

光载波条纹自动化图像处理

顾杰 陈方

(奥克兰大学机械系, 美国)

提要 本文提出一种全自动的光载波条纹处理方法, 只需要一幅光载波调制的条纹图就能提取出完整的信息。先用 FFT 滤波求出带有光载波的初始位相, 接着用反复平均法提高位相信息的质量, 然后用最小二乘法构造光载波的位相, 两位相相减得出信息的位相。

关键词 光载波条纹, 图像处理

1 引言

多数光学干涉计量法的条纹都有一个不确定因素, 即条纹的级次跟边界条件有关。有两种解决办法: 相移法^[1~4]和光载波法^[5~7]。只用一张光载波调制的图就能提出确定信息的有 FFT^[8]法。

FFT 法有两个主要的问题难以解决: 需要在谱面上找出光载波谱点的位置, 然后用傅里叶相移定理平移频谱; 离散傅氏谱的位置只能定准到一个像点。计算表明, 谱上一个像点相应于空域一根条纹, 只有当条纹很密时才能接受这样的误差。若是散斑问题, 通常只有十几根条纹, 这个误差是偏大了一点。另外, 得到好的滤波效果, 滤波窗的选择很重要。窗的取法和具体问题有关, 这使得采用自动化处理很不方便。

本文也用 FFT 方法, 但 FFT 的作用只是提取带有光载波的位相信息, 滤波窗的选择不再那么微妙, 图像噪声的问题由反复平均法解决^[9,10], 光载波解调在空域里解决, 精确度很高。

2 算法和理论

图 1 是算法的框图, 经光载波调制的图像光强是

$$I_m(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) + \phi_c] \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 是低频部分, $B(x, y)$ 是振幅, $\phi(x, y)$ 是我们感兴趣的信息位相

$$\phi_c = ax + by + c \quad (2)$$

是光载波位相。对(1)作傅氏变换

$$\begin{aligned} S(f_x, f_y) &= \iint I_m(x, y)\exp[-j2\pi(xf_x + yf_y)]dx dy \\ &= \mathcal{F}\{A(x, y)\} + \frac{\exp(jc)}{2}\mathcal{F}\{B(x, y)\exp[j\phi(x, y)]\} * \delta\left(f_x - \frac{a}{2\pi}, f_y - \frac{b}{2\pi}\right) \end{aligned}$$

$$+ \frac{\exp(-jc)}{2} \mathcal{F} \{ B(x,y) \exp[-j\phi(x,y)] \} * \delta \left(f_x + \frac{2}{2\pi}, f_y + \frac{b}{2\pi} \right) \quad (3)$$

式中 \mathcal{F} 表示作傅氏变换, * 表示卷积。由于光载波的调制作用, 式中的三部分可在谱面上分开, 滤波时取第二项(或第三项), 记

$$\phi_m(x,y) = \phi(x,y) + \phi_c(x,y) \quad (4)$$

作逆傅里叶变换, 得滤波后的强度为

$$I_f = \frac{B(x,y)}{2} \exp[j\phi_m(x,y)] \\ = \frac{B(x,y)}{2} [\cos\phi_m(x,y) + j\sin\phi_m(x,y)] \quad (5)$$

分开实部和虚部并作适当运算后, 得到含有光载波在内的位相

$$\phi_m(x,y) = \text{actan}(I_I/I_R) \quad (6)$$

此位相噪声通常还比较大, 甚至有许多位相跳跃点出现。反复平均法对这个问题很有效。对此位相作条纹再现。

$$I_{m_i} = 1 + \cos[\phi_m + (\pi/2)(i-1)] \\ i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

再取平均

$$I'_{m_i} = \int_w I_{m_i} dt dy \quad (8)$$

用这四幅平均后的图取位相

$$\phi_m = \text{actan} \frac{I'_{m_4} - I'_{m_2}}{I'_{m_1} - I'_{m_3}} \quad (9)$$

重复(7)~(9)的工作若干次, 信噪比就会得到提高。

光载波的位相是坐标 (x,y) 的线性函数, 我们可以用最小二乘法来求出。在图像上定出纯光载波的区域, 对这区域中的所有像点定义

$$E = \sum (\phi_{m_i} - \phi_c)^2 = \sum (\phi_{m_i} - ax_i - by_i - c)^2 \quad (10)$$

这里 i 是求和指数。令

$$\frac{\partial E}{\partial a} = \frac{\partial E}{\partial b} = \frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (11)$$

得

$$a \sum x_i^2 + b \sum x_i y_i + c \sum x_i = \sum x_i \phi_{m_i} \\ a \sum x_i y_i + b \sum y_i^2 + c \sum y_i = \sum y_i \phi_{m_i} \\ a \sum x_i + b \sum y_i + nc = \sum \phi_{m_i} \quad (12)$$

式中 n 是总的纯光载波区域的像点数, a, b, c 可以从(12)式中解出。最后信息的位相就很容易求出:

$$\phi(x,y) = \phi_m(x,y) - \phi_c(x,y) \quad (13)$$

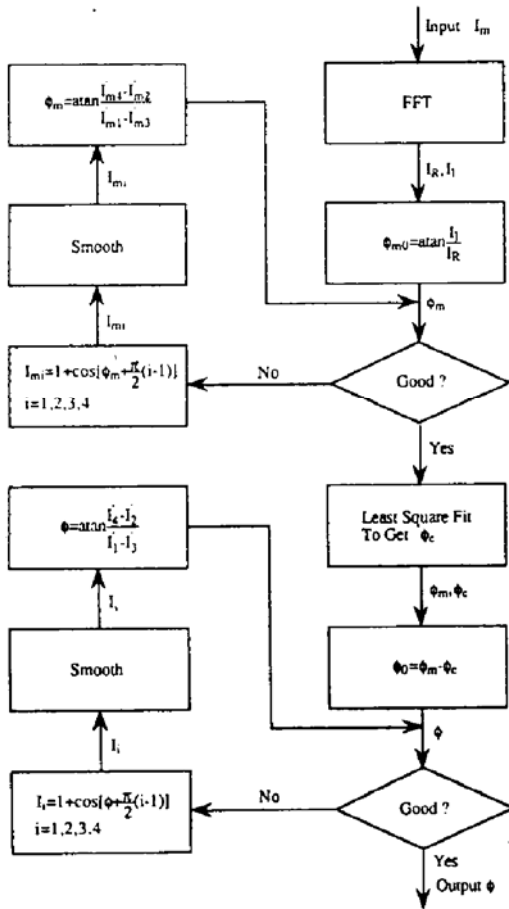


Fig. 1 Flow chart of algorithm

3 实 验

图 2 是一幅光载波调制的 ESPI 条纹图, 试件是一面加压的方形薄板。四周的板设有变形, 条纹为纯光载波。采图时注意, 一定要留有纯光载波的区域。这个纯光载波的区域不必连在被测物体上, 见图 3。图 3 是一个啤酒罐的投影云纹图, 实际做实验时表面应该喷上一色的油漆。在前节中我们给出了处理直条纹光载波的理论讨论。实际上只要知道光载波的函数形式, 都能用最小二乘法来求出系数。图 3 中的光载波就是曲线, 但在本文的方法来说, 没有什么困难。前面提到的 FFT 就完全不能用了。通常做实验时, 虽然尽量想得到直条纹的光载波, 但由于一些难以控制的干扰因素, 光载波扭曲了, 见图 4 的例子。在这种情况下, 我们可以假设。

$$\phi_c = axy + bx + cy + d \quad (14)$$

问题就迎刃而解了。

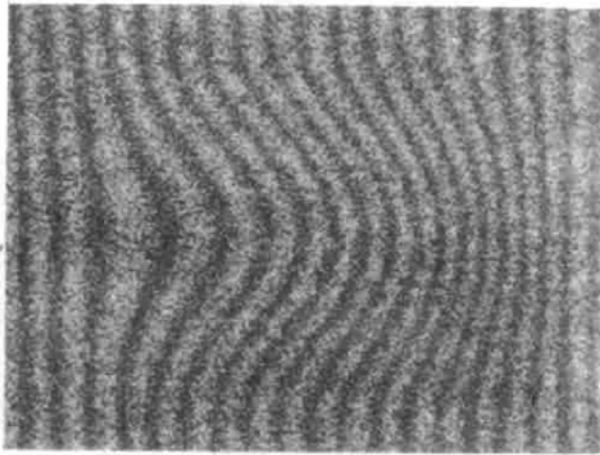


Fig. 2 Carrier modulated ESPI fringe pattern of a deformed plate

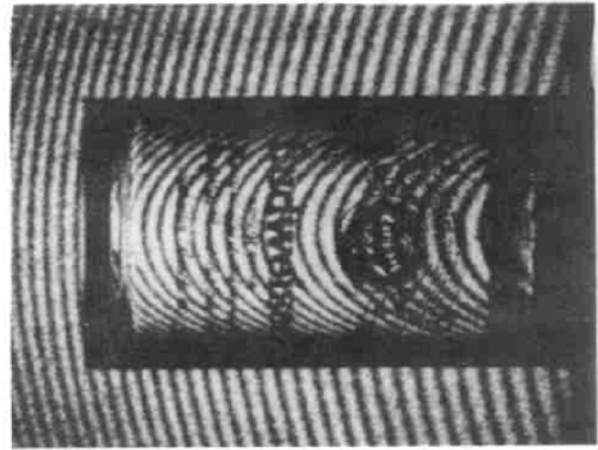


Fig. 3 Projection moire with laser generated non linear grating

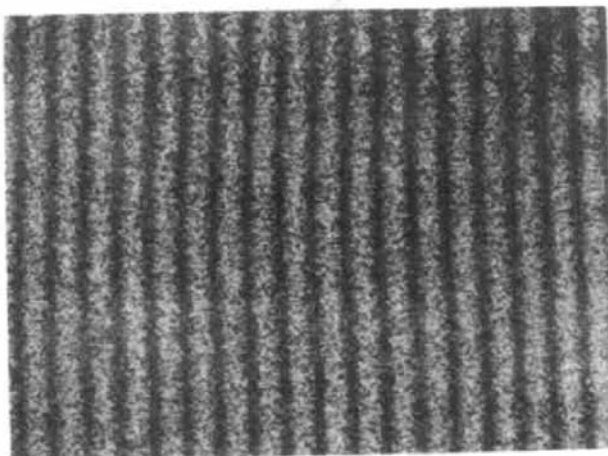


Fig. 4 Carrier fringe pattern

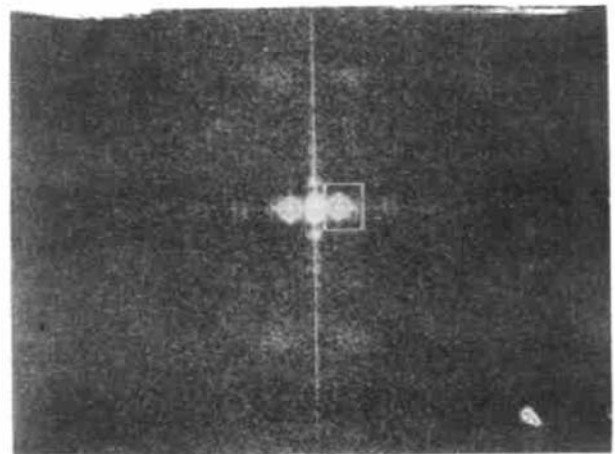


Fig. 5 Fourier spectrum and the filtering window

图 5 是对图 1 作 FFT 顺变换后得到的谱。滤波窗的选择很随便, 只要让一侧的亮点通过就是, 为了保证有用信息通过, 窗口可以取大一点。此时, 噪声也过去了不少。但不必担心, 反复平均法可以有效地抑制噪声。图 6 是初始位相, 图上的断条是噪声造成的。经过两次反复平均, 这些断条全都消失了。图 7 是用断条消失后的位相再现的条纹, 顶上和下部的两个框定出

了纯光载波区域。计算机自动作最小二乘法运算,然后求出解调后的位相。图 8 是该位相的三维图。这位相图虽然没有明的断条,都能看出不少小区域的七高八低。可以再度使用反复平均法来解决。图 9 为两次反复平均后的结果,显然比图 8 好了许多,如果不满意的话,可以多做几次反复平均。为了检验处理的效果,我们用图 9 的位相作条纹再现,见图 10。图 11 是原始的没有加光载波的 ESPI 条纹,比较两图,除了噪声外,图 10 和图 11 的条纹位置看不出什么差别。这证明了本文的方法是很准确实用的。

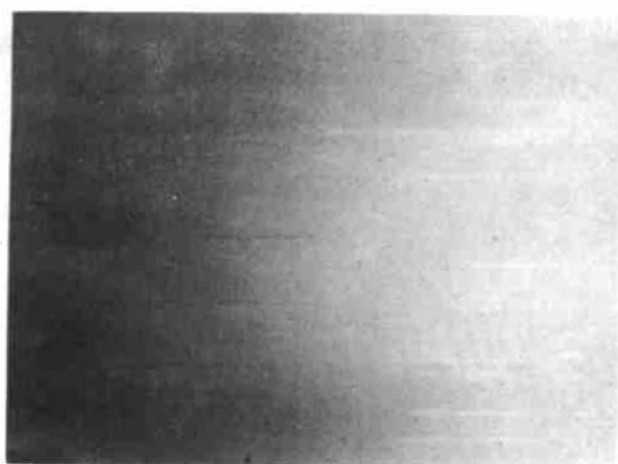


Fig. 6 Initial phase with carrier in it

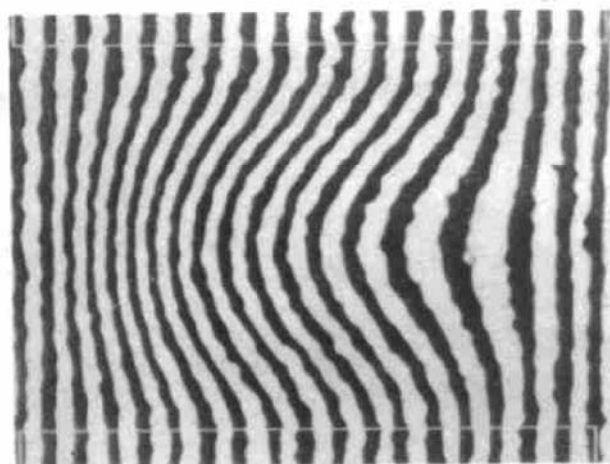


Fig. 7 Reconstructed fringe pattern and carrier locations

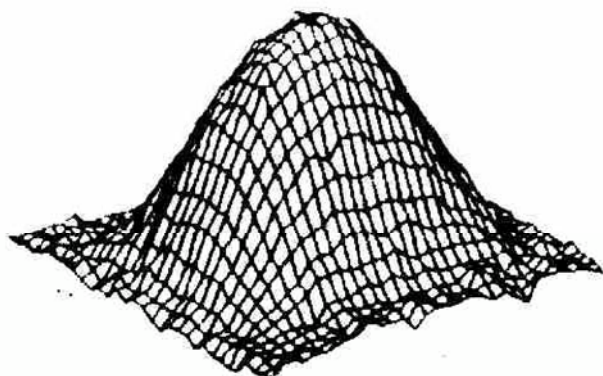


Fig. 8 3-D view of the information phase

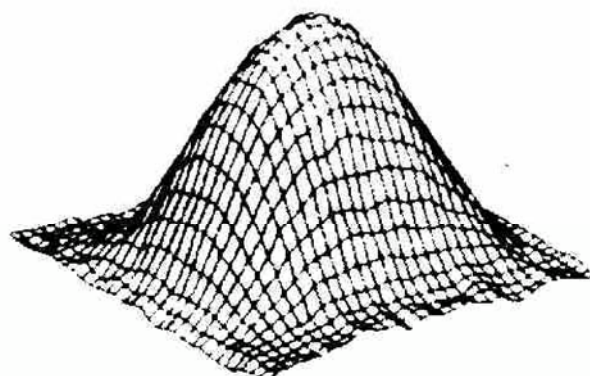


Fig. 9 3-D view of the iterated information phase

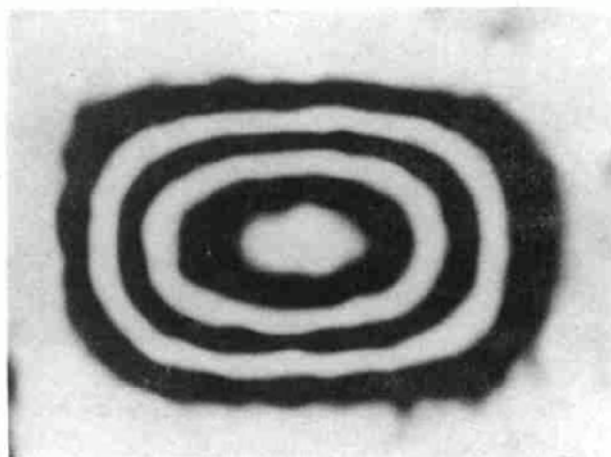


Fig. 10 Reconstructed fringe pattern from the phase in Fig. 11

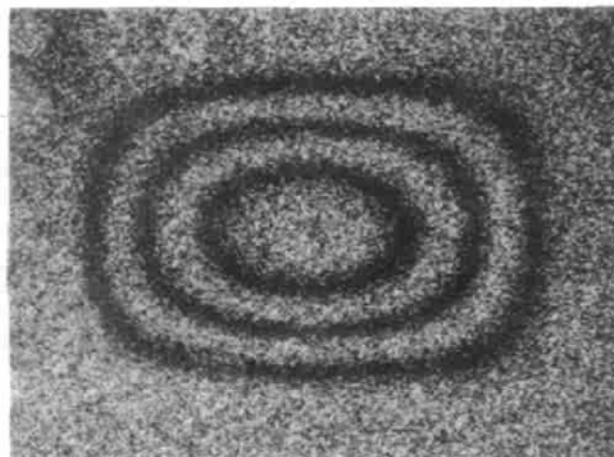


Fig. 11 Original ESPI fringe pattern of the plate without carrier modulation

4 结 论

1. 本文的方法适合于全自动光载波条纹处理的方法。
2. 本方法可以从单张光载波调制的条纹图中取出完整的信息。
3. 本方法可处理光载波不是直条纹的问题。
4. 本方法的精确度相当高。
5. 本方法适合于处理任何光载波条纹图, 例如全息、云纹等等。但对散斑的稀条纹特别显示出其优越性。
6. 图像上有纯光载波区是一个必要的条件, 在许多情况下, 可以把纯光载波区安排在边角的地方。但是从提高精度的角度出发, 以安排在边框处为好。

参 考 文 献

- 1 J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher *et al.*. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(11): 2693~2703
- 2 Katherine Creath. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3053~3058
- 3 Suezou Nakadate, Hiroyoshi Saito. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(14): 2172~2180
- 4 Th. Kreis. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(6): 847~855
- 5 Jie Gu, Y. Y. Hung, F. Chen. "Iteration Algorithm for Computer Aided Speckle Interferometry", *Appl. Opt.*, to be published
- 6 P. D. Plotkowski, Y. Y. Hung, J. D. Hovansian, G. Gerhart. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(5): 754~756
- 7 C. A. Sciammarella, J. A. Gilbert. *Exp. Mech.*, 1976, **16**(6): 215~219
- 8 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1982, **72**(1): 156~160
- 9 Jie Gu, F. Chen. *Acta Optica Sinica*, to be published
- 10 Jie Gu, F. Chen. *Chinese Journal of Lasers*, to be published

Automated Image Processing for Analysis of Carrier Coded Fringe Pattern

Gu Jie Chen Fang

(Department of Mechanical Engineering, Oakland University)

Abstract A novel algorithm of image processing for the analysis of carrier fringe pattern is proposed. Only one fringe pattern that is carrier coded is need for extracting unambiguous information. The coded fringe pattern is first FFT filtered to get an initial phase with carrier phase in it. Several times of phase shift iteration are carried out to improve the phase. Then the carrier is removed by subtracting the pure carrier phase from the code phase. The algorithm offer higher precision over the FFT-transform technique in literature.

Key words carrier fringe pattern, image processing