

文章编号: 1001-3806(2002)01-0054-03

## 全息相移技术用于物体的三维面形测量\*

吕晓旭 钟丽云 黄守江 李 川 杨齐民 余灿麟

(昆明理工大学激光研究所, 昆明, 650051)

**摘要:** 提出将全息干涉条纹和相移技术用于三维面形测量, 首先利用相移进行位相解调, 得到各点的包裹相位分布, 再利用投影条纹最小二乘法得到的高度信息对位相进行去包裹处理, 从而得到具有较高精度的位相测量和相应的三维面形测量结果。

**关键词:** 相移技术; 三维面形测量; 离轴全息

**中图分类号:** O438.1; TN26 **文献标识码:** A

### Holographic phase shifting technique for 3D profilometry

L. Xiaoxu, Zhong Liyun, Huang Shoujiang, Li Chuan, Yang Qimin, She Canlin

(Institute of Laser, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650051)

**Abstract:** Based on holographic technique, the principle and experimental device for 3D profile measurement are introduced in the paper. The holographic interference fringe is used instead of projected fringe. Meanwhile, phase shifting technique is used to calculate the phase of the fringe and the wrapped phase distribution of the holographic fringe is produced. Then the unwrapping process will be made by means of the height obtained based on the least square of the projected fringe. Thus, phase measurement can be obtained with higher precision. Finally, the 3D shape data can be produced according to geometric relationship between phase and the object height.

**Key words:** phase shifting technique; 3D profilometry; off-axis holography

### 引 言

物体的三维面形测量具有十分重要的价值, 在计算机辅助设计、数控加工技术、产品质量检测、医学甚至艺术领域都有广泛的用途。位相测量轮廓术<sup>[1]</sup>由于对物体表面反射率的变化不敏感, 具有较高的测量精度, 易实现自动测量, 因而被广泛地研究。目前普遍采用的求解位相的方法有两类, 一类是傅里叶变换法<sup>[2]</sup>、另一类是相移技术<sup>[3]</sup>。相移技术由于在位相解调中处理速度快、可以测量任意几何形状的三维物体和测量精度高等特点, 现已被广泛用于三维物体的面形测量。但该方法需要相移器和多幅相移图, 其中, 相移器的精度、重复性以及稳定性等都直接影响到相移技术的精度和成败。我们提出用全息投影条纹替代干涉仪产生的投影条纹,

并通过改变再现光入射角度的实现相移, 然后对包裹相位进行去包裹处理, 从而得到各点的真实相位图以及相应的三维面形测量结果。

### 1 位相测量的基本原理和相移技术

图 1 是三维面形位相测量系统的示意图, 其中  $P$  为投影系统的出瞳中心,  $I$  为成像系统的中心,  $R$  为参考平面,  $G$  为空间频率为  $f$  的正弦投影条纹, 假定投影条纹的方向垂直于纸面。D 为 CCD 摄像机, 其扫描方向沿  $x$  轴方向。当正弦光场投影到待

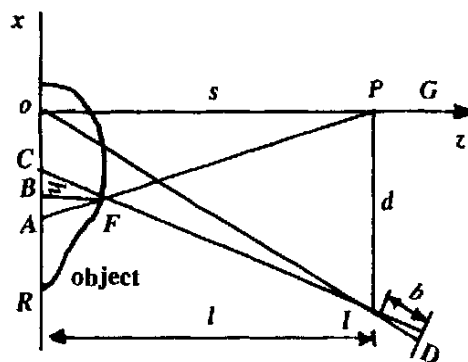


Fig. 1 Optical setup of the fringe projection for three dimensional profilometry

\* 云南省应用基础研究基金资助项目。

作者简介: 吕晓旭, 男, 1959 年 2 月出生。副教授。主要从事全息和全息干涉计量、散斑干涉计量和光学三维面形测量方面的研究工作。

收稿日期: 2001-01-08; 收到修改稿日期: 2001-05-25

测物体表面上,光场受物体表面面形调制后,CCD 摄像机接收被物体面形调制的变形条纹图像,通过图像处理技术进行位相解调,就可以得到物体的面形高度数据。

对变形光场的数学描述为:

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

式中,  $R(x, y)$  是一个与物体表面的光学特征有关的物理量,  $A(x, y)$  是背景光强,  $B(x, y)/A(x, y)$  为变形光场的条纹对比度,  $\phi(x, y)$  是位相值,它是物体表面高度的函数。

直接分析(1)式所表示的强度分布来确定位相  $\phi(x, y)$  是困难的,而相移算法却提供了一种精确测量位相的手段。下面利用相移算法对(1)式中的位相  $\phi(x, y)$  进行求解,若分别引入相移量  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ,可以得到以下4个式子:

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y)\cos\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y)\sin\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) - B(x, y)\cos\phi(x, y)] \\ I_4(x, y) &= R(x, y)[A(x, y) + B(x, y)\sin\phi(x, y)] \end{aligned} \quad (2)$$

由以上4个式可以得到:

$$\phi(x, y) = \arctan[(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)] \quad (3)$$

我们通过摄像机 D 可以测量参考平面上 C 点的位相  $\phi_C$  和物体上 F 点的位相  $\phi_F$ , 由于物体上 F 点的位相和参考平面上 A 点的相同,即  $\phi_F = \phi_A$ , 可以推导出物体上 F 点相对于参考平面 R 的高度为:

$$h(x, y) = l\overline{AC}/d(1 + \overline{AC}/l) \quad (4)$$

式中,  $l$  和  $d$  分别为摄像机成像中心到投影系统的出瞳中心和参考平面的距离,在实际测量中,由于  $d \gg \overline{AC}$ , 将(3)式代入(4)式可得:

$$h(x, y) = k\phi_{CF} \quad (5)$$

式中,  $k = l/2\pi fd$  为测量系统结构参数。

## 2 全息投影条纹的制作和相移

在以往三维面形测量系统中,产生投影条纹的装置较大,且干涉条纹较容易受到外界的影响而漂移和抖动,影响测量结果精度的提高。我们采用离轴全息的方法制作全息图来代替干涉仪产生等间距投影条纹,并通过细光束再现和

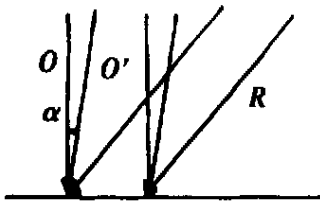


Fig. 2 Schematic diagram of making holographic projected fringe

改变再现参考光的入射角实现相移,并用于物体的三维面形测量。

其全息图的拍摄方法如图2所示,参考光  $R$  是平行光,物光  $O$  是垂直于干版的平行光,在作第1次记录后,把物光  $O$  偏转1个小角度  $\alpha$ ,成为物光  $O'$ ;再作第2次曝光,这样就完成了传播方向有一夹角为  $\alpha$  的两个平面波的记录。经化学处理后,在干版上可以观察到1组平行干涉条纹,其条纹间距  $\Lambda$  按右式计算<sup>[4]</sup>:  $2\Lambda\sin(\alpha/2) = \lambda$  (7) 式中,  $\lambda$  为拍摄时所用的激光光波波长。

当用细光束照射全息图使其再现时,再现物光  $O$  和  $O'$  总是相干的,由于细光束的直径较小(在毫米量级),每次被照射的基元全息照片的数目是一个不大的数字,而且它们都紧靠近在一起,它们再现成像的方向也相差甚微(即几何发散角很小),这就好像在成像方向加了一个小孔光阑,大大限制了成像光束的方向,因此,所有参加成像的基元全息照片的衍射像,在相当长的距离内都能较好地重合,形成大景深,高对比度和高信噪比的干涉条纹;通过改变再现细光束的入射角,就可实现全息干涉条纹的相移。

## 3 位相去包裹

由(3)式得到的位相分布  $\phi(x, y)$ , 被截断(或称为包裹)在反三角函数的主值范围内,因而是连续的,为了从位相函数计算被测物体的高度分布,必须将由于反三角函数引起的截断位相恢复为原来的位相分布,称为位相去包裹(或位相解断开)。由(3)式可以看出,所得到的位相值实际上是模为  $2\pi$  的理论位相值,其真实位相值为:

$$\Phi(x, y) = \phi(x, y) + 2\pi n(x, y) \quad (8)$$

式中,  $n(x, y)$  为整数,为了确定  $n(x, y)$  的值,进行下列讨论。

我们对投影条纹采用最小二乘多项式拟合法得到的三维面形高度为  $h'(x, y)$ <sup>[5]</sup>。由于位相测量得到的物体高度值与投影条纹多项式拟合所测量得到的值是一样的,不同的是前者的测量精度比后者高。假定投影条纹多项式拟合测量得到的精度不小于位相测量精度 0.5 级条纹,用投影条纹多项式拟合得到的结果来确定位相测量的结果是可靠的,因此可以得到<sup>[6,7]</sup>:

$$n(x, y) = \text{INT}[h'(x, y)/2\pi k] \quad (9)$$

式中, INT 表示取整操作,当上式中的参数接近整数时,可能会引起整数级条纹的误差,必须对上式进行修正,设点  $P(x, y)$  在两次不同测量精度下测得的

高度差为:

$$\varepsilon(m) = k[\Phi(x, y) + 2m\pi] - h'(x, y) \quad (10)$$

$$m = n(x, y), n(x, y) \pm 1$$

显然, (10) 式中  $m$  必然存在一个值  $m_0(x, y) \in \{n(x, y), n(x, y) \pm 1\}$ , 使得  $\varepsilon(m)$  为最小, 则  $m_0(x, y)$  就是  $\Phi(x, y)$  的精确条纹数值。这样就可以得到  $P(x, y)$  的精确的位相去包裹值。

#### 4 实验结果及讨论

在我们的实验系统中, 全息投影条纹的宽度为 1.0mm, 周期为 0.5mm, 摄像机光轴与全息投影光轴得夹角为  $45^\circ$ , 两者的距离相距 250mm, 实验中采用 MTV1802-CB CCD 摄像机对图像进行采集, 并通过的 MVPCL-V2A 将其量化为  $512 \times 512$  个像素, 相移通过改变再现细光束的入射角度来实现。

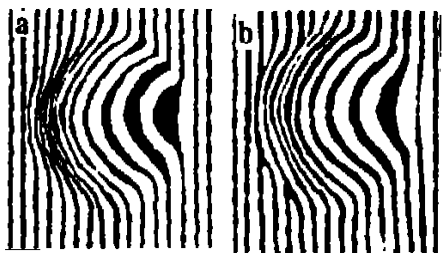


Fig. 3 Fringe pattern on the a protruding model surface with phase shifts of a=0 b= $\pi/2$

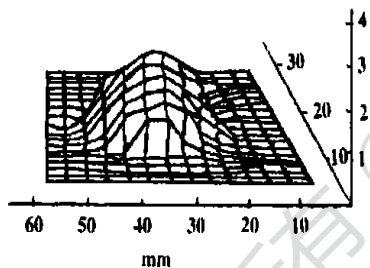


Fig. 4 Three-dimensional plot of the protruding model surface deformation

(上接第 74 页)

域作为反射区, 点阵在这一区域相对比较均匀而且密集, 而且经过调整透镜的校正, 使反射后光线在屏幕上所形成的点阵分布比较均匀, 能满足显示系统的光束行偏转要求。(3) 多柱转镜工作转速低, 属于刚性转子系统, 可以简化转镜的静平衡和动平衡提高系统的稳定性。

图 3a 是模型凸痕的变形条纹图, 图 3b 分别为条纹相移  $\pi/2$  变形条纹图, 图 4 为位相去包裹技术处理后得到的三维面形网格图。

#### 5 系统性能分析

由于在全息投影条纹三角法中引入相移技术, 因而提高了测量精度, 同时, 利用投影条纹多项式拟合得到的测量结果使得位相去包裹处理可以方便地进行, 且在测量中, 各点的去包裹处理是相对独立完成的, 即使在某些点出现去包裹误差, 也不会影响其它点的处理。

从以上分析可以看出, 为了能得到正确的位相测量结果, 投影条纹多项式拟合得到的测量精度应该达到位相测量精度的 0.5 级条纹, 我们的实验测量系统中投影放大率为 4, 条纹的周期为 0.5mm, 投影到被测物体表面上的条纹周期为 2mm, 通过 (6) 式可以算出位相测量的每级条纹所代表的高度值为 2mm, 即只要投影条纹多项式拟合测量精度达到 1mm 就可以。我们的实验系统中图像采集卡的分辨率为 8bit, 因此, 测量系统的分辨率达到 0.01mm 以上。

#### 参 考 文 献

- [1] Maurice H, Liu H Ch. Optics and Laser in Engineering, 1989, 11(3): 185.
- [2] Dresel T, Hausler G. J Optic, 1988, 48 (4): 215.
- [3] Creath K. Appl Opt, 1985, 24 (18): 3053~ 3058.
- [4] 于美文. 光学全息及光信息处理, 北京: 国防工业出版社, 1984: 6.
- [5] 钟丽云, 杨齐民, 李 川 *et al.* 激光杂志, 1999, 20(4): 31~ 37.
- [6] 赵 宏, 宋元鹤, 李根乾 *et al.* 光学学报, 1999, 19(4): 497~ 500.
- [7] Strand X T C, Optical Engng, 1985, 24 (1): 33.

#### 参 考 文 献

- [1] 王 本, 沈树群. 激光扫描和光盘技术. 北京: 北京邮电学院出版社, 1990.
- [2] Toyen G. SPIE Laser Scanning Components & Techniques, 1972 84: 138~ 145.
- [3] Minoura K. SPIE Proc, 1995, 1987: 264~ 273.
- [4] Beiser L. Appl Opt, 1995, 34(31): 7307~ 7317.
- [5] 周仁睦. 转子动平衡——原理、方法和标准. 北京: 化学工业出版社, 1992.