

激光三角法位移测量中光强度的模糊自适应控制

褚俊¹, 李顶根¹, 罗锋², 刘明勇²

(1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 在激光三角法位移测量系统中, 激光的强弱、被测表面颜色、粗糙度等对测量精度有着显著的影响。提出了新的光强度模糊自适应控制方法, 智能控制激光功率、光积分时间以及 CCD 放大增益来调节系统光强度, 达到最合适光强度; 在被测表面形态变化的情况下能够实现光强度自适应控制, 提高位移测量的精度; 计算机仿真将不同的系统光强度调节到预设值 3200, 验证了控制策略的可行性。并经实验表明, 通过控制上述三种要素, CCD 接收到的信号强度能够调节到预期范围, 而且测量小位移时精度提高了 5%。

关键词: 激光三角法; 位移测量; 模糊控制; 光强度

中图分类号: TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1458-05

Fuzzy adaptive control of light intensity in laser triangulation displacement measurement

Chu Jun¹, Li Dinggen¹, Luo Feng², Liu Mingyong²

(1. Energy and Power Engineering Institute, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Meanyang 621900, China)

Abstract: In laser triangulation displacement measurement system, the light intensity of laser, the color and roughness of measured surface significantly affect on the measurement accuracy. A new method of fuzzy adaptive controller for light intensity was proposed in this paper, which adjusted the light intensity to the best light intensity through intelligent controlling of the laser power, integral time and CCD amplification gain. This controlling method can control the light intensity to adapt to the variety of measured surface and improve the measurement accuracy at the same time. And several kinds of different light intensity were adjusted to the setting value 3200 through the computer simulation, which proved the feasibility of control strategy. Then the experiments show that the signal strength that received by CCD can be adjusted to the expected range through controlling the above three factors and the measuring precision is increased by five percent when the small displacement is measured.

Key words: laser triangulation; displacement measurement; fuzzy control; light intensity

收稿日期: 2012-10-12; 修订日期: 2012-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(11076013)

作者简介: 李顶根(1977-), 男, 副教授, 博士, 主要从事动态测试、发动机电控方面的研究。Email: lidinggen@hust.edu.cn

0 引言

激光三角法是工程中常用的一种测量方法^[1-2],分为斜射法和直射法两种,其共同优点是分辨率高、工作距离大,并可进行非接触式在线测量。斜射法主要接收正反射光,用于测量表面粗糙度接近镜面的物体,且测量精度较高,但传感器装置较大,难以应用于高速测量。而直射法接收散射及漫反射光,用于表面粗糙度不太大的被测物,直射式的传感器在结构上也易做到小而紧凑,因而受到人们重视,更多的应用于工程中。在实际测量中,人们发现被测表面的物理特性对激光三角法测量的精度有很大影响,参考文献[3-4]研究表明被测表面颜色、粗糙度和倾斜度的变化大大降低了测量精度,相应的误差影响可能使得测量结果变得毫无意义,调节系统光强使其自动适应不同的被测表面变得极其重要。然而光强的反射率与物体表面特征的关系用数学方程表达变得非常复杂,因此一般的激光器忽略了对系统光强度的控制,测量精度较低。为此文中提出了一种系统光强度模糊自适应控制方法,自动适应被测表面的变化,得到最佳接收信号,提高整个测量系统的精度。

1 激光三角法位移测量系统

激光位移传感器测量原理如图 1 所示。采用直入射法^[5]进行测量,激光器发射的激光光束经过会

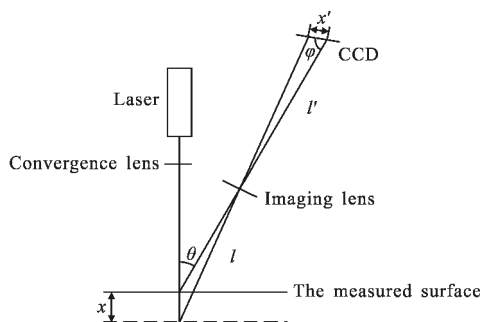


图 1 激光位移传感器测量原理图

Fig.1 Principle of laser triangulation displacement measurement

聚透镜垂直入射在被测物体表面,物体移动或表面变化导致入射点沿入射光轴移动。CCD 接收到经过透镜的入射光点的散射光并成像。若光点在 CCD 上移动的距离为 x' ,则被测物的位移 x 可以表示为:

$$x = \frac{x' L \sin \varphi}{L' \sin \theta - x' \sin(\theta + \varphi)} \quad (1)$$

式中: L 为物体到成像透镜的距离; L' 为成像透镜到 CCD 接收面的距离; θ 为入射光与透镜光轴的夹角; φ 为 CCD 接受面与透镜光轴的夹角。

为了适应不同被测表面,系统采用功率可调激光器(型号 DI650-1-3)作为光源,其输出功率为 1 mW,因此激光功率的调节范围为 0~1 mW。采用的光信号接收器为 TCD1501D 线阵 CCD,其最大驱动频率为 6 MHz,最小驱动频率为 1 MHz,当驱动芯片的计数器值计到 4 570 时,产生满信号,采样周期(1/驱动频率)乘以计数器值即为光积分时间,因而电路的光积分时间为 0.77~4.57 ms。当 CCD 接收到的信号太弱时,需要进行信号放大,在电路设计中采用 20 k Ω 数字电位计进行放大倍率的调节,前置电阻为 1 k Ω ,因此调节 CCD 放大增益的调节范围为 1~20 倍。

将 CCD 接收到的光信号数据读取到 DSP,并转化为数字信号,其范围是 0~4 098,加入阈值比较器模块,当信号强度高于或者低于某个数值时,通过模糊控制器重新确定驱动激光功率大小、光积分时间以及 CCD 放大增益,并由 DSP 控制这三个变量的输出。

2 光强度的控制流程

在光强度模糊自适应控制系统中,对激光功率、光积分时间和 CCD 放大增益的控制流程如图 2 所示。根据激光三角法位移测定经验,激光光斑强度越

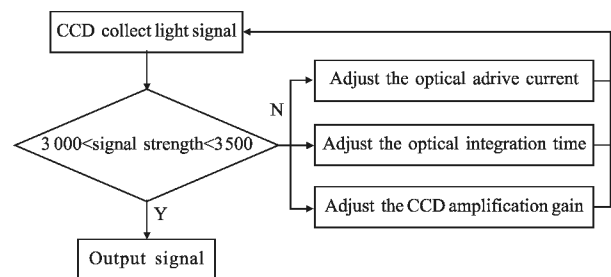


图 2 光强度控制流程图

Fig.2 Flow chart of light intensity control

大,系统的测量精度越高。文中光信号转化为数字信号范围是 0~4 098,为了避免 CCD 过于接近饱和,同时达到一定的测量精度,并根据后面的实验经验,选择阈值范围为 3 000~3 500。将 CCD 采集到的信号强度与阈值进行比较,如果信号强度在阈值范围内,则

直接输出信号。如果信号强度在阈值范围外,则调节上述三种要素。由于激光功率的调节最为方便,优先调节激光功率,继而调节 CCD 光积分时间和 CCD 放大增益。

3 模糊控制器的设计

3.1 模糊控制器的结构

模糊控制器的基本原理图如图 3 所示。在控制器中,以 CCD 接收到的光信号强度偏差 E 及偏差的变化 EC 为输入量,激光器的输出功率 U_1 、光积分时间 U_2 、CCD 放大增益 U_3 为输出量。构成两输入三输出的模糊控制器。

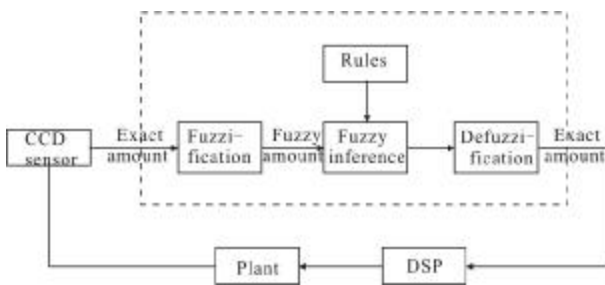


图 3 模糊控制器的基本原理框图
Fig.3 Basic principles of fuzzy controller

3.2 确定输入输出论域

在工程位移测量中,将 CCD 接收到光强度的最佳值设定为 3200,则光强度偏差 E 为 $(-3200, 898)$,将其离散为 13 个等级,因此 E 的基本论域为 $X_1=[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ 。偏差语言变量为 7 个,即[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]。量化因子 $k_1=6/2049$ 。对于实际获得的信号强度 E 对应为量化论域 X_1 上的元素,可由公式 $X=INT(k_1E+3.37)$ 转化。

将光强度偏差的变化率 EC 的变化范围设定为 $(-500, 500)$,并将其离散为 11 个等级,因此 EC 的论域为 $X_2=[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]$ 。偏差语言为 5 个,即[NB, NS, Z, PS, PB]。量化因子 $k_2=5/500=0.01$ 。

激光功率的调节范围是 0~1 mW,其预设值为 0.5 mW,则 U_1 的变化范围是 $(-0.5, 0.5)$ 。CCD 光积分时间调节范围是 0.77~4.57 ms,其预设值为 1.3 ms,则 U_2 的变化范围是 $(-0.53, 3.27)$ 。CCD 放大增益的调节范围是 1~20 倍,其预设值为 10 倍,则 U_3 的变化范围是 $(-10, 10)$ 。文中将它们均离散为 11 个等级, $Y_1=Y_2=Y_3=[-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5]$ 。

偏差语言变量为均为 7 个,即[NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB]。量化因子分别为 $k_3=0.5/5=0.1, k_4=1.9/5=0.38, k_5=10/5=2$ 。则经过模糊推理和模糊决策后,得到模糊输出量,再乘上比例因子,就可以得到激光功率、光积分时间以及 CCD 放大增益的精确量。

3.3 确定隶属度函数

常规的隶属函数有三角形,正态型,梯形等。三角形隶属函数具有分辨率高和灵敏度强的特点,且计算简单,因而采用三角形隶属函数。输入隶属度函数如图 4~5 所示,输出量采用同一隶属函数,如图 6 所示。

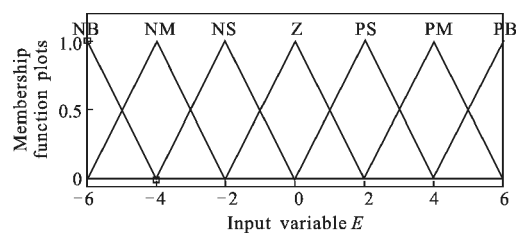


图 4 光强度 E 隶属函数

Fig.4 Membership function of light intensity E

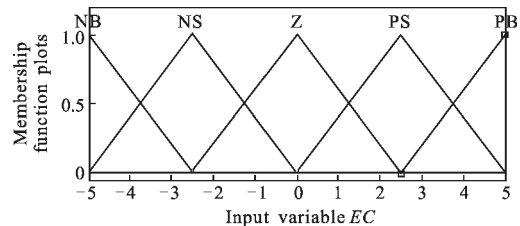


图 5 光强度变化率 EC 隶属函数

Fig.5 Membership function of lighth intensity rate EC

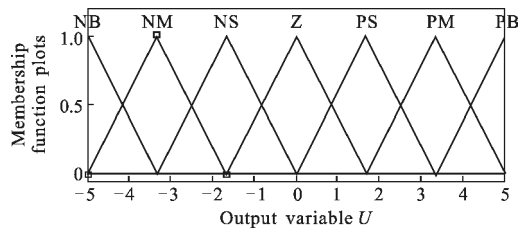


图 6 输出量 U_1, U_2, U_3 隶属函数

Fig.6 Membership function of output U_1, U_2, U_3

3.4 模糊控制规则设计

根据激光位移传感器用于工程测量的经验^[6],如果 CCD 接收到的光信号强度过弱,则增大激光功率和 CCD 放大增益,并且延长光积分时间。如果 CCD 接收到的光信号太强,则降低激光功率。对三者的控制采用同一个模糊控制表,如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

Tab.1 Fuzzy control rules table

EC	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PB	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
NS	PB	PM	PM	PS	Z	NS	NS
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z

$$\mu_C = \frac{\int_Y \bar{U}(u) u du}{\int_Y \bar{U}(u) du} \quad (2)$$

式中： \bar{U} 是某一变量 u 在论域 Y 上的模糊集合，得到去模糊化后的输出量，再乘以比例因子 $k_i(i=3, 4, 5)$ ，最终得到最佳的激光功率、光积分时间以及 CCD 放大增益。

3.5 输出去模糊化

查询模糊控制表得到输出值，将此值进行去模糊化，变成实际系统中所需要的参数。在系统中应用重心法去模糊化，该方法能够保证系统的线性和稳定性。重心法去模糊化的公式如下所示。

4 仿真

为了验证系统光强度模糊自适应控制的可行性，在 Matlab 中构造模糊控制器进行仿真，如图 7 所示。测定光强度 E 能否调节到阈值范围内。仿真得到的结果如图 8 所示。

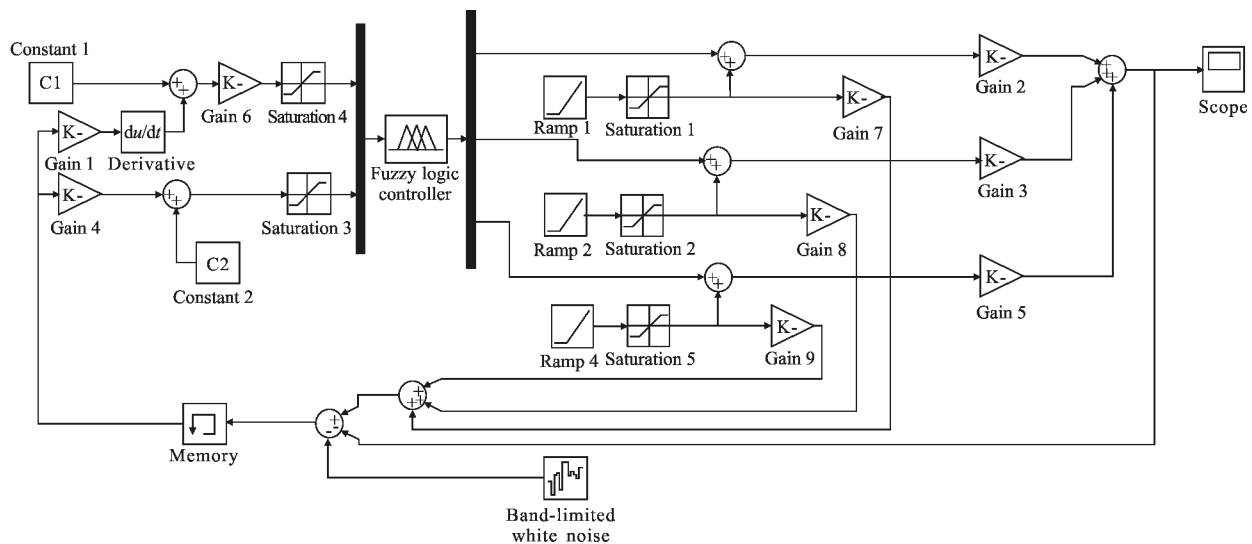


图 7 光强度模糊自适应控制系统仿真图

Fig.7 Simulation of light intensity fuzzy adaptive control system

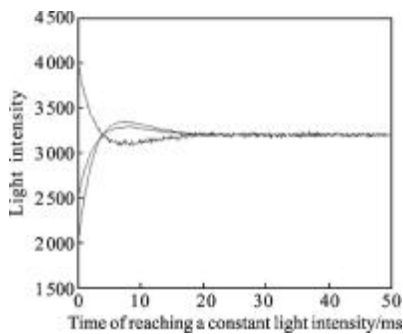


图 8 光强度控制图

Fig.8 Light intensity control chart

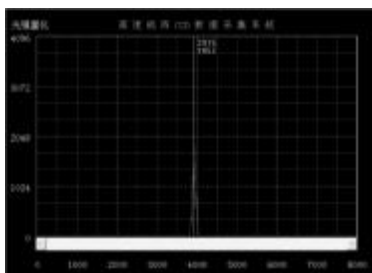
从仿真结果可以看出，将光强度设定为 2 000、

2 500 时，此时的光强度较弱，采用模糊自适应控制可以将光强度调节到 3 200 附近，处于阈值范围内。将其设定为 4 000，光强度接近饱和状态，仍然能够调节到阈值范围内。并且此方法具有较好的稳定性，而且响应时间仅为几十毫秒，控制效果显著。

5 实验

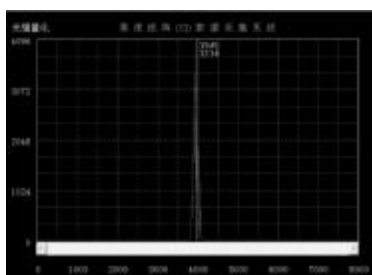
实验中 DSP 自动调节系统光强度并进行位移测量。将入射光强度、光积分时间和 CCD 放大增益调整到预设值，即激光功率为 0.5 mW，光积分时间为 1.3 ms，CCD 放大增益为 10 倍，采集经物面反射

后聚焦的光信号。再通过 DSP 自动调节光信号强度使之达到阈值范围,并采集调节后的光信号。将两次采集的信号进行比较,如图 9 所示。调节后的光信号的峰值较大,处于阈值范围 3 000~3 500 以内,对于光斑位置的定位将更加精确。



(a) 调节前的信号图

(a) Signal before adjustment



(b) 调节后的信号图

(b) Signal after adjustment

图 9 采集的光能量波形图

Fig.9 Oscillogram of light signal

在预设值情况下进行位移测量,选择黑色纸张作为被测物,黑色物体吸收光能,接收到的信号通常较弱,对其进行调节能够很好的反映出控制效果。采集光强度调节前后的数字信号,并运用重心法进行数据处理^[7],得到位移误差曲线如图 10 所示。通过曲线可以看出在小位移情况下调节系统光强度能够提高测量精度,保证系统的稳定性。

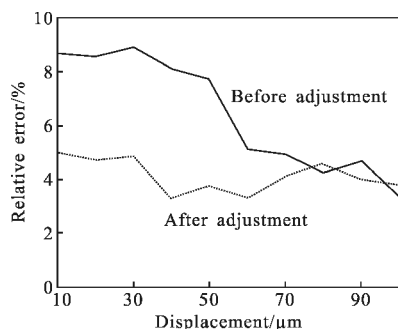


图 10 位移测量误差曲线

Fig.10 Displacement error curves

6 结论

提出的光强度自适应模糊控制系统能够对激光功率、光积分时间、CCD 放大增益进行智能调节,通过仿真验证了此方法的可行性。并且实验表明在被测表面变化的情况下能够保证系统光强度的稳定性,将测量精度控制在 5% 以内,因此光强度的自适应控制在位移测量系统中具有重要意义。当然,实现整个位移测量的高精度,还涉及到光路参数及后续处理等多个环节,必须系统解决好问题,以最终提高测量精度。

参考文献:

- [1] Xing Jichuan, Luo Xiaohong. Measurement of truck carriage volume with laser triangulation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3083-3087. (in Chinese)
邢冀川, 罗小红. 利用三角法测量火车车厢体积 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3083-3087.
- [2] Fang Jiancheng, Zhao Jianhui, Zhou Rui, et al. Planeness measuring system of solarpanel substrate by optical triangulation method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(2): 113-117. (in Chinese)
房建成, 赵建辉, 周锐. 基于光学三角法的太阳帆板平面度测量系统 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(2): 113-117.
- [3] Wu Jianfeng, Wang Wen, Chen Zichen. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2003, 20(5): 89-91. (in Chinese)
吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究 [J]. 机电工程, 2003, 20(5): 89-91.
- [4] Chang Cheng, Zhang Zhifeng. Study on the error in triangular laser measurement [J]. China Science and Technology Information, 2006(23). (in Chinese)
- [5] Feng Juyan, Feng Qibo, Kuang Cuifang. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 31-33. (in Chinese)
- [6] Liu Libo, Zhao Hui, Zhang Haibo, et al. Adaptive control method for light intensity in laser triangulation system [J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(5): 24-27. (in Chinese)
- [7] Guo Xiaosong, Tang Shengjin. Study on optimal nonlinear weighting coefficient of barycenter algorithm [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(1): 109-111. (in Chinese)