

文章编号: 1002-2082(2008)06-0874-04

基于迈克尔逊干涉的傅里叶变换 散斑形貌测量技术

马志芳¹, 高秀梅², 孙平¹

(1. 山东师范大学 物理与电子科学学院, 山东 济南 250014;
2. 济南市铁道职业技术学院 电气工程系, 山东 济南 250013)

摘要: 提出了电子散斑干涉载频调制测量物体形貌的方法。采用典型的迈克尔逊干涉光路, 将物体偏转一微小角度(等效为物面与参考面间形成空气楔)产生等厚干涉, 可在物体的表面引入包含物体高度信息的载波干涉条纹。用CCD采集该载波条纹图, 利用傅里叶变换法可解调出物体高度的位相信息, 从而实现物体的形貌测量。介绍了电子散斑干涉载频调制测量物体形貌的原理, 并进行了实物测量, 给出了实验结果。由于该方法采用散斑干涉方法测量物体形貌, 所以具有灵敏度高的优点。

关键词: 物理光学; 电子散斑干涉; 形貌测量; 傅里叶变换; 迈克尔逊干涉

中图分类号: TN206; O348

文献标志码: A

Fourier-transform speckle profilometry based on Michelson interference

MA Zhi-fang¹, GAO Xiu-mei², SUN Ping¹

(1. College of Physics and Electronics, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;
2. Department of Electrical Engineering, Jinan Railway Polytechnic, Jinan 250013, China)

Abstract: A method of shape measurement based on ESPI carrier-frequency modulation is presented. In the typical setup of Michelson interferometer, turning the tested object a small angle generates an air wedge between the object plane and the reference plane. The wedge produces equal thickness interference fringes. A carrier fringe pattern containing height information is formed on the object surface. The carrier fringe pattern is captured by a CCD camera. The phase of the object can be derived by Fourier transform and the shape measurement is realized. The principle of the method is described and the experiment results are given. The results indicate that the method has the virtue of high sensitivity because speckle pattern interferometry is used.

Key words: physical optics; electronic speckle pattern interferometry (ESPI); shape measurement; Fourier transform; Michelson interference

引言

高效率的特点,它在机器人视觉、自动加工、实物模型、工业检测、生物医学等领域有着重要的应用价

光学三维形貌测量技术具有非接触、高精度、

收稿日期: 2008-03-10; 修回日期: 2008-04-15

基金项目: 山东省科技攻关项目(2007GG20004002)

作者简介: 马志芳(1983—),女,山东人,山东师范大学物理与电子科学学院硕士研究生,主要从事散斑、投影光栅形貌测量等研究工作。E-mail: sunpingmail@sohu.com

值和广阔的应用前景。其中基于光学投影的相位测量方法更是近年来人们研究的热点之一, 主要有傅里叶变换法^[1-3]、相移法^[4-7]、形貌影栅云纹法^[8]和投影光栅法^[9]。投影光栅法的优点是测量范围调节方便, 受环境条件的影响比较小, 测量精确度较高, 但形貌的测量精度依赖投影栅线的空间频率, 对小物体和微小物体的测量灵敏度不高。

电子散斑干涉测量技术具有非接触、全场性、精度高和隔震要求低的特点, 被广泛用于动态或静态物体变形测量^[10-11]。电子散斑干涉中物体偏转微小角度可引入散斑载波条纹, 结合傅里叶变换法进行位移测量, 具有灵敏度高等优点^[12]。本文将该技术应用于物体的形貌测量, 采用典型的迈克尔逊干涉光路, 利用散斑干涉原理测量物体的形貌, 测量灵敏度大大提高。基本原理是: 物体所在平面偏转一微小角度后, 物面与参考面间形成等效的空气楔, 产生等厚干涉。在物体表面引入包含物体高度信息的载波干涉条纹, 结合傅立叶变换法实现物体形貌测量。该方法仅需一幅散斑图像, 操作相对简单, 不需要投影栅线, 由于是基于光的干涉, 测量灵敏度高。

1 物体面形的傅里叶变换载波调制原理

图1为典型的迈克尔逊干涉光路。He-Ne激光器发出的激光束经扩束镜扩束后, 再由半透半反分光棱镜BS分为2束光; 一束垂直照射到被测物的表面, 形成物光; 另外一束垂直照射到参考面上, 形成参考光。物光和参考光分别经反射和透射后在CCD靶面上叠加相干。

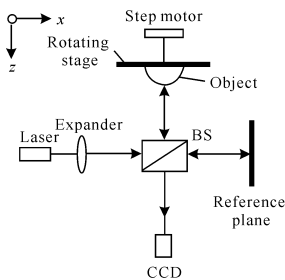


图1 电子散斑干涉测量物体面形的光路图

Fig. 1 Beam path of shape measurement with ESPI

将物体粘贴在能够作微小偏转的平台(平台由步进电机控制)上, 可实现平台的精密偏转。通过平台的旋转带动物体偏转(以下称粘贴有物体的偏转

平台面为物面)。由于物光和参考光垂直照射物面和参考面, 因此该装置对离面位移敏感, 当物面转动一微小角度 $\Delta\alpha$ 后, 引入了离面位移 w 。离面位移产生的相位变化可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi w}{\lambda} \quad (1)$$

物体偏转后生成载波条纹, 而在物体表面上则包含物体高度信息的弯曲条纹。通过CCD采集一幅载波条纹图, 利用傅里叶变换法可以解调出物体高度的相位。

由迈克尔逊干涉仪特点可知, 当物面和参考面完全垂直时, 所得到的干涉为等倾干涉; 当物面转动一微小角度 $\Delta\alpha$ 后, 物面与参考面不完全垂直, 可等效为在二者之间形成一个空气楔(楔角为 $\Delta\alpha$), 产生等厚干涉, 干涉图样为等间距分布的亮暗相间的直条纹。

由等厚干涉的性质可得相邻两条纹的间距:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\Delta\alpha} \quad (2)$$

进而得到干涉条纹的频率:

$$f_0 = \frac{1}{\Delta L} = \frac{2\Delta\alpha}{\lambda} \quad (3)$$

式中: $\Delta\alpha$ 为物面偏转角度(即等效空气楔的楔角); λ 是所用激光的波长。

物面偏转在 x 轴方向引入频率为 f_0 的载波。在粘贴有物体的区域, 由于物体具有一定高度而使得载波条纹发生弯曲。如图2所示, 物体粘贴在参考平面上, 参考平面绕 o 点转动。以参考平面为零高度, 设 $p(x, y, z)$ 为物体上任一点, 则该点高度为 z , 与物体表面法线的夹角为 α 。当物面转动一微小角度 $\Delta\alpha$ 后, 物体上任一点 $p(x, y, z)$ 转到 $p'(x', y', z')$ 点, 则有 $op = op'$ 。

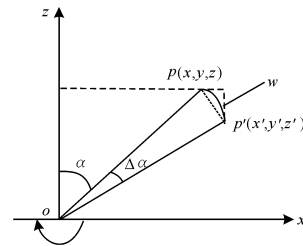


图2 离面位移及其与物体高度关系的几何示意图

Fig. 2 Geometry diagram of out-of-plane displacement and its relation to height of object

物面转动引起的坐标变化 Δz , 相当于物体变形的离面位移 w 。由图2中的三角形几何关系可得:

$$\Delta z = z - z' = w \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 op &= \frac{z}{\cos \alpha} \\
 op' &= \frac{z'}{\cos(\alpha + \Delta\alpha)} \\
 \Delta z &= op[\cos \alpha - \cos(\alpha + \Delta\alpha)] = \\
 &= \frac{2z\sin \Delta\alpha/2\sin(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha} \quad (5)
 \end{aligned}$$

联立(4)式和(5)式可得到物体的离面位移与物面上任一点的高度关系:

$$w = \frac{2z\sin(\Delta\alpha/2)\sin(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\cos \alpha} \quad (6)$$

由(1)式和(6)式可得物体高度引起的相位变化为

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi z\sin(\Delta\alpha/2)\sin(\alpha + \Delta\alpha/2)}{\lambda \cos \alpha} \quad (7)$$

式中: z 是物体上任一点的高度; α 是物体上一点与物体表面法线的夹角; $\Delta\alpha$ 是物体偏转角度。

干涉条纹场经线性调制后,变成密集的、含有物面高度信息的载波条纹。受调制的载波条纹可表述为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= a(x, y) + b(x, y)\cos\Delta\varphi(x, y) = a(x, \\
 &= y) + b(x, y)\cos[2\pi f_0 x + \Delta\varphi(x, y)] \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中: $a(x, y)$ 为背景光强; $b(x, y)$ 为条纹幅值; $b(x, y)/a(x, y)$ 称为条纹对比度; $\Delta\varphi(x, y)$ 为物体的高度差引起的相位变化,即待求位相,它们都是空间位置的函数; f_0 是物体偏转引入的沿 x 轴方向的空间频率。

干涉条纹经调制后形成携带着物体高度信息的载波条纹,由(8)式知条纹的相移量仅随空间变化。利用欧拉公式将其变为

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= a(x, y) + c(x, y)\exp(j2\pi f_0 x) + \\
 &= c^*(x, y)\exp(-j2\pi f_0 x) \quad (9)
 \end{aligned}$$

式中 $c(x, y) = \frac{1}{2}b(x, y)\exp[j\Delta\varphi(x, y)]$ 。

在 x 方向上对(8)式进行傅里叶变换,得到:

$$\begin{aligned}
 H(f_x, y) &= A(f_x, y) + C(f_x - f_0, y) + \\
 &= C^*(f_x + f_0, y) \quad (10)
 \end{aligned}$$

利用适当带通的滤波器将 $A(f_x, y)$ 和 $C^*(f_x + f_0, y)$ 滤掉,得到 $C(f_x - f_0, y)$ 项,并将其移到原点变为 $C(f_x, y)$,再对其作逆傅里叶变换得到 $c(x, y)$,于是可得到的相位分布为

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \quad (11)$$

(11) 式中 Re 和 Im 分别表示复数的实部和虚部。

2 典型实验

被测物体为一球冠,如图3所示。球冠的直径

为 22.2 mm,高度为 6.0 mm,粘贴在参考平面上。利用图1所示系统进行实验,He-Ne 激光经扩束镜后照明被测物,扩束镜为 40× 的显微镜头,距离被测物约 1.0 m。由于被测物较小,扩束镜较远,故可近似认为入射的照明光为准直光束。当转动平台转动角度 $\Delta\alpha (< 50^\circ)$ 后,在物体表面形成明暗相间的载波条纹。因物体表面具有一定的高度使得条纹发生弯曲,物体的高度信息包含在弯曲的载波条纹里。图4为物体偏转后在物体表面形成的载波条纹。应用傅里叶变换法,可由一幅载波条纹图解调出含有高度信息的包络相位图,如图5所示。经连续化运算可得到去包络后的相位图,再根据(7)式将相位转化为物面的高度,可得出物面的高度分布,球冠的三维高度网络图如图6所示。

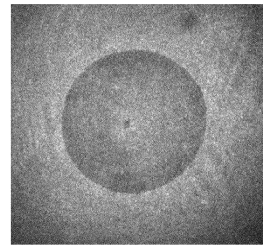


图3 被测物体
Fig. 3 Tested object

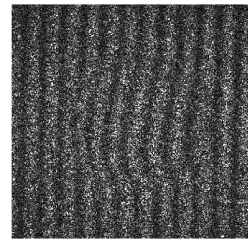


图4 偏转物面引入的载波条纹
Fig. 4 Carrier fringe pattern introduced by deflection plane

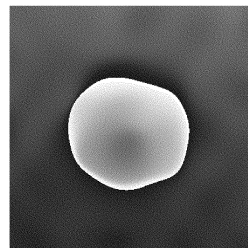


图5 解调出的包络位相图
Fig. 5 Envelope phase pattern obtained by demodulation

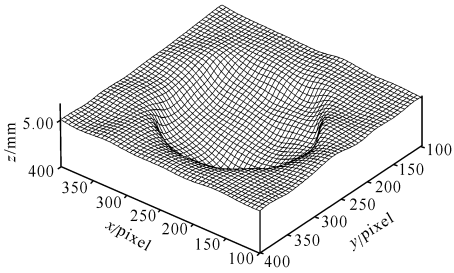


图6 物体的三维网格图

Fig. 6 3-D grid chart of object

3 结论

理论分析和实验证明,在基于迈克尔逊干涉光路的电子散斑干涉技术中,通过偏转物体可以方便地引入一定频率的载波,结合傅里叶变换可以实现较高精度的形貌测量。步进电机控制偏转角度的大小可实现不同空间频率及测量灵敏度的调制。该方法只需采集一幅散斑图像,操作相对简单,且测量灵敏度较高。由于实验要求测量物体满足散斑干涉近似条件,因此必须是小物体。当测量大物体的形貌时,该方法受到限制。

参考文献:

[1] TAKEDA T, MUTOH K. Fourier transform profilometry the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Appl. Opt., 1983, 22(4):3977-3982.

[2] LI J, SU X Y, GAO L R. An improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes[J]. Opt. Eng., 1990, 29(12):1439-1444.

[3] SPAGNOLO G S, GUATTARI G, SAPIA C, et al. Contouring of artwork surface by fringe by fringe projection and FFT analysis [J]. Opt. Laser Engng., 2000, 33(2):141-146.

[4] HE X, ZOU D, LIU S, et al. Phase-shifting analysis in Moiré interferometry and its application in electronic packaging[J]. Opt. Eng., 1998, 37(5): 1410-1319.

[5] SU X Y, VON B G, VUKICEVIC D. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex object evaluation [J]. Opt. Commun., 1993, 98(1-3): 141-150.

[6] SRINIVASAN V, LIU H C, HALIOUA M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse object[J]. Appl. Opt., 1984, 23(18):3105-3108.

[7] 徐建强,王蕴珊,司书春,等. 三维形貌测量的扫描相移法研究[J]. 光子学报, 2004, 33(10):1210-1213.
XU Jian-qian, WANG Yun-shan, SI Shu-chun, et al. Study on scan-phase-shifting profilometry for measurement of 3-D object shapes [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(10): 1210-1213. (in Chinese)

[8] 杨福俊,何小元,孙伟. 基于液晶显示投影技术的数字影栅云纹相移实现方法[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1057-1061.
YANG Fu-jun, HE Xiao-yuan, SUN Wei. Digital shadow Moiré method with phase-shifting based on liquid crystal display projector [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8):1057-1061. (in Chinese)

[9] 孙平,张丽,陶春先. 基于LCD数字投影技术的傅里叶变换法测量物体三维形貌[J]. 光子学报, 2005, 34(8):1250-1252.
SUN Pin, ZHANG Li, TAO Chun-xian. 3-D shape measurement with Fourier transform based on LCD projector[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(8): 1250-1252. (in Chinese)

[10] 范华,宋元鹤,谭玉山. 利用激光偏振特性的电子散斑面内全场位移测量技术的研究[J]. 中国激光, 1999, 26(2):127-130.
FAN Hua, SONG Yuan-he, TAN Yu-shan. Study on ESPI technique for simultaneous measurement of whole in-plane displacement with the polarization of laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(2): 127-130. (in Chinese)

[11] 孙平,韩青,王晓凤. 载频调制大剪切电子散斑干涉系统[J]. 应用光学, 2006, 27(5):380-384.
SUN Ping, HAN Qing, WANG Xiao feng. Large-shearing electronic speckle pattern interference system with carrier-frequency modulation technique [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5): 380-384. (in Chinese)

[12] 孙平,陶春先,张丽,等. 电子散斑干涉场的空间调制与解调技术[J]. 光电子激光, 2005, 16(9):1093-1096.
SUN Ping, TAO Chun-xian, ZHANG Li, et al. Spatial modulation and demodulation for electronic speckle patterns [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(9):1093-1096. (in Chinese)