

基于波长移相的光纤投影三维轮廓测量方法

毛心洁 何 勇 朱荣刚

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 提出了一种光纤干涉投影测量三维形貌的新方法。采用具有良好正弦性的光纤激光干涉条纹作为载波条纹进行投影,并且激光光源波长可调谐,通过精确控制电流源电流以改变激光波长来达到干涉条纹相位移的目的,进而通过移相算法可求解出相位值乃至被测物体的三维轮廓。实验中,相位提取采用重叠四步平均算法,其能够减小移相误差使得系统在50 mm口径范围下均方根值控制在30 μm 以内。

关键词 测量; 光纤投影; 波长移相; 三维面形测量

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101202

Fiber-Optic Interferometer Projection Based on Wavelength Phase-Shifting for Three-Dimensional Profile Measurement

Mao Xinjie He Yong Zhu Ronggang

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

Abstract A novel three-dimensional profilometry technique by optical fiber interference projection is presented. This technique uses fiber laser interference fringes with fine sinusoidal property as carrier fringes to project. Take the wavelength-modulated laser as the light source to make the purpose of interference fringe phase-shift by accurately changing the current. The phase and three-dimensional (3D) profile of object can be calculated by the phase-shifting algorithm. In this experiment, the repetitive deviation of object diameter under 50 mm is less than 30 μm root-mean-square by using overlapping averaging 4-frame algorithm.

Key words measurement; fiber optical projection; wavelength tuning; three-dimensional shape measurement

OCIS codes 150.0155; 150.1135; 330.4060; 330.7310

1 引言

条纹投影三维面形测量系统由于其非接触、测量速度快和系统成本低等特点被广泛地用于各种物体的轮廓测量中^[1-2]。其中相干投影法由于其干涉条纹具有非定域性以及绝对连续性而被广泛应用其中^[3-4]。本文采用的光纤干涉投影法是其中的一种方法,因其具有体积小、抗电磁辐射能力强和灵敏度高的优点而被广泛研究^[5-8]。

另外,在条纹投影测量中,相位信息直接与物体高度相对应,因此对相位的提取至关重要。在众多的相位检测算法中,移相法因具有解算速度快和精度高而被广泛推崇。传统的光纤干涉移相方法是将光纤的一条干涉臂缠绕在压电换能器(PZT)上,通过改变PZT两端电压来改变激光通过两干涉臂的光程差,因此可实现投射条纹的相位改变^[4,7]。然而由于光纤伸缩时本身的迟滞现象,以及移相过程中会被温度和环境扰动等因素干扰,会导致移相误差。本文参考主流移相干涉仪的移相原理,将先进的波长移相激光器引入到光纤干涉条纹投影测量中,得到较好的测试效果。

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-27; 网络出版日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(11473017)

作者简介: 毛心洁(1992—),女,硕士研究生,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: xinjiemao@126.com

导师简介: 何 勇(1966—),男,研究员,硕士生导师,主要从事干涉测量、光学精密测量方面的研究。

E-mail: heyong@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

2 原理

测量原理如图1所示:激光器发出的光经过50:50光纤耦合器后分成两路,分别进入干涉臂 l_1 和干涉臂 l_2 中,在干涉臂的末端两干涉臂紧密并排重合,两路光经过该末端投射到被测物体上,被CCD相机采集并由计算机进行处理分析。其中精密电流控制器用来改变激光器的波长进而改变光程差达到移相的目的。

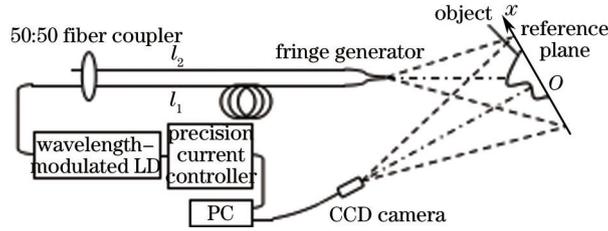


图1 测量原理图

Fig.1 Schematic of the measurement system

2.1 波长移相原理

若波长可调谐半导体激光器的中心波长为 λ_0 ,两干涉臂的光程差为 $n\Delta l$ (n 为光纤纤芯折射率, Δl 为光在两干涉臂中传输的实际路程差),则CCD采集的被物体高度调制的干涉图可表示为

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\left[\omega_0 x + \phi(x,y) + \frac{2\pi}{\lambda_0} n\Delta l\right], \quad (1)$$

式中 $\omega_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 表示条纹方向的空间频率, $a(x,y)$ 和 $b(x,y)$ 分别表示背景光强和条纹对比度, $\phi(x,y)$ 代表包含面形信息的条纹相位, $\frac{2\pi}{\lambda_0} n\Delta l$ 则是由于光程差引起的相位偏置。

如果移相器的步进距离为 $\Delta\lambda$, $\lambda_k = \lambda_0 + k\Delta\lambda$ 表示第 k 次激光波长改变后的波长值,则第 k 个采样干涉信号可表示为

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\left[\omega_k x + \phi(x,y) + \frac{2\pi}{\lambda_k} n\Delta l\right], \quad (2)$$

式中 $\omega_0 \approx \omega_k$, $\frac{2\pi}{\lambda_k} n\Delta l = \frac{2\pi}{\lambda_0 + k\Delta\lambda} n\Delta l \approx \frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0} - \frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0^2} k\Delta\lambda$,因此(2)式可以写成为

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos\left[\omega_0 x + \phi(x,y) + \frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0} - \frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0^2} k\Delta\lambda\right]. \quad (3)$$

(3)式与(1)式相比,相位移动了 $-\frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0^2} k\Delta\lambda$,通过对波长差 $\Delta\lambda$ 的精确控制可以得到需要的移相量。

此外, $n\Delta l$ 代表光通过两光纤的光程差,不容易获得其绝对值。因此在实际测量中需要进行标定,通过设定不同的 $\Delta\lambda$ 值来观察此时相位的变化量 $\Delta\phi$,对这两组数据进行直线拟合便可计算 $n\Delta l$ 所在项 $-\frac{2\pi n\Delta l}{\lambda_0^2}$ 的值。

2.2 重叠四步平均算法

重叠四步平均算法的具体原理及分析过程可参考文献[9],其具体的步骤可简述如下:

1) 条纹采集 $2M+3$ 幅(M 大于0),每幅图像光强分别记为 $I_i(i=1\sim 2M+3)$,且后一幅干涉图相对前一幅干涉图移 $\pi/2$ 相位;

2) 分别对第1~4幅,第2~5幅, ..., 第 $2M\sim 2M+3$ 幅图采取四步移相算法求取相位,相位求取公式如下:

$$\Phi_i = \arctan\left(\frac{I_{i+3} - I_{i+1}}{I_i - I_{i+2}}\right), (i=1\sim 2M). \quad (4)$$

3) 对 Φ_i 的 $2M$ 个相位值取平均得到相位 $\bar{\Phi}$,此相位值便是重叠四步平均算法解算相位的结果。

采用这种重叠四步平均算法,能够大大减少由于移相误差带来的相位复原偏差。

3 实验

现场实验装置如图2所示,其中激光器采用Newfocus中心波长632.8 nm的波长可调谐激光器,配置

Vortex 6000 型号控制器; CCD 相机采用微视 MVC1450 m 千兆网相机, 具有传输速度快特点。另外, 图中右下角展示了在暗室条件下实测过程。

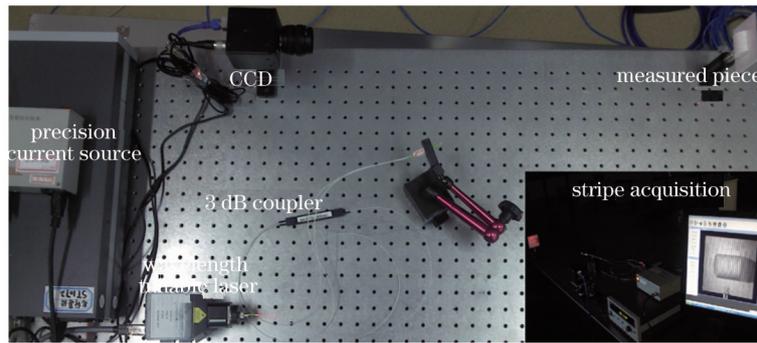


图2 实验实物装置图

Fig.2 Experimental device

首先对一标准件正四棱台进行测量, 其下底边长 40 mm, 上底边长 20 mm, 高 10 mm。采用波长可调谐激光器中心波长 λ_0 为 632.8 nm, 光纤间距 d 为 125 μm , 光纤投影角度和投影距离分别为 $\theta = 20^\circ$, $D = 500$ mm。因此条纹间距为 $\Delta x = \frac{D\lambda}{d \cos \theta} = 2.69$ mm。CCD 在被测区域的像素为 420 pixel \times 420 pixel。另外, 实验前首先对参考背景进行测试, 测试数据用来消除投影条纹的非线性给结果带来的误差^[6]。

测量如图 3 所示。图 3(a) 显示了测试过程中采集的 7 幅被物体形状调制的干涉图, 图 3(b) 表示图 3(a) 中每幅图的移相量曲线(图中画线位置)。通过曲线可以分析出, 移相器在标定过程中存在一定的误差, 而标定完成后每步的移相量保持高度一致。通过上面介绍的重叠平均算法, 以 7 步重叠平均为例, 6% 的标定误差带来了仅仅 1% 测量误差。图 4 是这一标准件的面形恢复结果, 其与实际值的偏差的均方根(RMS)值保持在 30 μm 以内。

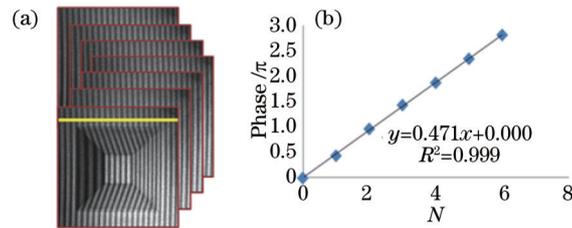


图3 (a) 移相条纹图; (b) 相位移动曲线;

Fig.3 (a) Deformed fringe of phase shift; (b) phase shift curve

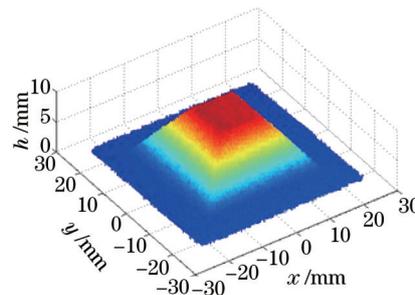


图4 标准件测试结果图

Fig.4 Result of the shape measurement of standard objects

由于波长移相技术已经被很好地应用在干涉仪测量中, 比如美国的 Zygo 公司 Metropro 软件能够直接应用在本测量装置中进行面形测量。由于知识产权问题, 采用了国内比较流行的南京英特飞光电科技有限公司研发的相位测量软件包 PhaseOne, 此软件包包含了 Metropro 大部分功能包括移相标定和测量功能。在本文装置下通过此软件包的测量结果如图 5 所示, 其包含了二维、三维面形图以及测试过程中条纹图和面形的峰谷(PV)值、RMS 值等等。结果显示这种方法对自由面形物体也具有很好的恢复效果。

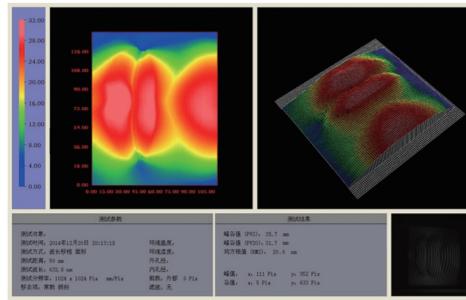


图5 PhaseOne软件界面下测试结果

Fig.5 Measurement results by PhaseOne

4 结 论

采用波长可调谐激光器作为光源,通过改变波长进而实现干涉条纹相位的改变,因此便可通过这种移相手段实现移相算法。这种方法与传统的应用PZT来改变相位的手段相比,具有抗干扰、无迟滞现象的优点,因此更容易实现相位标定和移相控制。实验过程中很好地恢复了被测件形貌,也验证了这种方法的优越性。

参 考 文 献

- 1 S S Gorthi, P Rastogi. Fringe Projection Techniques: Whither we are?[J]. *Opt & Lasers in Eng*, 2010, 48(2): 133-140.
- 2 Peng Xiang, Yin Yongkai, Liu Xiaoli, *et al.*. Phase-aided three-dimensional imaging and metrology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900120.
彭翔,殷永凯,刘晓利,等.基于相位辅助的三维数字成像与测量[J].*光学学报*, 2011, 31(9): 0900120.
- 3 V Srinivasan, H C Liu, M Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects[J]. *Appl Opt*, 1984, 23(18): 3105-3108.
- 4 Fan Hua, Tian Feng, Tan Yushan. Three-dimensional profilometry using a single mode optical fiber phase-shifting method[J]. *Chinese J Lasers*, 1998, 25(2): 135-138.
范华,田丰,谭玉山.单模光纤移相三维轮廓测量术[J].*中国激光*, 1998, 25(2): 135-138.
- 5 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.
- 6 Zhu Ronggang, Zhu Rihong, Song Qian, *et al.*. Applied research on fiber-optic interferometer projection of Fourier transform profilometry[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708003.
朱荣刚,朱日宏,宋倩,等.基于光纤干涉投影的傅里叶变换轮廓术应用研究[J].*中国激光*, 2013, 40(7): 0708003.
- 7 Fang Wu, Hong Zhang, Michael 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.
- 8 JD Valera, JDC Jones. Phase stepping in projected-fringe fibre based moire interferometry[J]. *Electron Lett*, 1993, 29(20): 1789-1791.
- 9 Zhu Rihong, Chen Jinbang, Wang Qing, *et al.*. A new algorithm on phase shifting interferometry- the overlapping averaging 4-frame algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(12): 1288-1293.
朱日宏,陈进榜,王青,等.移相干涉术的一种新算法:重叠四步平均法[J].*光学学报*, 1994, 14(12): 1288-1293.

栏目编辑:何卓铭