

全息散斑条纹的提取及图像处理

贺安之 阎大鹏 余桂英 张家军 朱兆清

(南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

提 要

介绍了一种新的全息散斑条纹的提取方法. 理论和实验表明: 对全息散斑底片逐点再现时, 两伴生亮斑条纹是全息散斑底片一级衍射光的杨氏干涉条纹, 与中央的杨氏条纹是一致的, 有较高的条纹对比度且没有背景光晕的影响. 利用计算机数字图像处理技术对伴生散斑条纹进行处理, 定量测试了受静载物体的面内位移.

关键词 全息散斑, 散斑条纹, 图像处理.

1 引 言

散斑再现条纹的改善主要是针对散斑噪声的消除以及背景光晕的消除. 为此人们提出了数字滤波法消除散斑图的噪声^[1], 图像复原技术消除衍射光晕的影响^[2]以及同态滤波法对散斑干涉图进行快速高精度的处理^[3]. 这些方法对散斑照相术是行之有效的. 但在全息散斑中, 利用逐点再现法时, 散斑场条纹的对比度由于受光晕的影响很差. 如果再现光很强, 则散斑条纹被光晕所淹没, 无法进行定量分析. 实验中注意到散斑场除了沿再现光方向的杨氏条纹外, 在其两侧还伴生有两个亮斑. Mohan 等人^[4]认为这两个亮斑条纹也是杨氏条纹, 且与中央条纹有关. 但未给予其结论以理论证实和进一步讨论. 本文从理论上推证这两伴生亮斑条纹是全息散斑底片的正、负一级衍射光经散斑对干涉所形成的, 与中央杨氏条纹具有相同形式的计算公式, 且条纹的对比度为 1, 不受再现光强度大小的影响, 但再现光入射角度的变化, 会影响全息底片的各级衍射效率. 理论和实验结果表明, 可以用伴生散斑场来定量分析被测物体的面内位移. 作者还采用了计算机图像处理技术, 由伴生散斑场定量测试了受静载物体的面内位移.

2 理论推导

利用像面全息散斑法对物体位移前后进行双曝光记录, 则像面上的光强分布为

$$I(x, y) = |E_0(x, y) + E_R(x, y)|^2 + |E_0(x, y)\delta(x - x_0, y - y_0) + E_R(x, y)|^2 \quad (1)$$

式中 (x_0, y_0) 为像面上物体的面内位移量, E_0 为物光, E_R 为参考光. 设

$$E_R(x, y) = m \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{e}\right) \exp[j2\pi(\mu_0 x + \nu_0 y)] \quad (2)$$

曝光后记录介质经线性处理, 透过率为

收稿日期: 1992年11月11日; 收到修改稿日期: 1993年1月5日

$$T = a - bI = \sum_{i=1}^4 t_i \quad (3)$$

式中 a, b 为常数, t_i 由下列式子表示

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= a - 2b|E_R|^2, & t_2 &= -b|E_0|^2[\delta(x, y) + \delta(x - x_0, y - y_0)] \\ t_3 &= -bE_0[\delta(x, y) + \delta(x - x_0, y - y_0)]E_R^* \\ t_4 &= -bE_0^*[\delta(x, y) + \delta(x - x_0, y - y_0)]E_R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

若用垂直于底片的细光束进行逐点再现, 在观察屏任一点 $Q(\mu, \nu)$ 上的光场分布为

$$\left. \begin{aligned} E_Q(\mu, \nu) &= CF[T] = \sum_{i=1}^4 E_i(\mu, \nu) \\ E_i(\mu, \nu) &= CF(t_i) \quad \mu = \mu_i/\lambda L \quad \nu = \nu_i/\lambda L \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 λ 为再现光的波长, L 为再现细光束中心到屏上衍射光束中心的距离. 将(4)式代入(5)式有

$$\left. \begin{aligned} E_1(\mu, \nu) &= c' a \delta(\mu, \nu) - 2bc' |E_R|^2 \\ E_2(\mu, \nu) &= c' b \cos(\mu x_0 + \nu y_0) \pi F[|E_0|^2] \\ E_3(\mu - \mu_0, \nu - \nu_0) &= c' b \cos(\mu x_0 + \nu y_0) \pi F[E_0] F[\text{circ}(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{e})] \\ E_4(\mu + \mu_0, \nu + \nu_0) &= c' b \cos(\mu x_0 + \nu y_0) \pi F[E_0^*] F[\text{circ}(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{e})] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

从(6)式可以得到如下结论:

1) E_1, E_2 沿再现光方向衍射, 对应零级衍射光; E_3, E_4 沿参考光及其共轭方向衍射, 分别对应于正、负一级衍射光.

2) E_2, E_3 和 E_4 是三个杨氏条纹场, 条纹分布由 $\cos^2(\mu x_0 + \nu y_0) = 0$ 确定. 相邻两条纹的间隔 d_i 与物体的位移 $P = (x_0, y_0)/M$ (M 为成像放大率) 具有同样的关系

$$P \cdot d_i = \lambda L_i / M \quad (i = 2, 3, 4) \quad (7)$$

式中 L_i 为再现细光束中心到衍射场 E_i 中心的距离.

3) E_1, E_2 对应于散斑场, 由于 E_1 的影响, 条纹对比度差. 并由于 E_1 取决于再现的参考光, 随着 E_1 的增大, 也即随着再现光强的增强, 散斑场的条纹对比度下降. 根据条纹对比度的定义^[5]

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (8)$$

由(6)式, 当 $\pi(\mu x_0 + \nu y_0) = n\pi$ 时, 对应于亮条纹; 当 $\pi(\mu x_0 + \nu y_0) = (n + \frac{1}{2})\pi$ 时, 对应于暗条纹. 求 I_{\max} 和 I_{\min} 并代入(8)式有 $K = 1$, 即 E_3 和 E_4 条纹场的对比度为 1, 并由于它们只与 E_0 有关, 而与 E_R 无关, 故 E_3 和 E_4 与再现光强的变化无关.

逐点再现时, 每级衍射光的衍射范围取决于底片上所记录物体的最大空间频率 (B_x, B_y) ^[6], 若 $(\mu_0, \nu_0) \geq 3(B_x, B_y)$, 则三个散斑场互不影响; 若 $(\mu_0, \nu_0) < 3(B_x, B_y)$, 三个散斑场发生重叠, 重叠区域变得模糊; 若 $(\mu_0, \nu_0) = (0, 0)$, 则只能看一个中央条纹场.

如果再现细光束不是与底片垂直, 令其入射场为

$$B(x, y) = \exp[j2\pi(px + qy)] \quad (9)$$

则屏上的光场变为

$$E'_Q(\mu, \nu) = CF[T \cdot B] = E_Q(\mu, \nu) \delta(\mu - p, \nu - q) = \sum_{i=1}^4 E'_i \quad (10)$$

可见, 改变再现光方向 (p, q) , 三个散斑场光场中心同步移动. 若使 $p = \mu_0, q = \nu_0$, 则有 $E'_3(\mu, \nu)$

$= E_3(\mu, \nu)$, 即正一级衍射的杨氏条纹场沿与干板垂直的方向, 这使得 L_3 的测量变得容易. 对负一级的衍射具有同样的结论. 但这种再现光束角度的变化, 会影响全息底片的各级衍射效率.

3 实验验证

Mohan 等人^[4]通过已知位移定量地证明了伴生条纹场和中央条纹场的条纹方向和疏密变化是一致的. 为了验证上述理论推导所得结论的正确性, 作者利用像面全息散斑记录光路进行了大量的实验. 图 1 是再现光较弱且垂直于全息底片时的散斑场; 图 2 是再现光很强、且垂直于全息底片时的散斑场. 显然, 当再现光很强时, 中央散斑条纹会被淹没, 而再现光的大小不影响伴生散斑场条纹的对比度. 图 3 是通过改变再现光入射角, 使正一级衍射提高, 在接收屏上看到的散斑场. 可见, 中央散斑场的条纹因背景光晕影响而难以分辨, 但伴生散斑场的条纹却很清晰, 便于测量. 图 4 是调整光强和曝光时间, 并尽量使中央条纹场清晰的情况下的正一级衍射散斑场. 说明伴生条纹场的对比度还是比中央条纹场好.

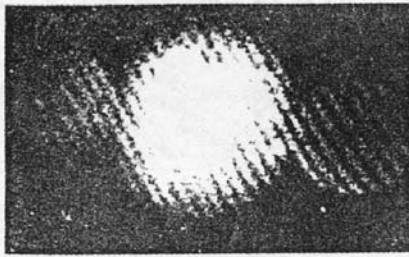


Fig. 1 Reconstructed speckle fields for the case of a weak reference beam intensity

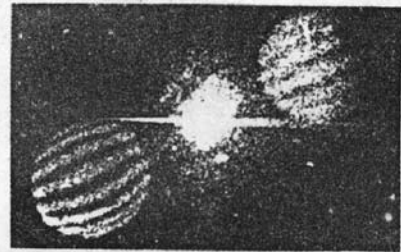


Fig. 2 Reconstructed speckle fields for the case of a strong reference beam intensity

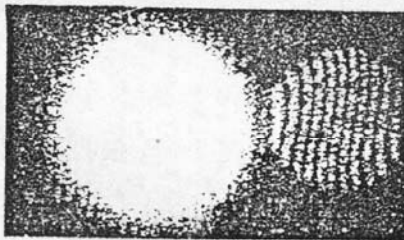


Fig. 3 Reconstructed speckle fields under inclined reconstruction beam illumination

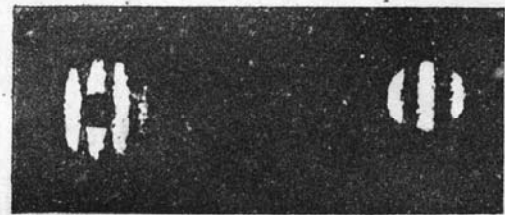


Fig. 4 The speckle fields under the case of making center fringes field clear

4 图像处理及结果分析

由于伴生散斑干涉图只有噪声的影响而没有背景光晕的存在, 且条纹的对比度为 1, 故可采用低通滤波技术来消除伴生散斑场中的噪声影响^[7], 也可以避免滤波时产生的图像模糊现象.

经过噪声处理后的图像, 作者设计了一种模式平滑算法对散斑条纹进行平滑, 可以填补条纹上的孔洞或删除条纹上的“毛刺”. 条纹的平滑过程是由填充和删除两个子过程组成. 填充过程是把满足以下条件的 3×3 窗口中点像素 x 置为 1 像素: (1) x 为 0 像素; (2) x 的四邻域中有三个以上的邻点为 1 像素. 图 5 表示了填充过程的一个例子. 删除过程是把满足以下条件的 3

$\times 3$ 窗口中点像素 x 置为 0 像素: (1) x 为 1 像素; (2) 3×3 窗口中其他像素 $(x_1 + x_2 + x_3) \cdot (x_5 + x_6 + x_7) + (x_3 + x_4 + x_5) \cdot (x_7 + x_8 + x_9) = 0$; (3) x 不是端点. 图 6 表示了删除过程的一个例子.

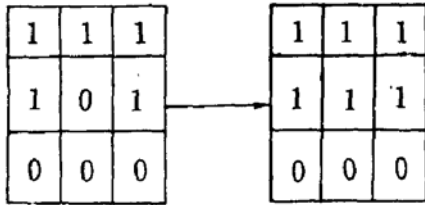


Fig. 5 Padding process

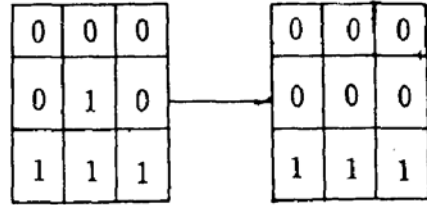


Fig. 6 Deleting process

为了提高散斑条纹间距的判读精度,作者还设计了一种散斑条纹的快速细化算法,即对经过噪声处理和条纹平滑后的图像进行扫描,在扫描过程中根据某种条件,将图像上的 1 像素或删除或标记为骨架点,或标记为候选点. 第一次遍历时,图像上所有的 1 像素均为候选点;第二次遍历时,只对经第一次遍历后标记为候选点的像素进行处理. 经多次迭代,直到形成单像素宽度的中心线. 如果 1 像素 x 满足以下条件,则将之删除(置为 0 像素): (1) 逻辑运算式 $\sum_{i=1}^4 x_{2i-1}(x_2 + x_{2i-1}) = 1$, 这里 x_i 为 3×3 窗口中有像素, $x_9 = x_1$; (2) $BN > 7$; (3) $BN < 7$; (4) 在前一次遍历中, x 没有被标记为骨架点. 如果上述的条件 (1) 或条件 (2) 为假,则将 x 标记为骨架点. 如果条件 (3) 为假,则将 x 标记为候选点,供下一次遍历时处理.

作者利用上述图像处理方法对图 3 的伴生散斑干涉图进行处理,获得细化后的结果如图 7 所示. 并利用像面全息散斑干涉法测量了受静载铝板的面内位移,通过伴生散斑场和上述图像处理技术定量给出其结果. 表 1 给了分别用中央条纹和伴生散斑场条纹获得的结果. 显然,它们是一致的. 表 2 是同组物体的全息散斑底片,用非垂直光再现时的测量结果,显然, p_2, p_3 也是一致的. 从而进一步说明,边缘伴生条纹确为散斑条纹,利用伴生散斑条纹和数字图像处理技术可精确测量物体的面内位移.

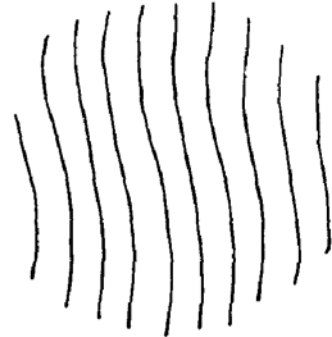


Fig. 7 The result processed from Fig. 3

Table 1 Experimental results $(p, q) = (0, 0)$

$L_2 = 6.5 \text{ cm}$		$L_3 = 6.6 \text{ cm}$	
$d_2 \text{ (cm)}$	$p_2 \text{ (cm)}$	$d_3 \text{ (cm)}$	$p_3 \text{ (cm)}$
7.9/5	7.810	5.0/3	7.518
7.6/15	24.354	3.8/7	23.081
5.8/18	38.625	3.9/11	35.798
2.3/3	16.095	2.3/3	16.343
3.9/4	12.656	3.0/3	12.742
2.7/2	9.313	1.4/1	9.281

Table 2 Experimental results for reconstruction light not orthogonal to the hologram $(p, q) \neq (0, 0)$

$L_2 = 6.9 \text{ cm}$		$L_3 = 6.7 \text{ cm}$	
$d_2 \text{ (cm)}$	$p_2 \text{ (cm)}$	$d_3 \text{ (cm)}$	$p_3 \text{ (cm)}$
5.5/4	9.527	3.7/3	10.313
5.0/12	31.438	3.2/8	31.798
5.4/16	39.174	2.9/9	39.474
3.1/4	17.465	2.2/3	17.344
5.0/6	15.714	2.8/3	13.628
3.1/2	8.589	1.4/1	9.085

5 结 论

1) 全息散斑底片逐点再现时的两伴生亮斑条纹场是由衍射光的正、负一级所形成的杨氏散斑条纹,它们测量物体面内位移的公式为 $P \cdot d_i = \lambda L_i / M$ ($i = 3, 4$), 与中央条纹具有相同的形式.

2) 两伴生条纹的对比度为 1, 再现光的光强大小对条纹对比度没有影响, 克服了背景光晕的影响. 用伴生散斑场来分析物体的面内位移, 解决了散斑测量中散斑条纹对比度差的问题.

3) 把计算机图像处理技术应用伴生散斑场的处理, 提高了定量分析的速度和精度.

参 考 文 献

- [1] 胡逸群, 用数字滤波消除散斑条纹噪声, 光学学报, 1989, 9(1):61~66
- [2] 胡逸群, 一种用于自动分析散斑摄影条纹图的数字图像复原技术——衍射晕影响的消除, 光学学报, 1988, 8(11):1012~1016
- [3] 李德喜, 方强, 谭玉山, 散斑条纹的快速高精度处理技术, 光学学报, 1990, 11(1):88~91
- [4] N. Krishan Mohan, D. K. Sharma, An alternative technique for extraction of in-plane displacement from an image plane hologram, *Opt. Commun.*, 1985, 56(2):83~86
- [5] C. M. 维斯特著, 樊雄文, 玉洪译, 全息干涉度量学, 北京:机械工业出版社, 1984:127
- [6] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 1968:Chapt. 8
- [7] 刘杰克, 姜宗林, 倪刚, 纹影干涉图的图像处理方法研究, 气动实验与测量控制, 1991, 5(2):53~59

The extraction of speckle fringes from holo-specklegram and its image processing

HE Anzhi YAN Dapeng YU Guiying ZHANG Jiajun ZU Zhaoqing

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014)

(Received 11 November 1992; revised 5 January 1993)

Abstract

In this paper, a new method for extracting speckle fringes of a holo-specklegram is presented. It is proved theoretically and experimentally that when the interrogation of a holo-specklegram from point to point is used, the fringes in the two side lobes are the Young's interference fringes of the first-order diffraction in the holo-specklegram and is identical with the central Young's fringes. The two side lobes fringes have high contrast and no effect of background halation. It is processed by using computer digit image processing technique and the in-plane displacement of a static load object is calculated quantitatively.

Key words holo-speckle, speckle fringes, image processing.