

激光非接触曲面面形传感器

姜 晶 方志良 刘福来 林 列 母国光
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要 提出一种用于空间自由曲面测量的激光非接触曲面面形传感器。该传感器结构简单, 在光学原理上传感器的输出量与被测量成线性关系, 接收物镜绕系统光轴 360° 接收目标面的漫射光, 目标面的倾斜产生的影响很小, 解决了困扰空间自由曲面测量中阴影效应、倾斜等问题。该传感器的测量范围为 4 mm , 分辨率为 $2\ \mu\text{m}$, 当目标面(漫反射面和金属等镜面反射面)倾斜角为 $\pm 85^\circ$ 时, 仍能保证 $20\ \mu\text{m}$ 的测量精度。

关键词 激光非接触传感器, 面形传感器, 位移测量, 空间自由曲面。

1 引 言

到目前为止, 大多数空间自由曲面都采用接触式测量, 其缺点: 1) 引起测量面的划伤和弹性变形; 2) 测量速度慢, 3) 需要进行测端半径的补偿, 4) 无法进行软性及柔性物体的测量^[1, 2]。

非接触测量技术中, 三角法光学非接触传感器具有工作距离大、精度高、响应快、横向分辨率高的特点, 被广泛用于空间自由曲面的非接触传感, 但是亦存在阴影效应的测量死角、非线性测量面倾斜时, 会产生测量误差等^[3~ 5]。

本文中的传感器无须测端补偿, 实现了位移量的线性测量。接收物镜绕系统光轴 360° 接收目标面的漫反射光, 可以减小被测面倾斜对测量的影响。不仅能适应于已知曲面的金属、土质、木质等材料的模型、模具等空间自由曲面的测量, 而且能用于软质、柔性、金属等材料未知曲面的空间自由曲面模型、模具的实时、高精度跟踪测量以及一般的测量任务。

2 传感器结构和光学原理

传感器的结构如图 1 所示。半导体激光器发出激光束经准直和反射后, 入射到目标面上。接收物镜绕系统光轴 360° 接收目标面的漫反射光, 然后照明环形狭缝, 可以认为环形狭缝是一个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而变化, 且由面阵 CCD 摄像机进行接收, 图像处理, 再经多点最小二乘法即可求出光环大小, 从而求出位移量。由于采用多点最小二乘法, 所以结果的可靠性较高。从图 1 中可看出, 传感器的光学系统只有两只透镜、一个环形狭缝和一个探测器组成。

结构简单, 系统误差源少^[5-10]。

图 2 为本传感器的几何光学原理示意图。传感器光学系统由集光物镜 L_1 (焦距为 f'_1)、物镜 L_1 的像方焦点处放置的环形狭缝 RS 以及狭缝后面任意位置处放置的成像物镜 L_2 (焦距为 f'_2) 组成。激光入射到离集光物镜 L_1 物方焦点为 Z_1 处的目标面上, 目标面的漫反射光经集光物镜 L_1 后, 通过其后的环形狭缝 RS (通光半径为 a 、狭缝宽度为 w)。然后经成像物镜 L_2 后, 在其像方焦平面上形成环形狭缝 RS 的光环像 (半径为 r)。该环形狭缝像由探测器接收, 再经电路转换及运算, 就可将光环半径求出来, 从而就可根据位移和光环像的关系得出位移量, 位移量 Z_1 和光环像半径 r 的关系可根据图 2 推导出来。

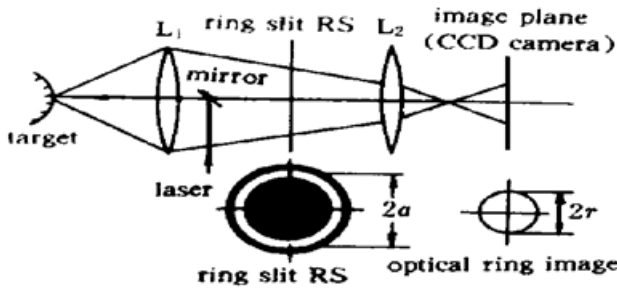


Fig. 1 Configuration of the sensor

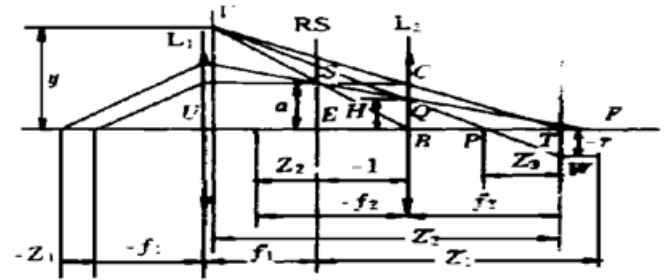


Fig. 2 Geometric principle of the sensor

对第一物镜 L_1 , 使用牛顿公式和 $\Delta SCQ \sim \Delta FES$ 有:

$$h = (af'_2)Z_1 + a \tag{1}$$

再对第二物镜 L_2 , 应用牛顿公式且 $\Delta CRT \sim \Delta VUT$ 、 $\Delta QRP \sim \Delta VUP$ 、 $\Delta QRP \sim \Delta WTP$ 得到:

$$f'_2 a = f'_2 h + rl \tag{2}$$

由(1)式及(2)式得到:

$$r = - (af'_2/f'_1)Z_1 \tag{3}$$

则位移量就为(略去表示方向的负号):

$$Z_1 = f'_1 r / af'_2 \tag{4}$$

从(4)式看出, 位移量 Z_1 与光环像的半径 r 成线性关系, 并可方便地用物镜 L_1 的焦距 f'_1 , 物镜 L_2 的焦距 f'_2 及环形狭缝的半径 a 来表示。 f'_1 、 f'_2 及 a 都是传感器的几何结构有关的固定值, 所以位移量 Z_1 与光环像的半径 r 的线性关系也就确定了。

令 $k = f'_1 r / af'_2$, 即 k 为由 f'_1 、 f'_2 及 a 决定的结构常数, 则(4)式转化为:

$$Z_1 = kr \tag{5}$$

如令 r_{max} 为探测器所能接收到的最大圆环半径, 则传感器所能测量的最大位移量 Z_{max} 为:

$$Z_{max} = kr_{max} \tag{6}$$

对(5)式进行微分, 得到:

$$\Delta Z = k\Delta r \tag{7}$$

这里, Δr 的意义为探测器所能分辨的最小的光环变化即 CCD 像素尺寸, ΔZ 即传感器的分辨率。

3 传感器结构参数和性能实验

根据前面分析, 传感器结构参数为:

激光器的输出功率 P 为 2 mW、波长为 685 nm；物镜 L_1 的焦距 f'_1 为 70 mm 和口径 D_1 为 50 mm；物镜 L_2 的焦距 f'_2 为 70 mm 和口径 D_2 为 50 mm；环形狭缝的半径 a 为 9 mm 及缝宽 w 为 0.1 mm；面阵 CCD 摄像机的面积及像素尺寸为 768×576 , $10.0 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$ ；图像采集卡型号：V512A (512×512)。

根据(5)式和(7)式可得：

测量范围为 5.5 mm，理论分辨率为 $20 \mu\text{m}$ 。

目标物恰好位于系统前焦点时，此时接收到光环图像为点像；正常测量时，光环图像随目标物离焦量的大小而变化；超出测量范围时，将接收不到光环图像。图 3 分别为目标面为漫射面时，倾斜角为 0° 、 70° 、 85° 时的实际光环图像。图 4 分别为目标面为镜面反射面时，倾斜角为 0° 、 70° 、 85° 时的实际光环图像。

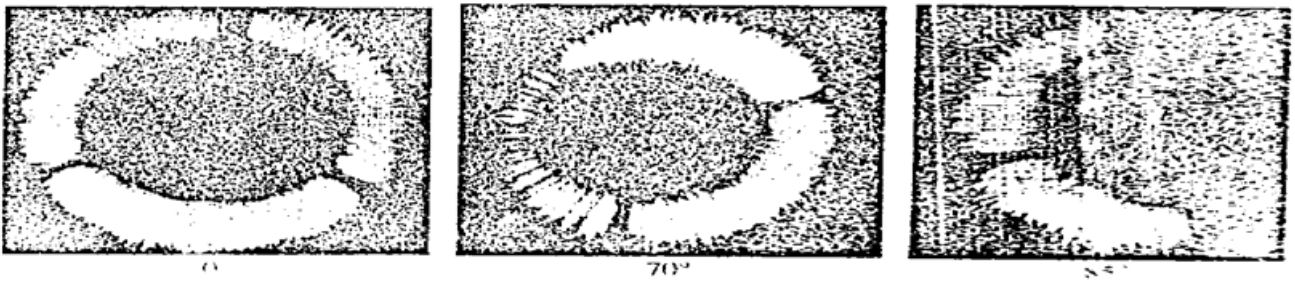


Fig. 3 Optical ring images of the diffusing surface

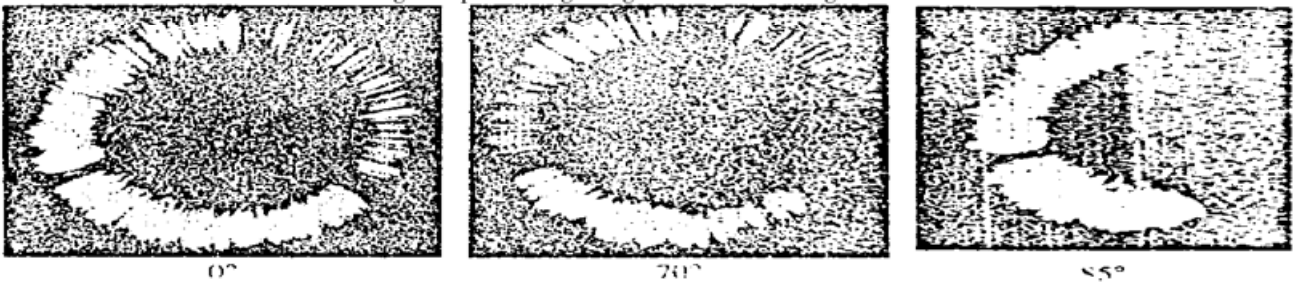


Fig. 4 Optical ring images of the metal surface

消弱或消除目标面倾斜对测量的影响是传感器的重要特性。由于采用绕光轴 360° 全方位接收目标面的漫反射光，所以目标面发生倾斜时，虽然进入光学系统的光的强度发生变化，但该强度如果在接收器的强度感应灵敏度之上就能有效地接收并转换为有用信号(但信噪比低)。从图 3 和图 4 可看出目标面倾斜 85° 时仍然得到半个圆环图像，经过图像处理完全精确地得出圆环半径，从而得到测量值。

1) 测量范围与线性度测试：用精密杠杆台架产生位移，用双频激光干涉仪进行精确标定，得到该传感器的测量范围为 4 mm，线性度曲线见图 5。测量条纹为：漫反射目标面、倾斜角为 0° 、测量间隔为 0.5 mm。从图 5(b) 可以看出最大误差为 $2 \mu\text{m}$ 。

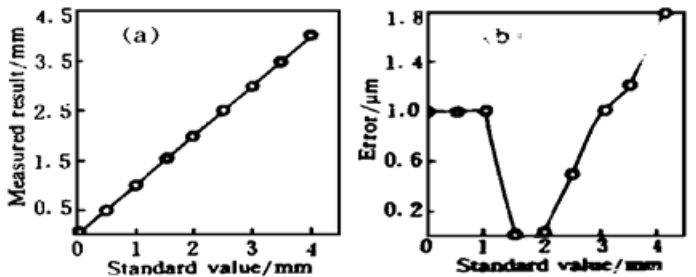


Fig. 5 Curve of linearity

2) 测试传感器抗倾斜能力：实验分为漫反射目标面和金属镜面反射面(表面粗糙度为 $0.4 \mu\text{m}$)，分别测试这两种目标面倾斜时传感器的线性度，用精密转角台改变目标面的倾斜角，测试几种倾斜角度时传感器的输出。图 6 为测量曲线。从测量结果可以看出目标面的倾斜角为 $0^\circ \sim 70^\circ$ 时，测量误差最大为 $5 \mu\text{m}$ ，倾斜角为 85° 时，测量误差增大，测量误差为 $20 \mu\text{m}$ 。

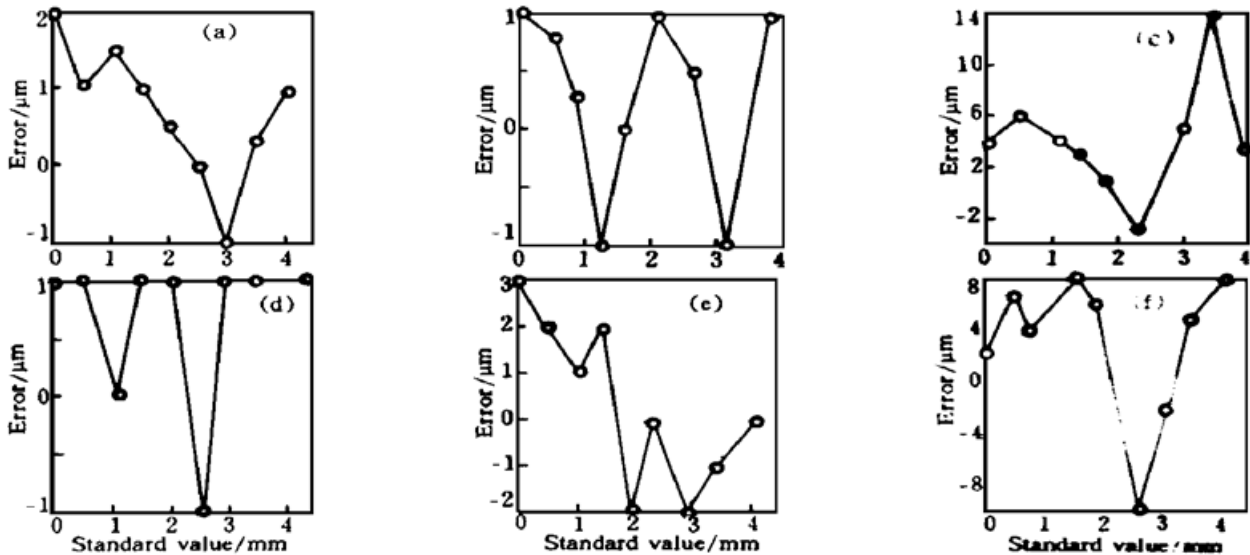


Fig. 6 Curve of target inclination effect. (a) Diffusing surface 0° , (b) Diffusing surface 70° , (c) Diffusing surface 85° , (d) Metal surface 0° , (e) Metal surface 70° , (f) metal surface 85°

3) 空间自由曲面测量实验: 选用表面粗糙度为 $0.4 \mu\text{m}$ 的金属圆柱体代替自由曲面进行测量。首先用三坐标测量机(采用 Renishaw 公司接触式位移传感器 TP2)对圆柱体进行测量, 将测量结果作为标准值, 然后用本传感器再对该圆柱体进行测量, 测量间隔为 1 mm , 测量结果如图 7 所示。当曲面倾斜角为 $\pm 85^\circ$, 误差加大为 $20 \mu\text{m}$ 。

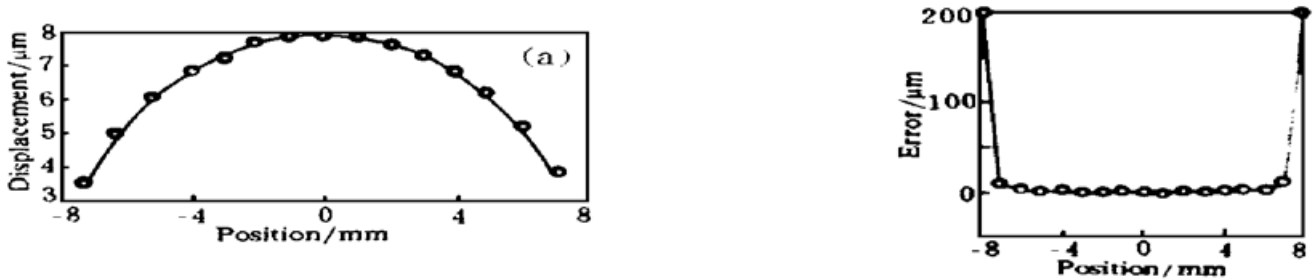


Fig. 7 Contour of metal cylindrical surface and error curve. (a) Regression contour, (b) Error curve

三坐标测量机(Renishaw 公司接触式位移传感器 TP2) 测量结果:

圆柱体回归直径为 15.777 mm , 标准偏差为 $2.3 \mu\text{m}$, 本传感器的测量结果: 圆柱体回归直径为 15.778 mm , 标准偏差为 $4 \mu\text{m}$ 。

结 论 轴向位移线性转换法的采用, 实现了位移量的线性测量。绕系统光轴 360° 接收目标面的漫反射光, 可以减小被测面倾斜给测量结果产生的影响, 当目标面(漫反射面和金属等镜面反射面) 倾斜角为 $\pm 85^\circ$ 时, 仍能保证 $20 \mu\text{m}$ 的测量精度。

参 考 文 献

- [1] K. Yamazaki, K. S. Lee, Noncontact probe continuous measurement of surfaces inclination and position using dynamic irradiation of light beam. *Annals CIRP*, 1993, **42**(1) : 585~ 590
- [2] B. Bidanda, An evaluation of prospective non-contact technologies and application in manufacturing system. *Int. J. Computer Integrated Manufacturing*, 1991, **4**(3) : 145~ 156
- [3] 金田一, 三角测量法によるレーザー式変位計の高精度化. 计测自动制御学会论文集, 1991, **27**(8) : 853 ~ 860

- [4] 三好隆志, 金型用模型の非接触自动形状测定装置の開発. *JSPE*, 1989, **55**(2) : 151~ 157
- [5] 三好隆志, 非接触 3-D デジタル化システムの開発研究. *JSPE*, 1990, **56**(6) : 1021~ 1026
- [6] 三好隆志, 三次元自由曲面の非接触形状センサの開発研究(第一報). *JSPE*, 1992, **58**(11) : 1886~ 1892
- [7] 三好隆志, 三次元自由曲面の非接触形状センサの開発研究(第二報). *JSPE*, 1992, **58**(12) : 2087~ 2092
- [8] T. Miyoshi, Y. Takaya, Optical ring image 3-D profile sensor. *Proc. SPIE*, 1993, **2101** : 1014~ 1024
- [9] 三好隆志, 三次元自由曲面の非接触形状センサの開発研究(第三報). *JSPE*, 1995, **61**(2) : 258~ 262
- [10] B. H. Zhuang, J. Jiang, *et al.*, A laser multisensor system for 3D free form surface non-contact measurement. *Proc. SPIE*, 1996, **2703** : 222~ 229

A Laser Non-Contact Surface Sensor for Measuring 3D Free Form Surfaces

Jiang Jing Fang Zhiliang Liu Fulai Lin Lie Mu Guoguang

(*Institute of Modern Optics of Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 3 August 1997; revised 4 January 1998)

Abstract A laser non-contact surface sensor for measuring 3D free form surface is proposed. This sensor is simple in structure and its output is linearly proportional to the measured displacement in optical principle. Because this sensor can receive the diffused light of the object in 360° direction, the inclination effect is very small. Problems of shadow effect and inclination influence are solved. The measurement range of the sensor is 4 mm, resolution is 2 μm. When object is inclined to ±85°, measurement error is about 20 μm.

Key words laser non-contact sensor, surface sensor, displacement measurement, free form surface.