

# 激光三角法测量的研究

万 瑾, 黄元庆

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:**三角法属于主动视觉测量方法,是非接触光学测量的一个重要形式。传统的光学三角法,改之以激光光源,并结合电子信号分析电路和计算机信号处理,使测量系统可以得到较高的精度,在三维形貌测量及其他应用中已有一定的研究并有相当的前景。该文较系统地分析了不同结构、不同类型的激光三角测量系统,并比较了其优缺点。针对实际应用中出现的对测量精度的影响因素,给出了相应的解决办法。

**关键词:** 光学测量; 三角法; 非接触测量

中图分类号: TN249; TM930.1

文献标识码: A

文章编号: 1673- 4343(2006)04- 0361- 04

## Study on Laser Triangulation Method Measurement

WAN Jin, HUANG Yuan-qing

(Department of Electromechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Triangulation measurement is initiative and non-contact. With the laser as lamp-house, electronic signal analyzing circuit and computer signal disposal, the triangulation measurement can achieve the higher precision, which is needed in many applications, such as three-dimension measurement, and has equivalent foreground. Laser triangulation systems with different structures and different sorts are introduced respectively and their characteristics are compared. Ineffective factors on precision in practice applications are discussed and the corresponding solutions.

**Keywords:** optical measurement; triangulation; non-contact measurement

激光三角法由于其具有非接触、不易损伤表面、材料适应性广、结构简单、测量距离大、抗干扰、测量点小、测量准确度高、可用于实时在线快速测量等特点,在几何量测量领域中得到广泛的应用。人们一直在探索用最现代的科学技术和完善它的途径,力求进一步简化结构,提高准确度,拓宽应用范围,满足工业生产的需要。

### 1 激光三角法测量光路的分类

激光三角法光路按检测方式分为反射型与透射型;若按入射光线与被测工件表面法线的关系分为直射式和斜射式;按入射光束的形态来分,又可分为单束光和片光。

#### 1.1 直射式

反射型直射式三角法测量等效光路如图1所示。激光器发出的光束,经会聚透镜聚焦后垂直入射到被测物体表面上,物体移动或表面变化导致入射光点沿入射光轴移动,接收透镜接收来自入

射光点处的散射光,并将其成像在光电接收元件敏感面上。其物象关系为:

$$= \frac{l_1 \cdot D}{l_2}$$

图1(a)所示方法中,被测物面的入射光束与光敏面平行,并垂直于成像透镜光轴,被测点的位移与光电探测器上光斑的位移为线性关系,可用于测量相对或绝对位移。但其光敏面要求很大,而且被测点在成像面的像并不清晰,因此测量精确度不高。所以改进后将光敏面与成像透镜如图1(b)配置,即光电探测器平面与成像透镜光轴垂直,而与被测物面的入射光束成 $\theta$ 角,则其物象关系为:

$$= \frac{l_1 \cdot D}{l_2} \sin \theta$$

这种方法的准确调焦位置只有一个,其余位置的像都处于不同程度的离焦状态,从而也降低了系统的测量精度。

因此,对于高精度要求的场合,一般将光电探测器的光敏面与成像透镜成 $\theta$ 角,如图1(c)所示。

收稿日期: 2006- 11- 08

作者简介: 通信作者: 黄元庆(1949-),男,福建莆田人,教授,博士生导师;第一作者: 万瑾(1976-),女,湖北武汉人,讲师,博士研究生。

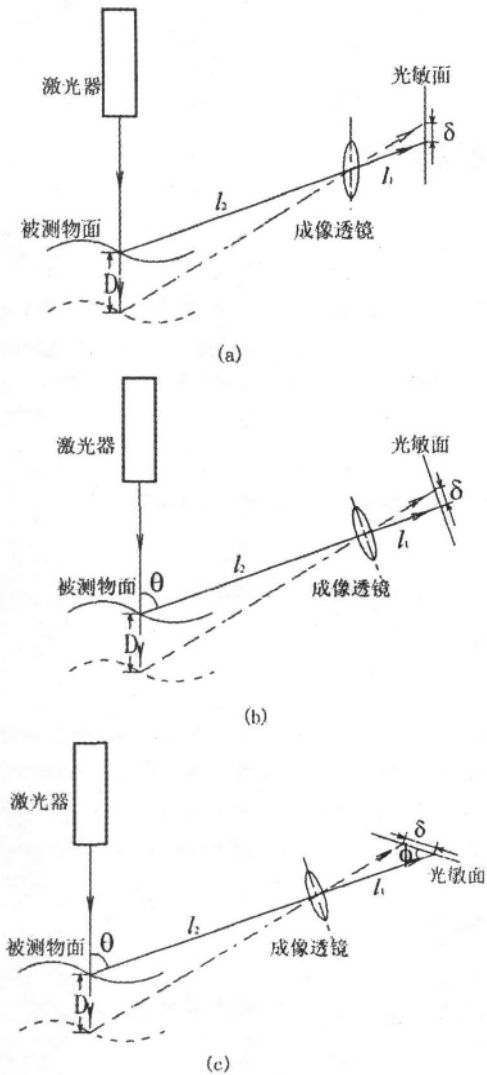


图 1 反射型直射式激光三角法测量原理图

光电探测器平面与成像透镜光轴的夹角和激光束与成像透镜光轴的夹角满足斯凯普夫拉格条件(成像面、物面和透镜主面必须相交于同一直线)时,其物象关系为:

$$= \frac{D \cdot l_1 \sin \theta}{D \cdot \sin(\theta + \varphi) + l_2 \cdot \sin \varphi}$$

其中,  $\varphi$  与  $\theta$  应满足如下关系, 以保证被测点成像在光敏面上:

$$\tan \varphi = \frac{l_2 \cdot f}{f} \cdot \tan \theta$$

式中,  $f$  为成像透镜的焦距。该光敏面可以较理想地接近像平面, 使得扩展像斑的尺寸减小, 从而减小测量误差, 缺点是使测量范围受到了限制<sup>[1]</sup>。

### 1.2 斜射式

直射式激光三角法由于其接收散射光的特点, 适合于测量散射性能好的表面, 否则可能由于光线大多被反射而存在测量盲区。斜射式三角测量原理图如图 2 所示<sup>[2]</sup>。激光器发出的光与被测面

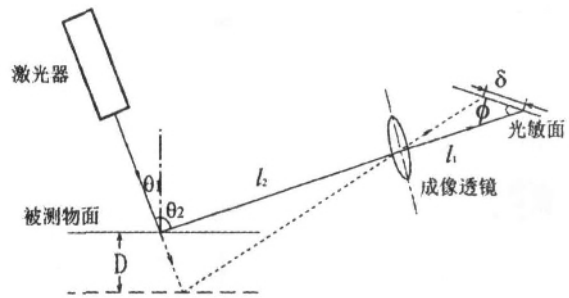


图 2 斜射式光路图

的法线方向成一定角度入射到被测面上, 其它的与直射式一样。物象关系为:

$$= \frac{l_1 \cdot D \sin(\theta_1 + \theta_2)}{l_2 \cdot \sin \varphi \cos \theta_1 + D \sin(\theta_1 + \theta_2 + \varphi)}$$

式中,  $\theta_1$  为激光束光轴与被测面法线之间的夹角,  $\theta_2$  为成像透镜光轴与被测面法线之间的夹角,  $\varphi$  为探测器光轴与成像透镜光轴之间的夹角。

与直射式相比, 斜射式可接收来自被测物体的正反射光, 比较适合测量表面接近镜面的物体, 而直射式由于其接收散射光的特点, 适合于测量散射性能好的表面, 否则可能由于光线大多被反射而存在测量盲区; 斜射式入射光光点是照射在物体的不同点上, 无法直接得到被测物体某点的位移情况, 而直射式可以; 斜射式分辨率高于直射式, 但测量范围较小、体积较大、光斑较大, 而直射式光斑小, 光强集中, 体积小。因此, 可针对直射式与斜射式各自的优缺点, 应用在不同的场合。

### 1.3 透射式

对于一些特殊材料的被测工件可以采用透射式, 即光敏面感知的是透过被测工件的光线。刘明、曾理江用透射式激光三角法测量了蜻蜓翅膀形状<sup>[3]</sup>, 如图 3 所示。

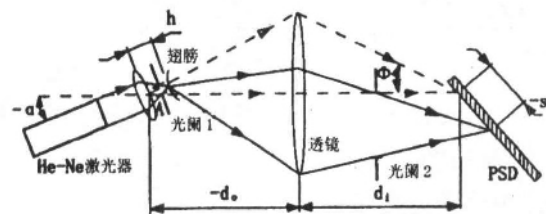


图 3 蜻蜓翅膀形状测量的光路图

这种方式主要针对于透明材质的被测物, 其光路与常规的激光三角法光路不同之处在于它利用前向散射光测量, 避免光滑表面反射对测量的影响。

### 1.4 片光

光切法(light-sectioning method), 又称结构光

图像法(structured light image)<sup>[4]</sup>,常用的结构光是由激光投射光条与一个面阵探测器一起组成,一次获取一条扫描线上的数据。如图4所示,点式激光发生器经过柱镜扩束后形成直线型激光束,将直线型激光束在行、帧方向进行扫描,即可得到曲

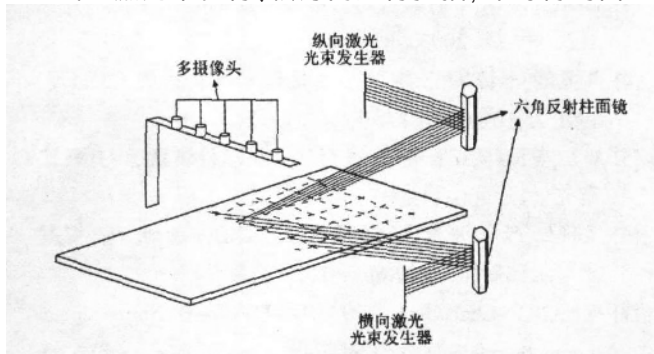


图4 直线型激光板形检测系统示意图

面特征<sup>[5]</sup>。

光切法在实际应用中是相当实用的,如钢铁的钢板板型、混凝土断裂面轮廓重构<sup>[6]</sup>等,其结构简单、测量速度快、使用灵活、适应能力强,方法直观、方便、快捷,但明显地增加了成本的投入。

## 2 影响测量精度的因素及解决方法

由于激光三角法在实际应用中的广泛推进,近年来对于提高其测量精度的研究也很多。总的来说,主要是存在着如下影响因素:

内部因素主要包括发射光强的稳定度、光学系统的象差、光点大小和形状、光电检测器件固有的位置检测误差和分辨力、检测电路的测量精度和噪声、电路和光学系统的温度漂移等。

外部因素主要是指被测表面倾斜、被测表面光泽和粗糙度、被测表面颜色以及测量速度的影响。

### 2.1 被测物体表面特性的影响与解决方法

包括表面光泽和粗糙度、表面颜色和表面的倾斜度。研究表明,在其他条件不变的情况下,当被测表面的粗糙度大于 $3.0\mu\text{m}$ 时,对激光位移传感器的测量精度有较大影响,需考虑数据补偿或对其表面进行预处理;表面颜色为蓝色、绿色、黑色时,吸收光能较多,散射光斑光强很弱,位置探测器得到的光能很少,从而测量的非线性误差偏移较大;而如果表面倾斜,误差可达百微米量级<sup>[7]</sup>,可采用双三角法来进行校正<sup>[8]</sup>。这种方法如果与立体视觉原理结合,又称为立体视觉测量。

双三角法主要用于三维曲面测量<sup>[9-10]</sup>。被测曲面或者扫描测量探头有二维方向的相对运动便能测出整个曲面。一般可以让激光束在行、帧两个方

向扫描来测量三维曲面轮廓,将若干曲线连在一

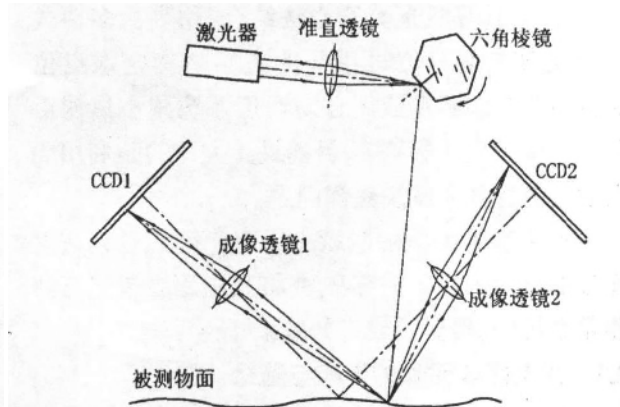


图5 激光束入射方向改变的双三角测量法

起,就是整个曲面。如图5所示,将激光束经多面体棱镜改变方向,完成平面内的入射光线移动,或将被测曲面在平面内沿两摄像机连线方向移动,如图6所示。

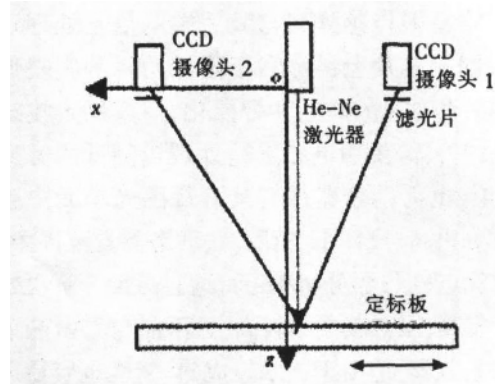


图6 被测量物平移的双三角测量法

双三角法在一定程度上解决了表面倾斜这一问题,即由于安装的角度问题,光电探测器的信号受被测物表面形态影响较大的缺点。在理论上要求必须保证激光束始终和被测量物体表面垂直,但在实际应用中是不可能达到的,特别是在测量物体表面形貌的应用中。由于在激光束的两侧对称地安装了光电探测器,在入射光轴与两光电探测器法线组成的主平面内,双三角法可以消除由于被测测量物体的表面在测量系统平面内的倾斜所带来的无法测量或较大误差的现象。但物面形貌所产生的散射光若不在此主平面内,光电探测器仍无法探测到信号。

### 2.2 入射光束焦深限制的影响与解决方法

高斯光束聚焦作为入射光时,光斑尺寸会随测量范围变大而离焦变大,从而降低系统分辨率,因而无法进行大测量范围应用。对此,可采用PSD作为探测器,但只能得到较低的横向分辨率及测量精度,而且容易得到由于被测物表面细节突变导致的错误信息;或可采用对入射光束精确调焦

的方法,但结构复杂且影响测量精度及速度;可采用 CCD 与计算机运算质心法结合,用高次多项式拟合光斑灰度分布再用灰度质心来确定像点位置,提高分辨率<sup>[11]</sup>;或用自动调焦系统减小焦深对测量系统精度的影响<sup>[12]</sup>。目前最受关注的是利用无衍射光的特性来解决焦深问题。

华中理工大学的赵斌、周莉萍等人对无衍射光束的特性进行了研究<sup>[13]</sup>,并将其应用在激光三角测量系统中,得到了较好的效果<sup>[14-16]</sup>。

### 2.3 光电接收元件的影响与选择

激光三角法测量系统中采用的光电接收元件普遍的有四种:早期的二象限硅光电池,该元件对光斑的要求较高,仪器分辨率受光电池灵敏度影响较大;PSD(位置敏感元件),分辨率可达 10  $\mu\text{m}$ ,但该元件要求激光器的光能输出稳定,仪器分辨率也要求 PSD 具有较高分辨率;CMOS 传感器,将象限传感阵列与其后端的信号处理电路集成在同一芯片上,有利于降低功耗和实现传感器的单片集成化(SOC)和智能化,但其固定模式噪声较大<sup>[17]</sup>,需要用电路进行处理以降低固有噪声;CCD(电荷耦合器件),具有每感光单元中感光面积百分比高、尺寸小、精度高、动态测量范围大、功耗低的优点<sup>[18]</sup>,仪器分辨率还可通过后期计算机处理进一步提高,虽然其成本较高,且不能与 CMOS 集成电路工艺兼容,但由于技术较成熟,精度也容易通过计算机处理提高,因此目前被普遍采用。

### 2.4 其它因素影响与解决方法

此外,还有测量环境温度的变化,在同样的光路参数下,被测物体存在 500 温差时,满量程时光线弯曲引起测量误差达 0.0687mm<sup>[19]</sup>,对此可以采用双光路结构来消除由此产生的误差;通过加大图像信息叠加,有效地降低散斑噪声,提高深度分辨率<sup>[19]</sup>;针对强反射自由曲面用三个 CCD 测量<sup>[20]</sup>;可用光学双稳装置(OBD)来稳定光源的光强<sup>[21]</sup>。

## 3 结论

目前的激光三角法在精度上都较传统的光学三角法有所提高,在实际应用中的改进也有一定的成效。但其根本的一个问题仍待解决:光电探测器平面的法线与入射光轴必须严格同面,且被测物面的倾斜角度仍会对测量的精度和可行性有较大的影响。如果解决了这一问题,对激光三角法的实际应用必然有着非常大的推动作用。

### 参考文献:

- [1] 洪昕,吴秀红,蒋诚志,等倾斜 CCD 光敏面以减小扩展像斑的分析[J].误差分析,1997,17(5): 11- 16.
- [2] 冯俊艳,冯其波,匡萃方.高精度激光三角位移传感器的技术现状[J].应用光学,2004,25(3): 33- 36.
- [3] 刘明,曾理江.透射型激光三角法测量蜻蜓翅膀形状[J].仪器仪表学报,2003,24(S4): 95- 97.
- [4] 苏显渝,李继陶.三维面形测量技术的新进展[J].物理,1996,25(10): 614- 617.
- [5] 刘江,姜丽华,王长松.直线型激光板形检测系统[J].钢铁研究学报,2003,15(5): 60- 63.
- [6] 吴科如,严安,张东,等.混凝土断裂面的实验研究[J].混凝土与水泥制品,2002(6): 3- 10.
- [7] KUANG - Chao Fan, KUANG - Pu Wen. Non - contact automatic measurement of free - form surface profiles on CNC machines [J].SPIE,Vol. 2101, Measurement Technology and Intelligent Instruments 1993:949- 958.
- [8] 王少清,庄葆华.物面倾斜对激光三角位移测量精度影响的研究[J].山东建材学院学报,1996,10(1): 63- 71.
- [9] 唐朝伟,梁锡昌,邹昌平.三维曲面激光双三角测量法[J].重庆大学学报,1993,16(1): 107- 111.
- [10] 杨春平,吴健,洪亮,等.双 CCD 系统在三维面形测量中的应用[J].半导体光电,2004,25(3): 219- 223.
- [11] 赵建林,郝建华,李恩普,等.提高 CCD 在激光三角测距中分辨率的方法[J].光子学报,1997,26(11): 998- 1001.
- [12] 刘君,刘江春,晏克俊.光学三角法高精度自动调焦系统设计[J].西安理工大学学报,2004,20(1): 63- 66.
- [13] 赵斌,李柱.同轴共轭透镜对斜入射平行光的聚焦衍射特性[J].光学学报,1999,19(3): 299- 305.
- [14] 周莉萍,赵斌,李柱.无衍射光束在激光三角测量系统中的应用研究[J].激光技术,1998,22(1): 22- 25.
- [15] 周莉萍,高咏生,李柱.双无衍射光束三角测量系统[J].华中科技大学学报,2001,29(1): 11- 13.
- [16] 周莉萍,高咏生,李柱.基于无衍射光及虚拟探测器的三角测量系统[J].华中科技大学学报,2001,29(1): 8- 10.
- [17] SUNETRA K M ,SABRINA E K, RUSSELL C G, et al. CMOS active pixel image sensors for highly integrated imaging systems[J]. IEEE Journal of Solid - state Circuits, 1997,32 (2): 187- 197.
- [18] 庄葆华,王少清,张吉华.高精度激光三角法位移测量被测表面倾斜影响研究[J].计量技术,1996(2):2- 4.
- [19] 邹小平,苏显渝,张启灿.激光片光三维传感中提高深度分辨率的方法[J].激光技术,2004,28(2): 196- 198.
- [20] 赵小松,张国雄,刘征.测量强反射自由曲面的测头设计[J].仪器仪表学报,2004,25(2): 274- 276.
- [21] 钱晓凡,吕晓旭,钟丽云.提高激光三角法测量精度的新方法[J].激光杂志,2000,31(3): 54- 55.

(责任编辑:叶 普)