

# 三维面形测量技术的新进展\*

苏显渝 李继陶

(四川联合大学光电科学技术系,成都 610064)

**摘要** 三维面形测量(即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,也是记录、比较、复制物体形态特征的基础.三维面形测量技术在机器视觉、自动加工、工业检测、产品质量控制、实物仿形、生物和医学等领域具有重要意义和广阔的应用前景.

**关键词** 三维面形测量,三维传感与机器视觉,轮廓术

**Abstract** Three-dimensional (3-D) shape measurement, i. e. surface topography measurement of 3-D objects, is becoming a powerful tool for obtaining the form and structure of objects. It is also the basis for recording, comparing and copying the shape of objects and has important significance and widespread application in machine vision, automatic manufacturing, industrial inspection, quality control, solid modeling, biomedicine, etc.

**Key words** three-dimension measurement, three-dimension sensing and machine vision, profilometry

物体的三维形态特征是物体最重要的特征之一.人们一直在研究用各种光学方法对物体三维表面形状进行测量,而实际上人的双眼就是最完美的三维传感器,它不仅能感知物体的二维坐标信息(上下、左右),还可以感知深度信息(前后).使用双摄像机的被动三维传感系统采用了人体双目立体视觉的原理,用计算机信息处理系统代替人的大脑,从两个不同视觉方向的二维图像中重建物体的三维面形.如果将双摄像机中的一个换成投影器,投射出点、线、面的结构光场,由于物体表面形状的不同,另一个摄像机观察到的光场会发生变化,因此,从变形光场中可以计算出物体表面形状,现代大多数主动三维传感技术就是根据这个原理发展起来的.

## 1 被动和主动三维传感

获取三维面形信息的基本方法可以分为两大类:被动三维传感和主动三维传感.被动三维

传感采用非结构照明方式,从一个或多个摄像系统获取的二维图像中确定距离信息,形成三维面形数据.从一个摄像系统获取的二维图像中确定距离信息时,人们必须依赖于物体大致形态、光照条件等的先验知识.如果这些知识不完整,对距离的计算可能产生错误.典型的被动三维传感系统是双摄像机的传感系统(见图1),它与人的双目立体视觉的原理相似.从两个或多个摄像系统获取的不同视觉方向的二维图像中,通过相关或匹配等运算可以重建物体的三维面形.这种双目立体的重建方法常常要求进行大量的数据运算,当被测物体上各点反射率没有明显差异时,这种运算变得更加困难.因此,被动三维传感方法常常用于对三维目标的识别、理解以及位置形态的分析.这种方法的系统结构比较简单,在无法采用结构照明时更具有独特的优点.

\* 1995年10月18日收到初稿,1995年12月18日收到修改稿.

通过成像光点位置的确定和系统光路的几何参数,即可计算出距离.

## 2 结构光三维传感方法

最简单的结构照明系统是投射一个光点到待测物体表面,如图 2(a)所示.点结构照明将光能集中在一个点上,具有高的信噪比,可以测

图 1 典型的被动三维传感系统

主动三维传感采用结构照明方式<sup>[1]</sup>.由于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.由于这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.根据三维面形对结构照明光场调制方式的不同,人们将主动三维传感方法分为时间调制与空间调制两类.一类方法称为飞行时间法(time of flight,简称 TOF),它基于三维面形对单光束产生的时间调制.例如,一个激光脉冲信号从激光器发出,经物体表面漫反射后,其中一部分漫反射光沿相反的路径传回到接收器,检测光脉冲从发出到接收之间的时间延迟,就可以计算出距离  $z$ .用附加的扫描装置使光束扫描整个物面,可形成三维形数据.这种方法原理简单,又可避免阴影和遮挡等问题,但对信号处理系统的时间分辨有很高的要求.为了提高测量精度,实际的 TOF 系统往往采用时间调制光束,例如采用正弦调制的激光束,然后比较发射光束和接收光束之间的位相,计算出距离.

另一类是更常用的方法,称为三角法.它以传统的三角测量为基础.由于三维面形对结构照明光束产生空间调制,改变了成像光束的角度,即改变了成像光点在检测器阵列上的位置,

图 2 结构光三维传感方法  
(a)点结构照明;(b)线结构照明;(c)面结构照明

量较暗的和远距离的物体.由于每次只有一个点被测量,为了形成完整的三维面形,必须有附

加的二维扫描.对于点结构照明的传感系统,通常采用线阵探测器作为接收器.

第二种结构照明系统是投射一个片状光束到待测物体表面,形成线结构照明,如图 2(b)所示.采用这种照明的传感系统使用二维面阵探测器作为接收器件,只需要附加一维扫描就可以形成完整的三维面形数据.在某些实际应用中,被测物体本身沿一个方向移动通过视场,例如传送带上的工件,这时只需要一个固定的线结构照明传感系统就可以完成三维面形测量任务.

第三种结构照明系统是投射一个二维图形到待测物体表面,形成结构照明.其中最简单的一种是由多个片状光束构成的多线结构照明,如图 2(c)所示.其他常用的面结构照明的二维图形还有罗奇光栅和正弦型光栅.这些面结构照明方式已在莫尔轮廓术、傅里叶变换轮廓术、位相测量轮廓术、空间位相检测等三维面形测量技术中应用.从广义上讲,很多种空间编码的二维图形都可以作为面结构照明光场.近年来,液晶投影机(LCD)提供了产生面结构照明的新方法,这种可由计算机控制(通过图像板)的投影机可以产生由软件编制的任意二维图形,并且实现图形的变化.这使得在位相测量轮廓术中相移图形的产生变得容易,而且可以按预期的观察光场形状设计并产生投影图形,形成智能型主动三维传感体系结构.

### 3 几种新的三维面形测量技术

#### 3.1 傅里叶变换轮廓术<sup>[2-4]</sup>

傅里叶变换方法在信息光学中的应用是大家所熟悉的.傅里叶变换方法还成功地用于干涉条纹图形的处理,以检测光学元件的质量.在光学三维传感中,结构照明型条纹图形与干涉条纹图形具有类似的特征,因此傅里叶变换方法又被用于解决物体的三维重建问题.1983年,M. Takeda 和 K. Muroh 提出基于傅里叶变换的三维传感技术,又称为傅里叶轮廓术(Fourier transform profilometry, 简称 FTP).这

种方法以罗奇光栅产生的结构光场投影到待测三维物体表面,对观察光场进行傅里叶分析、滤波和逆傅里叶变换,就可以从变形条纹图形中提取三维面形信息.FTP 测量系统的光路原理如图 3 所示.

图 3 FTP 测量系统光路原理

图 3 中  $E_p E_p$  是投影系统的光轴,  $E_c E_c$  是成像系统的光轴,两光轴相交于参考平面 R 上的 O 点,Ronchi 光栅 G 的栅线垂直于  $E_p E_c$  平面,光栅像被投影系统投影在待测物体表面,由成像系统得到的变形光栅像可以记为

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp\{i[2\pi n f_0 x + n\phi(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中  $f_0$  是光栅像的基频,  $r(x, y)$  是物体表面非均匀的反射率,  $\phi(x, y)$  是由物体高度分布引起的位相调制.对(1)式所示的变形光栅像进行一维傅里叶变换,对频谱滤波取出基频分量,然后作逆傅里叶变换,可以得到光场的基频分布为

$$g_1(x, y) = A_1 r(x, y) \exp\{i[2\pi f_0 x + \phi(x, y)]\}. \quad (2)$$

为了消除发散照明所引起的附加位相调制的影响,必须针对基准平面上的光栅像再进行

一次上述运算过程,得到在基准平面上光场的基频分布为

$$g_r(x, y) = A_1 \exp[i\{2f_0x + \phi_0(x, y)\}] \quad (3)$$

由(2)式和(3)式可以得到单纯由高度引起的位相调制为

$$\phi(x, y) = \text{Im} \left\{ \frac{g_r(x, y)}{g_r(0, y)} \right\} \quad (4)$$

由

$$\phi(x, y) = 2f_0 \overline{CD} \quad (5)$$

和三角形  $HCD$  与  $HE_pE_c$  的相似关系,可以得到所需的三维面形  $h(x, y)$  为

$$h(x, y) = \frac{l_0 \phi(x, y)}{\phi(x, y) - 2f_0d} \quad (6)$$

由于 FTP 方法要求进行频域中的滤波运算,为了从基频分量中有效地提取三维面形信息,必须避免频谱混叠,这一要求使 FTP 可测量的最大范围限制为

$$\left| \frac{\partial h(x, y)}{\partial x} \right|_{\max} < \frac{1}{3} \frac{l_0}{d} \quad (7)$$

近年来提出的一种改进的 FTP 方法采用了正弦光栅投影和相移技术,可以使 FTP 可测量的最大范围增加 3 倍。为了消除类散斑噪声的影响,最近又发展了二维傅里叶变换和二维滤波的方法。由于傅里叶变换轮廓术具有采样速度快的优点,正在被用于三维面形动态变化过程的研究之中。

### 3.2 位相测量轮廓术

位相测量轮廓术 (phase measuring profilometry, 简称 PMP) 是一种重要的三维传感方法<sup>[5]</sup>。这种方法采用正弦光栅投影和相移技术,通过获取全场条纹的空间信息和一个条纹周期内相移条纹的时序信息,重建物体表面的三维信息,具有较高的测量精度,也容易实现计算机辅助的自动测量。

与图 3 所示的光路相类似,当一个正弦光栅图形被投影到三维漫反射物体表面时,观察到的变形光栅像可以表示为

$$I(x, y) = R(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y)] \quad (8)$$

式中  $R(x, y)$  是物体表面不均匀的强度反射率,  $A(x, y)$  表示背景强度,  $B(x, y)/A(x, y)$  是条纹的对比,位相函数  $\phi(x, y)$  与系统的结构参数和被测物体高度有关。获取  $N$  帧相移条纹图形,可以从  $N$  个 ( $N-3$ ) 相移观察图形中计算位相函数

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

由(9)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 (phase unwrapping)。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。

近年来,对于 PMP 方法的研究进展主要集中在以下几个方面。

(1) 已经研究了一种基于离焦投影罗奇光栅的 PMP 方法<sup>[6]</sup>,提出了由离焦引起的光学低通滤波和  $N$  位相算法表征的数字滤波的解析描述。从理论上证明了:在一定离焦范围和适当选择相移次数  $N$  的情况下,系统仍具有很高的测量精度。这一研究结果为 PMP 方法中采用高精度二元投影模板提供了理论根据。

(2) 提出智能型主动光学三维传感的概念和体系结构,实现了采用计算机控制的液晶投影器的全电子 PMP 三维传感系统。

(3) 复杂形体的三维传感技术取得较大进展,复杂位相场的展开方法成为研究的热点<sup>[7-10]</sup>。新提出的位相展开方法包括:条纹跟踪法 (fringe tracking)、网格自动法 (cellular automata)、洪水算法 (flood algorithm)、位相梯度展开法、二元模板法、基于调制深度的展开方法,以及神经网络方法等。

上述进展有力地推动了 PMP 技术在各个领域的应用。例如井底模式探测、口腔全牙型测量、整形外科手术效果评价、产品质量外观检

测、实物仿形等.图4是油井钻头钻坑底部的三维形态图,它是  $8\frac{1}{2}$  HP<sub>3</sub> 钻头,在钻压为 7.8t、

转速为 60rpm 的实验条件下,在嘉陵江灰岩上钻出的井底模式的测量结果.图5是对口腔全牙模型的三维测量结果.



图4 井底模式的测量结果,井底三维形态图

图5 口腔全牙模型的三维测量结果

### 3.3 采用激光扫描的三维共焦成像<sup>[11]</sup>

这是一种获取高分辨三维图像的成像系统,已在材料科学、生物医学等领域应用.共焦激光扫描显微镜采用可见或红外激光作为光源,被测试的物体由激光束顺序扫描,物体表面的散射光由检测器接收后通过计算机数据处理形成一个焦平面上的  $x-y$  坐标显示图像,焦平面在  $z$  方向对物体的扫描形成共焦像序列,从而产生高分辨的三维显示.

共焦扫描光学系统的原理如图 6(a)所示,

三维共焦像的形成如图 6(b)所示.在共焦成像系统中,照明光源被聚焦在物体表面的一个点上,一个二维光束扫描器由两个扫描反射镜构成(图中未画出详细结构),使扫描点在物方共焦平面上作  $x-y$  方向的二维扫描,从物体表面散射的光线经同一个二维光束扫描器和半透半反镜成像在带针孔的隔板上,由针孔后方的探测器接收形成共焦像.如果让系统沿  $z$  方向移动以改变共焦平面的位置,可以得到一系列的共焦像.对于一个固定的  $(x, y)$  坐标点,共焦

图序列的强度最大位置对应物体上  $(x, y)$  点的  $z$  坐标,因此寻找每一个  $(x, y)$  点的共焦像序列的强度最大值,就可以计算出完整的三维图像.例如,一种用于眼底测量的共焦激光扫描显微镜,在测量过程中需要获取 32 个共焦像,共焦像序列对应的  $z$  方向深度为 0.5—

4.0mm,也就是说,相邻两个共焦平面的间距为  $16\text{—}130\mu\text{m}$ .在图像系统中,每个共焦像由  $256 \times 256$  个像素构成,数据精度为 8bit,因此每次测量所获取的数据量约为 2M,采用 PC486 微机作数据处理,一幅三维图像的采样时间大约为 1.5s,计算时间大约为 90s.

www.cnki.net

图 6 三维共焦成像系统

(a) 共焦扫描光学系统; (b) 共焦像序列

#### 4 结束语

上面简要地介绍了三维面形测量技术的基本原理、方法和部分最新的进展.三维传感与计量是一个仍在迅速发展的科学研究领域.在这一发展趋势中,传统的光学计量技术与信息光学和信息处理技术相结合是一个最显著的特点<sup>[12]</sup>.1994 年 4 月在日本京都召开了国际光学学会年会,会议的主题是“信息光学的前沿”,三维传感与计量被列为信息光学领域前沿的 7 个主要领域和方向之一.

限于篇幅,本文只列举了三维面形测量技术中部分最新的进展.近年来取得较大进展的技术还包括:飞行时间法、三角测量法、投影条纹法、相移莫尔和逻辑莫尔、空间位相检测法、

像平面定位系统、干涉计量和隧道显微镜技术等.这些技术的深度分辨率大约覆盖了从  $10^3\text{—}10^6\text{mm}$  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.

目前,主动三维面形测量技术已广泛用于工业检测、实物仿形、生物医学、机器视觉等领域.例如复杂的叶轮和叶片的面形检测,汽车白车身的检测,人类口腔牙型测量,整形外科效果评价,用于制鞋 CAD 的鞋楦三维数据采集,用于立体服装 CAD 的人体面形数据采集,各种实物模型的三维信息记录与仿形,复杂容器体积计算,工程和隧道的剖面测量与分析,微观三维表面结构分析等.不同的应用领域对三维面形的测量范围、测量速度、空间分辨和精度等提出了不同的要求.在提高三维面形测量的空间和深度分辨能力方面,在解决复杂面形测量中产

生的各种技术难题方面,目前仍然存在不少困难.

三维面形高速度、高精度测量技术将随着测量方法的完善和信息获取与处理技术的改进而进一步发展,在新的更加广阔的研究和应用领域中发挥重要作用.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] J. A. Jalkio, R. C. Kim, S. K. Case, *Optical Eng.*, **24**-6 (1985), 966.
- [ 2 ] M. Takeda, K. Mutoh, *Applied Optics*, **22**-24 (1983), 3977.
- [ 3 ] X.-Y. Su, J. Li, L.-R. Guo, *Proc. SPIE*, **954** (1988), 241.
- [ 4 ] J.-F. Lin, X.-Y. Su, *Optical Eng.*, **34** (1995), to be

published.

- [ 5 ] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, *Applied Optics*, **23**-18 (1984), 3105.
- [ 6 ] X.-Y. Su, W.-S. Zhou, G. von Bally, *Optics Commun.*, **94**-6 (1992), 561.
- [ 7 ] X.-Y. Su, G von Bally, D. Vukicevic, *Optics Commun.*, **98**-1 (1993), 141.
- [ 8 ] W.-S. Zhou, X.-Y. Su, *Modern Optics*, **41**-1 (1994), 89.
- [ 9 ] T. Kreis, W. Juptner, R. Biedermann, *Applied Optics*, **34**-8 (1995), 1407.
- [ 10 ] R. Cusack, J. M. Huntley, H. T. Goldrein, *Applied Optics*, **34**-5 (1995), 781.
- [ 11 ] G. Zinser, *视觉科学*, **13**-4 (1992), 1.
- [ 12 ] Meeting Digest, 1994 Topical meeting of the International Commission for Optics on Frontiers in Information Optics, Kyoto, Japan, (1994).

## 数字全息光刻技术\*

余建国 裴文 徐大雄

(北京邮电大学应用科学技术系,北京 100088)

**摘 要** 文章阐述了实现全息图数字化的重要意义,介绍了数字化全息光刻技术的原理和图像特征.叙述了计算机全息数字打印机的光学系统的一般结构,简述了国内外现状和应用前景.

**关键词** 数字化,计算机全息,光刻技术

近年来,数字全息引起了人们的强烈兴趣,比较成功的有英国的 Spatial Imaging Ltd. 公司创立的数字输入-全息图像输出系统, Dimensional Arts Inc. 公司的数字全息打印机,日本的 LCTV 全息打印机.其他一些有关数字全息技术的报道也不断涌现.数字全息技术能够实现商品化批量生产,摆脱过去全息图的许多苛刻限制.例如,以前用于拍摄全息图的物体只能是从自然界中抽取的一些标本,只能是尺寸较小的物体或模型,自然界中的真实物体的形象和颜色不能再现出来.另外,传统全息图的防伪性能十分有限,展示效果较差,只能在某些方向看到全息图像,不能 360 度可视,制作周期长,偶然因素多,工作量重,价格高.

利用计算机实现数字化,能够实现图像加密,增强全息图的防伪性能.一般全息图都是高

技术产品,原本就具有防伪功能,实现数字化以后,又能对全息图的颜色和图像的点型加密.即使是拥有同一种或同一台计算机全息数字打印机的用户,只要密码不同,图像的颜色和点型就不相同,并且拥有这种打印机的用户根据需要重新设置密码也非常方便,使全息图的防伪性能大大提高,为证件、商标的防伪提供了有力的武器.

### 1 原理和图像特征

计算机全息数字打印机的工作原理是,将

\* 国家教委博士点基金资助项目.

1995 年 10 月 4 日收到初稿,1996 年 1 月 8 日收到修改稿.