

激光三角法用于曲面测量中的 影响参数分析

洪 昕 蒋诚志 陈林才
(天津大学精仪系 天津 300072)

郑文学
(长春光学精密机械学院光电工程系 长春 130022)

提要 分析了利用会聚光束投射的激光三角法在曲面测量中由于离焦造成像斑扩展的各参数影响,并且利用计算机模拟曲线分析了改进方法并给出结论:利用激光三角法测量曲面的分辨率不受曲率变化的影响。

关键词 会聚光束,激光三角法,曲面测量,影响参数

1 引言

由于半导体激光器和新型光电位置检测元件(如 CCD、PSD 器件等)的发展,使得以经典的三角法为基本原理的激光扫描测头在小型化、测量高精度和高速度等方面得到长足进展^[1~4]。由于这种方法的高准确度、非接触性,目前已引起人们的广泛重视,尤其在质量控制和汽车行业等方面得到了应用。

光学三角法从投射光束的角度来看,分为两种:一种是采用平行光照射被测量物面;另一种是将激光束会聚到被测物面进行投射。后者突出特点为高精度(分辨率可达 $1\ \mu\text{m}$)。

由于作为探测器件的 CCD 的像敏元尺寸与中心距的要求,成像在 CCD 像敏面上的光斑尺寸就是影响测量精度的主要因素之一。本文分析了在曲面测量中各参量对于像斑直径的贡献,并利用计算机模拟曲线分析了改进方法。

2 激光三角法测头原理

图 1 中描绘了会聚光束与平行光投射的激光三角法的基本思想。投射到被测物面的光束由于光的散射,将不再具有确定的方向,须经透镜(lens 2)成像在探测器件 CCD 上。被测物体表面的位移 x 引起光敏面上成像光点产生位移 x' 。经过简单的公式转换,可以通过测量像点的移动而计算出轮廓的变化量。

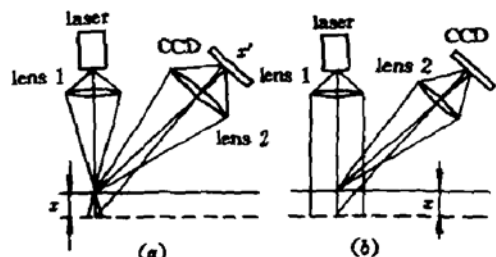


图 1 激光三角法

Fig. 1 Laser triangulation

3 误差参数分析

利用会聚光束投射曲面,当被测曲面位移 x 时(也即离焦后),将产生两个方面的问题:一是在照明宽度内,由于被测面自身的弯曲所造成的几何误差;另一个就是由于成像斑点的扩展所带来的误差。

3.1 几何误差

如图 2 所示,激光束被会聚在位置 1,当被测面位移 x 到达位置 2 时,由于光束的扩展及曲面自身固有的曲率半径 R 的影响,这个误差值为

$$\delta R = \frac{4f_1^2 R - D^2 x - 2f_1 \sqrt{4f_1^2 R^2 - 2xRD^2 - D^2 x^2}}{4f_1^2 + D^2} \quad (1)$$

f_1, D 分别为透镜 lens 1 的焦距和通光孔径。

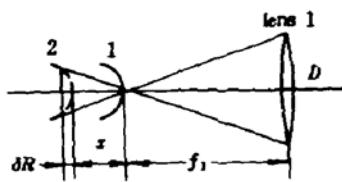


图 2 几何误差
Fig. 2 Geometry error

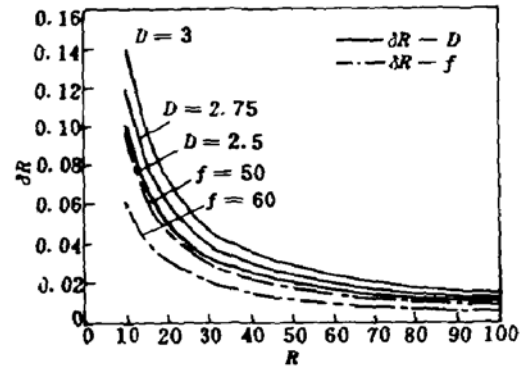


图 3 几何误差与孔径及焦距的关系
Fig. 3 Influence of the aperture and focus length of lens 1 on the geometry error

图 3 绘出了 δR 随 D 和 f_1 变化的关系曲线。分别画出了 $D = 3, 2.75, 2.5$ mm 和 $f_1 = 40, 50, 60$ mm 的三条曲线。可见, δR 随着 D 的减小明显减小,随着 f_1 的增大而减小。

可以得出结论:减小会聚透镜的孔径或者增大其焦距 f_1 都是抑制 δR 的方法。

3.2 像斑扩展

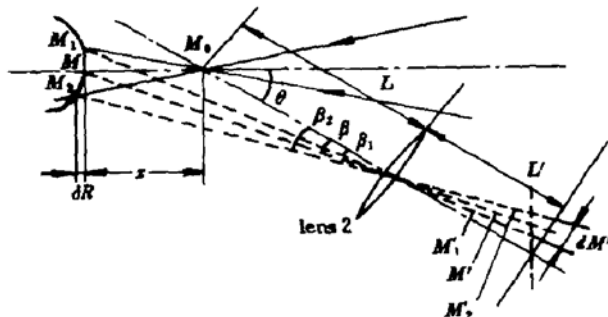


图 4 像斑扩展
Fig. 4 Image spread

如图 4 所示,会聚光束聚焦于 M_0 点,在曲面位移 x 时,扩展光束实际的照明区域为 $M_1 M_2$ 的扩展区域而非点斑。 M_1, M, M_2 经成像透镜 lens 2 分别成像于 M_1', M', M_2' 且位于探测器件之前,于是在接收器上得一扩展像斑 $\delta M'$ 。图 4 中有

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f_2} \quad (2)$$

由高斯光学有

$$\text{tg} \beta_i = \frac{2f_1' \sin \theta (x + \delta R) + (-1)^i D \cos \theta (x + \delta R)}{2f_1' l + 2f_1' (x + \delta R) \cos \theta - (-1)^i (x + \delta R) D \sin \theta}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

$$\delta M' = l' |\text{tg}\beta_2 - \text{tg}\beta_1| \tag{4}$$

$\delta M'$ 为探测器件接收的像斑尺寸,由图 5 可见,倾斜探测器件 $\delta M''$ 将会减小。

图 5 绘出了扩展像斑与各参数之间的关系曲线。为了绘图方便,图 5 中的数据被扩大。

在图 5 中,分别画出了 $\delta M'-D$ 和 $\delta M'-f_1$ 两组曲线,每组曲线由上而下分别代表以 $\Delta D = -0.5 \text{ mm}$ 减小的曲线和以 $\Delta f_1 = 10 \text{ mm}$ 增加的曲线。

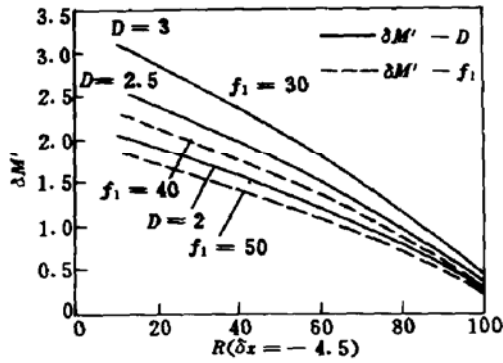


图 5 扩展像斑与孔径及焦距的关系

Fig. 5 Influence of the aperture and focus length of lens 1 on image spread

$x_0 = 45 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$, $f = 50 \text{ mm}$, $f_1 = 30 \text{ mm}$,
 $l = 100 \text{ mm}$, and $d = 3 \text{ mm}$

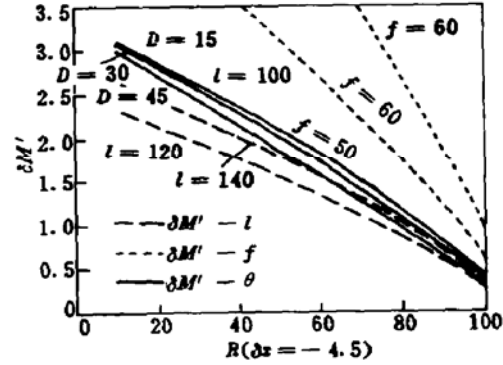


图 6 扩展像斑与接收角度、物距和焦距的关系

Fig. 6 Influence of viewing angle, object length and focus length on image spread

$x_0 = 45 \text{ mm}$, $\theta = 15^\circ$, $f = 50 \text{ mm}$, $f_1 = 30 \text{ mm}$,
 $l = 100 \text{ mm}$, and $d = 3 \text{ mm}$

在图 6 中,分别绘出 $\delta M'-\theta$, $\delta M'-l$ 和 $\delta M'-f$ 的三组曲线,每组曲线由上而下分别为以 $\Delta\theta = 15^\circ$ 增加的 $\delta M'-\theta$ 曲线, $\Delta l = 10 \text{ mm}$ 增加的 $\delta M'-l$ 曲线和以 $\Delta f = -10 \text{ mm}$ 减少的 $\delta M'-f$ 曲线。

3.3 误差分析

通过以上的分析,我们把第一部分的几何误差作为系统的原理误差来看待,而重点分析成像部分即像斑的扩展所带给位移量测量的误差。

由图 5 得到

$$\text{tg}\beta = \frac{x \sin\theta}{l + x \cos\theta} \tag{5}$$

$$M' = l' \text{tg}\beta \tag{6}$$

由公式(5),(6)推出

$$\frac{\Delta x}{x} = \sqrt{E_m^2 \left(\frac{dM'}{M'}\right)^2 + E_l^2 \left(\frac{dl}{l}\right)^2 + E_{f_2'}^2 \left(\frac{df_2'}{f_2'}\right) + E_\theta^2 (d\theta)^2} \tag{7}$$

其中

$$E_m = \frac{f_2' l \sin\theta}{f_2' l \sin\theta - M' (l - f_2') \cos\theta}$$

$$E_l = \frac{f_2' l^2 \sin\theta - M' (l - f_2')^2 \cos\theta}{(1 - f_2') [f_2' l \sin\theta - M' (l - f_2') \cos\theta]} \tag{8}$$

$$E_{f_2'} = \frac{l^2 \sin\theta}{[f_2' l \sin\theta - M' (l - f_2') \cos\theta] (l/f_2' - 1)}$$

$$E_\theta = \frac{f_2' l \cos\theta + M' (1 - f_2') \sin\theta}{f_2' l \sin\theta - M' (l - f_2') \cos\theta}$$

4 结 论

利用计算机模拟曲线从理论上并结合实践给出了如下结论:

(1) 减小会聚透镜 lens 1 的通光口径 D , 可以减小像斑扩展。

(2) 减小成像透镜的焦距 f 或者增大入射光轴与成像光轴的夹角 θ 也是减小像斑扩展的方法。

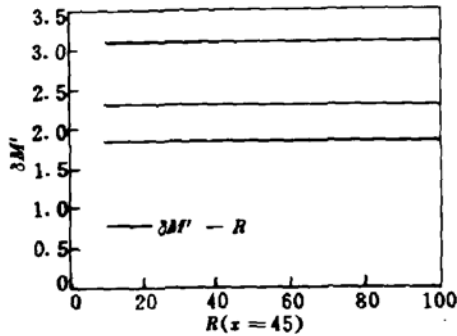


图 7 扩展像斑不受曲率半径的影响

Fig. 7 Image spread hardly changed by the radius

(3) 增加会聚透镜 lens 1 的焦距 f_1 也可以减小扩展像斑, 但这要受到测量头小型化等条件的制约。

(4) 拉大成像的物距 l 也可以减小扩展像斑, 但这一条件要受到测量头小型化的影响同时也要受到探测器件 CCD 的饱和光强等因素的限制。

(5) 在同一位移量 x 不变的情况下, 各参量的影响关系不变, 而且扩展光斑几乎不受曲率半径 R 的变化影响(在 μm 级以下)。因此, 用激光三角法在线测量曲面的分辨率不会由于曲率的变化而受到影响, 见图 7。

参 考 文 献

- 1 庄葆华, 蒋诚志. 激光三角法位移计接收光功率与被测表面倾斜的关系及倾斜角测量. 中国激光, 1995, A23(8): 595~600
- 2 庄葆华, 蒋诚志. 高精度激光三角法位移测量被测表面倾斜影响研究. 计量技术, 1996, (2): 2~4
- 3 W. Stevenson. The use of laser triangulation probes in coordinate measuring machines for part tolerance inspection and reverse engineering. SPIE, 1992, 1821: 406~414
- 4 Fan K., Wen K.. Noncontact measurements of free form surface profiles on CNC machines. SPIE, 1993, 2101: 949

The Influence of Parameters in the Profile Measurement Utilizing a Laser Probe

Hong Xin Jiang Chengzhi Chen Lincai

(Department of Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Zheng Wenxue

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract The image spread brought a large error in the profile measurement utilizing a laser probe. The present paper analyzed the parameters which contributed to the diameter of the image spread, and gave the ways for improvements with the result of the computer simulated curves. In conclusion, the resolution couldn't be changed in the curve profile measurement.

Key words focused beam, triangulation, curve profile measurement, parameter