

# 实验八 条纹投影三维面形测量

## 引言

非接触三维自动测量是随着计算机技术的发展而开展起来的新技术研究，它包括三维形体测量、应力形变分析和折射率梯度测量等方面。应用到的技术有莫尔条纹、散斑干涉、全息干涉和光阑投影等光学技术和计算机条纹图像处理技术。条纹投影以及各种光阑投影自动测量技术在工业生产控制与检测、医学诊断和机器人视觉等领域正占有越来越重要的地位。本实验是利用投影式相移技术，对形成的被测物面条纹进行计算机相移法自动处理的综合性实验。

## 一、实验目的

- 1、了解投影光栅相位法的形成机理。
- 2、了解一种充分发挥计算机特长的条纹投影相位移处理技术。
- 3、对于非接触测量有一定的感性认识。

## 二、实验原理

投影光栅相位法是三维轮廓测量中的热点之一，其测量原理是光栅图样投射到被测物体表面，相位和振幅受到物面高度的调制使光栅像发生变形，通过解调可以得到包含高度信息的相位变化，最后根据三角法原理完成相位---高度的转换。根据相位检测方法的不同，主要有 Moire 轮廓术、Fourier 变换轮廓术，相位测量轮廓术，本实验就是采用了相位测量轮廓术。

相位测量轮廓术采用正弦光栅投影相移技术。基本原理是利用条纹投影相移技术将投影到物体上的正弦光栅依次移动一定的相位，通过对采集到的移相变形条纹图进行计算得到包含物体高度信息的相位。

基于相位测量的光学三维测量技术本质上仍然是光学三角法，但与光学三角法的轮廓术有所不同，它不直接去寻找和判断由于物体高度变动后的像点，而是通过相位测量间接地实现，由于相位信息的参与，使得这类方法与单纯基于光学三角法有很大区别。

### 1. 相位测量轮廓术的基本原理

将规则光栅图像投射到被测物表面，从另一角度可以观察到由于受物体高度的影响而引起的条纹变形。这种变形可解释为相位和振幅均被调制的空间载波信号。采集变形条纹并对其进行解调，从中恢复出与被测物表面高度变化有关的相位信息，然后由相位与高度的关系确定出高度，这就是相位测量轮廓术的基本原理。

投影系统将一正弦分布的光场投影到被测物体表面,由于受到物面高度分布的调制,

条纹发生形变。由 CCD 摄像机获取的变形条纹可表示为:

$$I_n(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\Phi(x, y) + \delta_n] \quad (n=0, 1, \dots, N-1) \quad (1)$$

其中  $n$  表示第  $n$  帧条纹图。 $I_n(x, y)$ 、 $A(x, y)$  和  $B(x, y)$  分别为摄像机接收到的光强值、物面背景光强和条纹对比度。 $\delta_n$  为附加的相移值, 如采用多步相移法采集变形条纹图, 则每次相移量  $\delta_n$ 。所求被测物面上的相位分布可表示为:

$$\Phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi / N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi / N)} \right] \quad (2)$$

用相位展开算法可得物面上的连续相位分布  $\Phi(x, y)$ 。已知  $\Phi_r(x, y)$  为参考平面上的连续相位分布, 由于物体引起的相位变化为

$$\Phi_h(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_r(x, y) \quad (3)$$

根据所选的系统模型和系统结构参数可推导出高度  $h$  和相位差  $\Phi_h(x, y)$  的关系, 最终得到物体的高度值。下面具体分析高度和相位差之间的关系:

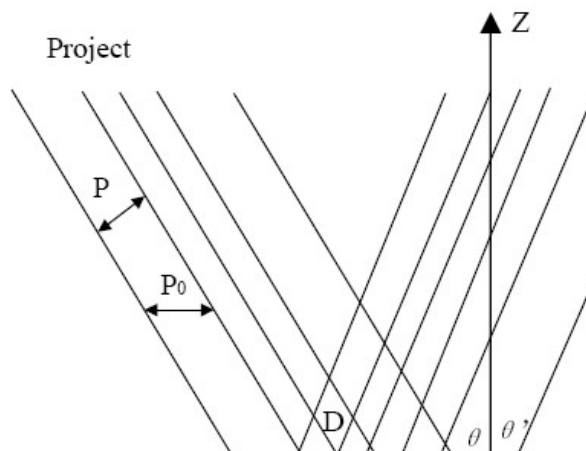


图 1 系统中高度和相位的关系

实际照明系统中, 采用远心光路和发散照明两种情况下, 都可以通过对相位的测量而计算出被测物体的高度。只是前者的相位差与高度之间存在简单的线性关系, 而在后一种情况下相位差与高度差之间的映射关系是非线性的。本实验的照明系统为远心光路。如图 1 所示, 在参考平面上的投影正弦条纹是等周期分布的, 其周期为  $p_0$ , 这时在参考平面上

的相位分布  $\Phi(x, y)$  是坐标  $x$  的线性函数，记为：

$$\Phi(x, y) = kx = 2\pi x / p_0 \quad (4)$$

以参考平面上  $O$  点为原点，CCD 探测器上  $D_c$  点对应参考平面上  $C$  点，其相位为  $\Phi_C(x, y) = (2\pi / p_0) \cdot \overline{OC}$ ， $D_c$  点与被测三维表面  $D$  点在 CCD 上的位置相同，同时其相位等于参考平面上  $A$  点的相位。则有  $\Phi_D = \Phi_A = (2\pi / p_0) \cdot \overline{OA}$ ，显然

$$\overline{OA} = (p_0 / 2\pi) \Phi_{CD} \quad (5)$$

则  $D$  点相对于参考平面的高度  $h$  为  $h = \frac{AC}{\tan \theta + \tan \theta'}$ ，当观察方向垂直于参考平面时，上式可表示为：

$$h = \frac{AC}{\tan \theta'} = (p_0 / \tan \theta) (\Phi_{CD} / 2\pi) \quad (6)$$

根据式(6)就可以求出物体上各点的高度值。

## 2. 相位的求取过程

如前所述，求得物体加入测量场前后的展开相位差就可以获得物体的高度，因此相位的求取过程是整个测量过程中重要的一环。而条纹图中的相位信息可以通过解调的方法恢复出来，常用的方法主要有傅立叶变换法和多步相移法。用傅立叶变换或多步相移求相位时，由于反正切函数的截断作用，使得求出的相位分布在  $-\pi$  和  $\pi$  之间，不能真实的反映出物体表面的空间相位分布，因此相位的求取过程可分为两大步：求：截断相位和截断相位展开。

### 2.1 求取截断相位

从条纹图中恢复出的相位信息由于它们恢复出的相位要经过反正切运算，使得求出的相位只能分布在  $-\pi$  和  $\pi$  的四象限内，这种相位称为截断相位  $\varphi$ 。与之相对应的真实相位称为展开相位  $\phi$ 。

傅立叶变换法仅仅通过对一幅条纹图处理就可以恢复出截断相位，获取图像时间短，更适合求测量速度快的场合。而相移算法是相位测量中的一种重要方法，它不仅原理直观，计算简便，而且相位求解精度与算法直接相关，可以根据实际需要选择合适的算法。其中，最常用的是使可控相位值  $\delta_n$  等间距地变化，利用某一点在多次采样中探测到的强度值来拟合出该点的初相位值， $N$  帧满周期等间距法是最常用的相移算法。下面以标准的四步相移算法为例来说明。四步相移算法中，式(1)中  $n=4$ ，相位移的增量  $\delta_n$  依次为：0，

$\pi/2$ ,  $\pi$ ,  $3\pi/2$  相应的四帧条纹图:

$$\begin{cases} I_1(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_2(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \sin[\phi(x, y)] \\ I_3(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I_4(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \sin[\phi(x, y)] \end{cases} \quad (7)$$

联立上式中的四个方程, 可以计算出相位函数

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (8)$$

对于更常用的  $N$  帧满周期等间距相移算法, 采样次数为  $N$ ,  $\delta_n = n \sim N$ , 则

$$\phi(x, y) = \arctan \left[ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \sin(2\pi / N)}{\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x, y) \cos(2\pi / N)} \right] \quad (9)$$

本论文采用  $N$  帧满周期等间距相移算法, 理论分析证明,  $N$  帧满周期等间距算法对系统随机噪声具有最佳抑制效果, 且对  $N-1$  次以下的谐波不敏感。

## 2.2 截断相位展开

相位测量轮廓术通过反正切函数计算得到相位值 (见式 9), 该相位函数被截断在反三角函数的主值范围  $(-\pi, \pi)$  内, 呈锯齿形的不连续状。因此, 在按三角对应关系由相位值求出被测物体的高度分布之前, 必须将此截断的相位恢复为原有的连续相位, 这一过程就是相位展开 (Phase unwrapping), 简称 PU 算法。

相位展开的过程可从图 2 和图 3 中直观地看到。图 2 是分布在  $-\pi$  和  $\pi$  之间的截断相位。相位展开就是将这一截断相位恢复为如图 3 所示的连续相位。相位展开是利用物面高度分布特性来进行的。它基于这样一个事实: 对于一个连续物面, 只要两个相邻被测点的距离足够小, 两点之间的相位差将小于  $\pi$ , 也就是说必须满足抽样定理的要求, 每个条纹至少有两个抽样点, 即抽样频率大于最高空间频率的两倍。由数学的角度而言, 相位展开是十分简单的一步, 其方法如下: 沿截断的相位数据矩阵的行或列方向, 比较相邻两个点的相位值 (如图 2, 如果差值小于  $-\pi$ , 则后一点的相位值应加上  $2\pi$ ; 如果差值大于  $\pi$ , 则后一点的相位值应减去  $2\pi$ )。

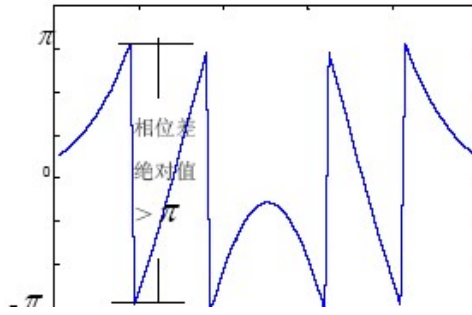


图2 截断相位

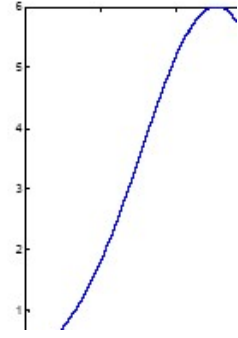


图3 连续相位

下面以一维相位函数 $\phi_w(j)$ 为例说明上述相位展开过程。 $\phi_w(j)$ 为一维截断相位函数，其中， $0 \leq j \leq N-1$ ，这里， $j$ 是采样点序号， $N$ 是采样点总数。展开后的相位函数用 $\phi_u(j)$ 来表示，则相位展开过程可表示如下：

$$\begin{aligned}\phi_u(j) &= \phi_w(j) + 2\pi n_j \\ n_j &= \text{INT}(\phi_w(j) - \phi_w(j-1) / 2\pi + 0.5) + n_{j-1} \\ n_0 &= 0\end{aligned}\tag{10}$$

上式中，INT是取整运算符。

实际中的相位数据都是与采样点对应的一个二维矩阵，所以实际上的相位展开应在二维阵列中进行。首先沿二维矩阵中的某一列进行相位展开，然后以展开后的该列相位为基准，沿每一行进行相位展开，得到连续分布的二维相位函数。相应的，也可以先对某行进行相位展开，然后以展开后的该行相位为基准，沿每一列进行相位展开。只要满足抽样定理的条件，相位展开可以沿任意路径进行。

对于一个复杂的物体表面，由于物体表面起伏较大，得到的条纹图十分复杂。例如，条纹图形中存在局部阴影，条纹图形断裂，在条纹局部区域不满足抽样定理，即相邻抽样点之间的相位变化大于 $\pi$ 。对于这种非完备条纹图形，相位展开是一个非常困难的问题，这一问题也同样出现在干涉型计量领域。最近已研究了多种复杂相位场展开的方法，包括网格自动算法、基于调制度分析的方法、二元模板法、条纹跟踪法、最小间距树方法等，使上述问题能够在一定程度上得到解决或部分解决。

### 3. 高度计算

在上面分析了测量高度和系统结构参数的关系，如公式(6)。其中有三个与系统结构有关的参数，即投射系统出瞳中心和CCD成像系统入瞳中心之间的距离 $L$ ，共轭相位面上的光栅条纹周期 $p_0$ ，以及投射光轴和成像光轴之间的夹角 $\theta$ 。这几个参数是在系统满足一定约束条件下测得参数值，这些约束条件包括：

- 1) CCD成像系统的光轴必须和参考面垂直，即保证一定的垂直度；
- 2) 投射系统的出瞳和成像系统的入瞳之间的连线要与参考面平行；

3) 投射系统的光轴和 CCD 光轴在同一平面内，并交于参考面内一点。

为了方便系统测量，本实验采用简便的标定法，避免参数标定的繁琐过程，提高系统的适应性。标定测量原理如图 4 所示，首先建立如图 4 所示的物空间坐标系  $O\text{-}XYZ$  和相位图像坐标系  $O_pIJ$ ：以参考面所在的平面为  $XOY$  平面(也就是零基准面)，垂直于  $XOY$  面并交  $XOY$  于点  $O$  的轴为  $Z$  轴，此时建立的坐标系称为物空间坐标系；选择相位图的横轴为  $J$ 、竖轴为  $I$  建立相位图像坐标系。在参考面初始位置  $z_1=0$  时，可以通过多步相移法获得参考面上的截断相位分布，该截断相位的展开相位分布为  $\phi(i, j, 1)$ ， $i, j$  是相位图坐标系中的坐标值；将参考面沿  $z$  轴正方向平移一定距离  $\Delta Z$  到达  $z_2= \Delta Z$  后，同样通过多步相移法获得参考面条纹分布，并由此求得展开相位  $\phi(i, j, 2)$ ；同理，依次等间距移动参考面到多个位置  $z_k=(k-1)\Delta z$  并得到对应位置参考面上的展开相位  $\phi(i, j, k)$ ，其中  $k=3, 4, \dots, K$ 。由于在  $z_k, k=1, 2, \dots, K$  的参考面作为后续测量的相位参考基准，因此把它们统称为基准参考面。

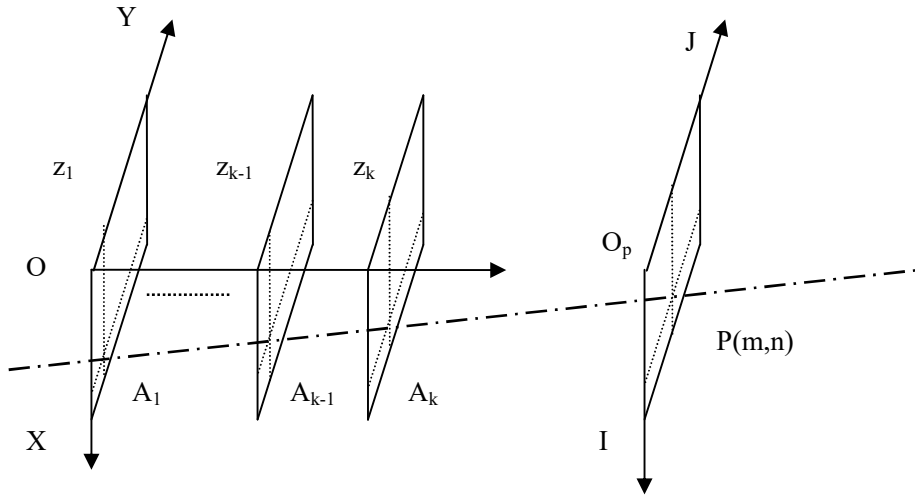


图 4 不同位置参考面高度与相位的对应关系

由相位-高度映射算法，物面高度(相对于参考平面) 可表示为：

$$\frac{1}{h(x, y)} = a(x, y) + \frac{b(x, y)}{\phi_h(x, y)} \quad (11)$$

一般情况下， $\frac{1}{h(x, y)}$  和  $\frac{1}{\phi_h(x, y)}$  成线性关系。但在实际测量中由于成像系统的像差

和畸变(特别是在图像的边缘部分)， $\frac{1}{h(x, y)}$  和  $\frac{1}{\phi_h(x, y)}$  之间的关系用高次曲线表示更

为恰当。本文采用二次曲线，(10) 式可改写为：

$$\frac{1}{h(x,y)} = a(x,y) + b(x,y) \frac{1}{\phi_h(x,y)} + c(x,y) \frac{1}{\phi_h^2(x,y)} \quad (12)$$

为了求出  $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 、 $c(x,y)$ ，图 4 中基准参考平面(其法线方向与摄像机光轴平行)的个数必须大于等于 4，相邻平面间的距离为一已知常数。

首先令  $\phi_h(x,y)$  为零基准面上的连续相位分布，由平面 2、平面 3、平面 4 三个平面得到的三个线性方程可解出  $a(x,y)$ 、 $b(x,y)$ 、 $c(x,y)$  三个未知常数(注：这里每个常数实际上是二维常数矩阵)；保存三个常数到计算机中，由测量时得到相位图的绝对相位，对相位图中的每一点进行相应运算，就可以确定每一点的高度值，即实现面形的测量

### 三、实验装置

光纤式白光点光源，LD 激光光源，精密平移台，干板架，成像镜头，面阵 CCD，图像采集卡，光栅，条纹投影测量物、电脑等。

### 四、实验内容和操作方法

#### 1. 光路调整

(1) 用半导体激光做高度基准，调整各光学透镜中心高度一致。各个元件都固定在导轨上。首先校准激光束水平度。可用可变光阑，在邻近激光器的位置，使激光束通过光阑的中心，再把光阑沿导轨平行移至台上尽量远位置，调整激光器俯仰角度和光阑的高度，使光阑中心与激光束中心重合。再将光阑沿导轨平行移至邻近激光器的位置，调整激光器俯仰角度和光阑的高度，使光阑中心与激光束中心重合。重复上述过程，直到邻近和远离两个位置光阑中心与激光束中心都重合。在此光束中逐个放入透镜的支架，调整支架高度，使有无透镜时激光束中心不发生上下偏移，此时系统各光学元件光轴重合；

(2) 将白光点光源放入光路中，将透镜 1 放入光路中，调节白光点光源的高度，使从透镜出射的光通过测量物的中心；

(3) 将固定标准平面的支架固定在导轨上，将固定光学件的导轨与装置 CCD 的导轨 1 成 25 度左右角安置；

(4) 调节标准平面的俯仰，使标准平面垂直系统的光轴；调节方法与步骤(1)类似，在标准平面上做一标记点，相当于步骤(1)中的光阑中心；

(5) 调整各个透镜间的距离，将白光点光源放置在透镜 1 的焦平面上，从透镜 1 出射近似平行光照明正弦光栅，透过透镜 2 照射到待测物体表面；

(6) 调节 CCD 的高度，使 CCD 镜头中心与透镜 2 尽量等高；

(7) 调节 CCD 与被测面的距离，使光栅像充满整个 CCD 像面。

#### 2. 实验测量过程

(1) 将 2 线/mm 的正弦光栅放入调整好的光路中，调节 CCD 与被测面的距离，使光栅像充满整个 CCD 像面；

(2) 调整测量物的高度，使光栅像照射到感兴趣区域，同时此区域可被 CCD 接收；

(3) 打开软件图像采集功能, 将有标定光源的图像信息记录下来

(4) 沿垂直于导轨方向移动光栅, 每次移动  $1/5$  栅距 ( $0.1\text{mm}$ ), 记录每次移动后的光栅图像, 共 5 幅; (若用 4 次相移则为  $0.125\text{mm}$  四帧条纹图共五幅图像)

### 3. 软件处理

用软件处理 6 幅图像, 再现被测面的面形特征。

### 4 结果分析

将测量结果报告输出, 根据误差程度分析误差原因, 调整实验精度, 优化实验方案

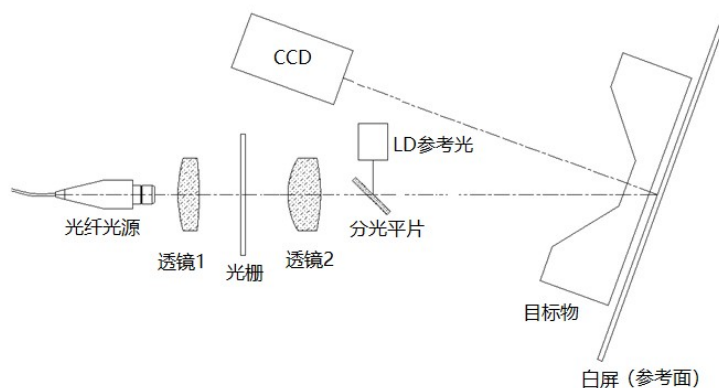


图 5 系统光路

## 五、注意事项

- 1、注意电源开关的开启顺序和关闭顺序。
- 2、光学器件的光学表面是经过精密加工光洁度极高的表面, 不能用手触摸; 不得用擦镜纸以外的物品去擦拭。
- 3、测量完毕, 应把各组件整理整齐。

## 六、预习要求

根据实验内容, 查阅相关投影光栅相位法、条纹投影相位移处理技术等文献资料, 熟悉这些方法的理论基础, 了解面阵 CCD 的工作原理。

## 七、思考题

- 1、相位检测方法有那些? 各种方法间异同点是什么?
- 2、光学三维测量技术理论基础是什么?