

# 调相光栅的正交相干相位检测

陈文艺 谭玉山

(西安交通大学 机械系, 西安 710049)

## 提 要

本文提出了一种解调调相光栅相位的新方法。将一幅相位调制光栅图输入计算机, 通过正交相干相位解调算法处理, 能够高精度、快速地获得光栅的相位分布。本文详细论述了正交相干相位解调原理, 并给出实验系统和处理结果, 最后与其他类似的相位解调方法进行了比较。

关键词: 调相光栅, 正交相干相位检测。

## 一、前 言

近年来干涉条纹图的自动分析有很大发展, 目前采用的主要方法有两类: 一类是直接对干涉图进行滤波、二值化、抽骨架等数学图像处理, 这类方法精度较低、对干涉图背景噪声敏感、不易判别条纹凸凹<sup>[1]</sup>; 另一类是采用相移技术<sup>[2]</sup>, 它克服了前一类方法的缺点, 但需要高精度的相移器。此外, 还有一类方法不是直接分析普遍干涉图, 而是引入高频载波到干涉图中, 形成类似于调相光栅的载波干涉图, 如各种载波全息干涉图, 载波莫尔干涉图等, 然后再从调相光栅中解调出干涉图相位分布。这类方法不但可以分析干涉图, 也能分析各种变形光栅的相位分布。为解调调相光栅相位, Takeda 等人提出了傅里叶变换法<sup>[3, 4]</sup>; Toyooka 等人提出了空间相位检测法<sup>[5, 6]</sup>。在求取相位分布时, 它们都是先将载波干涉图或变形光栅图直接由摄像机摄取, 经 A/D 转换输入计算机, 不需要相移器和多幅图像; 然而傅里叶变换法是通过将输入图逐行作傅里叶变换, 并取出一级谱作反变换, 从中求出相位分布, 而空间相位检测法是在空域内对输入图作正弦匹配, 求出相位分布。本文提出的正交相干相位检测法是在空域内对输入图进行处理, 根据不同的输入图像, 可选取不同系统参数, 以便兼顾处理速度和精度。正交相干相位检测法的速度和精度介于空间相位检测和傅里叶变换法之间, 因此具有更大的灵活性和适应性。

## 二、原 理

正弦载波的调相光栅光强分布可表示为

$$I(x, y) = A_0(x, y) + 2A_1(x, y) \cos[\omega_0 x + \varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中  $\varphi(x, y)$  是相位调制函数, 即要求的相位分布,  $A_0(x, y)$  的背景光强,  $A_1(x, y)$  是条纹对比度,  $\omega_0$  是载波角频率。若载波是非正弦的, 是光强分布可表示为

$$\left. \begin{aligned} I(x, y) &= \sum_{-\infty}^{+\infty} q_n(x, y) \exp(in\omega_0 x), \\ q_n(x, y) &= A_n(x, y) \exp[in\varphi(x, y)]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

当  $|n| \ll 1$  时, (2) 式变为 (1) 式。将角频率为  $\omega_0$  的正弦函数, 乘以 (2) 式得

$$I_1(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{+\infty} q_n(x, y) \{ \exp[i(n+1)\omega_0 x] - \exp[i(n-1)\omega_0 x] \}. \quad (3)$$

若  $q_n(x, y)$  的频谱宽度足够窄, 则对  $I_1(x, y)$  进行空域低通滤波, 可使  $I_1(x, y)$  的零级频谱分量通过, 而其它分量被衰减掉。则有

$$I_1(x, y) = \frac{1}{2} [q_1(x, y) - q_{-1}(x, y)]. \quad (4)$$

由 (2) 式知

$$I_1(x, y) = A_1(x, y) \sin \varphi(x, y). \quad (5)$$

同理, 将角频率为  $\omega_0$  的余弦函数, 乘以 (2) 式并通过低通滤波, 由 (2) 式知

$$I_2(x, y) = A_1(x, y) \cos \varphi(x, y). \quad (6)$$

由 (5)、(6) 式得

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_1(x, y)}{I_2(x, y)} \right]. \quad (7)$$

因为正切函数的周期性, 直接求出的  $\varphi(x, y)$  是从  $-\pi/2$  到  $\pi/2$  间值, 利用  $I_1(x, y)$  的符号, 可确定  $\varphi(x, y)$  从  $-\pi$  到  $\pi$  间值, 即

$$\bar{\varphi}(x, y) = \begin{cases} \varphi(x, y) - (\pi/2); & \text{当 } I_1(x, y) \geq 0 \\ \varphi(x, y) + (\pi/2); & \text{当 } I_1(x, y) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$\bar{\varphi}(x, y)$  为  $-\pi$  到  $\pi$  间值。当  $\bar{\varphi}(x, y)$  超出  $2\pi$  范围时, 可通过相位的突变判别是加  $2\pi$  值或减  $2\pi$  值, 最后通过相位的合成, 就能得到整个相位分布函数。

上述解调相位的方法类似于通信中的相干解调, 且用到两个正交的三角函数, 所以称之为正交相干相位检测法。

### 三、实验系统组成及处理结果

本文实验系统组成如图 1 所示。由投影仪将矩形光栅投影到物体上, 投影光栅相位受物体高度调制, 产生调相光栅, 被电视摄像机摄入, 经 PCVISION/plus 图像卡转换为数字图像, 通过正交相干相位解调即可求出调相光栅的相位分布。在实际求解时, 首先不放待测物体, 直接输入参考面的光栅图, 如图 2(a) 所示, 采用图像处理方法直接求光栅的粗略平均频率  $f_0$ , 以此频率作为光栅的载频对图 2(a) 解调, 可求出其相位分布如图 2(c) 所示, 载频的误差及投影栅在  $R$  面上的变形产生的相位分布都包含在图 2(c) 中, 可记为初始相位  $\varphi_0(x, y)$ 。然后放入待测物体, 得变形光栅如图 2(b) 所示, 本文实验中待测物体为四棱锥, 以  $f_0$  为载频对图 2(b) 解调, 得其相位分布  $\varphi(x, y)$ , 如图 2(d) 所示, 由此可知高度调相产生的相位分布为

$$\phi(x, y) = \varphi(x, y) - \varphi_0(x, y), \quad (9)$$

式中  $\phi(x, y)$  的三维显示如图 3 所示。关于载波干涉图, 因其载波为正弦波, 只是以上处理



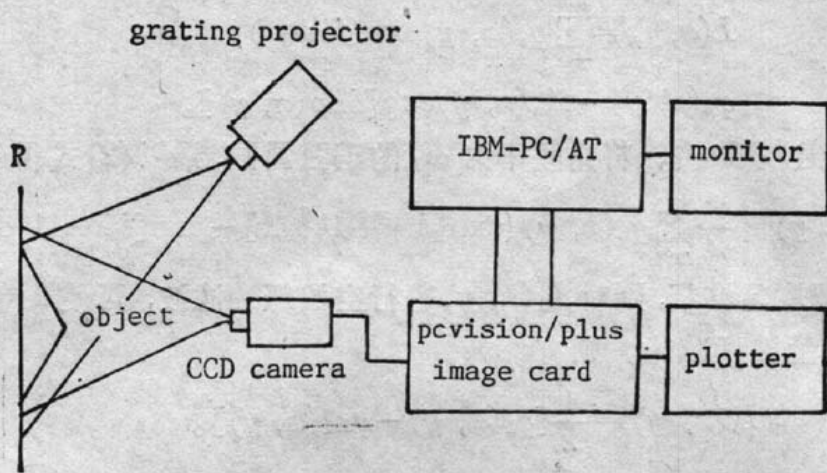
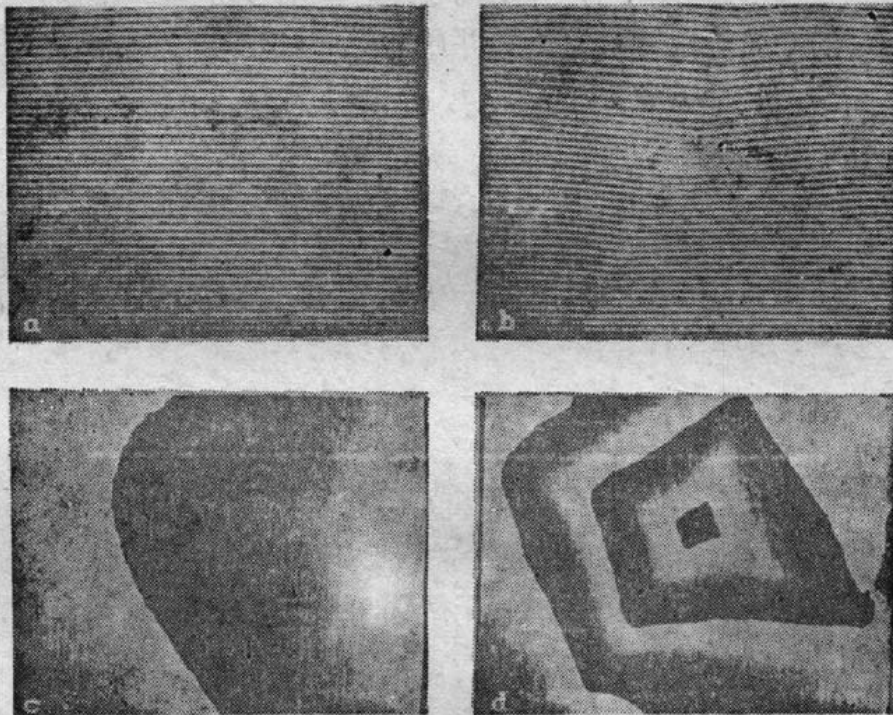


Fig. 1 Block diagram of the shape measurement system



(a) Reference grating image; (b) Deformed grating image;  
(c) Phase distribution of (a); (d) Phase distribution of (b)

Fig. 2

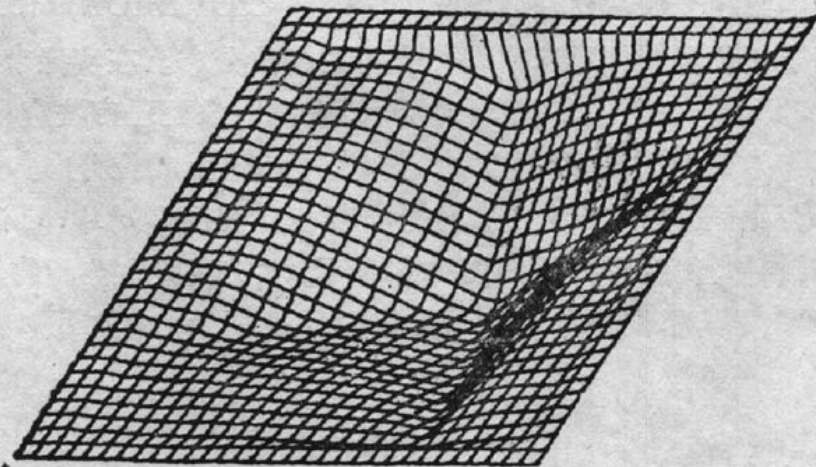


Fig. 3 Resultant perspective plot of  $\phi(x, y)$

方法的特例, 本文就不再累述了。

## 四、讨 论

对(2)式沿  $x$  方向作一维傅里叶变换, 得调相光栅的频谱为

$$\begin{aligned} G(\omega, y) &= \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) \exp(-i\omega x) dx \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_n(\omega - n\omega_0, y), \end{aligned} \quad (10)$$

式中  $Q_n(\omega, y)$  为  $q_n(x, y)$  频谱。图 4 为  $G(\omega, y)$  示意图。由傅里叶变换原理和本文所述正交相干相位检测原理可知, 两种方法的不同点在于, 傅里叶变换法是通过傅里叶变换和频域滤波取出单边一级谱内的相位信息, 而正交相干相位检测是通过频谱搬移和空域内实现的低通滤波取出一级谱内的相位信息, 能调相位的精度与低通的性能有关。对计算机图像处理而言, 在空域内实现低通滤波是较快的, 且有快速算法, 因此采用正交相干相位检测可根据输入图像特征, 在保证精度的条件下, 得到高的处理速度, 而傅里叶变换法不论处理什么图, 必须作复数的快速傅里叶变换。在本文实验系统中, 采用正交相干相位检测法用 C 语言编写的程序处理一幅  $512 \times 512 \times 8$  的图像, 大约需要 2 分钟, 在同样硬件条件下, 这比傅里叶变换法快得多。

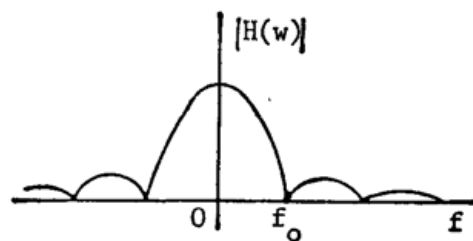
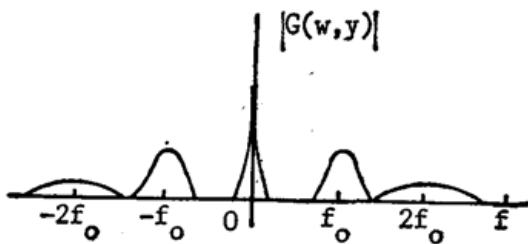


Fig. 4 Amplitude spectrum of  $I(x, y)$  Fig. 5 Amplitude spectrum of the low band pass filter

在处理速度上空间相位检测比正交相干相位检测要快一些, 但空间相位检测存在一些限制条件和固有的理论误差, 实际上空间相位检测是正交相干相位检测的特例。由空间相位检测原理可知, 其  $S[I_i]$  和  $O[I_i]$  分别对反应于(7)式中的  $I_1(x, y)$  和  $I_2(x, y)$ , 只是空间相位检测法中低通滤波是通过在一个载波周期内积分实现的, 这等效于正交相干相位检测中使用宽度为  $1/f_0$  的非加权平滑滤波器, 其振幅特性如图 5 所示, 在阻带内有较大的起伏, 且次极大衰减只有约 13dB, 这样的低通是不能很好地滤除高频分量的, 特别是在  $Q_n(\omega, y)$  较宽, 非正弦载波时, 很易产生频谱混叠, 故空间相位检测要附加条件限制  $Q_n(\omega, y)$  频谱宽度, 并存在理论误差。由此可知, 使用正交相干相位检测的关键是设计一个性能较好的快速低通滤波器, 这在数字图像处理中不难办到。

## 五、结 论

本文提出了一种解调调相光栅相位的新方法——正交相干相位检测法。它在本质上与傅里叶变换法相同, 但运算量要小得多; 而空间相位检测法是正交相干相位检测法的特例。正



交相干相位检测法能够快速、高精度地解调调相光栅相位, 因此在与调相光栅有关的领域, 如干涉计量, 工业质量控制, 生物学及医学中的形状测量和实验力学等领域, 将获得广泛的应用。

### 参 考 文 献

- [1] W. R. J. Funnell; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 18 (Sep), 3245.
- [2] M. Chang; *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, **9**, No. 2, 101.
- [3] M. Takeda *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**, No. 1 (Jan), 156.
- [4] M. Takeda *et al.*; *Appl. Opt.*, 1983, **22**, No. 24 (Dec), 3977.
- [5] S. Toyooka *et al.*; *Opt. Commun.*, 1984, **51**, No. 2 (Aug), 68.
- [6] S. Toyooka *et al.*; *Appl. Opt.*, 1986, **25**, No. 10 (May), 1633.

## Orthogonal coherent phase detection of phase modulated gratings

CHEN WENYI AND TAN YUSAN

(Dept. of Mechanical Engineering, Xian Jiaotong University Xian)

(Received 8 May 1990)

### Abstract

A new method for phase detection of the phase modulated grating is proposed. Phase distribution of the grating can be acquired quickly and sensitively by taking a phase modulated grating image into computer and processing it by using orthogonal coherent phase detection algorithm. The principle of the technique is introduced in detail and the experimental results are shown. Finally, the technique is compared with other similar techniques.

**Key words:** phase modulated grating, orthogonal coherent phase detection.