

基于反射结构的大视野小尺寸激光三角测距传感器

南卓江, 陶卫*

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 为解决狭小安装空间下传感器无法进行横向多点测量的问题, 通过增加反射结构设计一款大视野小尺寸激光三角测距传感器。在激光成像方向增加反射结构, 以光路折返的方式缩小传感器尺寸; 在激光发射方向利用旋转扫描结构实现激光在横向视野多点动态扫描。在光学灵敏度分析的基础上, 从空间几何尺寸和成像质量两个方面建立约束条件, 确定最优光学结构参数。通过 ZEMAX 仿真验证光学结构的合理性, 仿真结果显示成像光斑能量分布均匀且在传感器全量程内 RMS 光斑半径尺寸小于 0.38mm。此外, 在实际场景进行验证测试, 传感器测量精度可达 μm 量级。

关键词: 激光三角测距传感器;反射结构;大视野;多点测量;小型化

Large-field and small-size laser triangulation ranging sensor based on reflection structure

Nan Zhuojiang, Tao Wei*

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: To solve the problem that transverse multi-point measurement cannot be performed by the sensor in a narrow installation space, a laser triangulation sensor with large-field of view and small-size is designed by adding reflection structures. The reflective structure is added in the direction of laser imaging to reduce the size of the sensor in the means of optical path reentry; In the direction of laser emission, a rotating scanning structure is adopted to realize multi-point dynamic scanning of the laser in the transverse field of view. On the basis of optical sensitivity analysis, the constraint conditions are established from two aspects of space geometric size and imaging spot quality to determine the optimal optical structure parameters. The rationality of the optical structure is verified by ZEMAX simulation. The simulation results show that the energy distribution of the imaging spot is uniform and the its RMS radius is less than 0.38mm within the full range of the sensor. In addition, the verification tests are carried out in the actual application scene, and the measurement accuracy can reach the magnitude of micron-meter.

Keywords: Laser triangulation ranging sensor; Reflective structure; Large-field of vision; Multi-point measurement; Miniaturization

1 传感器设计背景和应用价值

激光三角测距传感器因其测量精度高、响应速度快、非接触测量等优势被广泛应用于各类精密微位移测量场景，其相关技术已日趋成熟，但对于特殊场景仍有亟待解决的问题。例如，航空航天飞行器需要控制载荷大小，限制了传感器的尺寸和安装空间。工业生产检测线需要对工件表面进行多点测量以提高检测效率，要求传感器具有更大的工作视野并进行多点测量。

上述应用背景和问题可归结为“狭小空间下的多点测量”：首先，为适应狭小安装空间，对传感器结构小型化提出更加严苛的要求，在减小传感器尺寸的同时应同时确保传感测量精度；其次，为满足大视野多点测量，现有方法采用多测头或单测头扫描的方式，与小尺寸需求矛盾。因此，设计一款可实现大视野多点测量的小尺寸传感器，具有重要的意义和应用前景。

本设计在传统激光三角测距传感器的基础上进行优化改进，在激光发射和激光成像方向分别引入反射结构，在激光成像方向通过“光路折返”的方式减小传感器空间尺寸，而在激光发射方向采用“旋转反射”扫描方式增大传感器的测量视野。传感器采用简单的反射结构，相较于复杂的光学设计更具有优势。简单的结构在实际应用中稳定性更好，光学结构加工、组装更加方便，有利于推广应用。

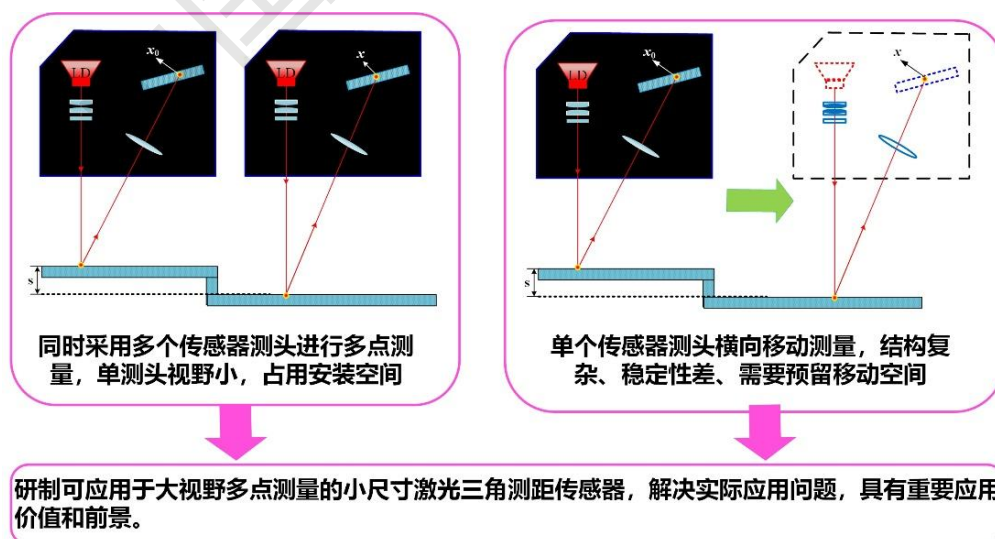


图 1 大视野小尺寸激光三角测距传感器应用场景分析

2 创新点与优势

本设计基于激光三角测距原理，提出一种基于反射结构的测量模型，以推广激光三角测距传感器在狭小空间的应用，存在创新点和优势如下：

- 1) 在激光接收端引入反射结构，最大程度地减小了激光三角测距系统的机械结构尺寸；
- 2) 在激光发射端引入动态反射扫描镜，扩展激光三角测距系统的横向视野，实现多点动态测量；
- 3) 相较于传统激光三角测距及其优化结构，本设计在激光发射端和接收端引入反射结构，对光学结构参数没有严苛的要求，方法简单、成本低、易于实现和推广。

综上，本设计特点可概括为“简”、“小”、“精”：方法简单（便于加工实现）、结构小巧（有望成为业内最小尺寸）、精度高（可达 μm 级）；本设计市场前景优势体现为“易推广”（加工及时间成本低）、“需求大”（针对特殊场景对小尺寸激光位移传感器目前仍为国内紧缺）。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

以直射式激光三角测距传感器为例，说明传统结构的激光三角测量原理。激光二极管（Laser Diode, LD）产生的激光，经准直透镜准直后投射到被测物表面并在被测物表面形成漫反射光束，沿着观测角 α 的方向经聚焦透镜后在成像器件上形成一个像点。当被测物移动，对应像点在成像器件上移动。记录像点位移 Δx ，通过三角几何关系解算得传感器测量得到的位移值 s ：

$$s = \frac{\Delta x \cdot l_o \cdot \sin \beta}{f_p \cdot \sin \alpha - \Delta x \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

其中， β 为成像角， l_o 是物距， f_p 是像距。

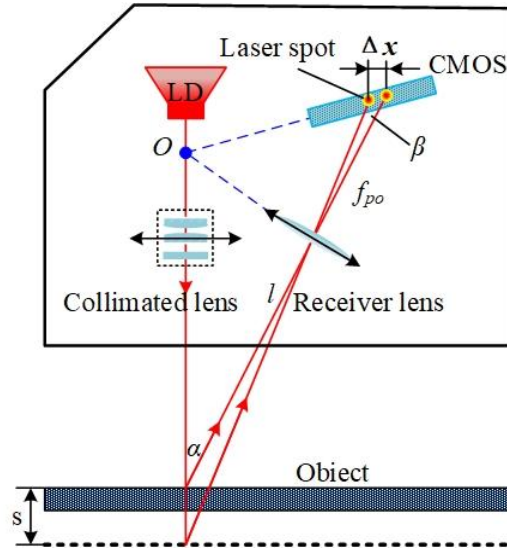


图2 传统结构的激光三角测距传感器原理

基于图2所示传感激光三角测量模型，本设计从两方面对激光三角测距传感器结构进行改造（如图3所示），研制小尺寸激光三角测距传感器，应用于大视野多点测量：

1) 以传统激光三角测距光路为基础，在激光成像端引入反射结构，通过光路折返的方式节约空间。根据反射原理，经反射结构折返后的成像光路应与原光路（不引入反射结构的光路）关于反射结构对称。基于反射单元的对称性，通过几何三角关系计算实际位移；

2) 此外，在激光发射端引入旋转反射结构，控制旋转反射结构在平面内转动，LD发射的激光束经由准直透镜后随着旋转结构的角速度变化在横向测量面进行多点扫描。

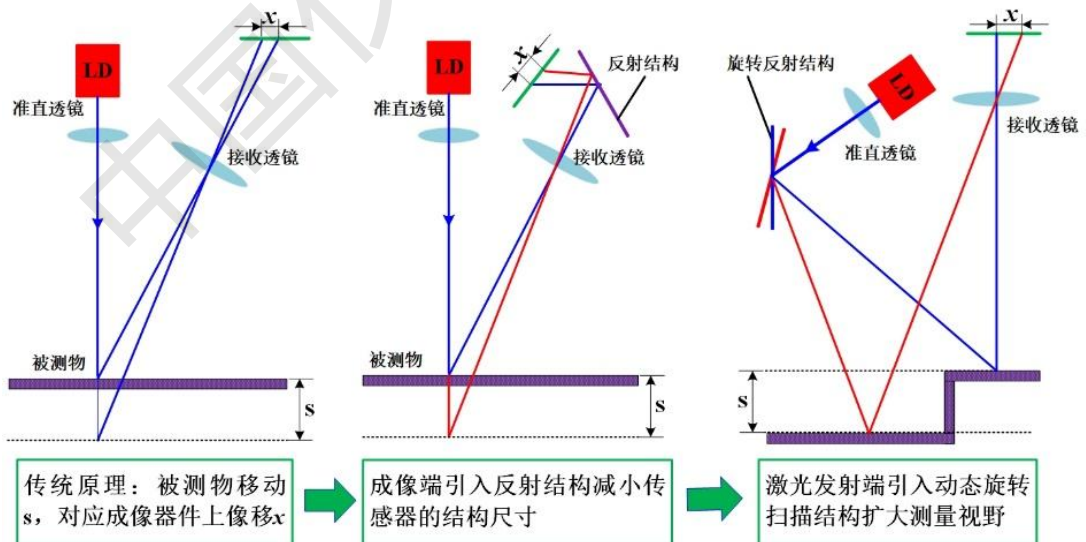


图3 基于反射结构的激光三角测距传感器结构改进原理示意图

3.2 设计方法

根据所述基于反射结构的激光三角测距传感器优化设计原理，对具体设计方法和流程进

一步阐述说明。本设计的前提准则是：以传统激光三角测距传感器结构为基础，通过灵敏度分析获得最优结构参数。设计中所述增加反射结构后的反射光路与传统结构的原光路应相互对称。

3.2.1 光学灵敏度分析

首先，根据原光路系统，我们通过灵敏度分析确定光路初始参数。对公式(1)进行变化有：

$$x = \frac{s \cdot f_p \cdot \sin \alpha}{l_o \cdot \sin \beta + s \cdot \sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

对公式（2）求导，计算得到光学系统灵敏度 δ_x ：

$$\delta_x = \frac{dx}{ds} = \frac{f_p \cdot l_o \cdot \sin \alpha \sin \beta}{[l_o \cdot \sin \beta + s \cdot \sin(\alpha + \beta)]^2} \quad (3)$$

显然，光学系统的灵敏度 δ_x 与量程 s 、观测角 α 、成像角 β 、物距 l_o 和像距 f_p 有关。光学系统灵敏度 δ_x 与观测角 α 、像距 f_p 成正比，与物距 l_o 成反比。在进行激光三角测距传感器的光学系统设计时，可适当增加观测角和像距，同时减小物距，以提高系统灵敏度。此外，观测角 α 、物距 l_o 和像距 f_p 决定了传感器光学系统的总体尺寸，在进行结构紧凑优化工作时应当着重考虑。

3.2.2 反射结构位置约束及确定

通过光学灵敏度分析确定激光三角系统光学结构的原始结构参数，作为优化设计的原光路。从两方面对反射结构位置进行约束：1) 首先，进行几何结构及尺寸约束。在原光路光束传播的主光线方向上，通过建立几何尺寸约束关系确定反射结构的初始位置；2) 其次，通过分析像斑成像质量确定最终的位置参数。遵循“激光发射方向的光斑尺寸应尽量保持恒定”的原则，即以确保激光发射光路的准直性为设计目标。分析零点、极限位置的像斑，设定极限位置像斑尺寸偏差阈值，保证光斑在测量视野内成像质量。

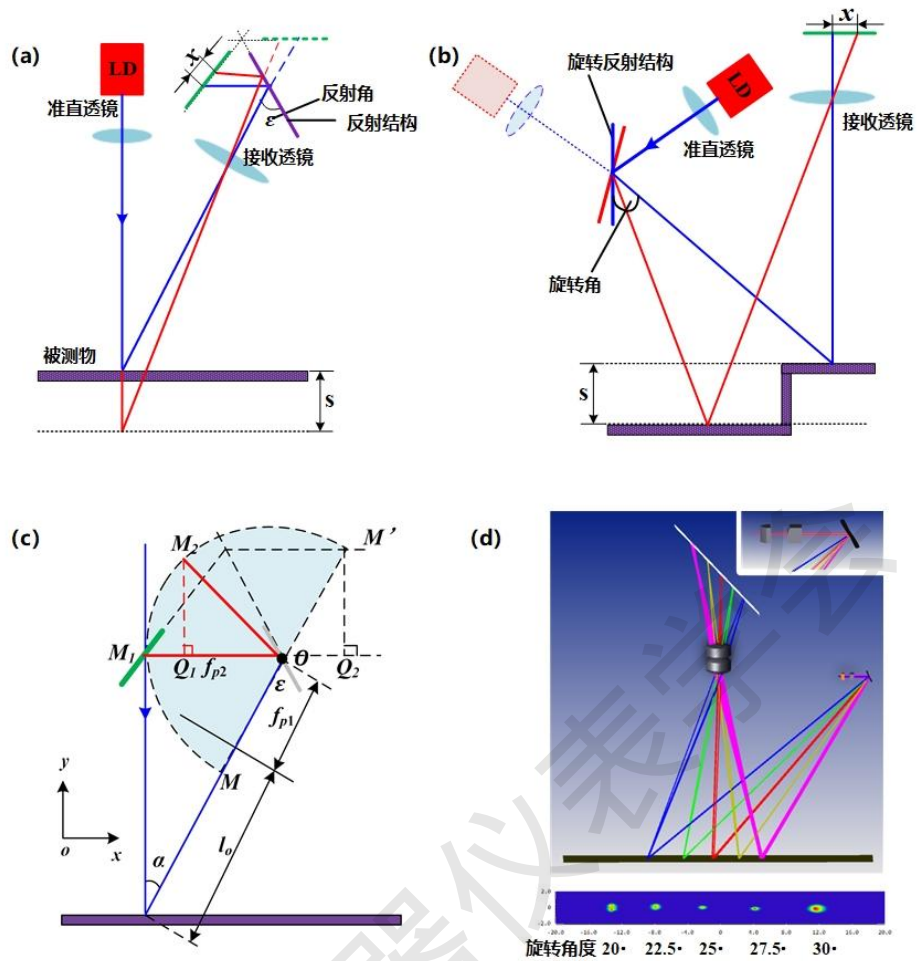


图 4 反射结构位置确定 (a) 在成像端引入反射结构后其成像器件位置关于原光路对称；(b) 在激光发射端增加旋转反射结构后其激光器位置关于原光路对称；(c) 避免机械结构对激光干扰并建立几何约束条件以确认反射结构位置；(d) 分析不同旋转角度下激光在被测物表面的能量分布情况确认最佳旋转角度

3.3 实验验证过程

3.3.1 ZEMAX 光学仿真验证

我们采用 ZEMAX 仿真对本设计的进行评估验证。在 ZEMAX 非序列模式下，针对发射端引入旋转反射扫描结构、成像端引入反射结构分别构建模型。设置多重结构，当测量位置深度和横向位置发生变化时，观察成像器件上光斑的质量，从仿真角度验证方法的合理性和可行性。

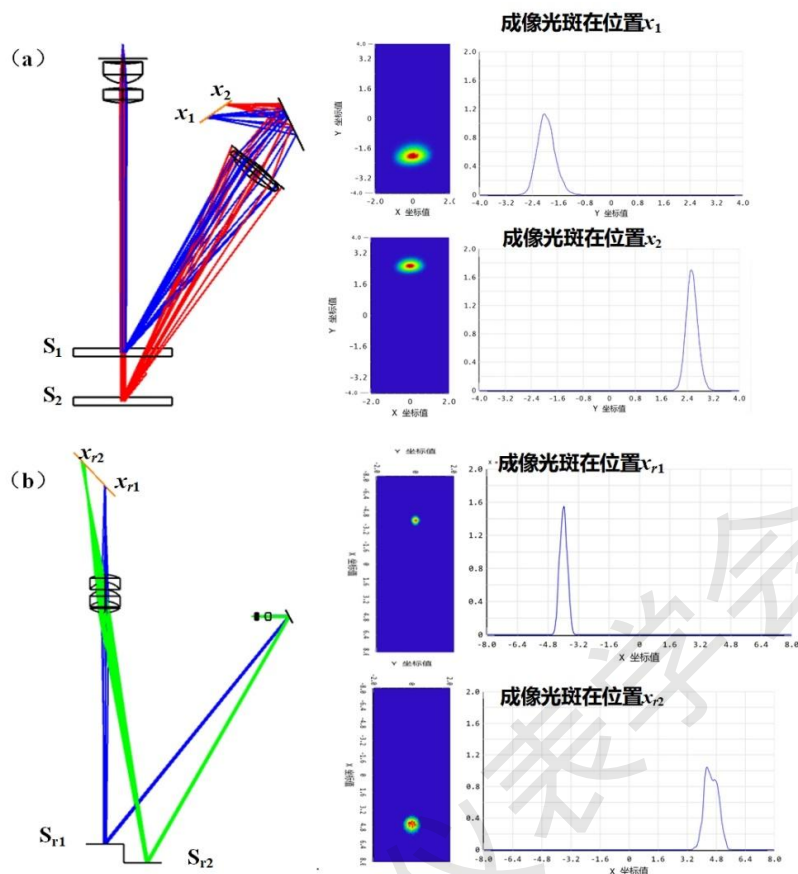


图5 ZEMAX 仿真结果 (a) 成像端增加反射结构的 ZEMAX 光学模型及成像结果； (b) 发射端引入旋转扫描结构的 ZEMAX 光学模型及成像结果。

利用 ZEMAX 软件构建基于反射结构的激光三角测距光学仿真模型，观察成像器件上像斑随着测量点位置变化的偏移并分析成像质量，验证结果如下：

- 1) 成像端增加反射结构，被测物位置由 S_1 移动至 S_2 ，像点位置由 x_1 移动至 x_2 ，成像清晰且能量分布均匀，RMS 光斑半径分别为 0.38mm 和 0.25mm；
- 2) 发射端增加旋转反射结构，被测物位置由 S_{r1} 移动至 S_{r2} ，像点位置由 x_{r1} 移动至 x_{r2} ，光斑能量经滤波后分布较为均匀，RMS 光斑半径分别为 0.21mm 和 0.37mm。

3.3.2 测试验证

我们在实际应用场景进行了测试。如图 6 所示给出了 2 个实际应用场景，分别为机器人三维重复定位测试（图 6 (a)，狭小空间场景）和台阶响应测试（图 6 (b)，横向多点测量场景）。图 6 (a) 中在空间位置 XYZ 方向正交布置激光三角位移传感器，对机器人历经一系列动作后回到零点的重复定位误差进行了测量，测量结果采用球心包络形式呈现，重复定位精度优于 9.5um。图 6 (b) 中对由金属量块和高精度平台构建的台阶进行了阶跃响应测

试，响应速度优于 1ms，重复定位精度优于 1 μ m。更进一步，图 6 (a) 中基于激光三角传感器的机器人重复定位误差测量方法，可推广至航天飞行器姿态测量等更为复杂的应用场景。

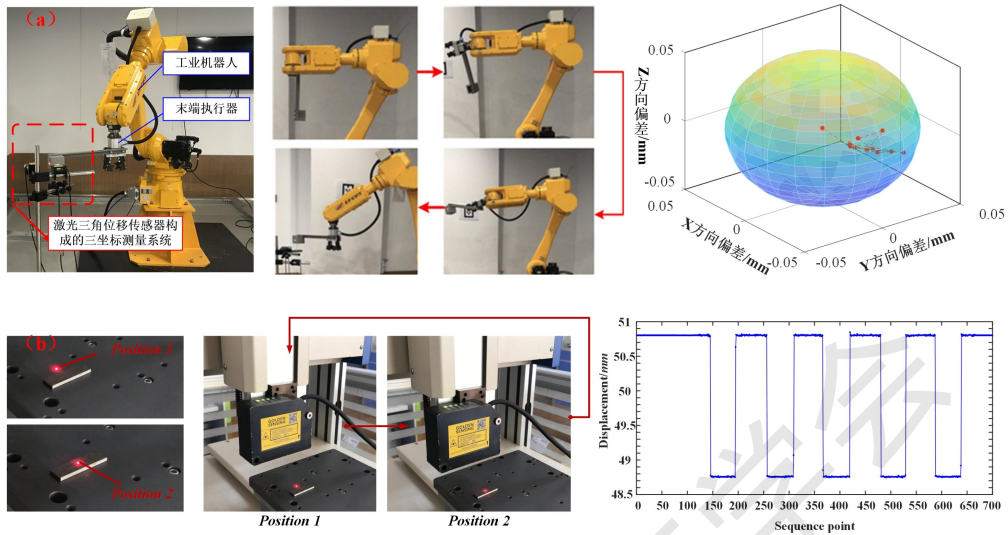


图 6 不同场景的验证测试(a) 机器人重复定位误差测试场景；(b) 台阶响应测试场景

中国仪器仪表