

文章编号: 1001-3806(2011)06-0784-03

## 条纹相位分析小区域平整度检测

杨初平, 纪婧如, 谭德妍, 林盈洪  
(华南农业大学 物理系, 广州 510642)

**摘要:** 为了对漫反射材料小尺寸平面的平整度进行检测, 提出采用载频条纹相位分析的方法。该方法采用激光作为照明光源, 通过相干获得周期为  $100\mu\text{m}$  的条纹, 使用傅里叶变换条纹相位分析提取待测表面的调制相位并可以转换为表面高度分布, 从而能够实现对材料表面平整度的评价。结果表明, 系统高度分辨力为  $10\mu\text{m}$ ; 考虑到噪声的影响, 实际分辨力可以达到  $20\mu\text{m}$ 。所给出的实际实验结果显示该方法是可行的。

**关键词:** 信息光学; 平整度检测; 条纹分析; 漫反射材料

中图分类号: O439 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.017

## Flatness detection of small plane by means of fringe phase

YANG Chu-ping, JI Jing-ru, TAN Sui-yan, LIN Ying-hong

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

**Abstract:** In order to detect and evaluate the flatness of small plane of diffuse reflection, a method was presented based on carrier fringe phase analysis. With a laser as illuminating light source, a coherent fringe pattern at period of  $100\mu\text{m}$  was achieved. The modulated phase distribution of the testing surface was retrieved after Fourier transform and converted into the physical height distribution, and then these height data were applied to evaluate the surface flatness. The detailed theoretical analysis was presented. The theoretical height resolution can reach  $10\mu\text{m}$ . Due to the effect of the noise, the experimental height resolution only reached  $20\mu\text{m}$ . The experimental results prove that the method is valid.

**Key words:** information optics; flatness detection; fringe analysis; diffuse reflection material

### 引言

表面平整度是材料的一个重要物理参量, 对表面平整度进行检测一直受到人们关注, 并提出了许多检测方法<sup>[1-3]</sup>, 属于接触测量的有千分尺法、水平仪法, 但接触测量会干扰测量对象; 非接触测量主要有电子经纬仪法、自准直仪法、干涉法和光电检测法, 多数非接触测量采用大间隔采样提取表面高度信息, 测量费时, 难以精密提供整个测试平面的高度数据; 干涉法测量精度高, 但对表面光洁度要求高, 不适合漫反射表面。要实现对材料表面平整度的准确评价, 尽可能多采集材料表面不同点的高度信息是关键。本文中提出采用载频条纹传感相位分析法<sup>[4-11]</sup>实现小尺寸(几个  $\text{cm} \times \text{cm}$ )漫反射材料平面的平整度测量, 该方法突出特点是非接触测量、测量速度快、无需逐点扫描测量, 就能

够提供整个待测平面的高度信息, 对每幅尺寸为  $480$  像素  $\times 640$  像素的像, 可以提供的表面高度信息达到  $30$  万点。该方法通过对测量表面  $3$  维面形信息的提取, 从而准确掌握测量表面平整度信息, 与载频条纹相位分析应用于  $3$  维形貌测量时侧重明显凹凸的面形信息获取比较, 应用于表面平整度测量侧重于微小起伏面形的检测, 这时对测量分辨力有更高的要求。

### 1 测量原理

#### 1.1 条纹相位分析原理

测量系统的光路采用相交轴结构<sup>[5]</sup>, 如图1所示, 短虚线边框表示 CCD 摄像机, 其中  $OE$  和  $OF$  分别是条纹投影光路和成像光路的光轴, 两光轴与参考平面  $POCB$  相交于  $O$  点,  $E, F$  分别是条纹投影光路和摄像机光瞳中心,  $EF$  平行参考平面,  $L$  表示  $EF$  到参考平面的距离。条纹由投影光路投射到待测物体表面。弧线  $PAB$  是测量物体表面的轮廓线。如果没有测量物体, 某个条纹直接投射到参考平面  $POCB$  的  $O$  点, 经过摄像机光瞳中心  $F$  成像于  $O'$  点; 出现测量物体时, 该条纹经过测量表面上的点  $A$  反射后的投影点是  $C$ , 经过摄像机成像于  $C'$  点。这时  $OC$  表示经过测量表面调制

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (9151064201000035)

作者简介: 杨初平 (1970-), 男, 副教授, 研究方向为光电信息处理。

E-mail: yangchp@scau.edu.cn

收稿日期: 2010-12-23; 收到修改稿日期: 2011-02-18

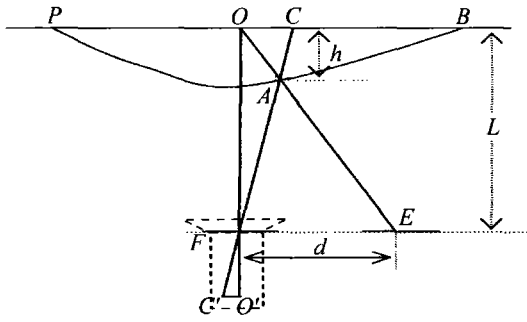


Fig. 1 Schematic of optical path

产生的条纹移动距离。移动距离可以通过计算经过测量表面调制产生的变形条纹相对于参考面上的基准条纹的调制相位而得到。以纵向条纹为例,由成像系统采集的变形条纹和基准条纹分别表示为:

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

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

式中,  $f_0$  是条纹图像的基频,  $r(x,y)$  是待测物体表面的非均匀反射率,  $\phi_n(x,y)$  是经测量物体调制后条纹的相位,  $\phi_{0n}(x,y)$  是经参考平面调制的相位,  $A$  为傅里叶级数的振幅。对(1)式每一行条纹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,提取含有物体表面高度信息的基频分量,然后进行逆傅里叶变换回到空域,得到变形条纹图像的基频信息:

$$g_1(x,y) = r(x,y) A_1 \times \exp\{j[2\pi f_0 x + \phi_1(x,y)]\} \quad (3)$$

对基准条纹图像进行类似处理,得到基频信息为:

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

将(3)式与(4)式共轭式相乘取对数,分离虚部得到由物体表面高度调制条纹产生的调制相位  $\phi(x,y)$  与条纹像位移  $\overline{O'C'}$  的关系为:

$$\phi(x,y) = \phi_1(x,y) - \phi_{01}(x,y) = 2\pi f_0 \overline{O'C'} \quad (5)$$

式中,  $\overline{O'C'}$  表示实际条纹位移  $\overline{OC}$  在条纹像中的位移。依据图 1 中  $\triangle AOC$  与  $\triangle AEF$  的相似关系,表面高度  $h(x,y)$  与实际条纹位移  $\overline{OC}$  的关系为:

$$\overline{OC} = -\frac{h(x,y)d}{L-h(x,y)} \approx -\frac{h(x,y)d}{L}, (L \gg h) \quad (6)$$

对于表面平整度测量,表面高度起伏非常微小,因而  $L \gg h$  是可以满足的。实际上,调制相位是通过投影条纹的像进行分析而获取的,因此必须找到  $\overline{OC}$  与  $\overline{O'C'}$  的关系。若  $f_b$  是投影在参考平面上条纹的基频(单位为  $m^{-1}$ ),则它与条纹像的基频  $f_0$ 、条纹移动距离  $\overline{OC}$  和对应像  $\overline{O'C'}$  的关系为:  $f_b \overline{OC} = f_0 \overline{O'C'}$ 。当系统的摄像机、投影光路和参考平面三者的相对位置固定,则  $\overline{OC}$

和  $\overline{O'C'}$  比例关系可表示为  $K$  (单位是  $m/\text{像素数}$ ) 是一定的。令:

$$K = \frac{\overline{OC}}{\overline{O'C'}} = \frac{\overline{OC}}{\phi(x,y)/(2\pi f_0)} \quad (7)$$

(7)式代入(6)式,得:

$$h(x,y) \approx -\frac{KL}{2\pi f_0 d} \phi(x,y) \Leftrightarrow \phi(x,y) \approx -\frac{2\pi f_0 d}{KL} h(x,y) \quad (8)$$

(8)式就是表面高度与调制相位转换关系式。通过该式可以讨论条纹相位分析平整度测量的分辨力。

## 1.2 系统分辨能力分析

(8)式显示调制相位与高度成正比关系;高度一定时,调制相位与条纹频率  $f_0$ ,  $d/L$  成正比关系;与  $K$  成反比关系;当系统相对位置一定时,高的条纹频率可以提高测量的分辨力。在实际测量系统中,  $L = 24\text{cm}$ ,  $d = 12\text{cm}$ 。(8)式中的比例参量  $K$  可以如下确定:激光干涉产生条纹投影到实验中参考平面上,条纹周期约为  $100\mu\text{m}$ ,经成像后所成条纹周期为 10 个像数,所以  $K = 0.1 \times 10^{-3}/10(m/\text{pixel})$ 。为了定量了解系统的分辨力,假定高度  $h(x,y) = 10^{-3}\text{m}$ ,则  $h(x,y)d/L = \frac{10^{-3}}{2}\text{m}$ ,相应的条纹移动距离为:

$$\overline{OC} = \frac{\phi}{2\pi f_0} = \frac{h(x,y)d}{LK} \approx \frac{10^{-3} \times 10}{2 \times 0.1 \times 10^{-3}} = 50\text{pixels} \quad (9)$$

即  $1\text{mm}$  的高度可以产生  $50\text{pixels}$  的条纹移动,等于 5 个条纹周期,对应的调制相位是  $10\pi$ 。若以条纹产生  $0.5$  个像素间距的位移计算检测的高度分辨能力,可以检测的最小高度为  $10^{-2}\text{mm} = 10\mu\text{m}$ 。实际测量中,噪声是影响测量分辨力的一个重要因素,它可以导致高度检测的分辨力下降。

## 2 实验结果

实验设计如下:激光束经过准直扩束后照射到一个透射反射比为 7:3 的分束镜,分束镜上、下表面反射光干涉产生载频条纹,经过测量物体表面调制的变形条纹由 CCD 相机采集后进行分析。

(1)实验中所用的石膏材料制作的漫反射物体表面的变形条纹如图 2 所示。为检测测量的分辨能力,在它表面刻下 3 个不同深度的微小凹痕。相应的解调相位如图 3 所示。图 3 中第 250 行对应的解调相位分布如图 4 所示。3 个微小凹痕的相位分别约为  $5\text{rad}$ ,  $4\text{rad}$  和  $2\text{rad}$ ,依据(9)式获得的高度-相位对应关系:

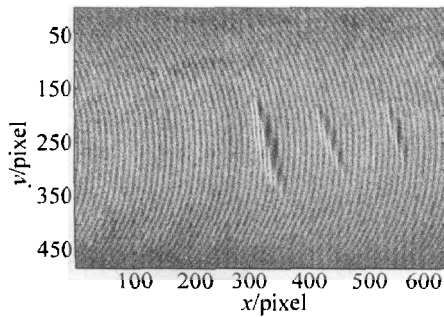


Fig. 2 Deformed fringe pattern

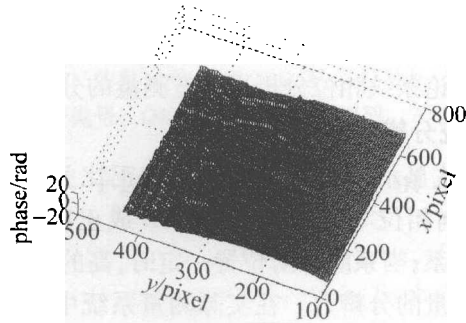


Fig. 3 Demodulation phase

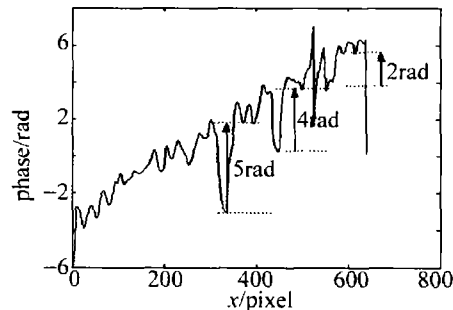


Fig. 4 Demodulation phase in the 240th row

$1000\mu\text{m} \leftrightarrow 10\pi$ , 可以计算出相应的高度分别为  $\frac{500}{\pi}\mu\text{m}$ ,  $\frac{400}{\pi}\mu\text{m}$  和  $\frac{200}{\pi}\mu\text{m}$ 。

(2) 影响测量精度和分辨力的实际因素有环境杂散光叠加引起的噪声和相干光产生的噪声,前者可以通过加上遮光罩大大降低其强度,但后者是条纹本身带有的、主要的噪声。为了检测相干噪声引起的调制相位起伏幅度,采用一个漫反射平整面进行测试,结果如图5所示,从图中得到该平面调制相位的起伏幅度为  $1.2/2 = 0.6\text{rad}$ , 相应的高度值约是  $20\mu\text{m}$ 。这是实

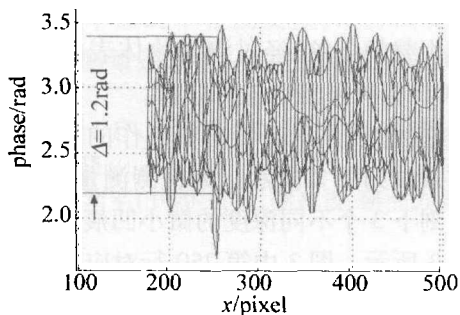


Fig. 5 Amplitude of noise

际测量可以达到的分辨力。

(3) 对于一个最大隆起高度为  $0.600\text{mm}$  的漫反射表面进行测量,结果如图6、图7所示。实验数据可以提供整个表面的调制相位分布。作为比较,获得该表面的最高隆起处的调制相位约是  $20\text{rad}$ , 相应的高度约为  $20/(10\pi) = 0.637\text{mm}$ 。

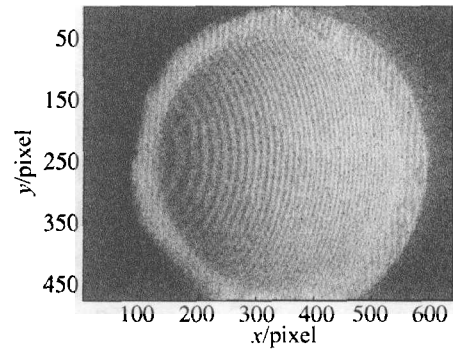


Fig. 6 Testing surface

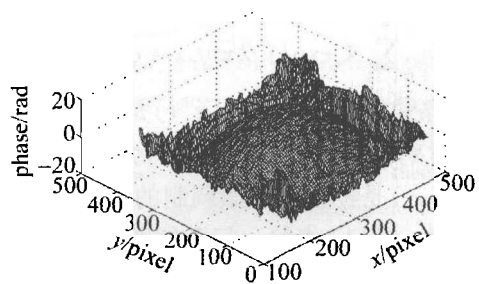


Fig. 7 Experimental result

### 3 结论

提出将载频条纹相位分析方法应用于小尺寸漫反射材料表面平整度测量,该方法通过对物体表面高度信息的提取,为准确掌握待测表面平整度信息提供数据,从而可以实现表面平整度的评价。采集一幅变形条纹成像就能提取整个表面高度数据,提取表面数据多、测量速度快。

#### 参考文献

- [1] ZHANG Zh J, YU Y J, ZHANG Sh Zh. Study on the method of high accuracy flatness measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2000, 21(2): 119-124 (in Chinese).
- [2] ZHU Sh P, FANG J Ch, ZHOU R, et al. The planeness measurement system of solar panel substrate[J]. Measurement and Control Technology, 1999, 18(10): 17-19 (in Chinese).
- [3] NIE T S, WANG Q S, HU H H, et al. Automated flatness measuring and selecting in succession of ceramic tile[J]. China Ceramic Industry, 2004, 11(2): 9-11 (in Chinese).
- [4] TAKEDA M, MUTOH K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Applied Optics, 1983, 22(24): 3977-3982.
- [5] YANG F J, HE X Y. Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach [J]. Applied Optics, 2007, 46(29): 7172-7178.

(下转第 836 页)

何变化,棱镜都有增大 e 光发散角的作用。

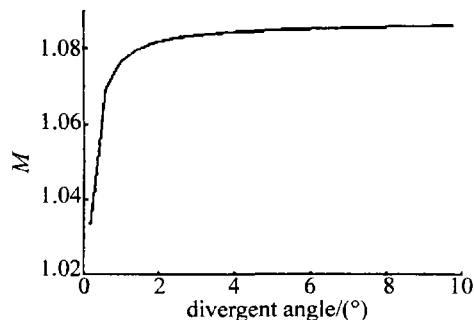


Fig. 5 The curve of the relationship between angular magnification of e beam and incident beam

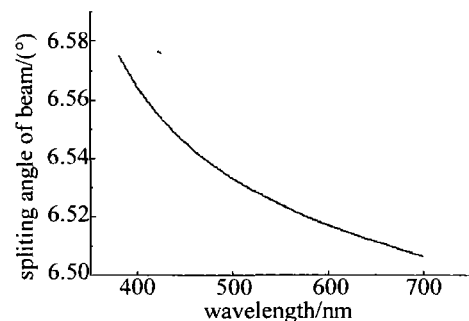


Fig. 6 The curve of divergent angle of e beam varying with wavelength

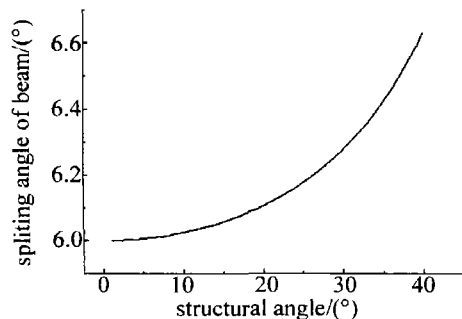


Fig. 7 The curve of divergent angle of e beam varying with structure angle

### 3 结论

分析了发散光束经过 Wollaston 棱镜后出射的 o 光光束和 e 光光束的变化,分析表明:(1)相对入射光

束的发散角,Wollaston 棱镜对 o 光有减小发散角的作用,而对 e 光有增大发散角的作用;(2)对于一定结构角的棱镜,当入射光的波长变大时,o 光发散角增大,而 e 光发散角减小;(3)对于确定的单色发散光束,当结构角增大时,o 光发散角减小,而 e 光发散角增大。

由此可见,无论是入射光的波长还是棱镜结构角的变化,对出射 o 光、e 光发散角的影响都是有限的,在要求不是太高的应用中可以忽略 Wollaston 棱镜对出射 o 光、e 光发散角的影响。

### 参 考 文 献

- [1] ZHU H F, SONG L K, WU F Q, *et al.* Calculation of the splitting angle of Wollaston prism by means of coordinate conversion[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4):362-364(in Chinese).
- [2] HARDING K G. Projection moire interferometer for vibration analysis [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(6):856-861.
- [3] ZHANG Zh, LIU L H, YU Y J, *et al.* Influence of orientation of Wollaston prism on accuracy of laser interference measuring system [J]. *Theory and Practice*, 1999, 19(1):4-7(in Chinese).
- [4] CHEN L G, HONG J, QIAO Y L, *et al.* Accuracy analysis of polarimetric measurement based on double Wollaston prism [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):468-470(in Chinese).
- [5] MENG F H, SONG L K, KONG F Zh, *et al.* A new symmetric beam-splitting polarization prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(6):670-672(in Chinese).
- [6] LI H X, WU F Q, FAN J Y. Studies on optimization problems about transmitted light intensity's perturbation of the Glan-Taylor prism [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6):597-599(in Chinese).
- [7] LI J Zh. Handbook of optic [M]. Xi'an: Shaanxi Science Press, 1986:506-512(in Chinese).
- [8] JIANG W M. Crystal physics [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 1980:258-271(in Chinese).
- [9] WU F Q, LI G H, FENG T Z. Researches in beamsplitting intensity ratio of OE double escape prism [J]. *Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition)*, 1994, 20(2):50-53(in Chinese).
- [10] WANG W, WU F Q, SU F F. Symmetric polarization beam splitting prism based on three-element Wollaston prism [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2):182-186(in Chinese).

(上接第 786 页)

- [6] XIAO Y Sh, SU X Y, ZHANG Q C, *et al.* 3-D surface shape restoration for the breaking surface of dynamic process [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3):258-261(in Chinese).
- [7] WANG X H, HE X D, FU Y J. The real-time measurement by two-frequency grating [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4):384-386(in Chinese).
- [8] MAO X F, CHEN W J, SU X Y. Analysis on an improved fourier transform profilometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1):97-102(in Chinese).
- [9] CHEN F X, HE X Y. Instantaneous three-dimensional profile meas-

urement of continually vibrating cantilever beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11):1647-1650(in Chinese).

- [10] QIAN K M, WANG H X, GAO W J. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: theoretical analyses [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(29):5408-5419.
- [11] ABID A Z, GDEISAT M A, BURTON D R, *et al.* Spatial fringe pattern analysis using the two-dimensional continuous wavelet transform employing a cost function [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(24):6120-6126.