

文章编号:1004-4213(2010)11-2045-4

利用电子散斑相移技术测量物体三维面形的方法*

赵瑞冬, 孙平[†]

(山东师范大学 物理与电子科学学院, 济南 250014)

摘要:为了获得准确的面形测量,提出了一种相移电子散斑干涉技术测量物体面形的测量方法.利用电子散斑干涉产生载波条纹,该载波条纹受到物体表面高度的调制变得弯曲,引起载波条纹相位的变化,可运用相移技术提取物体的相位信息,最后根据高度和相位之间的关系得到物体的面形.介绍了该方法的原理,利用该方法对球冠物体进行了面形测量,证明该方法测量物体面形是可行性的.由于是采用散斑干涉的方法产生干涉条纹,因此该方法测量物体面形具有灵敏度高的优点.

关键词:物理光学;电子散斑干涉术;相移;面形测量

中图分类号:O348

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103911.2045

0 引言

随着计算机技术、电子技术、数字图像采集和处理技术的飞速发展,产生了电子散斑干涉术^[1].近年来由于电子散斑干涉技术具有操作简单、全场测量、非接触、高准确度、隔震要求低的特点,逐渐取代了传统的三维面形测量方法,成为一种较为成熟的光学三维面形测量技术^[2],并且在面形测量、变形测量^[3]中得到了广泛的应用.特别是在设备的无损检测、热变形测量以及口腔修复的应用中电子散斑干涉技术具有明显的优势.面形测量中,从光强分布中提取相位信息的相位测量技术是决定测量结果是否准确的关键技术之一,主要有傅里叶变换法和相移法.基于投影栅线的傅里叶变换法^[4]对比度高、易于动态处理,但测量准确度受投影栅线空间频率的限制,灵敏度不高.电子散斑干涉利用光的干涉产生载波调制条纹,不需要投影栅^[4]线,物体的相位信息包含在散斑颗粒内,形成以散斑为载体的干涉条纹,因而灵敏度也较高.本文利用电子散斑干涉测量物体面形,通过物体的微小偏转在物体表面产生载波条纹.由于受到物面的高度的调制载波条纹变得弯曲,采用相移技术提取物面三维面形信息.该方法用散斑干涉产生干涉条纹,因此测量物面具有灵敏度高的优点.

1 相移法相位测量原理

相移法^[5]测面形的基本原理是对干涉光路中两

束相干光之间的相位差引入等间隔的位移,相位差发生变化时,干涉条纹也作相应的平移,使干涉场中任意点的光强呈余弦变化移动.面形测量的关键技术之一是提取相位,按相位测量方法的不同,主要有傅里叶变换法和相移法,相移法分为时域法(Temporal Phase Measurement Methods)和空域法(Spatial Phase Measurement Methods)两大类.时域相移法是一种在时间轴上的逐点运算^[6],因此调制点容易分离,不会造成全面影响.本文用时域相移法^[7]测量物体面形.

散斑干涉形成的干涉条纹是物光和参考光相叠加而成的,物光和参考光的光振动分别表示为

$$E_{ob} = A_{ob} \cos(\omega t + \varphi_{ob}) \quad (1)$$

$$E_{ref} = A_{ref} \cos(\omega t + \varphi_{ref}) \quad (2)$$

式中, A_{ob} 和 φ_{ob} 分别表示物光的振幅和相位, A_{ref} 和 φ_{ref} 分别表示参考光的振幅和相位.参考光和物光叠加以后的光振动可以表示成

$$E = E_{ob} + E_{ref} = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

其合振幅的平方为

$$A^2 = A_{ob}^2 + A_{ref}^2 + 2A_{ob}A_{ref} \cos(\varphi_{ob} - \varphi_{ref}) \quad (4)$$

因此干涉场的光强为

$$I = \overline{A^2} = A_{ob}^2 + A_{ref}^2 + 2A_{ob}A_{ref} \cos(\varphi_{ob} - \varphi_{ref}) \quad (5)$$

即

$$I(x, y, t) = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)} \cos \varphi(x, y) \quad (6)$$

当参考面是平面时,假定其相位等于零, $\varphi(x, y)$ 是物面与参考面的相位差,也就是待测物体的相位.物面上接有相移器,可对物面施加相移使参考光和物光的光程差发生改变,进而引起参考光和物光

* 山东省自然科学(Y2008G18)基金资助

[†] Tel:0531-86182521 Email:sunpingmail@163.com

收稿日期:2010-05-18

修回日期:2010-07-06

的相位差的改变,此时干涉场的光强为

$$I(x, y, t) = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\varphi(x, y) + \delta(t)] \quad (7)$$

施加相移以后,参考光和物光的相位差由物体的相位和相移器引入的附加相位共同决定, $\delta(t)$ 是相移器引入的相位.若对物面做四步相移,令每次的相移量为 $\delta_i(t)$,引入相移后参考光和物光的相位差就会发生相应的变化,由于测量不可避免的要产生误差,采用满周期等间距引入相移时误差最小,所以每步的相移量为 $\delta_i = 2\pi/N, N=4$,因此相移量为均为 $\pi/2$,做四步相移后干涉场光强分别为

$$I_1 = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\varphi(x, y)] \quad (8)$$

$$I_2 = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\varphi(x, y) + \pi/2] \quad (9)$$

$$I_3 = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\varphi(x, y) + \pi] \quad (10)$$

$$I_4 = I_{ob}(x, y) + I_{ref}(x, y) + 2\sqrt{I_{ob}(x, y)I_{ref}(x, y)}\cos[\varphi(x, y) + 3\pi/2] \quad (11)$$

将表示参考面的光强图与做四步相移以后的表示物面的光强图分别相减^[8],得到的光强图里的相位只包含物体的相位信息和相移器引入的附加相位,而把参考面减掉了,因此可以求出物体的相位为 $\varphi = \arctan[(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)]$ (12)

由相移法得到的相位是包裹在 $(\pi, \pi]$ 范围内的相位主值,必须利用相位展开算法^[9]展开得到物面的真实相位才能做进一步处理,恢复三维轮廓.

2 电子散斑干涉测量物体面形原理

图 1 中, L 和 C 分别是激光器和 CCD 的光心,两者相距 d . $C-L$ 连线与参考面平行,且相距 s . 当被测物不存在时,激光直接投射到参考面上,参考光和物光的干涉条纹是相互平行的,当有被测物时,干涉条纹变形.如果原来条纹的位置在 B 处,由于物体

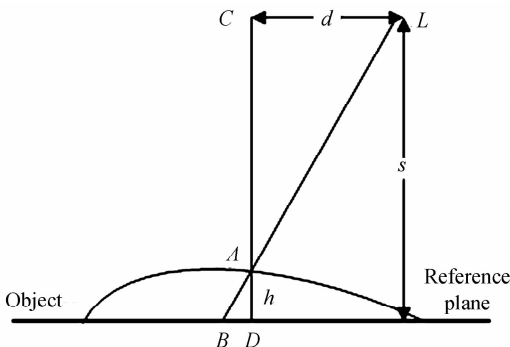


图 1 电子散斑干涉测量物体面形的光路
Fig. 1 Shape measurement system of ESPI

的遮挡,移到物体的 A 点,而由 CCD 观察到的 A 点的位置在 D 点上. 因此由于物体的遮挡产生了 BD 距离的光程差,对应的相位差为 φ 只要得到物面上每一点产生的相位差就可以算得全场的高度分布^[10] $h(x, y)$. 由相似三角形得

$$h = \varphi \lambda s / (2\pi d + \varphi \lambda) \quad (13)$$

式中 φ 是物体的相位. $\varphi = \varphi_D - \varphi_B$, 这样就把相位分布转化成了高度分布.

3 实验

实验采用如图 2 所示的电子散斑干涉系统测量物体的表面面形. 被测物为一小球球冠,用 He-Ne 激光作为光源经扩束镜后照射在球冠表面上. 球冠固定在一个可以在竖直平面内做微小转动的参考平板上,平板与相移器连接实现相移,参考光和物光经过方镜棱镜后在 CCD 光轴上实现同轴干涉,偏转调制物面,通过 CCD 可以看到图 3 的明暗相间的干涉条纹. 因物体表面具有一定的高度使得条纹变得弯曲,物体的高度信息包含在弯曲的干涉条纹里. 当入射角度越大,参考光光强和物光光强越接近时,条纹弯曲越明显,条纹对比度越好,测量效果也就越好.

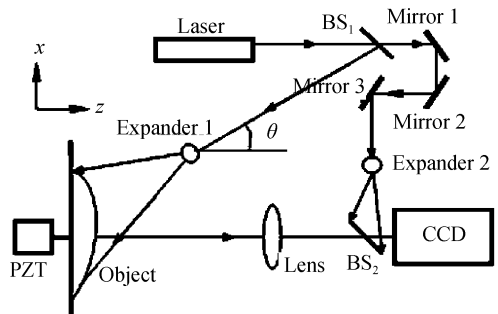


图 2 电子散斑干涉系统测量物体面形光路图
Fig. 2 Setup of shape measurement by ESPI



图 3 偏转物面引入的干涉条纹
Fig. 3 Interference fringe pattern introduced by tilting object

对得到的干涉条纹做等四步相移,这些明暗相间的干涉条纹会根据所加相移的大小做一定的平移. 利用相移技术可以提取出物面的相位信息,得到图 4 所示的包裹相位图. 由于相位被包裹在 $(\pi, \pi]$

之间,需要用四步相位展开算法把相位连续化求出球冠的真实相位,如图 5. 根据相位和高度的映射关系式(13)可得出物面的高度分布. 图 6 是由相移法得到的球冠的网格图,图 7 是物面的等高线图.

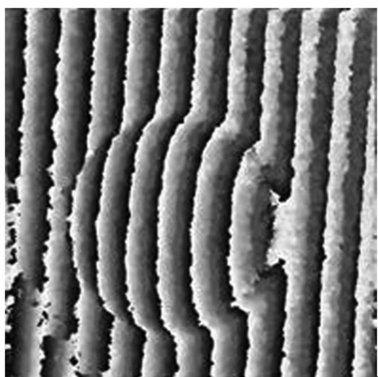


图 4 包裹相位图
Fig. 4 Wrapped phase pattern

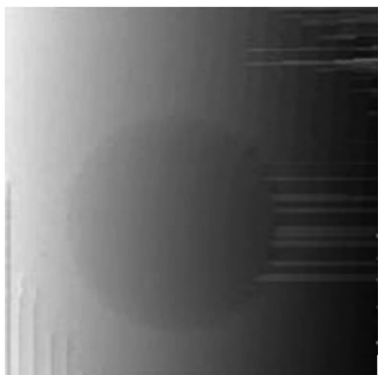


图 5 解包裹相位图
Fig. 5 Unwrapped phase pattern

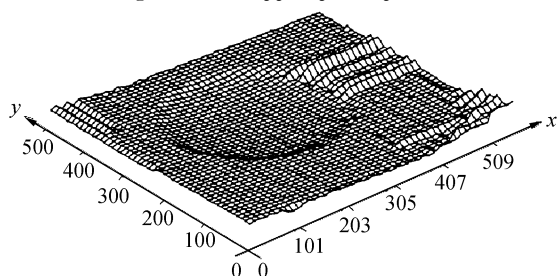


图 6 相移法得到的三维面貌
Fig. 6 3-D shape by phase-shifting measurement method

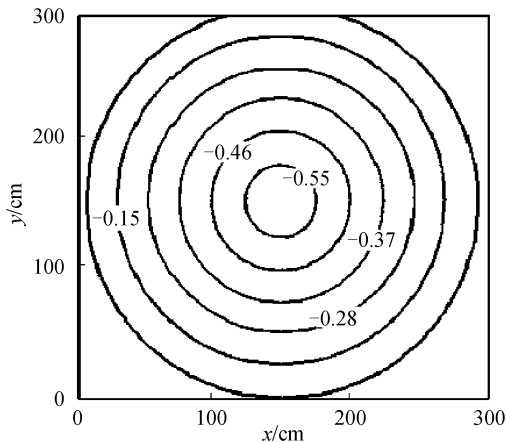


图 7 物面等高线图
Fig. 7 Contour of altitude field of object's surface

由实验结果可以看出,利用电子散斑干涉相移法可以测量物体的表面面形. 该实验用电子散斑干涉产生载波调制条纹,即使条纹稀疏也能经精确解调出物体的相位,因此测量准确度较高. 但由于相移装置的系统误差,使测量结果受到一定的影响.

4 结论

利用电子散斑干涉在物面上产生载波条纹,该载波条纹受到物体表面高度的调制变得弯曲,引起载波条纹相位的变化. 运用相移技术定量提取物体高度的相位信息,根据高度和相位之间的关系得到物体的面形. 理论分析和实验表明,相移电子散斑干涉技术可以测量物体面形. 由于是采用散斑干涉的方法产生干涉条纹,因此该方法测量物体面形具有灵敏度高的优点,由于采用相移技术提取相位信息,测量准确度也高.

参考文献

- [1] SUN Ping, ZHANG Xi. Study on phase-shifting techniques in ESPI[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2001, **12**(11): 1174-1176.
孙平,张熹. 电子散斑干涉中相移技术研究[J]. *光电子·激光*, 2001, **12**(11): 1174-1176.
- [2] SONG Peng, LIU Rui-jin, LÜ An-yan, *et al.* Analysis of the shape measurement by carrier modulation in electronic speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(3): 472-476.
宋鹏,刘瑞金,吕安延,等. 电子散斑干涉载频调制形貌测量方法分析[J]. *应用光学*, 2009, **30**(3): 472-476.
- [3] SUN Ping, LI Ai-hua, ZHANG Li, *et al.* Three-dimensional displacement measurement in electronic speckle pattern interferometry by using reversed phase calculation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 193-196.
孙平,李爱华,张丽,等. 在电子散斑干涉中利用反相位法进行三维变形测量[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 193-196.
- [4] CHEN Wen-jing, SU Xian-yu, CAO Yi-ping, *et al.* Improved FTP based on bi-color fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1153-1157.
陈文静,苏显渝,曹益平,等. 基于双色条纹投影的快速傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1153-1157.
- [5] QU Fang, ZHONG Jin-gang. Digital phase shifting technique application to surface profiling of discontinuous objects[J]. *Optical Technique*, 2004, **30**(4): 478-483.
曲芳,钟金刚. 数字相移技术用于不连续复杂物体的三维面形测量[J]. *光学技术*, 2004, **30**(4): 478-483.
- [6] WANG Jun, BAO Hai-ming, WEI Zhong-hui, *et al.* Review of the 3D information measuring technology [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, **17**(6): 12-15.
王军,鲍海明,魏仲慧,等. 光学形貌测量技术综述[J]. *光电子技术与信息*, 2004, **17**(6): 12-15.
- [7] KAUFMANN G H, GALIZZI G E. Phase measurement in temporal speckle pattern interferometry: comparison between the phase-shifting and the Fourier transform methods[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(34): 7254-7263.
- [8] LIU Cheng, YAN Chang-chun, GAO Shu-mei. Improved carrier-wave electric speckle interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 214-217.

- 刘诚, 阎长春, 高淑梅. 一种改进的载波电子散斑干涉处理方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(2): 214-217.
- [9] KAO C C, YEH G B, LEE S S, *et al.* Phase-shifting algorithms algorithms for electronic speckle pattern interferometry[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(1): 46-54.
- [10] WU Shuang-qing, ZHANG Yin, ZHANG San-yuan, *et al.*

Analysis of three-dimensional measurement system and the coordinates calibration in fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2780-2785.

吴双卿, 张引, 张三元, 等. 傅里叶变换轮廓术物体三维形貌测量的系统分析及其坐标校准方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2780-2785.

Shape Measurement Based on Phase-shifting Electronic Speckle Pattern Interferometry

ZHAO Rui-dong, SUN Ping

(College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: In order to obtain accurate measurement of 3-D shape, a shape measurement method using phase-shifting electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is proposed. A carrier pattern on the object surface is produced by electronic speckle pattern interferometry. The carrier pattern is curved because of the modulation of the altitude of the object surface, which causes the changes of the phase of the carrier pattern. Then the phase changes of the object surface can be extracted by phase-shifting algorithms. Finally the shape of the object surface can be derived by the relationship between the phase changes and the altitude of the surface. The principle of the proposed method is introduced. Surface of a small ball is tested using the method. The experimental results prove that the phase-shifting electronic speckle pattern interferometry is useful for the measurement of an object surface, and indicate that the method has the virtue of high sensitivity because the carrier pattern is produced by electronic speckle pattern interferometry.

Key words: Physical optics; Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI); Phase-shifting; Shape measurement



ZHAO Rui-dong was born in 1985. Now, she is a M. S. degree candidate and her research interests focus on shape measurement of object based on electronic speckle pattern interferometry.



SUN Ping received his Ph. D. degree from Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute in 2003. He currently works as an associate professor and his research interests focus on digital image processing, shape measurement of thin shells, nondestructive testing, and experimental stress analysis.