

# 三维曲面的光学非接触测量技术

杜颖 李真 张国雄

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

**摘要** 对三维曲面的光学非接触测量中的各种方法进行了较为全面的介绍,并重点说明了目前几种常用测量方法的发展状况和在其原理基础上研制的新型传感器。

**关键词** 三维曲面 非接触测量 传感器

## 1 引言

随着科学技术和工业生产的不断发展,对表面轮廓、几何尺寸、粗糙度、各种模具及自由曲面的测量工作越来越多,精度要求越来越高。传统的探针式的接触测量方法存在测量力、测量时间长、需进行测头半径的补偿、不能测量较软质材料等局限性。光学非接触测量技术比较成功地解决了上述问题,以其高响应、高分辨率而倍受重视,该方法具有受环境电磁场影响小、工作距离大、测量精度高及可测量非金属面等特点。随着各种高性能器件如半导体激光器 LD、电荷耦合器件 CCD、CMOS 图像传感器、位置敏感器件 PSD 等的出现,光学非接触测量技术得到迅猛的发展,新型传感器不断出现,传感器的性能也大幅度提高。

## 2 光学非接触测量方法

光学非接触测量技术大体上可分为光纤法、双目立体视觉法、干涉法、离焦法、轴向位移转换法和三角法。各种测量方法的比较如下。

**光纤法:** 通过被测量的变化来调制波导中的光波,使光纤的光波参量随被测量的变化而改变,从而求得被测信号的大小。具有灵敏度高、耐腐蚀、电绝缘、不受电磁干扰、光路可挠曲、便于遥测等许多优点,但价格较高。

**双目立体视觉法:** 两台相对位置固定的摄像机与被测物构成三角形,被测物体在两像面上

形成立体图像对,进行相关特征点匹配获取被测物体的三维空间尺寸。若图像某区域光强或颜色不均匀,则匹配不可实现;测量时,两摄像机位置相隔越远,视差深度计算越精确,但盲区现象越严重,覆盖视场越小。

**干涉法:**利用干涉原理进行测量,各种类型的干涉显微镜都可用于被测物表面形貌的非接触测量。这种方法具有高分辨率和高测量精度的特点,但电路较为复杂,对被测表面质量要求很高,通常需要精密制造的参考镜。而且测量范围偏小。

**离焦法:**将位移量首先转换为物镜像平面相对于被测面的偏移量,再由不同的转换元件(离焦检测元件)将这种偏移量转换为光电探测器上光斑强度或大小的变化,进而转换为电量输出的变化。这种方法具有较高的分辨率,易形成小型化测头,适于在线测量;缺点是工作距离偏小。

**轴向位移转换法:**将被测物相对于物镜前焦点的位移量转换为探测器上的轴向位移量,进而求出被测点与物镜前焦点的相对距离。

**三角法:**入射光照射到被测表面,接收器接收被测表面的散射光。成像光点在接收器上的位置是测头和被测表面距离之间的函数,检测像点的位移变化可求得物体表面位移变化。优点是结构简单、分辨率高、工作距离大;但原理上存在非线性,被测面表面质量对测量结果有影响,且被测面倾角不宜大于 $45^\circ$ 。

### 3 常用三维曲面非接触测量方法的发展状况

在一般的三维曲面非接触测量中,较常采用的方法有三角法、离焦法和轴向位移转换法。

#### 3.1 三角法

三角法是三维曲面非接触测量中最常使用的一种。根据入射光不同,以三角法为原理的测量方法可分为点光源入射、线光源入射和栅光源入射三种形式。

##### 3.1.1 点光源入射

图1是基本三角法的测量原理。其中 $\theta$ 是投影光轴与成像物镜光轴的夹角,由设计决定; $\Phi$ 是光电探测器受光面与成像物镜光轴的夹角。当 $\Delta$ 变化很小,即在小位移的情况下,近似有:
$$\delta = \frac{d_1 \Delta \sin \theta}{d_0 \sin \Phi}$$
。通过分析可以证明,在三角测量中,可以通过缩小测量范围,增大成像物镜的共轭距,增大三角测量系统的角度,缩小成像物镜的放大倍率,达到线性的测量结果。

单发射四接收传感器和双向扫描三角测量法能够较好地克服由于被测表面倾斜产生的阴影和死区对测量产生的影响,下面进行简单介绍。

单发射四接收传感器的原理如图2。半导体激光器LD发出的光照射到被测物表面O处,该处的散射光被四套接收透镜A、B、C、D接收,并会聚到各自的光电接收器上。四套接收透镜以入射光束为轴对称分布,与入射光束的夹角相同。实际测量过程中,如果遇到测量死区,就会使得某一接收装置所接收的光能过大或过小,此时将该测量装置所对应的测量信息舍去,只利用其余三个接收透镜即可测量入射光束入射于被测面上的反射光束。传感器中四套接收系统采用了冗余的设计思想,避免了实际测量中的粗大误差。

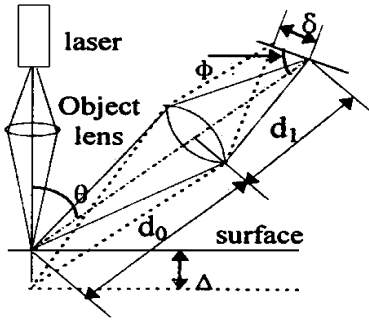


Fig. 1 Measurement principle of basic triangulation

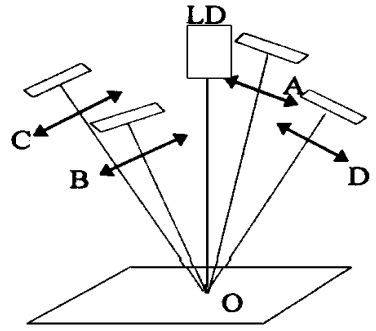


Fig. 2 Schematic view of monocular incident four-detector sensor

双向扫描三角测量法采用声光调制器(AOD)发出的衍射光从两个方向对被测物进行扫描,较好地克服了测量中阴影效应的影响。图3是双向扫描三角测量法的原理图:装置由一个激光器,三个反射镜( $M_1, M_2, M_3$ ),声光调制器AOD,聚焦透镜和位置探测器组成。位置探测器用于高精度探测光点沿某一轴的移动;AOD用作衍射扫描器,由于声光效应,激光束通过AOD时会发生衍射,衍射角的大小与输入电压 $V_i$ 有关,可以通过调节 $V_i$ 的大小控制压控振荡器(VCO)为AOD提供适当的能量和频率以获得不同的衍射角。当AOD输出衍射角从 $\alpha_0$ 到 $\alpha_0 + \Delta\alpha$ 依次变化扫描光束时,衍射光被 $M_3$ 反射,从A到B扫描物体;当AOD的输出衍射角从 $\alpha_0 - \Delta\alpha$ 到 $\alpha_0$ 依次变化扫描光束时,衍射光被 $M_1$ 和 $M_2$ 反射,从B到A扫描物体。最后,根据扫描光束衍射角和系统的设计参数,可计算出被扫描点的三维坐标。

### 3.1.2 线光源入射

采用线光源照明的三角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

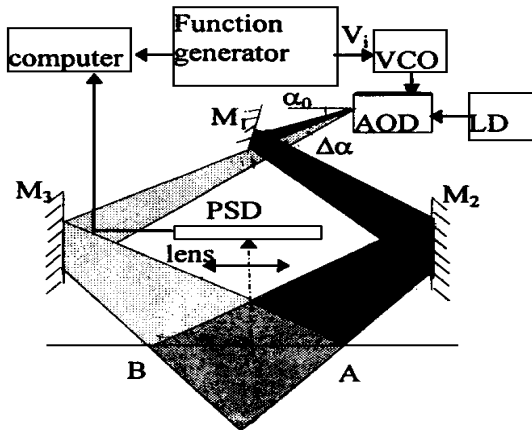


Fig. 3 Configuration of the two directional scanning method

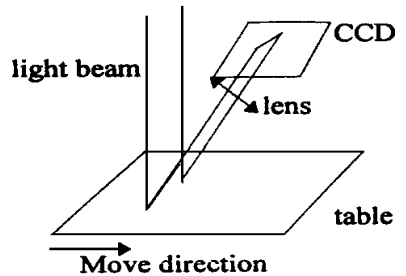


Fig. 4 Principle of light section

描就可以形成完整的三维面形数据。以线光源照明的三角法也称光切法,图 4 是这种方法的原理图。激光束经柱状透镜扩束并准直后成为一束很薄的片状光束投影到物面上,载有物面的平台沿给定坐标方向以一定速度平移,完成投影光在物面的扫描,在另一方向上用面阵 CCD 接收片光像。由于物面的高低不同,每条投影线在 CCD 光敏面上的像为一曲线,计算该曲线上个像素点偏离标准像(基准平面)的位置便可得出物面的深度变化。

### 3.1.3 栅光源入射

采用栅光源的三角位移传感系统是投射一个二维图形到被测物体表面,形成结构照明,其中最简单的是由多个线光源发出的片状光束构成的多线结构照明,其它常用的面结构照明的二维图形还有黑白光栅和正弦光栅。测量数据可以用莫尔轮廓术、傅立叶变换轮廓术、位相测量轮廓术、空间位相检测法和线性相位滤波法等方法进行处理,从而测得物体的三维面形。其特点是测量速度快,在其视场区域内不需机械扫描便可得到被测面的三维形貌。但其测量分辨率偏低,适于车间现场使用,目前机器人视觉中普遍采用该方法。

## 3.2 离焦法

离焦法的重大改进是将光通量的测量改为光斑尺寸的测量。传统的离焦检测元件主要有:刀口、付科棱镜、柱面透镜和临界角棱镜等,它们分别被称为刀口法、付科法、像散法和临界角法等。近年来,由于全息光学元件的引入,离焦法从结构上发生了根本的变化。它使得传统的光源与光电探测器之间垂直放置的 T 型结构改变为光源与光电探测器之间可共面或共基底放置的 Y 型结构。因而使发光与接收器件混合集成在一个半导体芯片上成为可能。

图 5 为全息双刀口式传感头的光路图。该光路主要包括半导体激光器 LD,全息光学元件 HOE,非球面镜 OB,以及光电探测器 PD。其中,HOE 是一个集合了两个半圆全息图  $H_1$  和  $H_2$  的基片。 $H_1$  和  $H_2$  分别是两个点源的全息干涉图,其设计与生成分别是以光电探测器四象限上的物点  $P_1$ 、 $P_2$  和 LD 的发光点  $O$  作为物光源和参考光源。LD 发出的激光束照射 HOE 后,零级衍射光直接透过,其它级衍射光被滤除,透射光由物镜 OB 在被测表面上会聚为一微小光点。由被测表面反射的光束再经物镜会聚照射到 HOE 上,两个全息图  $H_1$  和  $H_2$  产生的一级衍射光分别由 PD 接收。当被测面位于会聚点时,在 PD 像面上可得到 HOE 再现物光点  $P_1$  和  $P_2$ ,如图 5 中(a)所示。当被测表面偏离会聚点时,再现光使 HOE 在 PD 面上产生像差光斑,根据被测面位于会聚点的不同侧面如远或近,成像面上的光斑将会位于 PD 面上的不同象限上,如图 5 中(b)和(c)所示。 $H_1$  和  $H_2$  的结合部呈一直线,该直线与光源发光点和 PD 象限分划线 CC 共面,起到刀口的“切割作用”。

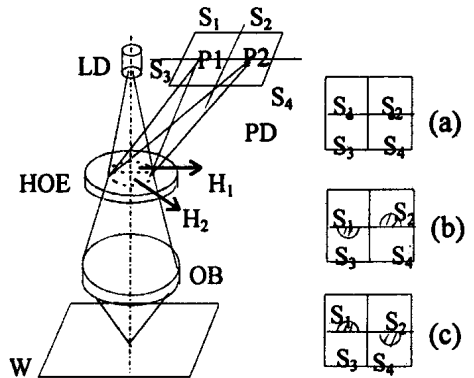


Fig. 5 Light path of double holr knife edge method

当被测面位于会聚点时,在 PD 像面上可得到 HOE 再现物光点  $P_1$  和  $P_2$ ,如图 5 中(a)所示。当被测表面偏离会聚点时,再现光使 HOE 在 PD 面上产生像差光斑,根据被测面位于会聚点的不同侧面如远或近,成像面上的光斑将会位于 PD 面上的不同象限上,如图 5 中(b)和(c)所示。 $H_1$  和  $H_2$  的结合部呈一直线,该直线与光源发光点和 PD 象限分划线 CC 共面,起到刀口的“切割作用”。

以离焦检测原理的位移传感头为基础的焦点跟踪式传感器。这种传感器利用传感头检出的离焦位移量,使物镜上下移动,来保证光线会聚点与被测面保持“恒定的接触”进而通过计算得出被测面表面形状的变化。这种传感器的最大测量范围可达几百微米,并有集成度高,体积小,重量轻等优点。

### 3.3 轴向位移转换法

轴向位移转换法起始于 1988 年, 日本学者横内弘宇首先将此法用于大型锻造件的自动检测系统中。将这种方法加以改进, 可以使接收器件全方位接收被测面的漫反射光, 从而减小被测面倾斜对测量结果的影响。图 6 是以轴向位移转换法为原理的线性位移传感器。半导体激光器发出的激光束经准直反射后, 入射到被测面上; 接收物镜全方位地接收被测面的漫反射光照, 可以认为环形狭缝是一个

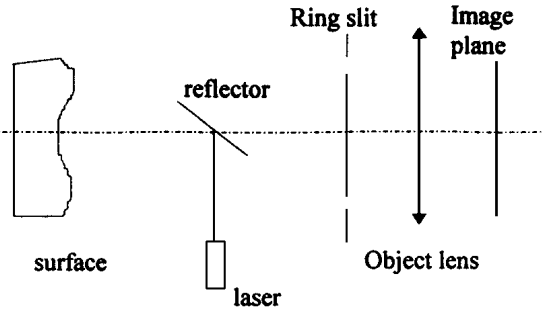


Fig. 6 Linear displacement sensor

圆形刻划板或特征环, 经成像物镜后在其像面上形成这一特征环的光环像, 该光环像的大小随被测面的离焦量变化。该光环像由摄像机接收图像处理, 再经多点最小二乘法即可求得光环大小, 从而求出位移量。

## 4 结 束 语

以上对三维曲面的光学非接触测量中的各种方法的原理进行了说明, 并介绍了以这些测量原理为基础的几种新型传感器。通过以上的讨论可以看出, 各种测量方法各有特点, 应用中应根据实际情况采取不同的测量方法, 以满足各种测量要求。

### 参 考 文 献

- 1 强锡富. 传感器. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 2 金篆芷, 王明时. 现代传感技术. 北京: 电子工业出版社, 1995
- 3 杨国光. 近代光学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1986
- 4 张吉华. 全息光触针型位移传感器及多光束测微理论与技术研究: [博士论文]. 天津大学, 1993
- 5 张文伟. 内外表面尺寸形貌的激光非接触测量法研究: [博士论文]. 天津大学, 1997
- 6 Zhang Jihua, Cai Lilong. Profilometry using an optical stylus with interferometric readout. *Measurement Science & Technology*, 1997, 8: 546549
- 7 苏显渝等. 三维面形测量技术的新进展. *物理*, 1996, 25(10): 614~ 620
- 8 Zeng Lijiang, Hirokazu Matsumoto, Kawachi Keiji. Two directional scanning method for reducing the shadow effects in laser triangulation. *Measurement Science & Technology*, 1997, 8: 262266
- 9 Ji Z, Leu M C. Design of optical triangulation devices. *Optics & Laser Technology*, 1989, 21(5): 335338
- 10 邹振书等. 非接触测量激光光学探头. *光学 精密工程*, 1997, 5(3): 83~ 89
- 11 Satoru Toyooka, Yuuji Iwaasa. Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection. *Applied Optics*, 1986, 25(10): 16301633
- 12 Tang Shouhong, Huang Yau Y. Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Applied Optics*, 1990, 29(20): 30123018

13 三好隆志. 三次元自由曲面的非接触形状传感器的开发研究(第一报): JSPE, 1992, 11: 1886~ 1888

## Optical Non-contact Measurement Technology for 3-D Surface

DU Ying, LI Zhen, ZHANG Guo Xiong

(*College of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072*)

### Abstract

In this paper various optical non-contact measurement technologies for 3-D surface are generally introduced. At the same time, several measuring methods that are frequently used are described in detail, including their development and some new sensors based on their principle.

**Key words:** 3-D surface, Non-contact measurement, Sensor

杜颖女, 1973年12月出生, 天津大学精密仪器与光电子工程学院测试计量技术及仪器专业博士研究生。