

# 基于调制度测量的三维轮廓术\*

苏礼坤 苏显渝 李万松 向立群

(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

**摘 要** 介绍了基于调制度测量的三维轮廓术的测量方法的原理和过程, 并给出了实物测量。结果证明它在原理上是正确的、可行的。此方法对三维轮廓术、三维传感及机器视觉的应用具有重要意义。

**关键词** 光学三维轮廓术, 调制度测量, 相移。

## 1 引 言

对物体三维轮廓术的测量已经发展起来的方法主要有相移测量术(PMP)<sup>[1, 2]</sup>、傅里叶变换术(FTP)<sup>[3, 4]</sup>、莫尔条纹法<sup>[5]</sup>、飞行时间法<sup>[6]</sup>、相干雷达技术<sup>[7, 8]</sup>等, 其中前三种方法的测量是基于三角测量原理, 即通过分析受物面调制的投影条纹的变形情况获取空间信息, 所以受到阴影、遮挡、相位截断的限制, 不能测量剧烈的面型变化。飞行时间法虽然可以实现垂直测量, 但因空间信息是靠光线的时差得到的, 对信号处理的时间分辨率有特别高的要求, 所以一般只用于大范围绝对距离测量。而同样可以实现垂直测量的相干雷达技术的移动步长要小于光源的相干长度, 即大约  $2\ \mu\text{m}$ , 对于高度差为  $2\ \text{cm}$  的物体, 就要移动约 10,000 步, 第一步还要进行相移操作, 所以又受到时间限制, 只能用于  $\mu\text{m}\sim\text{mm}$  级的微测量。对于面型有剧烈变化的物体的常规三维测量, 至今还没有一个适当的方法。而基于调制度测量的三维轮廓术(MMP)<sup>[9]</sup>, 它完全基于投影到待测物面上的正弦条纹的调制度分布, 并且投影方向和探测方向一致, 所以可以实现对物体的垂直测量, 不用解相位和相位展开, 亦即可以测量物表面高度剧烈变化或不连续的区域。它解决了前三种方法对阴影、遮挡、位相截断的限制, 且设备简单, 易于实现。本文将详细讨论基于调制度测量的三维轮廓术的原理、三维信息处理方法和实验结果。这种方法是将正弦条纹投影到物面上, 利用横向相移技术计算物面上各点的调制度, 然后将物体在纵向范围内移动  $N$  次, 就可得到  $N$  帧调制度图, 再找出每一个像素点调制度最大值的位置, 由此位置就可计算出此像素点的高度值。

## 2 原 理

将一正弦光栅投影到物体上, 从与投影方向相同的方向上探测被测物体上的条纹图形,

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-06-16; 收到修改稿日期: 1998-08-18

物体上的光强分布可表示为:

$$I(x, y) = I_0(x, y) + C(x, y) \cos(2\pi f x + \phi_0) \quad (1)$$

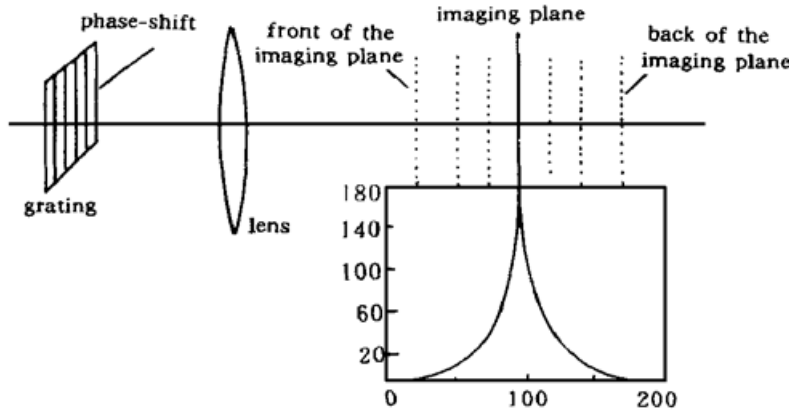


Fig. 1 The modulation distribution of the projection grating in front and back of the imaging plane

式中  $I_0(x, y)$  为背景强度,  $C(x, y)$  为条纹对比度,  $f$  为投影条纹空间频率,  $\phi_0$  为初位相。

在正弦光栅的成像面上, 条纹对比度最大, 而在成像面前后, 即离焦像面上条纹对比度降低, 在光轴方向就有一对比度分布, 不同的对比度对应此点到投影系统的不同距离。如图 1 所示。

为计算调制度, 在与正弦光栅条纹垂直的方向上, 以等间距移动光栅  $L$  ( $L \geq 3$ ) 次, 总移动量为一个光栅周期。则

可得  $L$  帧条纹图, 由此就可计算对应点的调制度。

考虑某一点的所有相移强度值, 该点条纹的调制度函数  $M(x, y)$  定义为<sup>[10]</sup>:

$$M(x, y) = \sqrt{\left[ \sum_{i=0}^{L-1} I_i(x, y) \sin(2i\pi/L) \right]^2 + \left[ \sum_{i=0}^{L-1} I_i(x, y) \cos(2i\pi/L) \right]^2} \quad (2)$$

式中  $I_i$  是第  $i$  次相移的强度值。

将(1)式代入(2)式可得如下表达式:

$$M(x, y) = \frac{1}{2}LC(x, y) \quad (3)$$

由此可知, 调制度函数  $M(x, y)$  与背景强度  $I_0(x, y)$  无关, 而是与条纹对比度  $C(x, y)$  成正比。在基于调制度测量的三维轮廓术测量中的调制度实际相当于条纹对比度。在光栅像平面上的像素点调制度最大, 在光栅像面前后的像素点调制度变小。

在实际测量中, 通过前后移动投影系统, 保持探测系统和物体的相对位置不动, 则可由物体纵深范围内的调制度三维分布得到待测物体的空间信息。

### 3 信息处理方法

基于调制度测量的三维轮廓术的测量装置如图 2 所示。在测量过程中, 保持待测物体、分束器、CCD 摄像机的位置不动, 在投影光轴方向依次平移投影系统, 使光栅的成像面扫描待测物体的纵深范围, 这一过程示于图 3 中。每次平移后在同一扫描面上利用相移技术获得  $L$  帧条纹图, 由此  $L$  帧条纹图计算这一扫描面上所有像素点的调制度。如果总平移次数为  $N$ , 则在 CCD 面阵上, 相对于时间轴, 就有  $N$  幅调制度图, 如图 4 所示。对于同一像素点, 就有  $N$  个调制度值, 如图 5 所示, 图中平移次数为横坐标, 调制度值为纵坐标, 此即 CCD 面阵上这一像素点在平移过程中的调制度分布。因为平移次数是分立的整数, 所以调制度最大的真实位置有可能处于两个整数之间, 这就需要插值。因为在几何光学近似下像面前后的调制分布可看作是对称的, 目前采用的方法之一是在测得最大调制度的位置, 向两边取相同数目的调制度值直到边界, 然后求出这些调制度值的重心位置作为调制度最大的真实位置。

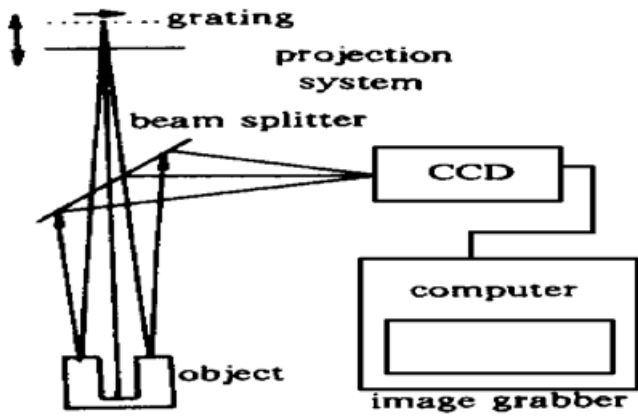


Fig. 2 The setup of MMP

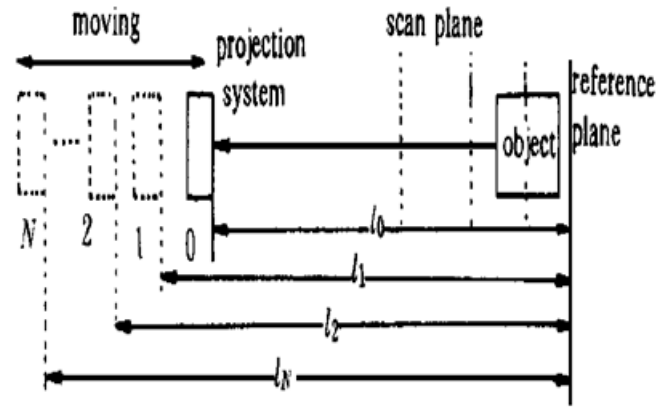


Fig. 3 The moving process of projection system

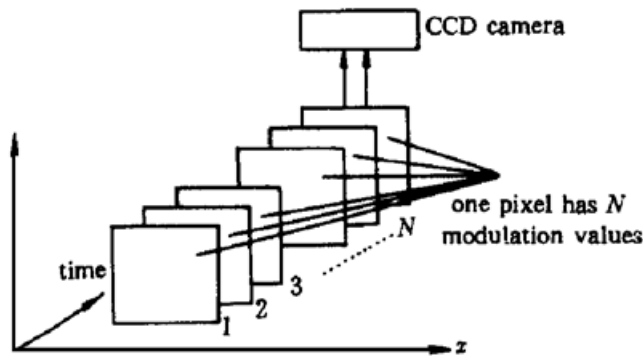


Fig. 4 The modulation maps on CCD relative to time

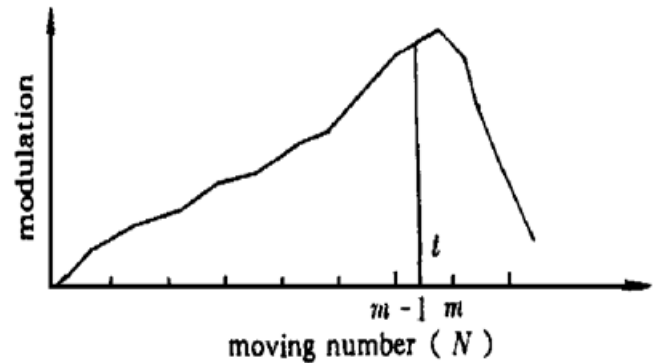


Fig. 5 The modulation distribution of one pixel

如果求重心后,  $t$  是最大调制度的真实位置且处于两个相邻的平移次数  $m - 1$  和  $m$  之间 ( $m$  是整数且  $0 \leq m - 1, m \leq N$ ), 则此像素点相对于参考平面的高度为:

$$l_t = l_{m-1} + [t - (m - 1)](l_m - l_{m-1}) - l_0 \tag{4}$$

在(4)式中  $l_0$ 、 $l_{m-1}$ 、 $l_m$  分别是投影系统移动前、移动到第  $m - 1$  次位置、移动到第  $m$  次位置时与参考平面的距离。

### 4 实验结果与讨论

实验系统如图 2 所示, 被测物体选用的是一中心带孔(上面是方孔, 下面是圆孔)的圆台模型。圆台外周和周孔均具有垂直边界, 因此如果用三角测量的其他方法, 例如位相测量轮廓术、傅里叶变换轮廓术等, 由于阴影的影响, 将无法得到完整的三维面型分布。

在初步实验中, 平移次数  $N$  为 24, 每次平移后的相移次数为 5。总共有 24 帧调制度图, 每帧图的数据量为  $512 \times 512$ , 即在  $512 \times 512$  的面上每个像素点有 24 个值。其中两帧调制度图示于图 6 中, 它们的距离差为 48 mm。

现以一个像素点为例说明它的测量过程, 实验参数示于表 1 中。

Table 1. Experiment parameters

moving steps $N$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
positions /mm	20	20	24	28	31	34	38	41	44	48	52	55	58
moving steps $N$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
positions /mm	62	65	69	72	76	79	82	85	89	92	96	100	

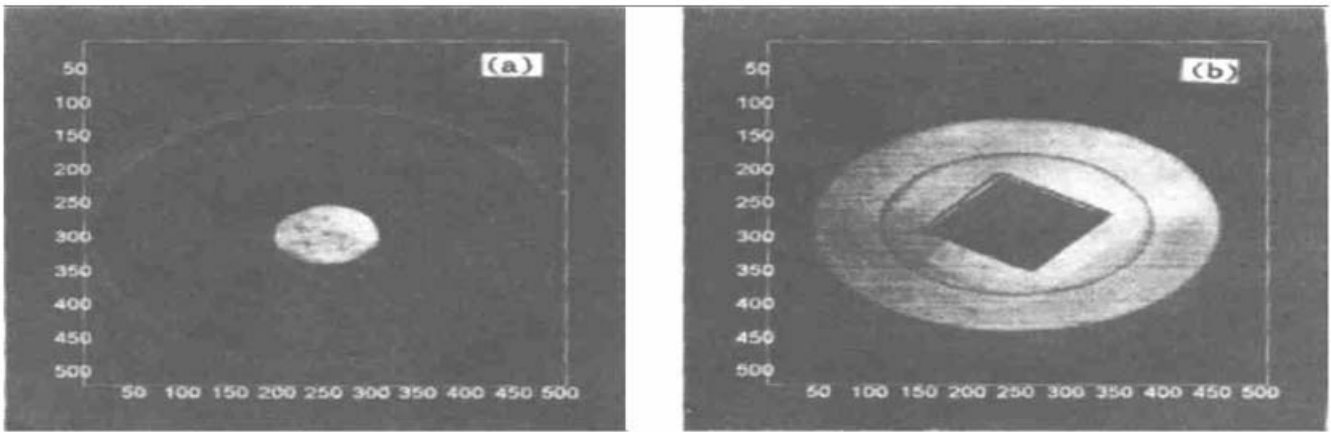


Fig. 6 (a) The fourth modulation map with position 31 mm, (b) The eighteenth modulation map with position 79 mm

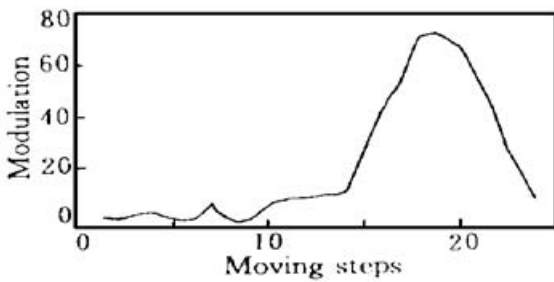


Fig. 7 The modulation distribution of pixel (400, 360)

由图 6 可看出像素点(400, 360)位于物体上表面, 其调制度分布示于图 7 中, 对应的调制度值在表 2 中给出, 调制度最大的平移次数为 19。因平移次数是分立的整数, 为了找出调制度最大的确切位置, 采用重心算法。在几何光学近似下, 成像面前后的调制度分布可看作是对称的, 所以在 19 两边取相同数目的数据。因 19 邻近 24, 所以数据范围取为从 14 到 24。由表 2 的调制度值可算得平移次数从 14 到 24 的调制度的重心位置:

$$\text{重心}(400, 360) = \frac{\sum_{i=14}^{24} i Md(i)}{\sum_{i=14}^{24} Md(i)} = 18.85$$

则 18.85 就作为调制度最大的真实位置, 将其代入(4)式, 可得像素点(400, 360)相对于参考平面的高度为:

$$\text{高度}(400, 360) = l_{18} + (18.85 - 18)(l_{19} - l_{18}) - l_0 = 61.6 \text{ mm}$$

其他所有像素点的高度按相同方法求出。

Table 2. The modulation values of pixel (400, 360)

moving steps ( <i>N</i> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
modulation	4	2	4	5	2	2	9	1	2	9	10	10
moving steps ( <i>N</i> )	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
modulation	12	12	30	46	55	72	73	68	55	37	22	10

最后测得的物体轮廓图如图 8 所示。可以看出圆台中心的上部为一方孔, 下部为一圆孔。物体本身的总高度为 52 mm, 测量精度为 0.48 mm。在图 9 中示出了其截面图, 图 10 中示出了其倒立图。

实验中发现影响测量精度的因素主要有以下几个方面:

1) 投影系统。因为基于调制度测量的三维轮廓术测量是基于投影光栅成像面的精确定位, 所以要求投影系统有好的成像能力, 并且投影系统的焦深越小, 测量精度越高。对探测系统而言, 在这种方法中要求具有较大的焦深。

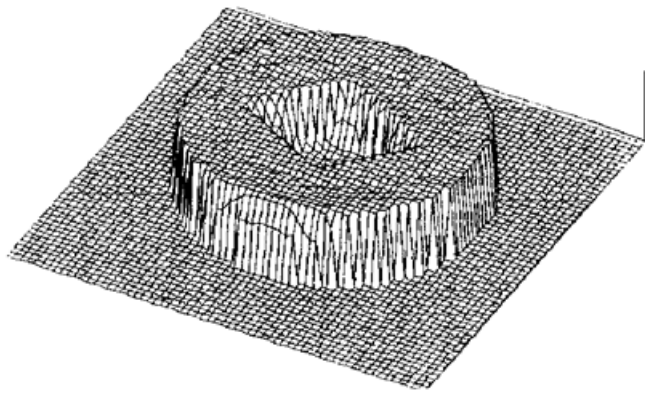


Fig. 8 The profilometry of the object measured with MMP

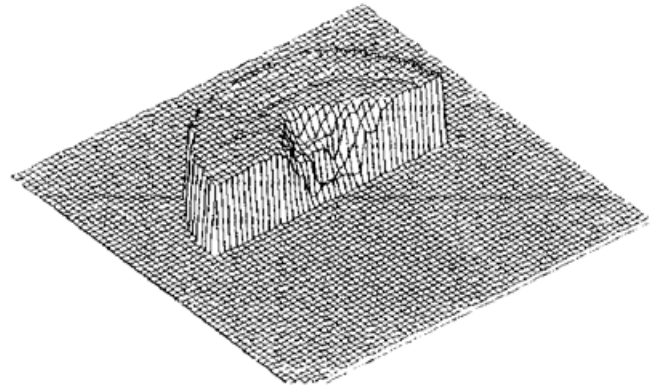


Fig. 9 The section map of the object measured with MMP

2) 光栅相移和条纹正弦性。(2)式的前提是投影条纹为正弦条纹且相移是等间距的, 如果相移不准或投影条纹偏离了正弦, 则调制度图上就会出现与投影条纹平行的周期性条纹, 调制度分布曲线就会有锯齿状而不是平滑曲线, 就会给调制度分布曲线上最大值位置的确定带来误差。

3) 确定调制度最大值位置的算法。本实验中根据成像面前后调制度的分布的对称特性采用了重心算法。实际上, 也可以采用其他方法确定调制度极值的位置, 例如曲线拟合法等。

4) 移动步长平移次数。移动步长越小, 高度分辨率越高, 但测量时间增加。对于只有几级高度差的物体, 可以在每个高度面前后增加平移次数, 减小移动步长; 而在高度面之间减少平移次数, 增大移动步长。这一过程如图 11 所示。

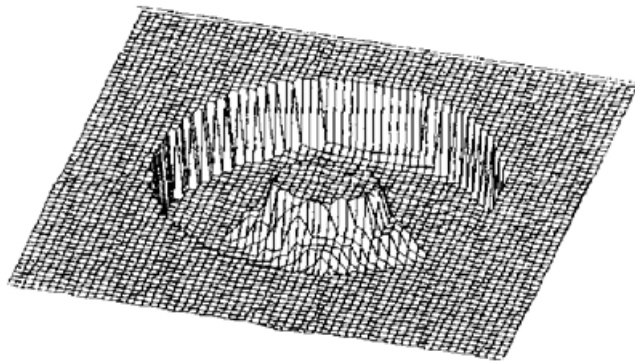


Fig. 10 The updown map of the object measured with MMP

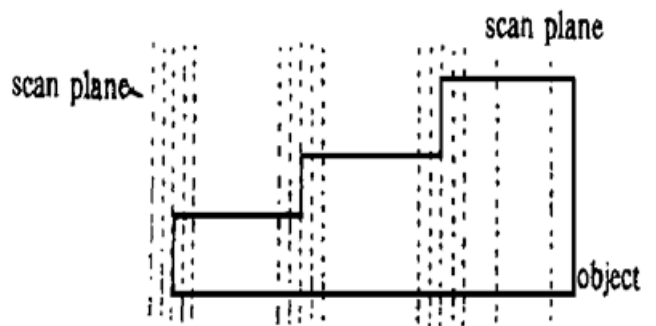


Fig. 11 The effective moving process for objects with several height differences

**结 论** 介绍了基于调制度测量的三维轮廓术测量的原理、信息处理方法, 并给出了测量实例。此处的测量结果已证明它在光学三维轮廓术测量中将是一种有效的方法, 在上面的实验中, 深孔也得到正确测量, 这在其他光学三角测量法中很难实现的。

所有基于三角测量的三维传感方法的致命是不能测量阴影区域。但在调制度测量轮廓术中, 因为投影方向和观察方向一致, 所以就没有阴影、遮挡等问题, 亦即可测量有高度剧烈变化和空间不连续及有深孔的复杂物体。这种方法对获取复杂物体的三维数据具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108
- [2] Su Xianyu, Zhou Wensen, Bally G von *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the Rochi grating. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6) : 561~ 573
- [3] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 3977~ 3982
- [4] Su Xianyu, Li Jian, Guo Lurong. An improved fourier transform profilometry. *Proc. SPIE*, 1988, **954** : 32~ 35
- [5] Takasaki H. Moir topography. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(10) : 1467~ 1472
- [6] Kaisto I, Kostamovaara J, Manninen M *et al.*. Optical range finder for 1.5~ 10 m distances. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(19) : 3258~ 3264
- [7] Dresel T, Hausler G, Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar. *Appl. Opt.*, 1993, **31**(7) : 919~ 925
- [8] Takeda M, Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/or spatially isolated surfaces. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34) : 7829~ 7837
- [9] Su Xianyu, Su Likun, Li Wangsong *et al.*. A new 3-D profilometry based on modulation measurement. *Proc. SPIE*, 1998, **3558** : 1~ 7
- [10] Su Xianyu, Bally G von, Vukicevic D. Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1, 2, 3) : 141~ 150

### 3-D Profilometry Based on Modulation Measurement

Su Likun    Su Xianyu    Li Wangsong    Xiang Liqun  
(*Opto-electronics Department of Sichuan Union University, Chengdu 610064*)

(Received 16 June 1998; revised 18 August 1998)

**Abstract** 3-D profilometry based on modulation measurement (MMP) depends on the modulation distribution of the sinusoidal fringes projected on objects. The projecting direction is the same as the detecting direction, it can measure the objects with shadow, discontinuous height steps and spatial isolation on them. The detailed introduction on the principle and processing method of MMP and the measuring results for an object are presented. The results proved that MMP was correct in principle and effective in actual measurement. This method will be useful for 3-D profilometry、3-D sensing and machine vision etc.

**Key words** optical 3-D profilometry, modulation measurement, phase-shift.