

# 基于光纤干涉投影的傅里叶变换轮廓术应用研究

朱荣刚 朱日宏 宋倩 李建欣 李金鹏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 基于光纤干涉投影傅里叶变换轮廓术,提出了减小其测量物体形貌中误差的方法。在理论上分析了光纤干涉在接收屏上的光强分布,并通过分析得到其强度满足一定的高斯分布。在条纹预处理过程中对其进行光强校正,校正后的条纹频谱基频成分更加清晰。分析了条纹非正弦性引起的相位误差,在测量结果上对其进行补偿。通过仿真实验得出,经过所提出方法处理后的面形恢复精度比未处理前有了很大程度的提高。实物实验对给定标准件进行测量,验证了这种方法的正确性。

**关键词** 测量;光学测量;光纤投影;傅里叶变换;三维面形测量

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0708003

## Applied Research on Fiber-Optic Interferometer Projection of Fourier Transform Profilometry

Zhu Ronggang Zhu Rihong Song Qian Li Jianxin Li Jinpeng

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Techniques, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** To reduce the error in the measurement of object morphology, a method based on Fourier transform profilometry with optical fiber projection grating is proposed. The method analyzes the light intensity distribution that is projected on the receiver screen in theory. Its intensity meets certain Gaussian distribution by analyzing. The intensity correction is made in the process of fringe pretreatment and after correction the fundamental frequency components of stripes spectrum are clearer; the error that is brought by the non-sinusoidal stripe is compensated in the measurement of outcome. The simulation result shows that the accuracy of shape restoration has been greatly improved by the proposed method. The experiments on a standard object verify this method.

**Key words** measurement; optical testing; fiber optical projection; Fourier transform profilometry; 3D shape measurement

**OCIS codes** 150.0155; 150.1135; 330.4060; 330.7310

## 1 引 言

结构光照明光学三维面形测量(又称光学三维传感)方法由于其具有非接触、高精度、快速及易于在计算机控制下实行自动化测量等特点,被广泛应用于机器视觉、自动检测、质量控制、逆向工程和生物医学等领域<sup>[1,2]</sup>。其中以光纤干涉投影为手段的相干投影法是结构光测量的一种方式,其干涉条

纹具有良好的周期性和非定域性,且光纤本身具有体积小、抗电磁辐射能力强、灵敏度高的优点,被广泛推崇<sup>[3~6]</sup>。

基于光纤投影的测量方法,相位测量轮廓术(PMP)<sup>[3,5~7]</sup>和傅里叶变换轮廓术(FTP)<sup>[2,8]</sup>是目前常用的两种测量方法。PMP法具有计算速度快和测量精度高等优点。然而由于其受环境影响大,

**收稿日期:** 2013-01-06; **收到修改稿日期:** 2013-02-28

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(61108041)资助课题。

**作者简介:** 朱荣刚(1984—),男,博士研究生,主要从事光学干涉测量以及图像处理技术等方面的研究。

E-mail: ronggang1984@gmail.com

**导师简介:** 朱日宏(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事精密光学仪器理论与技术及光学图像的压缩与处理技术等方面的研究。E-mail: zhurihong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

很难实现准确移相,而且其测量过程需要采集多幅移相干涉图,因此很难实现动态测量。FTP法则仅需要一幅图像就可以恢复出物体三维面形,但是这种方法存在频谱泄漏,不能绝对真实地恢复面形,特别是在条纹的周期性和均匀性不好的情况下。因此本文的重点在于研究光纤干涉条纹的非周期性对FTP法的影响以及如何通过计算对其进行消除。

## 2 原 理

### 2.1 光纤干涉投影法原理

如图1所示,激光器发射的光经过3 dB耦合器后分成两路光,其中一路光经过偏振控制器与另一路光重合,由于这两路光投射出来的光场是相干的,其产生的光强分布可表示为

$$I(x, y) = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos(\theta_2 - \theta_1) \times \cos\left[-\frac{2\pi(ax + by)}{\lambda D} + \delta\right], \quad (1)$$

式中各变量意义如图2所示, $a$ 、 $b$ 表示两光纤的相对距离, $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 则分别是两光纤的偏振角, $\delta$ 表示初始相位角, $D$ 表示光纤发射端到接收屏之间的距离。

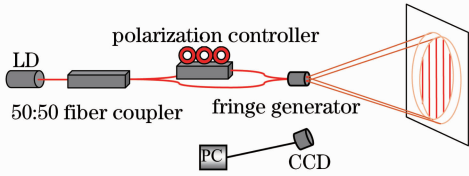


图1 条纹投影系统原理图

Fig.1 System diagram of fringe projection

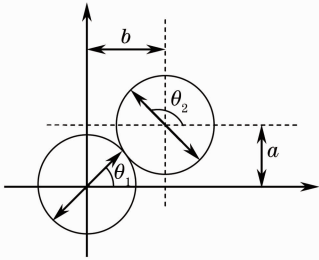


图2 两光纤出射端

Fig.2 Terminal of two fibers

一般情况下由3 dB耦合器分成的两路光具有相同的光强分布 $I_0(x, y)$ ,同时,将偏振控制器对比度调至最高,此时(1)式可表示为

$$I(x, y) = 2I_0(x, y) \left\{ 1 + \cos\left[-\frac{2\pi(ax + by)}{\lambda D} + \delta\right] \right\}. \quad (2)$$

光强 $I_0(x, y)$ 是光纤出射端沿光轴到物体上点所在截面的垂直距离 $z$ 及物体上点到光轴的距离 $r$ 的函

数。Takai等<sup>[9]</sup>提出其可表示为

$$I(r, z) = \frac{2a_0^2}{q^2} I_1 \exp\left(\frac{-2r^2}{q^2}\right), \quad (3)$$

式中 $q = \frac{\lambda z}{\pi \xi_0}$ ,这里的 $I_1$ 代表激光耦合到光纤中的光强, $a_0$ 为光纤半径, $\lambda$ 为光波长, $\xi_0$ 为散斑场的相干长度。由(3)式可知,光纤投影的干涉条纹分布并不均匀而是满足一定的高斯分布。

### 2.2 傅里叶变换提取相位原理

假设投影器投射 $x$ 方向周期性条纹,则由成像系统得到的变形条纹图可以记为

$$g(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_n \exp\{j[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\}, \quad (4)$$

式中 $f_0$ 表示条纹的基频, $r(x, y)$ 表示物体表面非均匀的反射率, $\phi(x, y)$ 是被测相位。

对(4)式进行傅里叶变换提取基频分量(一级谱),然后通过逆变换后得到

$$g_1(x, y) = r(x, y) A_1 \exp\{j[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\}. \quad (5)$$

则

$$2\pi f_0 x + \phi(x, y) = \text{Im}\{\ln[g_1(x, y)]\}, \quad (6)$$

式中 $\text{Im}$ 为取虚部操作, $\ln$ 为取自然对数。再对(6)式进行消倾斜,便得到相位 $\phi(x, y)$ 。

### 2.3 相位和高度关系

三维面形测量系统光路结构如图3所示。 $P$ 为投影光纤末端, $C$ 为CCD摄像机,两者之间距离为 $d_{PC}$ ,且位于同一水平高度 $h_C$ 。观测被测物体 $D$ 点,在没有放入物体时,CCD观测到的 $D$ 点实际上为参考面上 $B$ 点,此时测得相位为 $\varphi_B$ ;放入被测件后CCD观测到的 $D$ 点的相位则等同于没有放入物体时参考面上 $A$ 点的相位 $\varphi_D = \varphi_A$ 。因此,可求得

$$\overline{AB} = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{2\pi f} = \frac{\varphi_B - \varphi_A}{2\pi f} = \frac{\varphi_{AB}}{2\pi f}, \quad (7)$$

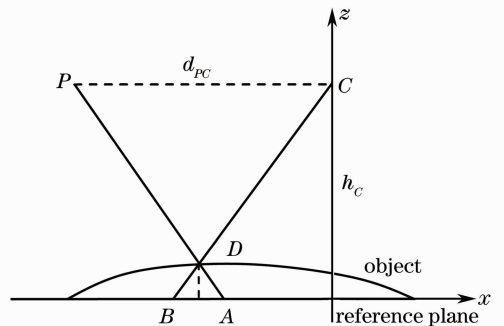


图3 结构示意图

Fig.3 Configuration schematic diagram

式中  $f$  为投影条纹的空间频率,  $\varphi_{AB}$  表示物体  $D$  点与参考面上  $A$  点的相位差。由  $\triangle ADB$  相似于  $\triangle PDC$ , 所以可测得  $D$  点高度为

$$h(x, y) = \frac{h_C \overline{AB}}{d_{PC}(1 + \overline{AB}/d_{PC})}. \quad (8)$$

实际光路中, 一般系统设计时使得  $d_{PC} \gg \overline{AB}$ , 此时

$$h(x, y) = \frac{h_C \overline{AB}}{d_{PC}} = \frac{h_C \varphi_{AB}}{2\pi f d_{PC}} = k \varphi_{AB}, \quad (9)$$

式中  $k = \frac{h_C}{2\pi f d_{PC}}$  是与光路结构有关的常数。

(9)式表达的是高度和相位差的关系, 而(6)式测量的是相位。可以先检测参考面的相位  $\phi_0(x, y)$ , 放入被测件后测的  $\phi(x, y)$ , 二者相减便是所求的相位差。实际上测量时常常不需要检测参考面相位, 由于参考面相位分布也是倾斜项, 所以, (6)式消倾斜的时候  $\phi_0(x, y)$  也同时被减去了。

### 3 仿 真

仿真一球冠, 半径  $r = 20$  mm, 高  $h = 10$  mm。仿真光源  $\lambda = 632.8$  nm, 条纹发射端光纤间距  $d = 125$   $\mu\text{m}$ , 到参考面中心距离  $D = 425$  mm, 入射角  $\theta = 0.3\pi$ , CCD 相机位于参考面中心正上方与条纹发射端持平位置。仿真得到的被高度调制后的条纹图如图 4 所示, 其中加入了高斯强度分布。

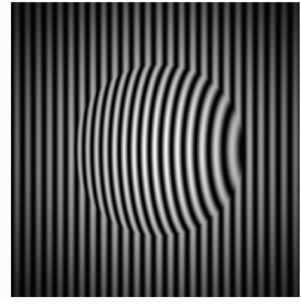


图 4 条纹高度调制后仿真图

Fig. 4 Simulation figure of height modulated fringe

#### 3.1 幅度校正

幅度校正通过计算光纤结构的光强分布对干涉图进行归一化, 在对光纤参数不明确的情况下, 也可以通过最小二乘求解的方法来求得强度分布中的参数  $q$  和  $a_0$ , 归一化后的干涉图如图 5 所示。图 6 是对幅度校正前后的干涉图频谱图, 可以看出幅度校正后的频谱零频旁瓣减弱, 抑制了频谱泄漏, 有利于基频成分的提取。

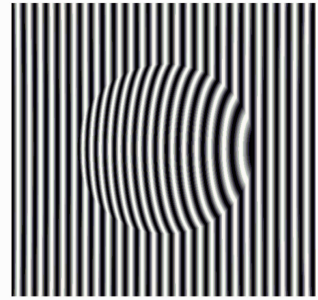


图 5 强度校正后条纹图

Fig. 5 Intensity corrected fringe

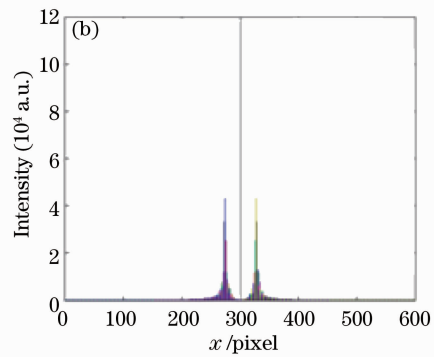
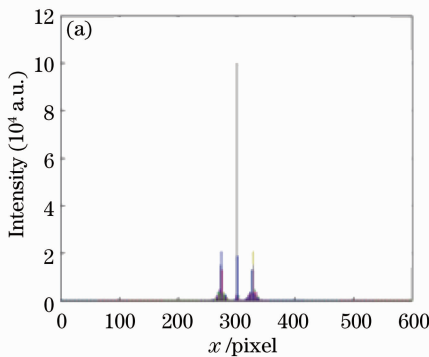


图 6 条纹频谱图。(a) 校正前; (b) 校正后

Fig. 6 Frequency spectra. (a) Before correction; (b) after correction

#### 3.2 相位校正

理论上参考面条纹如果满足绝对周期分布, 将不会存在误差。然而光纤在参考面上的干涉条纹显然不满足这一条件, 因此需要对这个检测到的相位值进行相位校正, 其具体过程为先通过光纤结构仿

真出背景相位分布  $\phi_B(x, y)$ , 然后通过实际检测的相位将此值减去。在仿真参考面相位分布  $\phi_B(x, y)$  可采用精度更高的四步移相法来处理。

图 7 为由移相算法得到的参考面相位畸变折算成高度误差  $Z_B(x, y)$  后的结果。图 8 则是校正前后

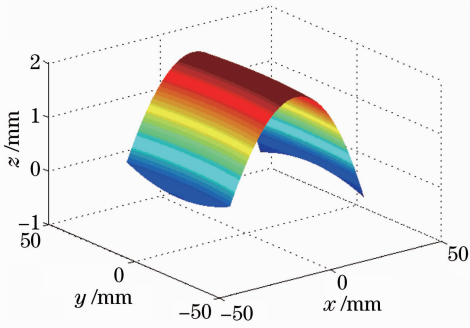


图 7 等效参考面高度误差

Fig. 7 Equivalent height error on reference surface

的面形,图 9 为  $y=0$  时的剖面图,由图 9 可以看出经过校正补偿后的面形更加接近原始面形。

## 4 实验和结果

实验结果如图 10 所示,其中图 10(a)是实际采集的图像,图 10(b)和图 10(c)是校正前的频谱及面形分布,图 10(d)校正后的最终面形分布。可以看出实物实验的参数与仿真实验中的一致,本文校正后的实验结果更能够体现面形的变化。

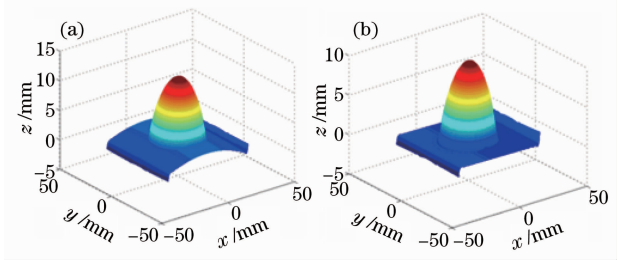


图 8 恢复面形。(a)校正前;(b)校正后  
Fig. 8 Recovered surface. (a) Before correction;  
(b) after correction

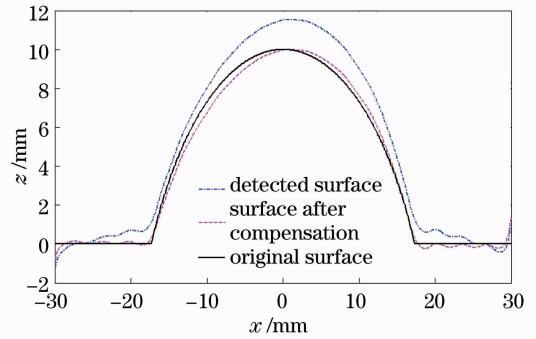


图 9 面形剖面图

Fig. 9 Cross section diagram

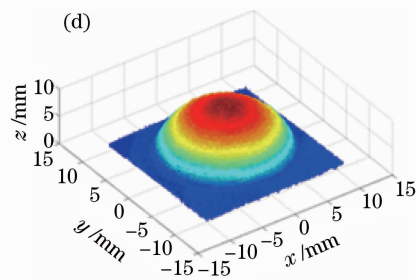
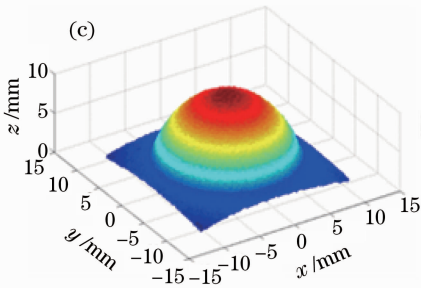
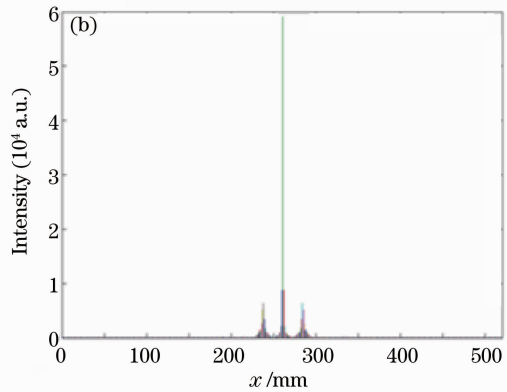
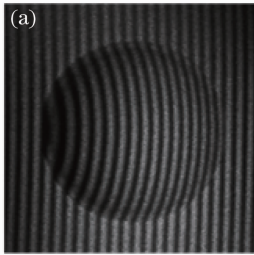


图 10 实物测量图。(a)面形调制条纹图;(b)条纹频谱;(c)校正前面形;(d)校正后面形

Fig. 10 Actual measurement of object. (a) Height modulated fringe; (b) frequency spectrum; (c) recovered surface before correction; (d) recovered surface after correction

## 5 结 论

本文详细分析了光纤干涉投影的条纹强度分

布,与理想投影条纹相比,此干涉条纹强度满足一定的高斯分布,且相比之下周期性较差。通过仿真实

验,对强度进行校正,校正结果显示其在一定程度上抑制了频谱泄漏;通过移相法计算出参考面上由于条纹非周期性引起的相位误差,并且将其等效为高度误差表示出来,在计算被测件的时候将其减去以实现相位补偿。仿真结果显示补偿后的面形更接近于原始面形。采取与仿真实验一样的参数进行的实物实验,进一步证实了这种补偿方法准确可行。

### 参 考 文 献

- 1 S. S. Gorthi, P. Rastogi. Fringe projection techniques: whither we are? [J]. *Opt. & Laser Eng.*, 2010, 48(2): 133-140.
  - 2 X. Su, W. Chen. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt. & Lasers in Eng.*, 2001, 35(5): 263-284.
  - 3 Fan Hua, Tian Feng, Tan Yushan. Three-dimensional profilometry using a single mode optical fiber phase-shifting method [J]. *Chinese J Lasers*, 1998, A25(2): 135-138.
- 范 华, 田 丰, 谭玉山. 单模光纤相移三维轮廓测量术[J]. 中

国激光, 1998, A25(2): 135-138.

- 4 Zhang Chao, Duan Fajie, Xing Minghao, *et al.*. Fiber-optic interferometer projection of real time Fourier profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0207001.
- 张 超, 段发阶, 邢明浩 等. 光纤干涉投射实时傅里叶轮廓术的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0207001.
- 5 F. Wu, H. Zhang, M. J. Lalor, *et al.*. A novel design for fiber optic interferometric fringe projection phase-shifting 3-D profilometry [J]. *Opt. Commun.*, 2001, 187(4-6): 347-357.
- 6 J. D. Valera, J. D. C. Jones. Phase stepping in projected-fringe fibre based moire interferometry [J]. *Electron Lett.*, 1993, 29(20): 1789-1791.
- 7 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. *Appl Opt.*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 8 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J Opt Soc Am*, 1982, 72(1): 156-160.
- 9 N. Takai, T. Asakura. Statistical properties of laser speckles produced under illumination from a multimode optical fiber [J]. *J Opt Soc Am A*, 1985, 2(8): 1282-1290.

栏目编辑: 何卓铭