

一种新的光栅投影轮廓术

田 丰 赵 宏 陈文艺 周 剑 谭玉山

(西安交通大学机械工程学院激光与红外应用研究所, 西安 710049)

摘 要 提出了一种新的光学全场轮廓术。它采用了一种可由计算机控制的、可变空间频率的莫尔条纹投影仪, 利用不同空频的两次变精度测量, 以适应待测物体形面的突然起伏。在以上理论基础以及一台具体实验装置的配合下, 得到出了令人满意的测量结果。

关键词 三维轮廓术, 相位, 光栅, 空间频率。

1 引 言

目前, 用于物体形貌测定的、非接触的、自动的光学仪器在现代工业中的应用越来越广泛。不论是物体形面、尺寸的测量, 还是产品的质量控制, 也不论是微观还是宏观的测量, 光学轮廓术都起着一个非常重要的角色。总的说来, 光学轮廓术可分为以下几种: (1) 阴影法。(2) 立体视觉法。(3) 单点激光扫描法。(4) 结构光投影法。这最后一种方法是将某种形式的结构光投影到物体表面, 再反射到一个探测器上, 然后, 把物体形面从变形的光场中解调出来。传统的结构光方法, 不论是阴影条纹(moire)法、投影条纹法, 还是如傅里叶变换等直接分析条纹法, 均是采用一种空间频率的条纹对物体进行测量, 这样结构简单, 容易实现, 故得到广泛的应用。但是, 这种方法有一定的局限性, 主要是对待测物的面形缺乏适应性。如果采用空频较高的光栅条纹, 则非常适用于表面轮廓变化较快的物体, 对于表面变化平缓的待测物则显不必甚至浪费, 因为高空频光栅成本较高, 而且空频的提高也会给投影系统、成像系统带来更高的要求, 无形之中使测量系统的实用性受到影响, 尽管可获得较高的测量精度。反之, 如果使用低空频的光栅, 则可以满足某些表面变化平缓的物体的测量要求, 但其测量精度相对来说不高。为了增加系统的适应性、实用性, 本文提出了一种新的方法: 变精度两次测量法。这种方法可以有效地解决上述高低频率的矛盾。在下面的叙述中, 将对这种方法的原理、实现的方法及装置加以阐述。除此之外, 还对相移法、相位与高度的转换关系进行简要的论述。最后给出了具体的实验结果。

2 光栅投影条纹测量法的基本原理

如图 1 所示, 当一正弦光场被投影到物体表面时, 受物体表面形状的调制, 这一变形光场可用下式表示:

$$I(x, y) = R(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos [2\pi x/p + \Delta\varphi(x, y)]\} \quad (1)$$

式中 $R(x, y)$ 为与物体表面反射率有关的参数, $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为调制因子, P 为条纹周期, $\Delta\varphi(x, y)$ 则是与物体表面轮廓相关联的相位因子, 为了从 $I(x, y)$ 中解调出反映物体形面信息的 $\Delta\varphi(x, y)$, 可以采用快速傅里叶变换法^[1], 余弦变换法^[2], 在这里采用两步相移法。当引入相移量 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 后, 则有^[3]:

$$\Delta\varphi(x, y) = \arctg [\sqrt{3} (I_3 - I_2) / (2I_1 - I_2 - I_3)] \quad (2)$$

求得 $\Delta\varphi(x, y)$ 后, 下一步就是确定 $\Delta\varphi(x, y)$ 与物体轮廓或表面高度的关系。如图 2 所示。

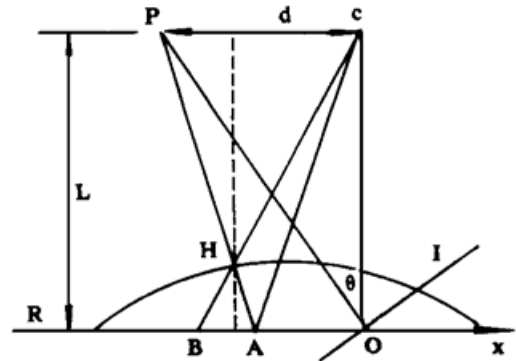
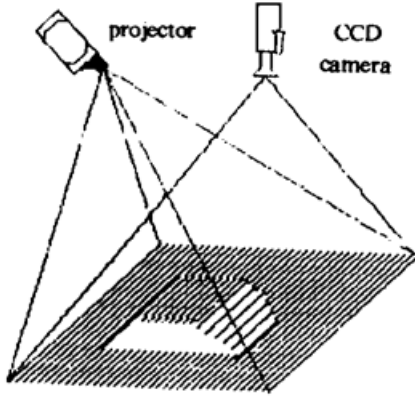


Fig. 1 Schematic of the approach to profilometry Fig. 2 Geometry of projection & image system

图中 P 点为投影系统的出瞳, C 为成像系统的入瞳, P、C 间距为 d , 它们离参考面 R 的距离为 L , 成像系统与投影系统的光轴交于参考面上的 O 点, 则物体上任意点 H 处的高度 $Z(x, y)$ 可由相似三角形求得。如图 2 所示, $\triangle PHC$ 与 $\triangle BHA$ 相似, 故有:

$$(L - Z_H/d) = (Z_H/BA) \quad (3)$$

引入相位变化 $\Delta\varphi(x, y)$, 则有 $\Delta\varphi(x, y) = 2\pi BA/P$ (4)

其中 $P = P_0 / \cos \theta$, P_0 为 I 面上的条纹空间频率。由(3), (4)式有:

$$Z(x, y) = LP\Delta\varphi(x, y) / [2\pi d + P\Delta\varphi(x, y)] \quad (5)$$

这样, 就将前面求得的相位信息 $\Delta\varphi(x, y)$ 转化为物体高度信息 $Z(x, y)$, 从而达到测量目的。

3 变精度测量的必要性

为了适应待测物体形貌的粗细变化, 有必要采用两次测量法, 如图 3 所示。

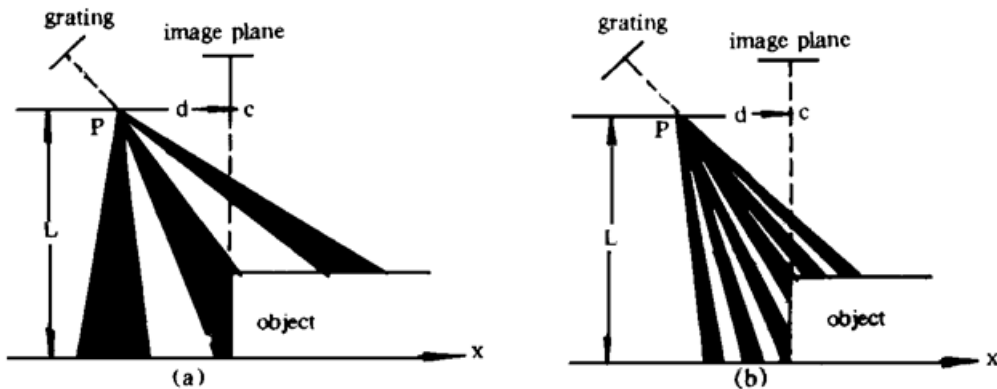


Fig. 3 Adaptation of the fringe spacing to the large topology

(a) projection of a coarse grating, (b) projection of a fine grating

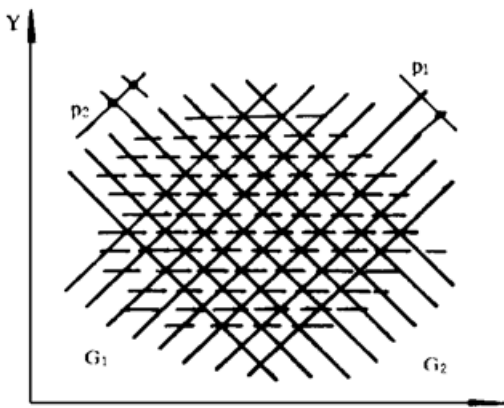
图 3(a) 表示一个粗光栅的投影。在这种情况下, 只有半个周期的条纹落在物体形面发生

突变的部分。因此，摄像机获取的变形光栅图象中没有任何条纹损失。这样，通过(1)式，相位可被唯一地解调出来。然而，与光栅周期密切相关的测量精度却很低，因此，当待测物形面变化较快、测量精度要求较高时，用这种光栅投影是不适当的。图 3(b) 表示一个细光栅的投影。从图上可以看出，不止一个周期的条纹被投影在物体突变、不连续的部分。这样，由摄像机获取的变形光栅图象中就有不知数量的条纹信息被丢失。因此，通过(1)式，相位不能被唯一地解调出来。但是，采用这种光栅的测量精度要比上述粗栅的精度要高得多。

为了充分地利用粗细光栅的特点，提出一种变精度二次测量法。即第一步利用粗光栅投影，确定物体突变部分的范围大小，然后，第二步采用精细光栅投影，获得高精度的物体形面。

4 变精度投影的原理及其实现

由前述可知，实际测量中，利用了相移技术来求出参考平面上的光栅图相位分布和投影在物体表面的变形光栅的相位分布。如果要利用相移技术，首先必须要求投影的条纹按正弦分布。为了获得正弦光场，一种方法是制作一个正弦光栅用于投影。困难在于制作一个正弦光栅是非常复杂的；更令人不满意的是，一旦一块正弦光栅被制作好，其空间频率将是常数，显然不能满足变精度的测量要求。另外一种方法是利用相干光产生干涉条纹。但是干涉仪光路复杂，且对环境噪声敏感。因此，利用摩尔条纹的准正弦特性产生一个近似的正弦光场^[4]。本文采用两块矩形光栅来产生一个准正弦条纹光场。



如图 4 所示，两个矩形光栅 G_1, G_2 ，空间频率分别为 $v_1 = 1/P_1, v_2 = 1/P_2$ ，当它们叠加在一起时，便会产生摩尔(Moire)条纹。当很接近时，摩尔条纹可近似为一个正弦分划板。将此条纹投影，就产生一个准正弦光场。改变的夹角即方便地改变摩尔条纹的空频；通过移动整个组合装置即能产生相移。根据上述思想，作者已在早些时候设计了一台三维测量仪，夹角的改变以及整体的移动均由步进电机来控制(步进电机由 PC 机通过接口实现自动控制)。

Fig. 4 Intersection of two gratings with different periods

5 测量及其结果

根据以上所述的原理及方法，设计了如图 5 所示的三维形面自动测量系统。

以一个物体上的一部分(含突变部分)为测量对象。首先对参考平面上的相位分布、物体放上后变形光栅的相位分布测量(均采用相移法，依据(1)式计算求得)，然后，利用(5)式将相位信息转化为高度坐标，从而求得物体的面形分布。图 6 清楚地表示出了测量结果。图中(a)为粗光栅投影相应的测量结果(沿轴的一部分轮廓)。显然，它测出了物体的变化范围，但精度很低，细节不

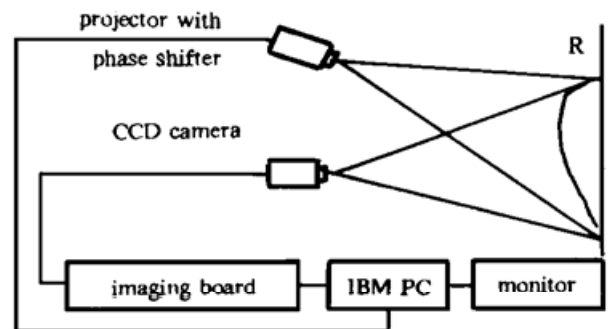


Fig. 5 The block measurement system

清楚, 达不到测量的要求。图中(c)是一细光栅投影, (d)是对应的测量结果(与图(b)一样, 是针对同一物体的同一部分)。从图上可以看出, 物体突变部分的信息丢失, 这是由于相位不能被唯一确定的缘故。然而, 在突变部分前后的物体轮廓却可被较高精度地测量出来。因此, 结合两种光栅测量的优点, 将(b)、(d)的结果合成, 就可得到令人满意的测量结果, 如图(e)所示。通过这种方法整个物体的轮廓被准确测出。

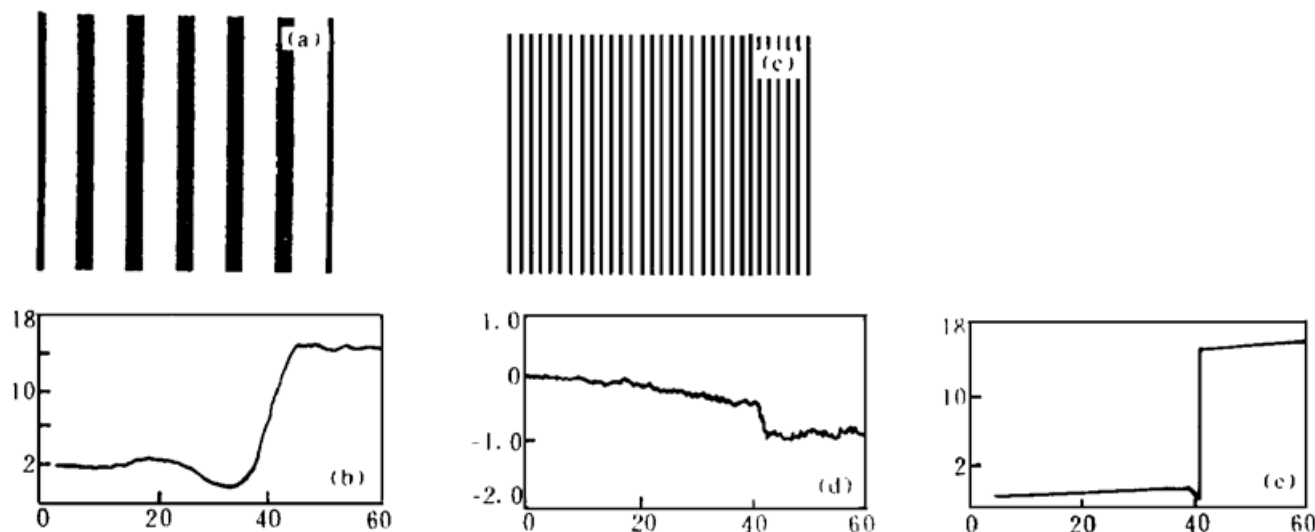


Fig. 6 Example of measurement performed by using two gratings with different periods

结 论 阐述了基于一个可变空频的光栅投影装置的全场三维测量仪及其方法。这种投影方法可适应物体的各种形面。在以上的基础上, 提出了变精度测量法, 可以有效地解决物体形面突变部分的测量。为无接触测量物体三维尺寸的光学方法注入了新的思想, 提高了它的实用性。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda, K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~ 3982
- [2] W. H. Chen, C. H. Smith, S. C. Fralick, A fast computational algorithm for the discrete cosine transform. *IEEE Trans. Commun.*, **COM-25**(5): 1004~ 1008
- [3] 郑 文, 谭玉山, 高精度全息干涉计量—相移技术的应用. *光学学报*, 1991, **11**(4): 376~ 380
- [4] 赵 宏, 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**(7): 834~ 837

A Novel Profilometry with Projecting Grating

Tian Feng Zhao Hong Chen Wenyi Zhou Jian Tan Yushan
(Institute of Laser & Infrared Application, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)
 (Received 31 July 1995)

Abstract A novel optical whole-field profilometry is presented. A new kind of moire fringe projector controlled by computer is used for changing the spacial frequency to adapt the contour of the object to be measured. Besides, a method named "Two Times Measurement with Different Precisions" is proposed in order to measure an object with sudden surface changes. The satisfactory results are obtained.

Key words three dimensional profilometry, phase, grating, spacial frequency.