

表面散射光对激光三角法位移测量的影响

高 瞻 吴思进 韩 强 陈士谦 冯其波

(北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要 三角测量法是一种位移测量方法,其测量精度不但受到传感器本身因素如光源、探测器、机械结构特性等因素的影响,还受到被测表面特性如色泽、材料、粗糙度、倾斜度以及外界环境的影响。国内外的一些学者提出了许多提高传感器测量精度的方法,但这些研究都是针对某一特性表面进行的,没有涉及到对不同表面的测量时存在的问题。利用随机行走理论对物体表面的散射场进行了分析,给出了不同粗糙度表面下弱散射光强与散射角及入射角的关系。由于设计制造的传感器量程范围内接收散射光的角度在 15° 至 25° 内变化,因此取 20° 作为散射角角度,理论计算模拟的三种不同粗糙面散射光强变化最大能达到 300% 左右。该结果对于优化激光三角传感器的设计和提高测量精度有一定的意义。

关键词 激光三角法;弱散射;随机行走;测量精度

中图分类号 TH744.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0029

The Influence of Surface Scattered Light to the Measurement of Laser Displacement Sensor Based on Triangulation

Gao Zhan Wu Sijin Han Qiang Chen Shiqian Feng Qibo

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The accuracy of laser displacement measurement based on triangulation is affected not only by optical source, detector and mechanical construction, but also have relation with measured surface features such as luster, material, roughness, inclination and environment. Some researchers have presented some methods to improve the measurement accuracy, which based on the same surface features. In this paper the scattered light field on the measured surface is analyzed with random walk theory. The relations of scattered light intensity and scattered light detected angle on different roughness surface are shown. Because the scattered light detected angle of sensor we made is between the 15° to 25° , the value of scattered light angle is assumed to be 20° , the maximum change of scattered light intensity on three different roughness surface is roughly 300% through the simulation. These model and results are helpful to the optimal design of the laser displacement sensor and improvement of measurement accuracy.

Key words laser triangulation; weak scatter; random walk; measurement precision

1 引 言

三角测量法是一种位移测量方法,它最大的优点是其测量方式属于非接触测量。传统接触法测量在应用中有很多的局限性,既不适于测量由易被擦伤的软质材料构成的高精度表面,也不适于测量易污染的材料,更不适于在某些恶劣环境下进行测量。因此研究非接触式的测量方法无论对于科学研究还是实际生产都是十分重要的。

随着激光器的诞生,新的光电扫描技术的发展,加之微机的控制与数据处理、电子技术的不断进步及 PSD(Position Sensitive Detector), CCD(Charge Coupled Device)等光电探测器件的完善和发展,使这种传统的方法有了很多新的进展和应用。目前以激光三角法作为基础的光电位移检测技术已被广泛的应用于航空航天、生物医疗、物体识别、工业自动检测等领域。

基金项目: 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题资助。

作者简介: 高 瞻(1968—),男,博士,副教授,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: zhangao@bjtu.edu.cn

随着工业生产的发展,激光位移传感器将向着高速度、高精度、多功能、小尺寸的方向发展,它将在机器视觉、自动加工、工业在线检测、产品质量控制、实物仿形、生物医学等领域具有重要意义和广阔的应用前景^[1]。

国内外基于三角法激光位移传感器的研究在理论上已经日趋成熟和系统。在分析影响传感器测量精度的因素和提高激光位移传感器的适用范围,减少环境、被测表面特性等因素对传感器测量的影响的理论研究中,很多科研成果已经发表^[2~5]。由于半导体激光器、光学系统及光电探测器尤其是 CCD 器件在技术性能上的高速发展与突破,为激光位移传感器不断提供新的发展空间与前景。二十世纪末开始就有很多国外学者在光源、表面特性、光学成像、CCD 信号处理等方面做了相关探索和研究,提出了很多可行性方案,如 Murakami, Fumio, Clark, J 及 Kim, Kyung-Chan 等。目前国内在此领域的研究发展也很迅速,天津大学的黄战华教授等研究了光学系统成像、环境温度折射率、光斑形状、CCD 传感器和处理电路等传感器误差产生原因并提出了相应的消除方法;哈尔滨工业大学湛芸等在 CCD 软件算法和信号处理方法上提出了提高传感器测量精度的方法^[6,7]。但这些研究都是针对某一特性表面进行的,没有涉及到对不同表面的测量时存在的问题。而现在随着应用领域的扩大,在不同特性表面保证传感器测量精度是十分必要的。通过研究几家国外权威公司的产品发展趋势我们可以看出,高精度、高速度和不受表面材质、色彩影响等技术特点是目前这个领域研究的热点和重点。

2 三角法测量的基本原理

三角法测量的基本原理是几何光学物象关系^[8]。由于系统光路中入射光与散射光(反射光)形成三角形,而称此种测量方法为三角法。如图 1 和图 2 所示,探测光入射到被测物表面,散射光或反射光经光学系统后成像于探测器,由于被测表面位移改变引起探测器接收到的像位置改变,从而在被测物位移与探测器像移间建立了一种一一对应关系以实现测量。按照入射光与被测表面法线关系,三角法分为直射式和斜射式。光路如图 1 和图 2 所示:激光器发出激光,经光学系统后聚焦于被测物表面,散射光经光学系统后成像于光学探测器 CCD。当被测表面位置变化时,根据 CCD 上成像位置的变化,就可以计算出物体的位移。

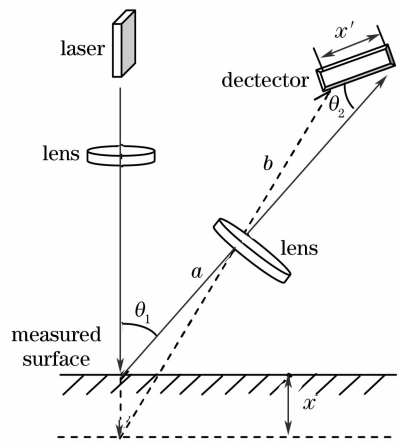


图 1 直射式光路图

Fig. 1 Triangulation layout with incident light is perpendicular to the surface

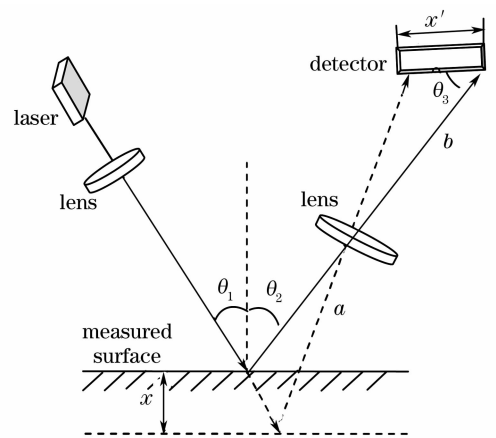


图 2 斜射式光路图

Fig. 2 Triangulation layout with incident light has an angle with the normal of the surface

3 表面散射光强变化的分析

在三角法测量中测量精度不但受到传感器本身因素如光源、探测器、机械结构特性等因素的影响,还受到被测表面特性如色泽、材料、粗糙度、倾斜度以及外界环境的影响^[9]。本文着重讨论表面散射光对测量的影响。

由于物体表面的粗糙度及光泽引起物体表面对光的反射和吸收程度不同,使成像光斑存在像差。如果探测器接收光强过饱和和过弱都会给测量带来较大误差,粗糙度过大,甚至会出现局部丢光的现象。

为了从理论上分析表面粗糙度与散射光强的关系,本文选择了一种较成熟的数学模型即随机行走法对弱散射表面模型进行模拟^[10],通过对不同粗糙度表面进行数学模拟,理论计算得出不同的入射角

度对不同粗糙度表面的弱散射特性。

当入射光为激光时,尽管此时入射光场是规则的,但界面的几何形状微观上则呈无规则起伏,因此反射的光场也将呈无规则起伏,这就需要用统计的方法来进行处理,其基本方法就是概率论中的“随机行走”。设有三个波场,分别是 $a_1 e^{j\varphi_1}$, $a_2 e^{j\varphi_2}$, $a_3 e^{j\varphi_3}$,如果要求这三个波场之和,可以假设一个人从原点出发,走出三步到达终点。第 i 步的步长为 a_i, φ_i 。如果 a_i, φ_i 中有一个以上的随机变量,则就是随机行走问题。

粗糙表面可以分为强散射和弱散射表面。如果粗糙表面的随机高度 h 的标准偏差 σ_h 比波场 λ 大若干倍,则认为是强散射表面;若 σ_h 比波场 λ 还小,则认为是弱散射表面。强散射表面取一系列采样点时,光强具有如下的概率密度,

$$P_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{I}} \exp(-\frac{I}{\bar{I}}), & I \geq 0 \\ 0, & I < 0 \end{cases}$$

式中 \bar{I} 为散斑强度的概率平均值。它表明接收器上可能接受到任何数值的光强,但弱光出现的机会很多。由于我们主要关心的是不同的入射角、粗糙度表面和散射光强的关系,因此主要讨论弱散射表面。经过分析可以得出以下结论:

入射波经弱漫射表面反射后生成的场等于反射场和散射场之和。设入射点的光强为 $I_0(x, y)$, 则反射光的光强^[10]为

$$I_r(x, y) = I_0(x, y) \exp(-\sigma_\varphi^2), \quad (1)$$

式中 $\sigma_\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \sigma_h (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)$, α_1 和 α_2 分别是入射角和散射角。

而散射光强则^[10]为

$$I_s(x, y) = I_q(x, y) \exp(-\sigma_\varphi^2), \quad (2)$$

式中 $I_q(x, y)$ 是强漫射表面的散斑光强分布。在强散射中,无论在反射方向还是其余考察方向,散斑图的统计性质是一样的,即散斑的平均强度和尺寸皆相同。对于我们设计的传感器,测量对象为光滑金属表面,测量范围也较小,如果假设在此范围内 $I_q(x, y)$ 变化不大,则可以得到散射光强和入射角、散射角之间的关系。如图 3 所示,横坐标是表面粗糙度和检测波长之比,纵轴是散射光的归一化强度。设入射角为零度, I 线、II 线和 III 线分别是散射角为 $60^\circ, 30^\circ, 0^\circ$ 时的情况,可见,粗糙度越大,散射光强越大;且随着散射角的变小,散射光的强度也相应变大。图 4 的横坐标是散射角,纵坐标是散射光归一化强

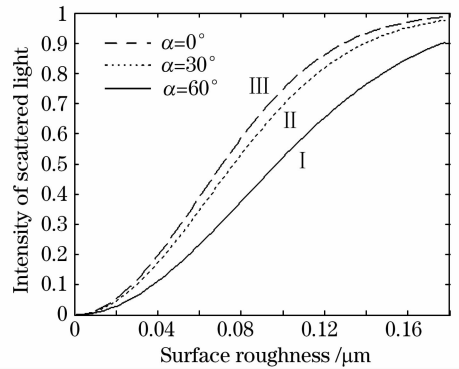


图 3 散射光强和不同入射角的关系
Fig. 3 Scattered light intensity changed with different incidence angles

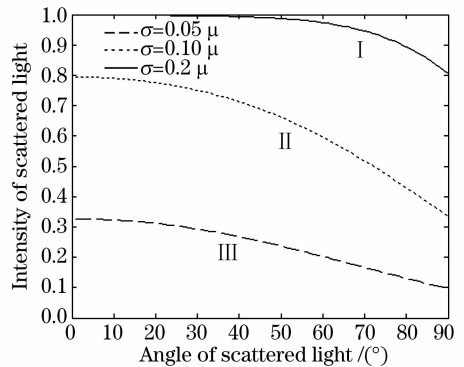


图 4 不同粗糙度表面散射光强与散射角关系
Fig. 4 Scattered light intensity changed with different roughness surfaces

度。I、II、III 三线分别对应的表面粗糙度为 0.2μ , 0.1μ 和 0.05μ 。它们分别代表着不同粗糙度表面散射光强特性与散射角度之间的关系,对于同一表面随着散射角度的增大,散射光强变弱。对于同一散射角度,不同粗糙度表面散射光强也不同。在激光位移传感器设计中由于接收透镜位置固定,所以接收光的散射角度是确定的。由于测量要求与传感器外型尺寸的关系,我们设计的激光位移传感器在量程范围内接收散射光角度在 15° 至 25° 内变化。在 20° 的固定角度,由图 4 可知三种不同的粗糙表面散射光强变化最大能达到 300% 左右。在我们的激光位移传感器中,确定光斑位置时由于中心法存在动态范围较小的缺点,因而采用域值法,即以探测到的光斑强度达到所设定的域值时的时间来确定光斑的位置。在这种工作模式下,由于测量的量程范围内不同位置接收光的散射角会发生变化,进而会引起光强的变化。假设如图 5 所示,光斑的强度提高 1 倍,则测量的时间由原先的 t_1 变为 t_2 ,时间测量误差为 $t_2 - t_1$,空间测量误差则对应半个光斑大小。

同样,测量不同粗糙度表面时也会出现这种测量误差,甚至数据超界或者信号过弱不能测量。因此从随机行走理论得到的这个分析结果对于接受信号域值的设定和整个系统设计,特别是光学系统参数的确定有着一定的指导作用。

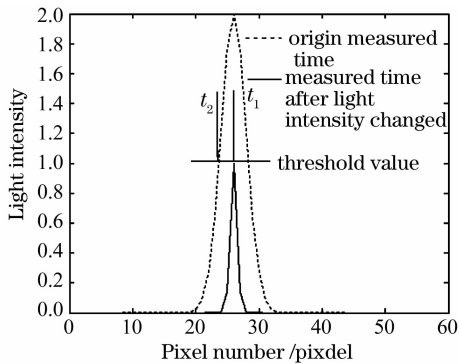


图 5 光强变化对测量的影响

Fig. 5 Influence on measurement due to variation of light intensity

4 结 论

本文利用随机行走法讨论了在弱散射情况下散射光强随不同粗糙度表面、不同散射角变化的情况。模拟计算表明,在散射角为 20° 时,对应于不同的粗糙度表面,探测器接收到的弱散射光的信号强度变化范围可以达到 300%。而稳定测量时由于被测表面特性和角度引起的 CCD 接收光强变化,是提高传感器测量精度与适用范围的重要因素之一,因此本文的结论对于激光三角法传感器的优化设计和提高测量精度有一定的意义。

参 考 文 献

- 1 Wang Xiaojia, Gao Jun, Wang lei. Survey on the triangulation [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2004, **25**(S2): 601~607
王晓嘉,高 隽,王 磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, **25**(S2): 601~607
- 2 K. Kyung-Chan, O. Se-Baek, K. Jong-Ahn *et al.*. Compensation of Surface Inclination for Detecting in Optical Triangulation Sensors [C]. Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000, v 3, 1292~1296
- 3 SultanK-Salen. Validity of the kirchhoff approximation for electromagnetic wave scattering from fractal surfaces [J]. *IEEE*, 2004, **42**(9): 1860~1870
- 4 Fernado Perez-Quintan. Angular distribution of the mean scattered intensity applied to cylindrical rough surface characterization[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(11): 2747~2752
- 5 J. Clark, E. Trucco, H. F. Cheung. Improving Laser Triangulation Sensors using Polarization[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 1995. 981~986
- 6 Huang Zhanhua, Cai Huaiyu, Li Heqiao *et al.*. Analysis for error in triangular laser measurement system and an elimination method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(3): 58~61
黄战华,蔡怀宇,李贺桥 等. 三角法激光测量系统的误差分析及消除方法[J]. 光电工程, 2002, **29**(3): 58~61
- 7 Chen Yun. Research of Laser Triangulation Measurement System [D]. Harbin Institute of Technology. 2004, 6
湛 芸. 激光三角法测量系统的研究[D], 哈尔滨工业大学硕士学位论文, 2004, 6
- 8 P. K. Rastogi. Optical Measurement Techniques and Applications [M]. Artech House, Inc. Boston · London, 1997. 17
- 9 V. Lombardo, T. Marzulli, C. Pappalettere *et al.*. A time-of-scan laser triangulation technique for distance measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2003, **39**(2): 247~254
- 10 Cheng Lu. Principle and Development of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1990. 334~335
程 路. 光学原理及发展[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 334~335