

文章编号 1004-924X(2002)05-0528-05

光学非接触三维形貌测量技术新进展

陈晓荣,蔡 萍,施文康
(上海交通大学 电子信息学院,上海 200030)

摘要:三维物体表面轮廓测量是获取物体形态特征的一种重要手段,在机器视觉、自动加工、工业检测、产品质量控制领域具有重要意义和广阔的应用前景。光学非接触测量由于其高分辨率、无破坏、数据获取速度快等优点而被认为是最有前途的三维形貌测量方法。介绍了光学非接触测量方法中的光切法、基于调制度测量的原理及优缺点,重点介绍了光栅投射法的测量原理,并分析了其研究热点与发展方向。

关键词:非接触检测;形貌测量;3D
中图分类号:TB92 **文献标识码:**A

1 引言

三维曲面或三维轮廓测量技术广泛应用于工业、科研、国防等领域。汽车车身、飞机机身、轮船船体、汽轮机叶片等加工制造中的在线检测,特别是大型工件的曲面检测一直是生产中的关键技术难题。该类工件在车间条件下一般采用靠模法测量,但可测截面少,测量精度低;在计量室条件下采用三坐标测量机测量虽然精度较高,但数据采集速度低,测量成本高,且难于实现在线测量。鉴于接触式测量方法的局限性,用非接触光学方法来测量物体表面轮廓形状,例如激光三角法、莫尔投影法、工业视觉测量法等具有灵敏度高、速度快、获取数据多等特点,在三维测量中正日益受到重视和广泛应用。

2 测量原理

从技术上看,光学非接触测量法可分为两类:一类称为被动法,利用图像明暗、纹理、光流等信息求出三维信息,常用于对三维目标的识别、理解以及位置形态的分析;另一类称为主动法,采用结构照明方式,由三维面形对结构光场的空间或

时间调制,观察光场中携带了三维面形的信息,对观察光场进行解调,可以得到三维面形数据。由于后一种方法具有较高的测量精度,因此大多数以三维面形测量为目的的三维传感系统都采用主动三维传感方式。下面简要介绍光切法、调制度轮廓术,重点介绍光栅投射法。

2.1 光切法

光切法 LSM(light-section method)是近年来在激光逐点扫描法基础上发展起来的一种非接触测量方法。它用激光光源,经柱面镜产生平面光照射在被测物上,在被测物表面上产生一条明亮的光带,通过 CCD 摄像机摄入经数字信号处理可获得光带的数字图像,再经计算机处理即得物体在该光切面上的二维轮廓信息,若进一步沿第三维步进测量,就可得到物体的三维轮廓全貌,如图 1 所示。

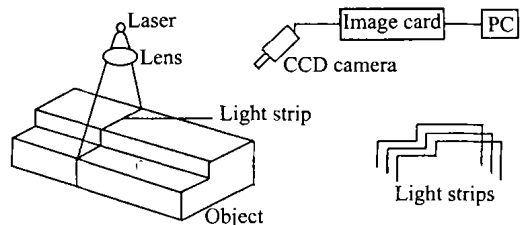


图 1 光切法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the light-section method.

该测量方法适用于要求测得被测物的 360° 三维轮廓数据,而难以实现被测物与测量装置之间的相对旋转时。罗晓晖等^[1]运用该方法实现了脚型三维曲面测量。

由于光切法仍然存在采样速度较慢等缺点,在此基础上,又提出结构光编码的方法,编码方式包括颜色编码、二进制编码、位相编码等。Kai 等^[2]运用二进制编码并结合相移技术实现了轿车白车身三维尺寸的在线检测。

2.2 基于调制度测量的三维轮廓术

基于调制度测量的三维轮廓术(MMP)^[3],它完全基于投影到待测物面上的正弦条纹的调制度分布,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。由于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,亦即可以测量物体表面高度剧烈变化或不连续的区域。它对阴影、遮挡、位相截断并无限制,且设备较为简单,易于实现。

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物体上的条纹图形,物体上的光强分布可表示为:

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

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

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,在光栅像平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

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, ϕ_0 为初相位。

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 2 所示。

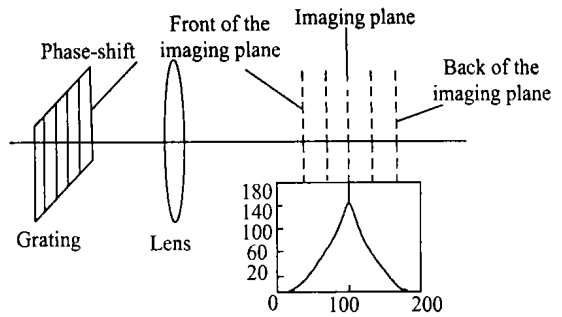


图 2 调制度测量轮廓术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of modulation distribution of the projection grating.

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:

物体的空间信息。

调制度测量轮廓术解决了所有基于三角测量的三维传感方法不能测量阴影区域的问题。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。

2.3 光栅投射法

光学三维测量中,光栅投射技术是最常用的、最有发展前途的技术。光栅投射技术借助图像数字化设备将投射条纹输入计算机,并对该载波信

号进行直接的解调计算,从而求取物体面形信息。图 3 所示装置由 Takeda^[4]提出,是光栅投射技术常用的典型装置。

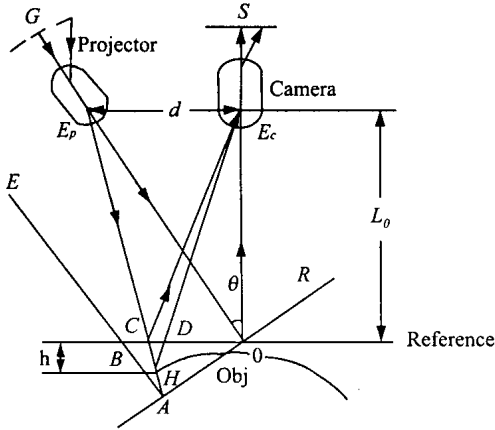


图 3 光栅投射技术装置图

Fig. 3 Setup of the grating projection technique.

图 3 所示系统中, E_p 为光栅投影系统的出瞳中心, E_c 是摄像机的入瞳中心。摄像机光轴与参考面 reference 垂直相交于点 O。该系统中, 摄像机所获取的光栅投射于待测物面或参考面上的条纹图像可表示为:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)], \quad (4)$$

其中: I 为记录到的光强分布, a 表示背景光强, b 表示调制度, f_0 是投影到参考平面的光栅图样空间频率, 条纹位相 ϕ 对应于物体上各点的高度 $h(x, y)$ 。

光栅投射技术测量三维面形的过程可分为两步:

- (1) 由条纹图像求解其位相分布;
- (2) 根据位相与物面深度的映射关系求解物面的深度分布。

为了求解条纹位相, 有傅立叶变换法与位相法。

a. 傅立叶变换法

Takeda 等^[4]提出了傅立叶变换与频域滤波的方法。

式(4)可以重写为:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi i f_0 x), \quad (5)$$

其中:

$$c(x, y) = \frac{1}{2} b(x, y) \exp[i\phi(x, y)], \quad (6)$$

式(6) $g(x, y)$ 对 x 的傅立叶变换为:

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f - f_0, y), \quad (7)$$

由于 $a(x, y)$, $b(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 相对 f_0 变化缓慢, 因此可滤出频谱中的 $C(f - f_0, y)$ 成分, 并将其移回原点做反变换得到 $c(x, y)$, 求出 $\phi(x, y)$:

$$\tan \phi(x, y) = \text{Re}[c(x, y)] / \text{Im}[c(x, y)], \quad (8)$$

傅立叶变换法只需一幅图像, 数据处理较简单, 但是使用 FFT 会产生泄露、混淆和栅栏效应引起的误差。

b. 位相法

Srinivasan 等^[5]最早将相移技术应用于光栅投射技术即位相方法。控制光栅沿栅线垂直方向以 $2/N$ 为步距作 N 步相移, 可获取 N 帧相移条纹图形, 记为 I_n , 其中, $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ($N \geq 3$)。则位相为:

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

由上式计算的位相 $\phi(x, y)$, 被截断在反三角函数的主值范围内, 因而不是连续的。为了计算物体的三维分布, 必须首先将截断的位相恢复成连续的位相分布, 这一过程称为位相解截断或位相展开。然后, 根据系统结构的几何关系, 从展开后的位相重建三维面形。位相法测量精度高, 但需要至少 3 幅图像, 数据处理复杂, 不易实现实时测量。

3 研究热点和发展方向

由于光栅投射技术是光学三维测量中最常用的、最有发展前途的技术, 本节着重于该技术的热点与发展方向。

1) 条纹图形处理技术的发展

光栅投射法研究热点集中于变频条纹投射技术的研究^[6-7], 其目的是实现绝对位相的自动求解, 解决具有台阶或不连通区域的复杂面形测量

中的去包裹问题。

2) 与其它空间编码技术的结合

光栅投射技术实际上是一种位相编码方式,常见的编码方法包括二维网格图案编码^[8]、二进制编码^[9]、位相编码、随即图案编码^[10]以及各种颜色编码^[11-12]等。与其它方式相比,位相编码的优点在于可实现较高的测量分辨率。其不足之处在于:采用相移技术时需要采集多幅图像,不易实现实时测量。Huang等^[13]采用了位相编码,并结合以颜色编码克服了此缺点。首先,分别以红、绿、蓝三基色形成互有相移的余弦条纹图像,合成后投射于物面。经图像传感器接收后,三基色经各自通道分离,并据此以相移算法求解位相。

位相编码的另一限制是需要用位相去包裹操作。通常,减小光栅节距是提高测量精度的最有效方法之一,但同时也会使去包裹操作变得异常困难。为此,Sonsni等^[9]采用了二进制编码与位相编码相结合的技术。一系列空间频率逐次倍增的二值(黑白)条纹被依次投射于物面之上。其间,物面上任意点位于黑白条纹的状态可利用阈值方法确定,分别记为0与1,逐次排列后可形成该点二进制编码。在条纹到达某一高频(条纹宽度减小到一定宽度,阈值判断困难)时,采用位相编码与相移算法来提高测量分辨率,并使位相去

包裹的操作在较小的区域内进行。因此位相编码与其它编码法相结合,可以取长补短,从而产生新的技术。

3) 光栅投影设备

光栅投射技术中,早期的标准设置是利用投影机将余弦光栅投射于物面,但是柔性较差,难以实现可变灵敏度;须借助机械机构实现相移;精度可靠性较低。数字投影设备通过编程实现了非机械精确相移^[13]以及可变灵敏度,并可实现自适应测量,但具有一定非线性。为获得标准余弦条纹,也可用干涉仪作为光栅投影设备,如剪切干涉仪、光纤干涉仪等,并且可以以此实现相移和光栅的可变空间频率。

4 结 束 语

三维传感与计量是一个仍在迅速发展的科学研究领域。近年来取得较大进展的技术还包括:像平面定位系统、干涉计量、隧道显微镜技术和结构光编码^[3]等。这些技术的深度分辨率大约覆盖了从 $10^3 \sim 10^6$ mm的范围,覆盖了从大尺度三维形貌测量到微观结构研究的广泛应用和研究领域。

参考文献:

- [1] 罗晓晖. 脚型三维曲面测量技术[J]. 激光技术, 2001, 25(4): 308-311.
- [2] Kai W, Dieter R, Schafer. An approach to computer-aided quality control based on 3D coordinate metrology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 107: 96-110.
- [3] Su X Y. A new 3-D profilometry based on modulation measurement[J]. *SPIE*, 1998, 3558:1-7.
- [4] Takeda M, Hideki I, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. O. S. A*, 1982, 72(1): 156-160.
- [5] Srinivasan V. Automated phase-measuring profilometry: a phase mapping approach[J]. *Appl. Opt*, 1985, 24(2): 185-188.
- [6] Yudong Hao. Multifrequency grating projection profilometry based on the nonlinear excess fraction method[J]. *Appl. Opt*, 1999, 38(19): 4106-4110.
- [7] Zhang H. Spatiotemporal phase unwrapping and its application in fringe projection fiber optic phase-shifting profilometry[J]. *Opt. Eng*, 2000, 39(7): 1958-1964.
- [8] Yee S Y, Griffin P M. Three-dimensional imaging system[J]. *Opt. Eng*, 1994, 33(6): 2070-2074.
- [9] Sansoni G. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors[J]. *Appl. Opt*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [10] Mikael S, Per S. Measurement of shape by using projected random pattern and temporal digital speckle photography[J]. *Appl. Opt*, 1999, 38(10): 1990-1997.
- [11] Huang P S. Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring[J]. *Opt. Eng*, 1999, 38(6): 1065-1071.

- [12] Liu W Y. Color-coded projection grating method for shape measurement with a single exposure[J]. *Appl. Opt.*, 2000 , 39(20) :3504-3506.
- [13] Hung Y. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2000 , 39(1) :143-149.

The latest development of optical non-contact 3D profile measurement

CHEN Xiao-rong , CAI Ping , SHI Wen-kang

(*Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*)

Abstract : 3D profile measurement is becoming a powerful tool for obtaining the form and structure of an object. It has important significance and widespread applications in machine vision , automatic measurement , industrial inspection , quality control , etc. Because of the advantages of high resolution , non-destruction , and quick data-obtaining , etc. , it is thought to have a great future. This paper introduces some new techniques of the 3D profile measurement such as the light-section method , MMD method , and emphasizes the grating projection measurement method , giving both their advantages and disadvantages , as well as the current hot points and future directions of the last one.

Key words : non-contact measurement ; profile measurement ; 3D

作者简介 :陈晓荣(1974 -) ,女 ,山东省文登市人 ,上海交通大学博士研究生 ,主要从事高精度三维检测及信号处理研究。