

# 光纤投影双频自动轮廓测量术

范 华 赵 宏 谭玉山

(西安交通大学激光红外应用研究所, 西安 710049)

**摘 要** 提出一种双频光纤投影自动轮廓测量技术; 用一分二单模光纤耦合器产生正弦光强分布的投影光栅场; 将光纤一臂绕在压电陶瓷(PZT)环上, 通过压电陶瓷环引入相移值; 以改变出射端两光纤间的距离来改变投影光栅场的空间频率, 用双频光栅技术实现复杂形面自动轮廓测量。

**关键词** 光纤耦合器, 相移, 轮廓术。

## 1 引 言

为了获得物体三维信息, 通常把一个光栅投影场投射到被测物体的表面, 这个光栅投影场由于受物体三维形状的调制而发生变形, 通过对变形的光栅场进行处理解调出代表物体高度的位相信息<sup>[1]</sup>。求解相位的最有效的方法是相移技术<sup>[2]</sup>, 它是通过相移装置引入已知相移量, 比较投影光栅场中同一点在不同相移量下的光强值变化来求解相位, 求解出的相位在  $-\pi, \pi$  处存在断点, 即被  $2\pi$  所包裹, 需进行去包裹处理以得到连续分布的相位图。包裹相位图由于存在噪声断点以及物体表面形状本身的断点使相位去包裹处理十分困难甚至失败, 因此相位去包裹是自动三维轮廓测量研究的难点, 人们提出了许多相位去包裹的方法<sup>[3~5]</sup>。

相移技术要求投影光栅场为一正弦光场, 正弦光栅尤其是高精度正弦光栅制作比较复杂, 因此通常人们用两个矩形光栅产生的莫尔条纹投影产生一近似的正弦光场<sup>[6]</sup>, 这将带来一定的误差, 另外这种结构也比较复杂, 体积大、重量重。

本文提出用一分二单模光纤耦合器产生正弦光强分布的投影光栅场; 计算机控制压电陶瓷晶体引入相移值; 改变出射端两光纤间的距离改变投影光栅场的空间频率, 用高低两种频率光栅场对物体进行测量, 可实现三维轮廓自动测量, 对复杂物体表面以及受噪声影响使原理相位图出现断点的情况亦能正确进行自动测量。

## 2 测量原理

### 2.1 相移三维轮廓术原理

当正弦光强分布的投影光栅场投影到三维物体表面时, 光栅场将变形, 变形的光栅场为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) [1 + \gamma(x, y) \cos \varphi(x, y)] \quad (1)$$

$I_0(x, y)$  为背景光强,  $\mathcal{V}(x, y)$  为条纹对比度,  $\mathcal{Q}(x, y)$  为光场相位, 它是物体高度的函数, 解调出  $\mathcal{Q}(x, y)$  即可获得物体的高度信息, 用相移器引入相移量  $\delta$ , 这时

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{1 + \mathcal{V}(x, y) \cos [\mathcal{Q}(x, y) + \delta]\} \quad (2)$$

采用二步相移, 取  $\delta = 0, 2\pi/3, 4\pi/3$  可求得:

$$\mathcal{Q}(x, y) = \arctg \left[ \sqrt{3} (I_3 - I_2) / (2I_1 - I_2 - I_3) \right] \quad (3)$$

对  $\mathcal{Q}(x, y)$  进行去包裹处理得到连续相位图。

## 2.2 相位与物体高度关系

三维面形测量系统光路结构如图 1 所示。P( $X_0, 0, Z_0$ ) 为投影光纤末端, C(0, 0,  $Z_0$ ) 为 CCD 摄象机, 两者位于同一水平高度, 光纤形成的干涉条纹投影到参考平面, 可计算出参考平面各点的相位分布; 放入被测物体后, 可以计算出被测物体表面各点的位相分布, 物体上 D 点与参考面上 A 点具有相同位相即  $\mathcal{Q}_B = \mathcal{Q}_D$ 。物体上 D 点与参考面上的 B 点通过成像镜头在 CCD 摄像机靶面上成像于同一点。

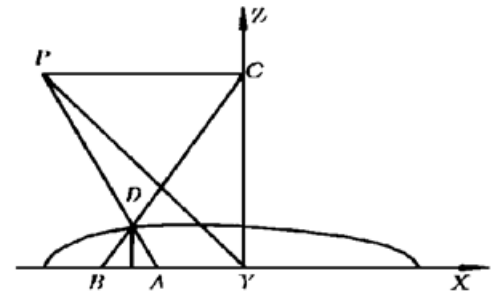


Fig. 1 Configuration schematic diagram

$$\overline{AB} = (\mathcal{Q}_B - \mathcal{Q}_D) / 2\pi f = (\mathcal{Q}_B - \mathcal{Q}_D) / 2\pi f = \mathcal{Q}_{BD} / 2\pi f$$

式中  $f = 1/p$  为投影光栅空间频率,  $\mathcal{Q}_{BD}$  是物体上的 D 点与参考面上 B 点的位相差。因为  $\triangle CPD$  与  $\triangle BAD$  相似, 所以

$$Z(x, y) = Z_0 \overline{AB} / X_0 (1 + \overline{AB} / X_0) \quad (4)$$

实际光路中, 光学设计使  $X_0 \gg \overline{AB}$ , 这时

$$Z(x, y) = (Z_0 \overline{AB} / X_0) = (Z_0 / X_0) (\mathcal{Q}_{BD} / 2\pi f) = k \mathcal{Q}_{BD} \quad (5)$$

式中  $k = Z_0 / 2\pi f X_0$  是与光路结构有关系的常数。

## 2.3 双频三维轮廓测量

选用不同空间频率的投影光栅将得到不同测量精度, 对同一物体使用空间频率为  $f_1$  和  $f_2$  的投影光栅进行两次测量, 选择  $f_1$  使测量物体时只有一级原理相位图  $\theta_0$ , 即原理相位图  $\theta_0$  小于  $2\pi$ , 不用去包裹处理即是最终的连续相位图; 选择  $f_2$  是满足测量精度要求的频率, 测量的原理相位图为  $\mathcal{Q}$ , 设去包裹后的最终相位图为  $\Phi$ , 其与原理相位图  $\mathcal{Q}$  之间的关系为:

$$\Phi = \mathcal{Q} + 2n\pi \quad (6)$$

式中  $n$  为整数。两种空间频率下测量到的物体高度分别为:

$$Z_1(x, y) = k_1 \theta_0, \quad Z_2(x, y) = k_2 \Phi = k_2 [\mathcal{Q}(x, y) + 2n(x, y) \pi]$$

式中  $k_1 = Z_0 / 2\pi f_1 X_0$ ,  $k_2 = Z_0 / 2\pi f_2 X_0$  分别为与光路有关的常量。

由于对同一物体进行测量, 因此  $Z_1(x, y)$  应该等于  $Z_2(x, y)$ , 即

$$\begin{aligned} k_1 \theta_0 &= k_2 [\mathcal{Q}(x, y) + 2n(x, y) \pi] \\ n(x, y) &= \text{INT} [k_1 \theta_0(x, y) / k_2 2\pi] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 INT 为取整数符号。由于两次测量投影光栅空间频率不同, 因此测量精度亦不同, 再者当原理相位图  $\mathcal{Q}$  的值接近  $2\pi$  时, (7) 式所求出的条纹级数  $n$  不是准确的条纹级数,  $n$  取值在  $n, n \pm 1$  之间不确定, 确定  $n$  值的原則是取  $m = n, n \pm 1$  时, 计算

$$|Z_1 - Z_2| = |k_2 [\mathcal{Q}(x, y) + 2m\pi] - k_1 \theta_0|$$

当  $|Z_1 - Z_2|$  最小时的  $m$  值即为确定的条纹级数。 $f_2$  频率下的相位图可以正确得到:

$$\phi = \varphi(x, y) + 2m\pi \tag{8}$$

从(7)式和(8)式可以看出, 这种相位测量方法的好处是任意一点  $(x, y)$  的真实相位图只与该点在频率  $f_2$  下得到的原理相位图  $\varphi(x, y)$  以及该点在频率  $f_1$  下得到的相位图  $\theta_0(x, y)$  有关, 与其它点的相位无关, 因此这种方法不受物体表面断点以及包裹图中噪声点的影响。

### 3 测量装置

#### 3.1 用单模光纤耦合器和相移器产生正弦投影光场

照明光源为波长 630 nm 带尾纤的半导体激光器, 将一个分光比为 50·50 的单模光纤耦合器焊接在半导体激光器的尾纤上; 从激光器发出的光被耦合器分成光强相等的两束光, 由于单模光纤芯径只有 9  $\mu\text{m}$ , 因此从光纤耦合器出射端射出的光可以被看成是两点光源发出的光, 当两光纤出射端靠的很近时将产生杨氏条纹, 其条纹间距为:

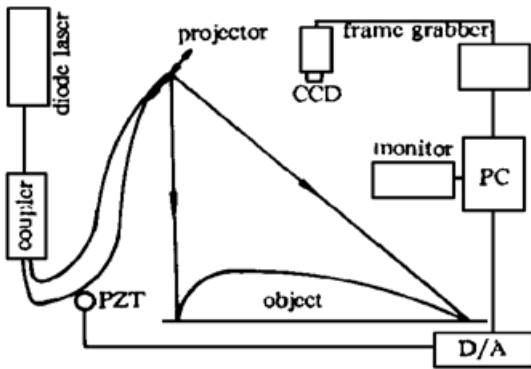
$$p = \lambda D / \delta$$

式中  $\lambda$  为光波长,  $D$  为两光纤出射端到观察屏的距离,  $\delta$  为光纤出射端两光纤芯间的距离。

光纤出射端两光纤芯间的距离  $\delta$  可进行微调从而可改变杨氏条纹间距, 方便地得到所需要的正弦投影光栅场。用压电陶瓷引入相移, 将单模光纤耦合器的一臂紧紧绕在一个压电陶瓷环上。压电陶瓷环由计算机通过 D/A 板控制。绕在压电陶瓷环上的光纤长度约 2 m 以便使加在压电陶瓷上的电压从 0 V 变到 10 V 时能够得到 0 到  $4\pi$  的相位变化。

#### 3.2 实验系统

实验测量系统如图2所示。它由正弦光栅场投影光路和计算机图像处理两部分组成: 尾



纤的半导体激光器发出的光被耦合器分成光强相等的两束光, 投射到被测物体表面, 光纤出射端两光纤芯间的距离可进行微调从而可改变杨氏条纹间距, 得到所需空间频率的正弦投影光栅场。受被测物体表面调制而变形的光栅场被 CCD 摄像机摄取并经图像板量化成数字图像由计算机进行处理。所用图像板分辨率为  $512 \times 512 \times 8$  bit。实验中选  $z_0 = 600$  mm,  $x_0 = 350$  mm。

Fig. 2 Schematic diagram of measuring system

### 4 测量结果

测量对象是人牙齿的石膏模如图 3(a) 所示, 它表面形状有许多断点。图 3(b) 是在空间

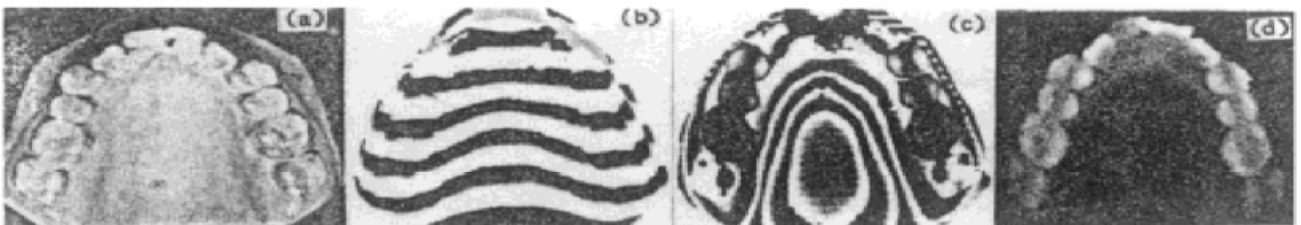


Fig. 3 Measuring results

频率  $f_1$  下测得的包裹相位图, 图 3(c) 是在空间频率  $f_2$  下测得的包裹相位图, 图 3(d) 是去包裹相位图。图 4 是计算机重建的三维图。

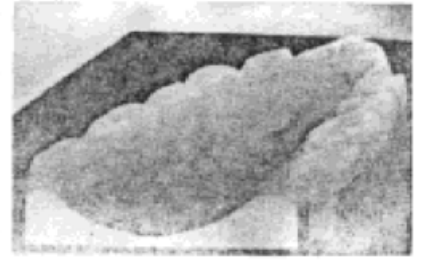


Fig. 4 Reconstructed shape

**结 论** 本文提出的双频投影测量系统可以自动测量物体三维面型, 对物体表面有断点以及对受到噪声影响的包裹相位图都能进行测量, 并得到正确的测量结果。采用了光纤耦合器和光纤相移器构成具有相移功能光栅投影器, 它具有以下优点: 首先, 它能产生真正的正弦投影光栅场; 第二, 光栅场空间频率能很容易地改变; 第三, 体积小、重量轻; 最后, 由于单模光纤芯径只有  $9\ \mu\text{m}$  左右因此它又起到一个针空滤波器的作用, 光学噪声被滤掉, 产生的光栅条纹场具有极高的条纹对比度。

### 参 考 文 献

- [1] M. Halioua, H. C. Liu, Optical Three-dimensional sensing by phase measuring profilometry. *Opt. and Laser in Engineering*, 1989, **11**(3) : 185~ 215
- [2] B. F. Ored, R. G. Dorsch, Profilometry by phase-shifted talbot images. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34) : 7955~ 7962
- [3] Fabrice Bremond, A phase unwrapping technique for object relief determination. *Opt. and Laser in Engineering*, 1994, **21**(1/2) : 49~ 60
- [4] J. A. Quiroga, E. Bernabeu, Phase-unwrapping algorithm for noisy phase-map processing. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(29) : 6725~ 6731
- [5] Hong Zhao, Wenyi Chen, Yushan Tan, Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(20) : 4497~ 4500
- [6] 赵 宠, 陈文艺, 谭玉山, 利用莫尔条纹的准正弦特性的三维轮廓术. *光学学报*, 1994, **14**(8) : 834~ 837

## Automatic Profilometry by Dual-Frequency of Optical Fiber Projection Grating

Fan Hua      Zhao Hong      Tan Yushan

(Institute of Laser & Infrared Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 24 September 1996)

**Abstract** A novel automatic profilometry technique by dual-frequency of optical fiber projection grating is introduced. A one to two ( $1\times 2$ ) optical fiber coupler is utilized to generate sinusoidal intensity projection grating. A piezoelectric (PZT) cylinder wrapped by one arm of the optical fiber coupler is utilized to introduce phase shift. Different frequencies of projection gratings can be got easily through adjusting the separate distance of the two projecting optical fiber ends. Three-dimension shape can be measured automatically with this technique even in the cases of true discontinuities and noise in the phase.

**Key words** optical fiber coupler, phase shift, profilometry.