

载波全息干涉图的自动分析

陈文艺 谭玉山

(西安交通大学机械系, 西安710049)

提 要

用正交相干相位检测法实现了载波全息干涉图的自动分析。讨论了分析载波条纹图的边界效应, 提出了一种易于在微机上实现的条纹图外插算法。最后给出了一幅实时法载波全息图的分析结果。

关键词 载波全息干涉图, 相位检测, 边界效应。

1 引 言

全息干涉图的自动分析是目前全息干涉计量中急需解决的重要问题, 随着数字图像处理系统, 特别是使用微机的图像处理系统的发展, 提出了各种实用的处理技术。载波全息干涉图就是在一般的全息干涉图中人为地引入线性变频载波条纹, 它有利于判别条纹的方向, 且易于从噪声中自动提取相位信息。用于自动分析载波条纹图较早的方法有一维傅氏变换法^[1,2]和空间条纹扫描法^[3], 1986年, J. Bone等人提出了二维傅氏变换法^[4], 并首次讨论了边界效应问题, 1987年O. Roddier等人的文章中对边界效应问题进行了更深入的研究, 提出了一种较好的条纹外插方法, 有效地减少了边界效应的影响^[5], 但此方法是基于2-DFFT变换, 并需多次迭代, 在一般没有专门硬件的微机上实现太慢。本文采用快速灵活的正交相干相位检测法^[6]对载波全息干涉图进行自动分析, 并提出了一种易于由微机实现的一维外插算法。

2 正交相干相位检测原理

载波全息干涉图的光强分布可表示为:

$$I(x, y) = D(x, y) \{a(x, y) + b(x, y) \cos[\omega_0 x + \phi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 $a(x, y)$ 为背景光强, $b(x, y)$ 是条纹对比度, ω_0 为载波角频率, $\phi(x, y)$ 即要求的相位分布, $D(x, y)$ 为边界函数:

$$D(x, y) = \begin{cases} 1; & \text{条纹图内} \\ 0; & \text{条纹图外} \end{cases} \quad (2)$$

将(1)式第 y_c 行乘以 $\sin \omega_0 x$ 得:

$$I_1(x, y_c) = D(x, y_c) \cdot \left\{ a(x, y_c) \sin \omega_0 x + \frac{b(x_1, y_c)}{2} \sin [2\omega x + \phi(x, y_c)] - \frac{b(x, y_c)}{2} \sin \phi(x, y_c) \right\} \quad (3)$$

对(3)式进行低通滤波, 并假设 $D(x, y_c) = 1$, 则

$$I_1(x, y_c) = -\frac{b(x, y_c)}{2} \cdot \sin \phi(x, y_c) \quad (4)$$

同理将(1)式 y_c 行乘以 $\cos \omega_0 x$ 得:

$$I_2(x, y_c) = \frac{b(x, y_c)}{2} \cos \phi(x, y_c) \quad (5)$$

由(4)、(5)两式得相位函数:

$$\phi(x, y_c) = -\arctan \frac{I_1(x, y_c)}{I_2(x, y_c)} \quad (6)$$

逐行处理就可解出 $\phi(x, y)$, 因为正切函数的周期性, 直接求出的 $\phi(x, y)$ 是从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 间值, 利用 $I_2(x, y)$ 的符号可确定 $\phi(x, y)$ 从 $-\pi$ 到 π 间值, 再通过相位的去包裹 (phase unwrap) 就可求出相位的整体分布函数. 在以上分析中, 曾假设 $D(x, y_c) = 1$, 实际上由于边界函数的突变, 必然引起频谱的扩展, 从而在条纹边界附近产生较大的相位检测误差, 此即为边界效应. 为克服边界效应的影响, 有效的方法是条纹外插, 使边界处条纹不发生幅度和相位的突变.

3 载波条纹图的外插算法

为实现载波条纹图的外插, J. Bone 等人提出了在边界对称反转外延的方法, 这解决了条纹图在边界的幅度突变, 但不能保证边界处相位的连续性. C. Roddier 等人提出了一种迭代算法, 基本原理是如果条纹图的频谱是有界的, 则条纹图必然是解析的, 且可据解析连续性唯一地外插. 通过如下的迭代运算, 就可实现条纹图的外插. 如图 1 所示, 首先对原条纹图进行 2-DFFT 运算求得其频谱, 再在谱域内以 ω_0 为中心, ω_0 为半径画圆, 圆外的值置 0, 然后做反 FFT 变换得外插后图, 将原图值代入外插图, 再重复上述过程 N 次, 最后就得到所需的外插条纹图. 因为在每次迭代中由于边界突变而产生的高频分量被置 0, 即每迭代一次边界的突变就少一些, 只需几次迭代就能得到满意的结果. 上述算法显然外插效果较好, 但需要反复进行 2-DFFT 运算, 在一般微机上实现速度太慢. 结合一维相位检测方法, 这里提出了一种一维外插算法, 其实质与上述方法相同.

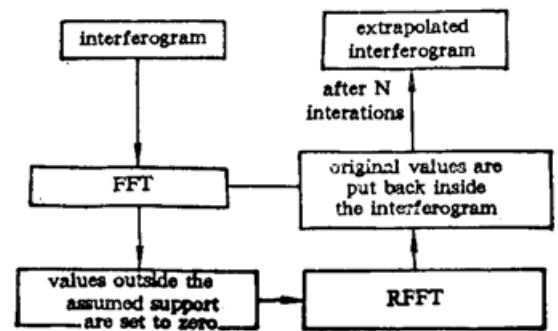


Fig. 1 C. Roddier's extrapolation algorithm

设计一个带通滤波器, 其中心角频率为 ω_0 对应单位冲激响应为 $h(x)$, 则外插算法为:

1) 当 $i=1$ 时,

$$\bar{I}_i(x, y_c) = \begin{cases} I(x, y_c) * h(x) + aV(x); & \text{当 } D(x, y_c) = 0 \text{ 时} \\ I(x, y_c); & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

2) 当 $i > 1$ 时,

$$\bar{I}_i(x, y_c) = \begin{cases} \bar{I}_{i-1}(x, y_c) * h(x) + aV(x); & \text{当 } D(x, y_c) = 0 \text{ 时} \\ \bar{I}_{i-1}(x, y_c); & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

3) 重复 2 到 $i=N$, 则 $\bar{I}_N(x, y_c)$ 即是 y_c 行的外插条纹强度分布值, 这样逐行处理就可得外插条纹图.

(7)、(8)式中 $aV(x)$ 为边界处条纹光强的均值, 可通过边界的局部平均求得. 在实际外

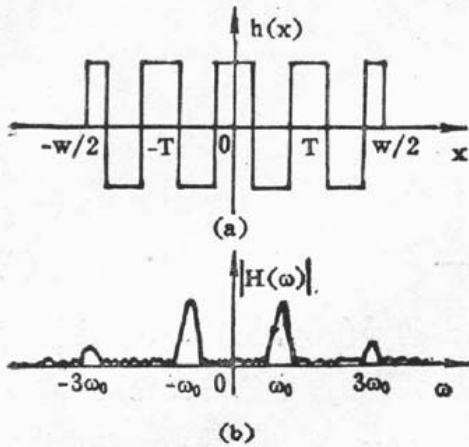


Fig. 2

(a) The window function of the bandpass filter, $w=4T$. (b) The spectrum of $h(x)$

插中,为进一步减少运算量,取 $h(x)$ 为:

$$h(x) = g_1(x) \cdot \left[\sum_{h=-\infty}^{+\infty} 2 \cdot g_2(x-nT) - 1 \right] \quad (9)$$

(9)式中

$$\begin{cases} g_1(x) = U\left(x + \frac{w}{2}\right) - U\left(x - \frac{w}{2}\right) \\ g_2(x) = U\left(x + \frac{T}{4}\right) - U\left(x - \frac{T}{4}\right) \end{cases} \quad (10)$$

(10)式中 $T=2\pi/\omega_0$, w 中可视实际情况选取, $U(x)$ 为单位阶跃函数. $h(x)$ 如图 2(a) 所示, 其频谱如图 2(b) 所示, 从图中可看出 $h(x)$ 的谱具有带通特性, 可用于条纹图的外插, 其中高次谐波通带对外插影响不大. 由于 $h(x)$ 只取 +1 和 -1 值, 故在做相关运算时, 不需要做乘法运算. 这就大大提高了外插的速度.

4 载波条纹图外插和分析结果

本文分析系统由 IBM-PC/AT 微机 and PCVISON plus 图象卡组成, 图象由 $512 \times 512 \times 8$ bit 象素构成. 为了在分析载波全息干涉图时考查边界效应及外插效果, 本文对一幅完整的实时法载波全息干涉图进行人为的切边, 得图 3(a) 所示条纹图用正交相干相位检测法对其进行处理, 得图 3(b) 所示相位图, 从图 3(b) 中可看出, 在边界部分出现较大的相位误差, 以至于各级条纹相位在边界处连在一起. 为减小边界效应的影响, 先用本文所述外插方法对图 3(a) 进行外插, 得图 3(c) 所示外插后条纹图, 然后再用正交相干相位检测法对其进行处理, 得图 3(d) 所示相位图, 在图 3(d) 中, 边界效应产生的相位误差就很小了. 为进一步看清外插的效果, 分别从图 3 各图的中间部分取出一行值, 对应示于图 4 中, 从图 4(c) 的条纹中已看不出突变的边界, 图 4(b)、(d) 中的标准相位值是从未切边的原干涉图中求出的, 故不存在边界效应, 通过统计可知图 4(d) 与 (b) 中相位误差之比为 0.07, 即边界相位误差减少了 93%. 对图 3(d) 的相位图进行去包裹处理, 就得到了完整的相位分布图, 结果如图 5 所示. 分析的相位误差决定于被分析干涉图的信噪比, 和正交相干相位检测方法中的低通滤波器的频率特性. 为估算分析误差, 用实时法得到了一平面离面转动的载波全息干涉图, 并用上述方法对该图进行自动分析, 得到的相位图用直线拟合方法得其均值, 则其方差就认为是相位的随机误差. 实际估算表明用本文方法分析的相位误差小于 $\lambda/50$, 分析时间包括外插和去包裹约为 15 分钟.

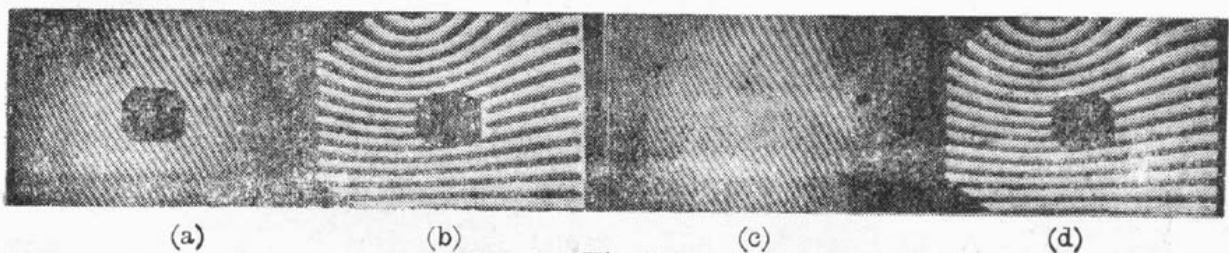


Fig. 3

(a) The holographic interferogram. (b) The phase of (a)
(c) The extrapolated image of (b). (d) The phase of (c)

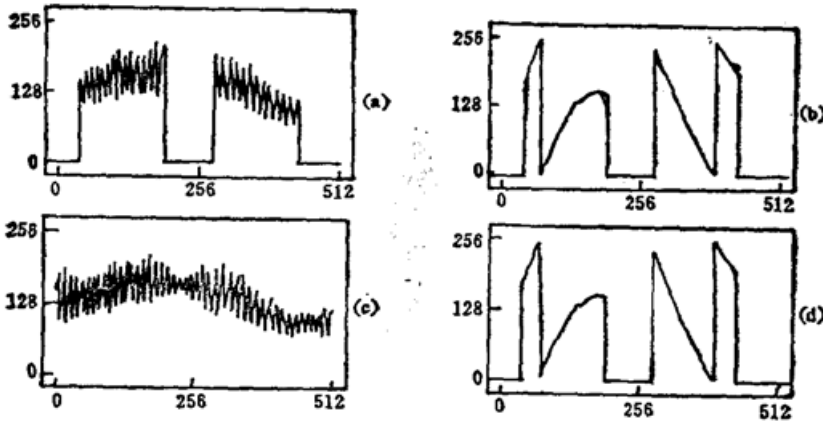


Fig. 4 The intensity values of Fig.3(a), (b), (c), (d) respectively. Horizontal cut near the center

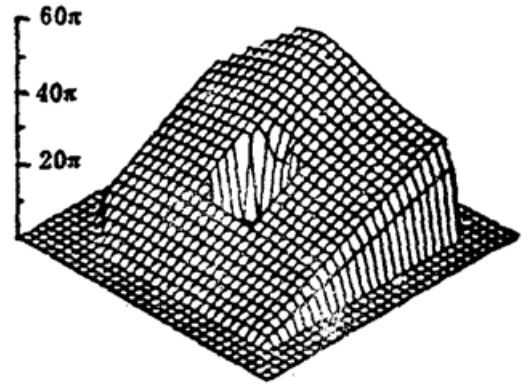


Fig. 5 The phase of Fig.3(d) after phase unwrapping

5 结 论

本文在以微机为基础的图象处理系统上,用正交相干相位检测法实现了载波全息干涉图的自动分析,并提出了一种易于微机实现的外插算法,基本解决了载波条纹图分析中的边界效应问题。实际分析表明本文方法具有较高的分析精度和速度。由于不需要昂贵的高级图象处理系统,所以具有较高的实用和推广价值。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72** (1): 156
- [2] W. W. Macy, Jr., *Appl. Opt.*, 1983, **22** (23)(Dec): 3898
- [3] S. Toyooka *et al.*, *Opt Commun.*, 1984, **51** (2): 68
- [4] D. J. Bone *et al.*, *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 10(May), 1653
- [5] G. Roddier *et al.*, *Appl. Opt.*, 1987, **26**, No. 9(May), 1668
- [6] 陈文艺,谭玉山. *光学学报*, 1990, **10** (12): 1103

Automatic analysis of holographic interference photo-carrier fringe patterns

CHEN WENYI TAN YUSAN

(Dept. of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 4 June 1991)

Abstract

The automatic analysis of holographic interference photocarrier fringe patterns has been realized by using orthogonal coherent phase detection method. The edge effects of analyzing the fringe patterns is discussed, and a extrapolation algorithm suited for microcomputer processing has been proposed. Finally, the analysis results of the fringe patterns are shown in this paper.

Key words holographic interference photocarrier fringe patterns, phase detection, edge effects.