

文章编号:1004-4213(2010)s1-0019-4

数字散斑干涉术物体形变测量

董会,周岩,郭俊,张婉怡,王文生

(长春理工大学 现代光学测量技术研究室,长春 130022)

摘 要:基于数字散斑干涉术测量物体形变的原理,研究了物体面内位移及变形的测试技术.采用电荷耦合器件记录变形前后的两幅散斑图,取代传统散斑干涉术中的记录干板,省去传统方法中干板显影、定影的繁琐的化学湿处理过程.分别用菲涅尔散斑和像面散斑方法获得散斑干涉图,用相减技术得到含有物体形变信息的散斑干涉条纹.设计高斯低通滤波器,对干涉条纹进行处理,提高了干涉条纹的对比度.提出扫描条纹中心行方法,由条纹中心行一维位相分布获得一维物面变形,实现了散斑干涉条纹的自动判读.试验表明,该方法简洁且实用.

关键词:数字散斑干涉术;形变测量;数字滤波器;一维形变

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0019

0 引言

目前,数字散斑干涉术(Digital Speckle Pattern Interferometry, DSPI)被广泛的用于振动测量^[1],高温物体的位移测量^[2]和热变形测量^[3],应变^[4-6]中有广泛的应用,在工业生产和国防科技领域中有很高的研究推广价值.传统的数字散斑干涉术对得到的干涉条纹图采用相移法(三步相移法、四步相移法)再解包裹得到相位图^[7],比较复杂,处理时间长.基于散斑干涉条纹中心行具有物面变形的最大信息的原理,本文提出一维条纹中心行方法,对得到的干涉条纹图进行高斯低通滤波处理,再扫描条纹中心行,得到一维灰度分布,由此得到一维位相分布,该方法简单、高效,实现了散斑干涉条纹的自动判读,从而实现变形测试或物面定位.

1 数字散斑干涉术测量原理

当一束激光照射在光学粗糙表面上,由于表面漫反射的光发生干涉后将产生许多随机分布的亮暗斑点,光强分布为 $U_0(r) = u_0(r) \exp \phi_0(r)$, 式中 $u_0(r)$ 是光波的振幅, $\phi_0(r)$ 是经物体漫反射后的物体光波的相位.除了物光波外,散斑干涉术也需要有参考光波与其合成,其参考光是一个固定不变的散斑图,由于在物体变形前后它都保持不变,故可以将其看作参考波,它的光强分布为 $U_R = u_R(r) \exp \phi_R(r)$. 这两束光在电荷耦合器件(Charge Coupled

Device, CCD)上形成的光强 $I(r)$ 为 $I(r) = u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cos(\phi_0 - \phi_R)$. 当被测物体发生变形后,表面各点的散斑场振幅 $u_0(r)$ 基本不变,而位相 ϕ_0 改变 $\phi_0 - \Delta\phi(r)$, 即 $U_0'(r) = u_0(r) \exp[\phi_0(r) - \Delta\phi(r)]$, 变形前后的参考光波保持不变.这样,位移后的合成光强为 $I'(r) = u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cos[\phi_0 - \phi_R - \Delta\phi(r)]$ 对这两个光强进行相减处理后,光强 I 可记为

$$I = |I'(r) - I(r)| = |u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cdot \cos[\phi_0 - \phi_R - \Delta\phi(r)] - [u_0^2 + u_R^2 + 2u_0 u_R \cdot \cos(\phi_0 - \phi_R)]| = \left| 4u_0 u_R \sin\left[(\phi_0 - \phi_R) + \frac{\Delta\phi(r)}{2}\right] \sin\frac{\Delta\phi(r)}{2} \right| \quad (1)$$

由式(1)可见,处理后的光强是一个包含高频载波项 $\left[(\phi_0 - \phi_R) + \frac{\Delta\phi(r)}{2}\right]$ 的低频条纹 $\left[\sin\frac{\Delta\phi(r)}{2}\right]$. 该低频条纹取决于物体变形引起的光波的相位变化.这个光波的相位变化与物体变形关系不难从光波传播的理论推导出来

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} [d_1(1 + \cos\theta) + d_2 \sin\theta] \quad (2)$$

式(2)中, λ 是所用激光的波长, θ 是照明光与物体表面法线的夹角, d_1 是物体变形的离面位移, d_2 是物体变形的面内位移.

2 实验装置与实验结果

实验装置如图 1,光源是波长为 632.8 nm 的

基金项目:国家自然科学基金(No. 60973098、No. 60873151、No. 90820306)资助

第一作者:董会(1986-),女,硕士研究生,主要研究方向为现代光学检测技术. Email: donghui6365@sina.com

导师(通讯作者):王文生(1944-),男,教授,主要研究方向为现代光学测试技术. Email: wwscom@163.com

收稿日期:2010-08-24;修回日期:2010-09-01

He-Ne 激光器;由显微物镜、针孔、准直透镜(傅里叶透镜)组成准直扩束系统,由于激光光束截面是高斯分布,能量分布不均匀,通过针孔进行空间滤波,同时也提高了空间相干度,减少相干噪音.将激光器发出的光束通过扩束系统扩大到直径为 20 mm 平行光束,与 CCD 面积匹配,且使能量分布均匀.光束经过分束器分为两束光,一束为参考光,经过反射镜直接被 CCD 接收;另一束为物光,照射到物体表面(入射角为 30°),物体表面漫反射的光直接由 CCD 接收,如图 1(a);而在像面散斑中,光在物体表面漫反射后经过透镜($f=120$ mm)成像在 CCD 上,如图 1(b).记录散斑图所用的 CCD 分辨率为 $2\,048(H) \times 2\,950(V)$,像素尺寸为 $3.5\ \mu\text{m} \times 3.5\ \mu\text{m}$.系统满足时间相干性和空间相干性要求,并且使激光、傅里叶透镜、CCD 满足空间带宽积(Space Band-width Product, SBP)要求.对于一个成像系统,其空间带宽积等于有效视场和由系统截止频率所确定的通带面积的乘积,SBP 决定了可分辨像元的数目,即空间物体的自由度 $N = \text{SBP} = (2L_x B_x)(2L_y B_y)$,其中, L_x, L_y 分别表示在 X, Y 方向系统的相面宽度, B_x, B_y 分别表示 XY 方向的空间频率.

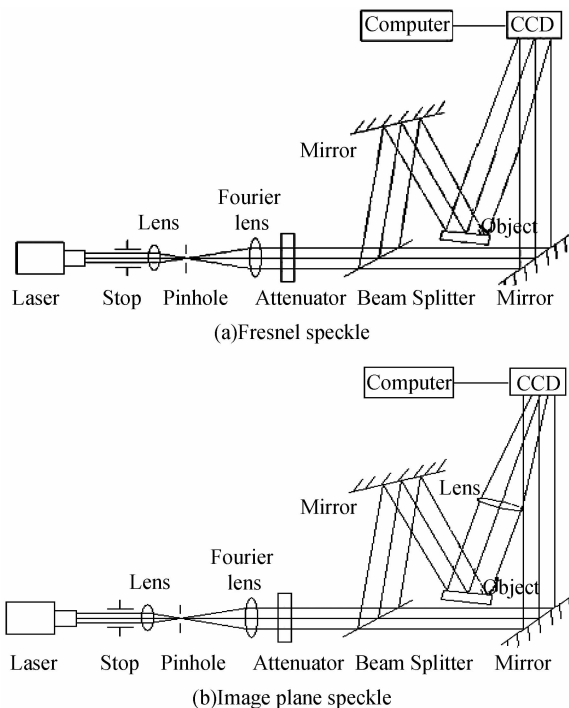


图 1 测量面内位移的菲涅尔和像面散斑实验装置图
Fig. 1 In-plane displacement layouts with Fresnel and speckle image plane speckle methods

测量面内位移的实验物体为一角硬币,将其固定于二维位移平台上,物体的位移由平台上的螺旋测微杆实现;变形测量时,由于铝片表面粗糙,漫反射导致物光光强较弱,因此实验光路图采用像面散

斑的光路,物体换为铝片,在铝片中心施加力的作用使得铝片有微小变形.用 CCD 直接拍摄物场变化前后物光与参考光相干涉的两幅图像,如图 2~4,将两幅图像相减就获得了散斑干涉条纹图,测量面内位移得到的是黑白相间直条纹,而测量变形得到的是圆环条纹.

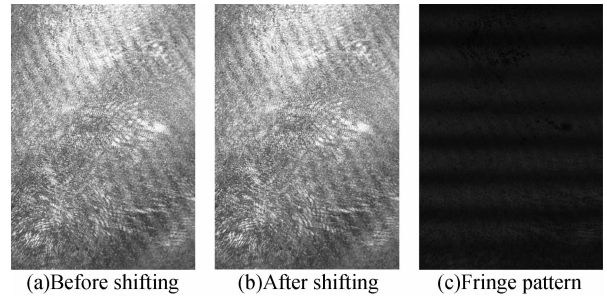


图 2 菲涅尔散斑测量面内位移
Fig. 2 In-plane displacement measurement with Fresnel speckle method

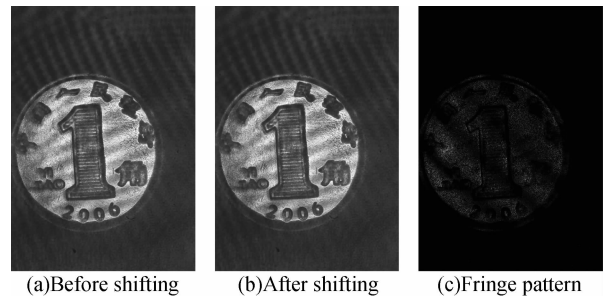


图 3 像面散斑测量面内位移实验图片
Fig. 3 In-plane displacement measurement with image plane speckle method

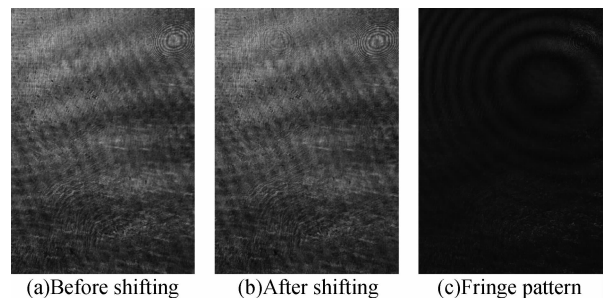


图 4 测量变形实验图片
Fig. 4 Deformation measurement experimental patterns

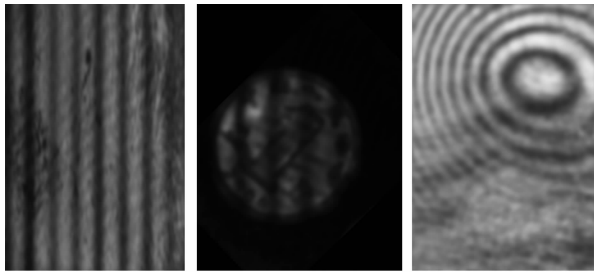
3 干涉条纹自动处理

散斑干涉图像的特征是存在大量的随机噪声,表现为条纹亮带中有暗点,暗带中有亮点,亮带和暗带中没有明显的边界,且没有前景与背景之分,图像对比度差.图中可看到黑白相间的条纹,但是条纹对比度差,因此要对条纹图进行滤波处理.

本文采用高斯低通滤波^[8]的方法,高斯低通滤波器的传递函数为

$$H(u, v) = \exp \left[-\frac{D^2(u, v)}{2\sigma_0^2} \right]$$

式中 σ_0 为截止频率,所用模板为 3×3 模板. 对图 2 (c)和图 3(c)旋转后高斯低通滤波得到图 5(a)(b)的结果,图 5(c)为圆环的高斯低通滤波结果,滤掉干涉条纹中的高频部分,对比滤波前后的干涉条纹图看出对比度有所提高.



(a)Fresnel fringes (b)Image plane fringes (c)Deformation fringes

图 5 高斯低通滤波后结果

Fig. 5 Results after Gauss low-pass filtering

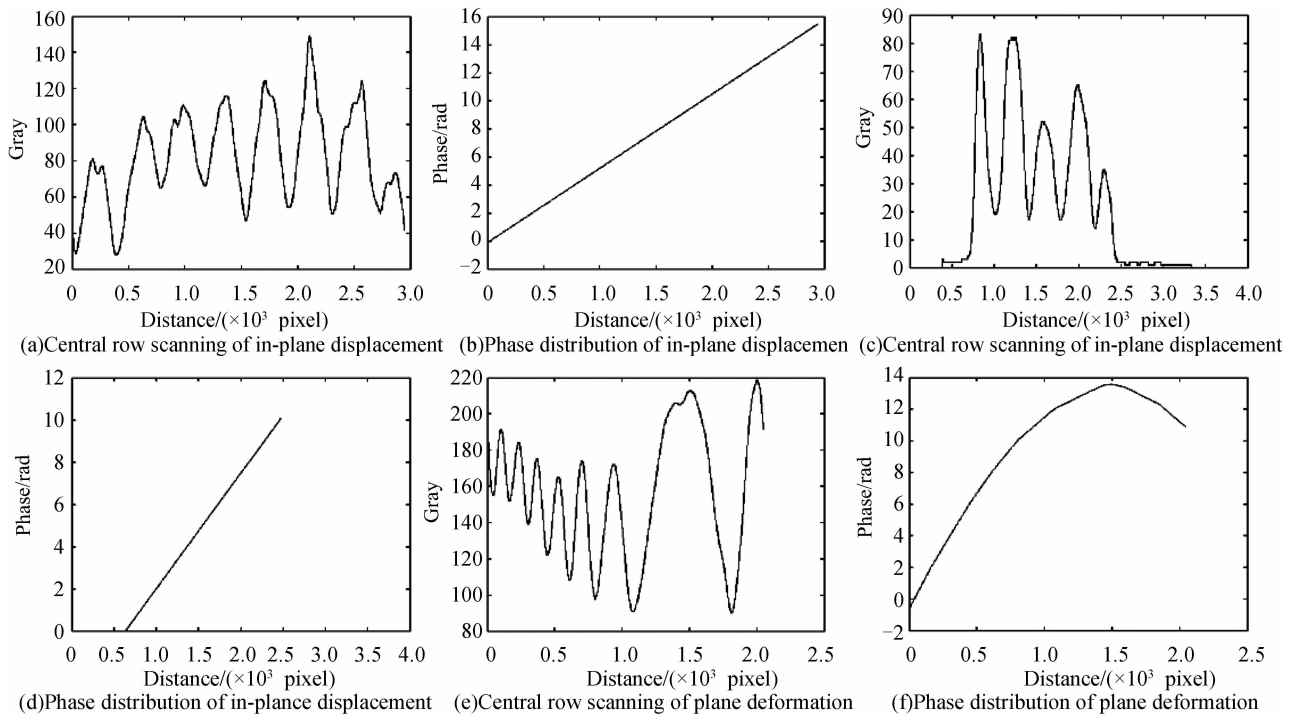


图 6 中心行扫描结果及相应的相位分布

Fig. 6 Central row scanning results and phase distribution

由式(2)可计算出位移量,菲涅尔散斑方法计算出的位移量 $d_F = 9.8704 \mu\text{m}$,像面散斑方法计算出位移 $d_I = 6.3653 \mu\text{m}$;实验中螺旋测微杆读出的参考位移分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$;变形中心点的位移可以看作离面位移,计算得位移量为 $d_D = 2.3382 \mu\text{m}$,参考位移为 $2 \mu\text{m}$,由此看出本文测位移方法比机械测位移方法更加精确.

4 结论

试验表明:高斯低通滤波器可滤掉散斑条纹图中的高频部分,滤波后可获得对比度较好的条纹图,截止频率 σ_0 取值越小,滤掉的高频部分越多,扫描结果越平滑,但过大会丢失有用信息;一维条纹中

对于图 5 中(a),扫描中心行得到图 6(a)的灰度图,条纹数判读精度为 $\lambda/10$,相邻条纹间隔 2π 的位相,图 6(b)为相应的相位图,根据相位图由计算机算出 $\Delta\phi = 15.5979\pi$;对于图 5 中(b),扫描硬币中心行得到图 6(c),相应的相位如图 6(d)所示, $\Delta\phi = 10.0589\pi$;对于图 5(c),圆环中心变形量为最大,扫描圆环中心行得到图 6(e)的灰度图,图 6(f)为计算出的相位图,中心点 $\Delta\phi = 13.7895\pi$,此相位图反映出条纹中心行上每一点的变形信息.

心行扫描法,实现了条纹的自动判读.该方法简单、高效,可用于物面定位和变形测试中,利用一维条纹中心行扫描法,也可进一步研究散斑条纹图的多条线扫描,从而实现三维物面变形测试.

参考文献

[1] WANG Bao-rui, LIANG Yong-qiang, QIAN Ke-mao. An application of ESPI in small-amplitude vibration measurement for a plane[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, **18**(3): 355-359.
王宝瑞,梁永强,钱克矛.电子散斑干涉法在平面小振幅振动测量中的应用[J]. *实验力学*, 2003, **18**(3): 355-359.

[2] ZHOU Can-lin, LI Fang, WANG Yun-shan. Large displacement measurement using ESPI [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(12): 1472-1475.
周灿林,李方,王蕴珊.大位移电子散斑干涉法[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(12): 1472-1475.

- [3] BAI Rui, SUN Xue-wei, JIA Song-liang, *et al.* An experimental research on the CTE measurement of metal composite leads using laser speckle interferometry [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2004, **19**(2):156-160.
白锐, 孙学伟, 贾松良, 等. 激光散斑干涉法测量金属复合引线热膨胀系数的实验研究[J]. *实验力学*, 2004, **19**(2):156-160.
- [4] GUO Xiang-hua, FANG Dai-ning, LI Xi-de. Measurement of deformation of pure Ni foils by speckle pattern interferometry [J]. *Mechanics in Engineering*, 2005, **27**(2):22-25.
郭香华, 方岱宁, 李喜德. 用电子散斑法对纯镍薄片弯曲变形的测量[J]. *力学与实践*, 2005, **27**(2):22-25.
- [5] RESTIVO G, CLOUD G L. Cloud embedded digital speckle pattern interferometry for three-dimensional strain analysis [J]. *Experimental Mechanics*, 2008, **48**:731-740.
- [6] YASUHIKO Arai. High resolution speckle interferometry using virtual speckle pattern produced by information of deformation process [J]. *Journal of Modern Optics*, 2008, **55**(15), 2329-2345.
- [7] SUN Ping. Isolation of two-dimensional displacement components of symmetrical deformation by using one phase map in phase-shifting electronic speckle pattern interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):337-339.
孙平. 单幅对称变形相位图分离二维变形分量的相移电子散斑干涉技术[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2):337-339.
- [8] 冈萨雷斯 R C. 数字图像处理[M]2版. 阮秋琦等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003:92-95.

Digital Speckle Pattern Interferometry for Deformation Measurement

DONG Hui, ZHOU Yan, GUO Jun, ZHANG Wan-yi, WANG Wen-sheng
(Laboratory of Contemporary Optical Measure Technology, Changchun University
of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The technique of measuring displacement and deformation based on principle of digital speckle pattern interferometry was studied. Traditional recording plane in speckle pattern interferometry was substituted by charge coupled device camera. The method left out the wet chemical process of developing and fixing. The speckle patterns were obtained in two ways of Fresnel speckle method and image plane speckle method. Two patterns of speckle interference field before and after deformation were recorded by charge coupled device camera and stored in computer; after subtracting and taking the absolute value, the correlative fringe pattern including object's deformation information was acquired. Processing the pattern with low-pass Gauss filter, the contrast of interference pattern was enhanced. The scanning central row method was proposed. From the one dimension phase distribution of central row, one dimension deformation was obtained and interference fringes interpreter was automatically realized. The experiment shows that this method is simple and available.

Key words: Digital Speckle Pattern Interferometry (DSPI); Deformation measurement; Digital filter; One dimension deformation