维显示  
Fig.4 3D display of the object's contour

### 3 讨论

该方法不仅可测曲面平缓物体形貌, 而且能测含高度突变部分的物体, 从而拓宽了测量对象范围. 由于在相位去包裹时, 精细光栅对应相位的不确定

性可由粗光栅相位修正, 从而准确完成对包裹相位的“去包裹”处理, 使测量精度提高. 当然, 以前傅里叶变换轮廓术中的一些影响测试精度的因素, 比如: 系统标定误差, CCD摄像机的非线性响应、镜头畸变, 采集系统的量化误差, 傅里叶变换的漏频、栅栏等效效应, 在新方法中依然存在. 通过各种改进可以降低或减少影响程度. 比如, 为了将待测物面与参考面的相位差转化为高度信息, 需要进行测试系统的标定, 并且标定方案的不同, 对最后形貌测量精度是有影响的. 对此, 我们也做了研究, 并有文章进行专门阐述. 本文只是针对物体曲面起伏大、突变部分时, 难以准确“去包裹”问题而做了些改进. 为了评价新方法, 对一已知尺寸的规则几何体进行测量. 为了作比较, 对同一物体分三次测量, 一次用粗光栅投影测量, 一次用精细光栅投影测量, 一次用粗、细光栅合成的复合双频光栅进行测量. 三次测量中除所用光栅不同外, 其它参数完全相同, 图5所显示的分别是三次测量中对应同一截面的轮廓线. 从图中不难看出, 5(a)测出了物体的变化范围, 但精度不高, 5(b)中, 物体突变轮廓丢失, 没有恢复出来, 5(c)物体轮廓被比较准确测出, 5(d)为该截面实际轮廓. 比较5(c)和(d), 在随机选取的该截面上新方法所得轮廓与实际轮廓的平均误差很小.



(a)(b)Evaluated profile by coarse and fine grating  
(c)Evaluated profile by dual-frequency grating (d)Real profile  
图5 几何体同一截面轮廓  
Fig.5 Profile along same section of geometrical object

### 4 结论

文章针对含面型突变部分的物体, 用单频光栅投影测量难以准确“去包裹”的难题. 提出用软件的办法制作双频复合光栅, 用液晶投影仪投影. 由于采用了多精度变频光栅技术, 可有效解决含突变部分物体的形貌检测问题. 使该技术更具实用性.

#### 参考文献

1 Frank C, Gorden M B, Mumin S. Overview of three-dimensional shape measurement using optical method. *Opt Eng*, 2000, **39**(1): 10 ~ 22

- 2 Takeda M, Ina H, Kpbayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analys for computer-based topography and the interferometry. *J Opt Soc Am*, 1982, **72**(1): 156 ~ 160
- 3 Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes. *Appl Opt*, 1983, **22**(24): 3977 ~ 3982
- 4 Sanoni G, Biancardi L, Minoni U, et al. A novel adaptive system for 3-D optical profilometry using a liquid crystal light projector. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1994, **43**(4): 85 ~ 89
- 5 田丰, 赵宏, 陈文艺, 等. 一种新的光栅投影轮廓术. 光学学报, 1996, **16**(10): 1506 ~ 1509  
Tian F, Zhao H, Cheng W Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1506 ~ 1509
- 6 范华, 赵宏, 谭玉山. 光纤投影双频自动轮廓测量术. 光学学报, 1998, **18**(1): 86 ~ 89  
Fan H, Zhao H, Tang Y S. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1): 86 ~ 89
- 7 江桂荣, 胡长华. 用双频栅测三维物体的形状. 实验力学, 2002, **17**(1): 111 ~ 115  
Jiang G R, Hu C H. *Journal of Experimental Mechanics*, 2002, **17**(1): 111 ~ 115
- 8 周灿林. 相位锁定循环投影技术及其应用. 光子学报, 2000, **29**(2): 157 ~ 160  
Zhou C L. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(2): 157 ~ 160
- 9 翁嘉文, 钟金钢. 加窗傅里叶变换在三维形貌测量中的应用. 光子学报, 2003, **32**(8): 993 ~ 996  
Weng J W, Zhong J G. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 993 ~ 996
- 10 李兵, 罗意平, 王昭, 等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究. 光子学报, 2003, **32**(6): 738 ~ 741  
Li B, Luo Y P, Wang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6): 738 ~ 741

## A Novel Profilometry with Dual-frequency Grating

Li Fang<sup>1</sup>, Zhou CanLin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Life Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275

<sup>2</sup> School of Physics and Microelectronics, Shandong University, Jinan 250061

Received date: 2004-02-23

**Abstract** The phase unwrapping is a very difficult problem for profilometry of object containing depth discontinuities. The problem can be resolved with dual-frequency measurement technique. Two measurements with dual different frequencies cannot be contented with real-time demand. The new profilometry is based on compound grating, generated by computer software, projected by liquid crystal projector, so that the grating with different precision is easily created, conveniently changed. The same purpose is attained as capturing two different frequencies' deforming gratings. Two phase maps are determined simultaneously, whose sensitivity to height variations is correlated with the frequency of pattern gratings. The phase uncertainty of the finest grating can be revised by the phase information coming from the coarse one. Finally, satisfactory experimental results are demonstrated. Meanwhile, it is verified that the new method has high speed, accurate unwrapping and extensive measure range.

**Keywords** Shape measurement; Fourier transform; Phase distribution; Phase unwrapping; Two-frequency grating



**Li Fang** was born in Hu'nan Province, China. She received her M. S. and Ph. D. from Zhongshan University in 1994 and 2002. Currently, she is a teacher in Department of Biochemistry in Zhongshan University. Her main research interests include morphogeny of fungi and myxobacterium, bio-mechanics measurement technique.