

# 曲面轮廓测量中二维坐标传感器的设计

唐朝伟 梁锡昌

(重庆大学机械传动国家实验室, 重庆, 630044)

**摘要:**本文详细阐述了二维光学测量的原理,指出了传统单三角测量中象点位移和表面起伏的关系的不准确性,推导了光学测量头各器件之间的精确关系,给出了测量范围和象点的关系,最后根据设计实例说明测量装置调节的可能性和调节方法。

## The design of 2-D coordinate sensor for curved surface contour measurement

Tang Chaowei, Liang Xichang

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission of Chongqing University)

**Abstract:** This paper describes the theory of 2-D optical measurement in detail, points out the approximate relation between surface undulation and image of light spot, derives the accurate relation of all the components of triangulation device, and gives out the relation between the measuring range and the image of the light spot. At last, the possibility and the method to adjust the measurement device is illustrated, according to the designed example.

### 一、引言

三维曲面轮廓测量的方法很多,如摄影测量法、光栅测量法、三坐标机测量法等,其中测量精度最高的是三坐标机测量法,但此法也有缺点,操作慢而且不能测比自己体积大的物体。目前,激光扫描测量法以其非接触的优点越来越得到广泛应用,但这种方法更多的是用在表面起伏的一维测量中。

为了获取三维曲面上各点坐标又不希望依赖于三坐标机,提出了一种双三角测量曲面的新方法。下面介绍这种测量方法中的双三角测量头的设计方法。

### 二、二维非接触测量原理

为了确定空间中的一点,根据人眼立体视觉效应,采用两个光电接收器,目标点分别在两个光电接收器上成像,根据成像位置便可以得出相应于两个光电接收器的目标点的二维坐标。在曲线测量的基础上,让测头旋转,即可扫描整个被测曲面。

图1所示为当双三角光学测量头,激光器 LA 射出的激光束入射到多面转镜 FA 上,经反射后照射到被测曲面上一点 Q。光点 Q 被摄像机 LC<sub>1</sub> 和 LC<sub>2</sub> 接收,经过成像系统和光电图象传感器 CCD 测出长度  $b_1$  和  $b_2$ 。若多面转镜 FA 旋转,则光点 Q 在被测曲面上自左到右扫描,由采样器依次采样,则可测出此曲线的坐标  $(x_i,$

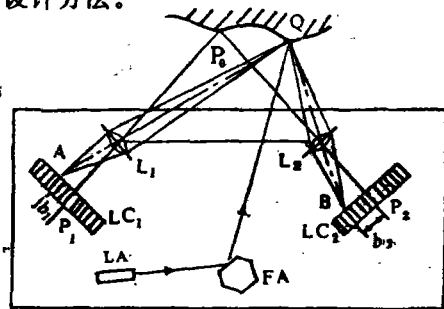


Fig. 1 Schematic diagram of double triangulation using a laser

$y_i$ )。

图1实际上是两个单三角形装置的合成,只要设计好单三角形的各个参数便能组合成二维测量头。至于两个光学测头之间的距离可以根据测量范围和被测曲面的曲率来确定。

### 三、一维激光单三角形测量头的近似性

激光三角测量法的原理是由激光照射到被测物体表面上,被测物表面的一部分漫反射光由接收物镜成象在图象传感器 CCD 上,根据 CCD 上光点成象位置可以测量物体的表面起伏大小,如图 2 所示。

在图 2 所示的测量装置中,Luxon 和 Parker<sup>[1]</sup>指出:对于接收器表面垂直于接收物镜光轴的这种三角形装置而言,假设位移  $h$  很小,当表面位移小时角是近似不变的常数,与  $h$  相关的象点的位移是:

$$S = h \cdot M \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

式中,  $M = L_i / L_o$  是接收物镜的放大率。

在图 2 所示的结构方案中,当光斑在被测物表面上移动时,不能确保接收器上的所有光斑象精确位于象平面上,Luxon 和 Parker<sup>[1]</sup>指出:接收器必须与接收物镜成  $\varphi$  角放置。假设  $h$  很小时,得到下述方程式:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{d_o - f}{f} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

$$S = \frac{f}{d_o - f} \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \quad (3)$$

式中,  $f$  是透镜焦距。

上述方程式都是近似式子,在测量范围很小 ( $h$  很小) 时是适用的,但测量范围大时须讨论别的精确关系。

如图 3 所示 CCD 图象传感器与接收物镜光轴成一定夹角,之所以如此,是由于物点并不是在垂直于光轴的一个平面上,而是在成一定夹角的一个平面上,根据几何光学原理,只有垂直于光轴平面上的物点与象点才满足精确的物象关系。然而,被测表面有起伏,被测物点并不在一条直线上,也不与光轴垂直,如果让线阵 CCD 与接收物镜光轴垂直,则不可能精确成象,势必造成 CCD

上象点大小分布不均,从而影响测量的精确性。为了达到精确成象的目的,激光束与线阵 CCD 与接收物镜主平面必须共面,而且 CCD 线阵与接收物镜主平面成一定夹角。

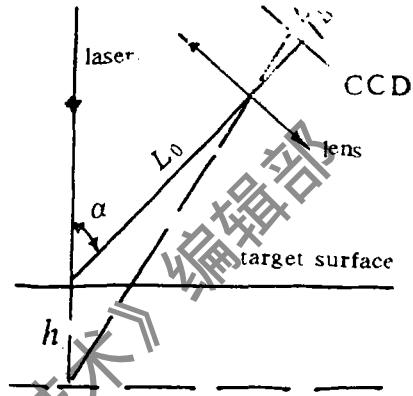


Fig. 2 Triangle measuring principle using laser

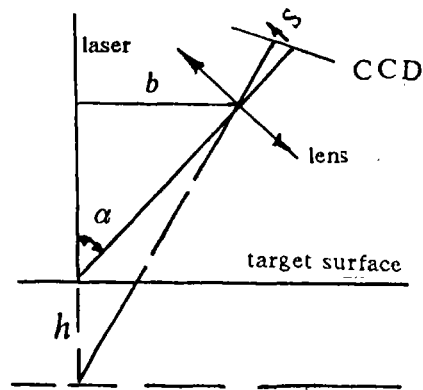


Fig. 3 Accurate triangle measuring principle

#### 四、单三角形测量头中 CCD 图象传感器与光轴的夹角关系

如图 4 所示, A, B 为物面, T 为象面, 光点在 AB 上作直线运动。A, T 为满足物象关系的轴上点。

根据几何光学原理可得:

$$\frac{1}{L_o} + \frac{1}{L_i} = \frac{1}{f} \quad (4)$$

任何透镜系统都有一定的放大倍数, 图 3 中物象垂轴放大率为:

$$\frac{h \cdot \sin \alpha}{-s \cdot \sin \varphi} = \frac{-L_o + h \cdot \cos \alpha}{L_i + s \cdot \cos \varphi} \quad (5)$$

根据文献[2]中的牛顿公式有:

$$\frac{h \cdot \sin \alpha}{-s \cdot \sin \varphi} = \frac{f}{L_i - f - s \cdot \cos \varphi} \quad (6)$$

$$\frac{h \cdot \sin \alpha}{-s \cdot \sin \varphi} = \frac{-L_o + f + h \cdot \cos \alpha}{-f} \quad (7)$$

为了化简方便, 不妨令:

$Y = h \cdot \sin \alpha$ ,  $X = h \cdot \cos \alpha$ ;  $Y' = s \cdot \sin \varphi$ ,  $X' = s \cdot \cos \varphi$  分别代入(4), (5), (6), (7)式有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_o} + \frac{1}{L_i} &= \frac{1}{f} \\ \frac{Y}{-L_o + X} &= \frac{-Y'}{L_i + X'} \\ \frac{Y}{-Y'} &= \frac{f}{L_i - f + X'} \end{aligned}$$

同时有:  $Y = X \cdot \tan \alpha$

由以上四个式子化简可得:

$$\tan \varphi = \frac{-L_o - f}{f} \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

式中  $L_o < 0$ ,  $-L_o > f$ 。

上式表明: 接收器 CCD 与光轴的夹角  $\varphi$  与  $\alpha$  有关, 也与透镜焦距  $f$  有关。 $L_o$  由  $\alpha$  与图 3 中的  $b$  确定<sup>[3]</sup>。

测量系统中常将激光器和透镜系统设计在一起, 称作测量头, 而且其间距恒定, 这样一旦安装决定了  $\alpha$ , 也就决定了  $L_o$ 。

#### 五、测量范围大小与接收器上象点位移的关系

当被测表面有起伏时, 漫射光点并不正好都在光轴上, 这时随着表面起伏变化, 象点即在 CCD 上移动, 象点的位移反映了起伏大小。由(5)式可知:

$$\frac{h \cdot \sin \alpha}{-L_o + h \cdot \cos \alpha} = \frac{-s \cdot \sin \varphi}{L_i + s \cdot \cos \varphi}$$

$$h \cdot \sin \alpha \cdot L_i + h \cdot \sin \alpha \cdot s \cdot \cos \varphi = L_o \cdot s \cdot \sin \varphi - h \cdot s \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi$$

由此得到  $s$  与  $h$  的关系如下:

$$S = \frac{L_i \cdot h \cdot \sin \alpha}{L_o \cdot \sin \varphi - h \cdot \sin(\alpha + \varphi)} \quad (9)$$

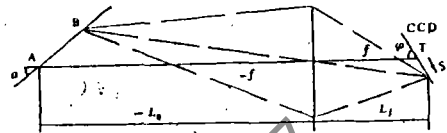


Fig. 4 The relation of the surface undulation with the position on the CCD

由(9)式可以看出,象点位移与表面起伏有关,而且还分别与光学透镜的结构尺寸及接收器与光轴的相对位置有关。

在实际测量中,我们需要在已知光学系统情况下,利用接收器上的象点位移求出表面起伏大小  $h$ 。由(9)式可得:

$$h = \frac{L_o \cdot s \cdot \sin\varphi}{L_i \cdot \sin\alpha + s \cdot \sin(\alpha + \varphi)} \quad (10)$$

任何线阵接收器都有一定的最小光敏尺寸,我们可让最小光敏尺寸非常小,从而求出表面起伏的最小值。对(10)式求微分有:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{L_o \cdot L_i \cdot \sin\varphi \cdot \sin\alpha}{[L_i \cdot \sin\alpha + s \cdot \sin(\alpha + \varphi)]^2} \quad (11)$$

上式中,  $dh/ds=0$ , 所以  $h$  不存在极值,也即是说只要  $s$  足够大,测量范围  $h$  可无限大;实际

上,任何接收器件总不可能有无限长,所以  $h$  是有限的。线阵 CCD 是由很多光敏元依次排列而成的,两单元的中心距即是象点位移的分辨率,如果两物点相距比此距离还小,则 CCD 认为是同一个物点,所以由(11)式还可算出表面起伏测量系统的分辨率。

(10)式可以由图 5 所示  $h$  与  $s$  的关系。

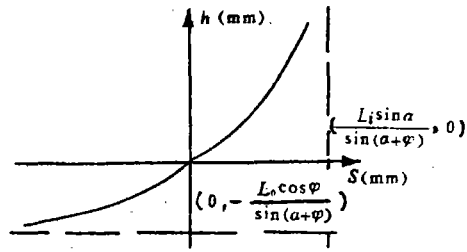


Fig. 5 The relation curve between  $h$  and  $s$

### 六、三角形测量头中各个参数的选定及设计实例

我们可以利用上述分析来设计实际的测量系统,一般测量装置总有一个测量范围和分辨率,我们可以利用这两个指标连同推导的方程来设计实际的测量装置,最后根据测量系统进行误差分析。

一般的三角形测量装置如图 2 所示,激光器与透镜中心的距离常常是确定的,即  $b$  与  $L_o$  有如下关系:

$$L_o = b \sin\alpha \quad (12)$$

又根据前述分析可得下列方程组:

$$\frac{1}{L_o} + \frac{1}{L_i} = \frac{1}{f}, \quad \text{tg}\varphi = \frac{L_o - f}{f} \cdot \text{tg}\alpha$$

$$\frac{h \cdot \sin\alpha}{-L_o + h \cdot \sin\varphi} = \frac{s \cdot \sin\varphi}{L_i + s \cdot \cos\varphi}$$

$$\frac{h \cdot \sin\alpha}{-s \cdot \sin\varphi} = \frac{f}{L_i - f - s \cdot \cos\varphi} \quad (13)$$

$$\frac{h \cdot \sin\alpha}{-s \cdot \sin\varphi} = \frac{-L_o + f + h \cdot \cos\alpha}{-f}$$

$$\frac{dh}{ds} = \frac{L_o \cdot L_i \cdot \sin\varphi \cdot \sin\alpha}{[L_i \cdot \sin\alpha + s \cdot \sin(\alpha + \varphi)]^2}$$

光学系统中的五个参数  $L_o, L_i, f, \alpha, \varphi(h, s, b)$  可以由以上五个独立方程根据测量范围  $h$  及分辨率求得。

根据上述要求设计的光学系统是一个固定不可调节系统,然而实际测量中总希望有不同的测量范围及测量分辨率,这就需要调节光学系统。由(12)式可知,改变激光束与透镜中心的距离  $b$ ,则可以改变  $L_o$ ,从而改变  $L_i$ ,通过调节焦距  $f$  可以达到系统调节的目的。透镜在光轴方

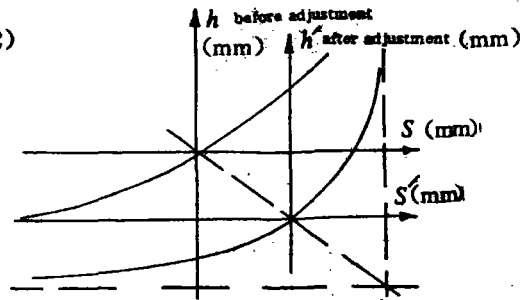


Fig. 6 Curve  $h-s$  in adjustable optical system

向平行移动,不改变透镜与光轴及接收器之间的夹角关系。

图6示出了两种光学系统的测量范围与位移的关系曲线。

### 七、二维光学测量头的设计

由以上分析可知,把两个设计好的单三角测量头组合起来便可以得到二维光学测量头。所不同的是,二维测量头要考虑扫描范围。扫描范围与接收物镜的视距及被测物体离测量头的距离有关。两个单三角测量头之间的距离由被测物体离测量头的距离以及被测曲面的曲率决定。

我们为三维人体曲面测量设计了上述二维测头,给定要求,2048元 CCD 传感器有效线阵长为 28.672mm,接收物镜为相机镜头,即:

$S = 14.336 \text{ mm}$ ,  $f_1 = f_2 = 50 \text{ mm}$ ,  $h = 600 \text{ mm}$ ,  $dh/ds = 0.1 \text{ mm}$ , 被测曲面离测量头为 1000mm。

代入(12)式,(3)式中,可求得:

$L_o = 1019.80 \text{ mm}$ ,  $L_i = 47.66 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 11.31^\circ$ ,  $\varphi = 75.25^\circ$ ,  $b = 200 \text{ mm}$ ,  $L = 2b = 400 \text{ mm}$ , 水平扫描范围为 810mm。

若改变  $b$  不改变夹角关系,则接收物镜在光轴方向移动,此时  $L_o$ ,  $L_i$  均随之变化,  $h$  和  $dh/ds$  也发生变化。这样便可以根据给定  $h \cdot dh/ds$  反复计算逼近最佳结构。本文的具体装置结构图如图1所示。

采用本文的方法设计三角测量头成为可调节系统是非常方便、实用的。

### 参 考 文 献

- [1] Luxon J, Parker D. Opt & Technol, 1989, 21(5): 212~216
- [2] 张以谟. 应用光学. 北京, 机械工业出版社, 1988, 35
- [3] [日] 稻荷隆彦. 国外计量, 1989, (1): 1~3

作者简介: 唐朝伟, 男, 1966年10月出生, 博士生。现从事柔性制造及激光扫描三维测量的研究。

梁锡昌, 男, 1935年10月出生, 博士生导师。国家二等发明奖获得者, 国家级有突出贡献专家, 重庆大学机械传动国家重点实验室主任。

收稿日期: 1993年2月18日。

收到修改稿日期: 1993年4月26日。

· 产品简讯 ·

## 大面积 InGaAs 光电二极管

美国加利福尼亚州 Telcom Devices 公司出售 850~1700nm 波段内的圆形或方型 10mm InGaAs 光电二极管, 动态阻抗 0.5MΩ, 响应灵敏度 0.9A/W, 均匀性 5%。35PD10M 型光电二极管可用于全纤维电缆信号传感和其它检测测量等。

译自 L F World, 1992, 28(11): 176

于祖兰 译 巩马理 校