

文章编号: 1001-3806(2010)05-0628-04

## 激光三角测量中图像传感器参量自适应控制

周盈, 赵辉\*, 陶卫, 张海波

(上海交通大学 信息检测技术及仪器系, 上海 200240)

**摘要:** 在激光三角位移测量中,为了减少由被测物体表面的反射特性以及测量环境的光干扰对测量的影响,提高测量精度,提出了一种新的图像传感器成像参量的自适应控制方法。推导了图像传感器的成像参量,详细地分析了这些参量对位移测量精度的影响,在理论分析的基础上提出了该方法,并通过实验的方法加以验证。结果表明,该方法能够根据外界环境变化自适应调整成像参量,有效地减小环境的干扰,提高位移测量的精度。

**关键词:** 测量与计量;自适应控制;光学三角原理;成像参量;精度

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.014

### Adaptive control method for imaging parameters of image sensor in laser triangulation displacement measurement

ZHOU Ying, ZHAO Hui, TAO Wei, ZHANG Hai-bo

(Department of Information Measurement Technology and Instruments, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The reflection characteristics of the measured objects and the obtrusive light of the environment will have strong impacts on the accuracy of laser triangulation displacement measurement. In order to reduce the impact, a new imaging parameters adaptive control methods was proposed. The imaging parameters of an image sensor were described and the effect of these parameters on the accuracy of measurement was analyzed. Then an idea of improving the accuracy was put forward by parameters adjustment. The experimental results show that this method can adaptively adjust the parameters based on the environment, effectively reduce the environment interference and ultimately improve the displacement measurement accuracy.

**Key words:** measurement and metrology; adaptive control; principle of optical triangulation; imaging parameter; accuracy

## 引言

激光三角位移测量传感器<sup>[1]</sup>是一种非接触式的位移测量器具,它结构简单、测量精度高、适用范围广,已经被广泛地应用于各个位移测量领域<sup>[2]</sup>。但是,由于它依靠图像传感器成像被测物体表面反射的光源光斑,是通过对光斑成像位置的定位来实现位移测量的,因而被测物体的光反射特性以及测量环境的光干扰情况都将严重影响位移测量的精度。通过对图像传感器成像参量的自适应控制,能够减小测量环境的影响,从而提高位移测量的精度<sup>[3-5]</sup>,拓展激光三角位移测量传感器的应用领域。

## 1 图像传感器成像原理及参量

激光三角位移测量传感器将光源照射被测物体表

面反射形成的光斑成像在图像传感器上,通过定位图像传感器采集的光斑得到被测物体的实际位置。整个位移测量基于图像传感器采集到的图像,因此,首先分析图像传感器的成像原理。

根据图像传感器的原理,可知其成像公式<sup>[6-7]</sup>为:

$$S(i, j) = G_{\text{gain}} \times [N_e(i, j) \times T \times \eta(i, j) \times q + I_{\text{dark}} \times T] + G_{\text{bias}} + n \quad (1)$$

式中,  $G_{\text{gain}}$  为运放的增益,  $N_e(i, j)$  为单位时间接收的光子量,  $T$  为光注入时间,  $\eta(i, j)$  为光敏单元的量子效率,  $q$  为单位电子的电荷量,  $I_{\text{dark}}$  为图像传感器的暗电流强度,  $G_{\text{bias}}$  为光敏单元的偏置,  $n$  是随机噪声。

单位时间接收的光子量  $N_e(i, j)$  可以表示为:

$$N_e(i, j) = \Phi_e(i, j) / (h\nu) = E_e(i, j) \times A / (h\nu) \quad (2)$$

$$E_e(i, j) = P_{\text{pow}}(i, j) + P_{\text{amb}}(i, j) \quad (3)$$

式中,  $\Phi_e(i, j)$  为某像元单位时间接收的辐射能,  $h\nu$  为一个光子的能量,  $E_e(i, j)$  为光源的辐照度,  $A$  是像元面积。(3)式表示由光源强度  $P_{\text{pow}}(i, j)$  和环境光  $P_{\text{amb}}(i, j)$  建立的光源的辐照度模型。

若用  $N$  表示图像传感器的偏置  $G_{\text{bias}}$  和随机噪声  $n$  之和,假设所有像元的量子效率相同,则量子效率

作者简介:周盈(1985-),女,硕士研究生,研究方向为光电检测和图像处理技术等。

\* 通讯联系人。E-mail: huizhao@sjtu.edu.cn.

收稿日期:2009-11-03;收到修改稿日期:2009-12-08

$\eta(i, j)$ , 电荷电量  $q$ 、像元面积  $A$  和光子能量  $h\nu$  都是常量, 用  $K$  表示  $\eta(i, j) \times q \times A / (h\nu)$ 。

将(2)式和(3)式带入(1)式并展开得:

$$S(i, j) = K \times G_{\text{gain}} \times T \times P_{\text{pow}}(i, j) + K \times G_{\text{gain}} \times T \times P_{\text{amb}}(i, j) + G_{\text{gain}} \times T \times I_{\text{dark}} + N \quad (4)$$

由(4)式可知, 图像传感器的成像参量是由光源强度  $P_{\text{amb}}(i, j)$ , 曝光时间  $T$ , 增益  $G_{\text{gain}}$ , 环境光  $P_{\text{amb}}(i, j)$ , 暗电流  $I_{\text{dark}}$ , 以及噪声  $N$  组成。同时光斑波形可以分解为两个部分:(1) 信号部分  $S_{\text{sig}} = K \times G_{\text{gain}} \times T \times P_{\text{pow}}(i, j)$ ; (2) 噪声部分  $S_{\text{noi}} = K \times G_{\text{gain}} \times T \times P_{\text{amb}}(i, j) + G_{\text{gain}} \times T \times I_{\text{dark}} + N$ 。由于图像传感器在一定的光强下会到达饱和, 所以(4)式受到  $\max[S(i, j)] \leq S_{\text{sat}}$  的限制, 其中  $S_{\text{sat}}$  是图像传感器达到饱和时的光强值。

## 2 提高位移测量精密度和准确度的方法

激光三角位移传感器在实际测量位移前必须对图像传感器成像光斑定位位置进行标定, 将被测物体的位移转换为图像传感器成像光斑位置的变化。提高位移测量精密度和准确度也即提高光斑定位的精密度和准确度。

位移测量的精密度的是指对同一位移进行多次重复测量, 得到的位移值之间的相符程度, 即图像传感器成像光斑的位置之间的相符程度。位移测量的准确度是指在 实际测量中, 由光斑定位得到的位移值与位移真值的相符合程度。激光三角位移传感器标定后的位移真值就是标定时的图像传感器成像光斑位置, 因此, 位移测量的准确度就是在标定和实际测量中, 两次光斑位置的相符合程度。

### 2.1 成像参量与光斑定位精密度和准确度的关系

由(4)式可知, 除噪声外, 图像传感器的成像参量为: 光源强度<sup>[8]</sup>, 环境光, 增益和曝光时间。图1和图2说明了它们与光斑定位精密度和准确度的关系。其

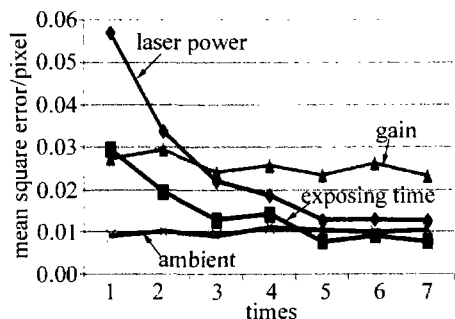


Fig. 1 The relationship between CMOS imaging parameters and the precision of the light spot

中图1和图2的横坐标是各参量增加的方向, 图1的纵坐标是20次光斑定位值的均方差, 图2纵坐标是20次光斑定位结果均值。实验中采用 CMOS 图像传

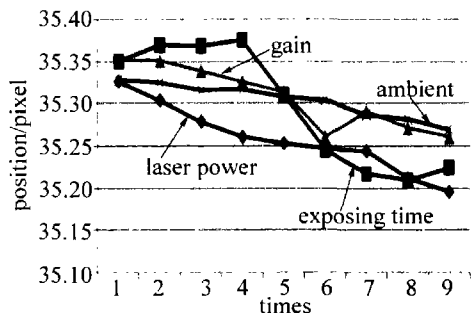


Fig. 2 The relationship between CMOS imaging parameters and the accuracy of the light spot

感器, 光源为 650nm 单色激光, 环境光为不均匀的红色 LED 光, 光斑定位<sup>[9]</sup>采用平方加权的灰度质心算法<sup>[10-11]</sup>。

2.1.1 激光强度 由图1和图2的光源强度曲线可以看出, 随着激光强度的增加, 光斑定位的精密度变好, 但使光斑定位位置发生变化。这是因为激光强度的增加, CMOS 图像  $S_{\text{sig}}$  部分的信息增加。而本文中采用的激光三角测距方法的成像面和被测物体表面不是平行的, 导致被测物反射的光斑在 CMOS 上的成像光斑能量左右分布不对称, 而采用平方加权质心法定位对该成像光斑的强度是敏感的, 所以, 不同的激光强度使得光斑定位位置不同。

2.1.2 曝光时间 由图1和图2中的曝光时间曲线可以看出, 随着曝光时间的增加, 光斑定位的精密度明显提高, 但也使光斑定位位置不同。这是由于曝光时间的增加使得  $S_{\text{sig}}$  部分的信息增加。和增加激光强度一样, 平方加权质心法定位对能量分布不对称的光斑的强度是敏感的, 所以, 不同的曝光时间使得光斑定位位置不同。

2.1.3 增益 由图1和图2的增益曲线可以看出, 随着增益的增加, 光斑定位的精密度没有明显的变化, 但会带来不同的光斑定位位置。这是由于 CMOS 的本身的输出是数字信号, 增益只是放大了数字信号, CMOS 图像的分辨率并没有提高, 即  $S_{\text{sig}}$  部分的信息量没有增加, 而  $S_{\text{noi}}$  部分的变化使得光斑定位位置改变。

2.1.4 环境光 由图1和图2的环境光曲线可以看出, 随着环境光的增强, 光斑定位的精密度没有明显的变化, 但会带来不同的光斑定位位置。这是由于 CMOS 图像的  $S_{\text{sig}}$  部分的信息量的并没有增加, 但  $S_{\text{noi}}$  部分的变化使得光斑定位位置改变。

### 2.2 提高光斑定位精密度和准确度的方法

由上述分析可知, 只有增加光源强度和曝光时间能够提高定位的光斑定位的精密度, 改变环境光和增益无法提高精密度。由(4)式和限制条件  $\max[S(i, j)] \leq S_{\text{sat}}$  可知, 增加曝光时间会使得  $S_{\text{noi}}$  部分的值增

加,使图像传感器容易饱和而无法得到较多  $S_{sig}$  部分的信息,所以,增加曝光时间只使用在环境光较小的情况。同时改变光源强度、环境光、增益和曝光时间等参量都会影响光斑定位的位置,都会导致光斑定位准确度下降。

因此要提高光斑定位的精密密度,可以提高光源强度,或者环境光较小时增加曝光时间。而要提高光斑定位的准确度,则应保证图像传感器成像参量与标定时完全一致。

### 3 图像传感器成像参量自适应控制

#### 3.1 成像参量自适应控制的原理

图像传感器成像参量自适应控制的目标是使得光斑定位精密密度和准确度最好。可以通过两种方法实现:(1)若自适应控制首先考虑光斑定位的精密密度,那么自适应控制后的图像传感器成像参量与标定时不一致,从而导致光斑定位准确度下降;(2)若自适应控制首先考虑光斑定位的准确度,那么自适应控制后的图像传感器成像参量与标定时完全一致,定位准确度良好。如果标定时图像传感器成像参量的定位精密密度良好,那么自适应控制后的光斑定位精密密度仍然较高。

因此标定时图像传感器成像参量非常关键。成像参量自适应控制的目标就是使得测量环境的成像参量与标定时的参量一致,以保证同时具有良好的精密密度和准确度。

但是,实际的测量环境中的被测物体表面颜色、粗糙度和环境光强弱,会影响到光源强度和参量,使得图像传感器成像参量与标定时不一致,同时它们又是无法改变的量,无法通过自适应控制保证它们与标定时的参量一致。因此,必须把图像传感器成像参量转换成另一个对于光斑定位而言等效的概念。在激光三角位移测量中,对光斑进行定位实际上是对图像传感器采集的波形进行处理。因此,真正的有效输入是图像传感器采集的波形,而图像传感器成像参量决定了图像传感器采集的波形。由(4)式可知,图像传感器采集的波形是由两个部分组成:信号部分  $S_{sig}$  和噪声部分  $S_{noi}$ 。如果能够保证测量时  $S_{sig}$  和  $S_{noi}$  与标定时一致,则对于光斑定位而言,等同于成像参量与标定时一致。

所以,为了在不同的环境下,保证光斑定位精密密度和准确度,就要自适应地调整图像传感器成像参量,使得  $S_{sig}$  和  $S_{noi}$  与标定时一致,实现图像传感器成像光斑的波形与标定时的波形一致。

#### 3.2 成像参量自适应控制的流程

激光三角位移传感器在进行实际的测量前,首先

要进行图像传感器标定成像参量的选择。标定时的图像传感器成像参量既要有良好的精密密度,又要易于在测量中通过参量自适应调节再现此成像波形。然后记录标定时的成像参量以及成像波形的  $S_{sig,c}$  和  $S_{noi,c}$ 。

如图3所示,位移传感器首先将图像传感器成像

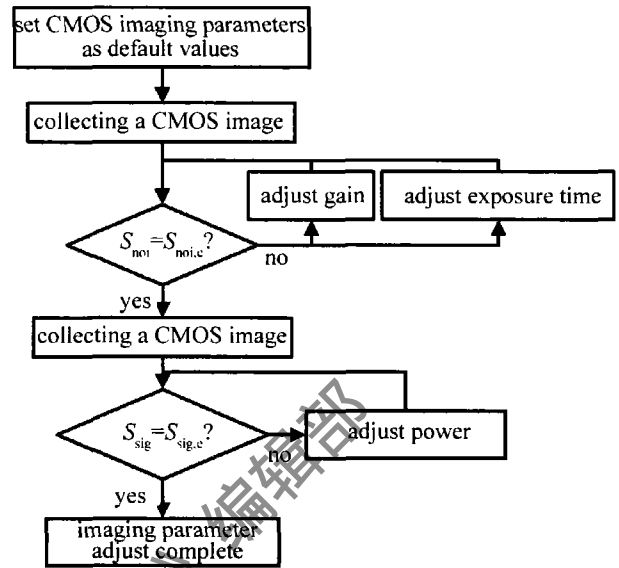


Fig. 3 Adaptive control process of the imaging parameters

参量设置为标定时的值,然后采集一帧图像,取出其中的  $S_{noi}$  部分,与标定时的值进行比较。如果  $S_{noi} \neq S_{noi,c}$ ,则调整增益或者曝光时间,使得  $S_{noi} = S_{noi,c}$ 。然后取出图像的  $S_{sig}$  部分,与标定时的值进行比较。如果  $S_{sig} \neq S_{sig,c}$ ,则调整光源强度,使得  $S_{sig} = S_{sig,c}$ 。此时图像传感器成像的波形和标定时的波形一致,实现了良好的准确度。又因为标定时的参量具有良好的位移测量精密密度,因此此时的光斑定位也同时具有良好的精密密度。

#### 3.3 实验

实验中针对实际测量中可能变化的环境光,通过对图像传感器成像参量的自适应调整,提高光斑定位精密密度和准确度。由于  $S_{sig}$  与增益、曝光时间和激光强度有关,  $S_{noi}$  与增益、曝光时间和环境光有关。实验中对环境光进行了调整,使得  $S_{noi}$  部分变化,为保证  $S_{sig}$  和  $S_{noi}$  与标定时一致,需要调整曝光时间或者增益,而曝光时间或者增益的调整将同时影响  $S_{sig}$  部分的值,因此也需要调整激光强度。为了分析在保证  $S_{noi}$  不变时采用调整增益和曝光时间的不同,故实验分为调整增益和光源强度;调整曝光时间和光源强度。

图4和图5分别说明了不调整成像参量;调整曝光时间和光源强度参量;调整增益和光源强度参量,这3种方法对提高光斑定位精密密度和准确度的作用。其中图4和图5的横坐标是逐渐增加的环境光,图4的纵坐标是20次光斑定位值的均方差,图5纵坐标是20次光斑定位结果均值。实验中采用CMOS图像传

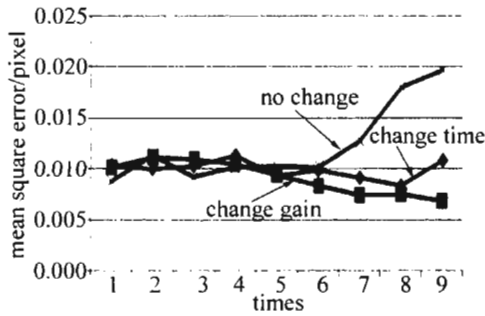


Fig. 4 The different precision of light spot when using different adaptive control methods

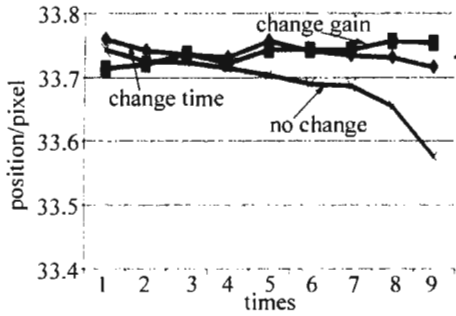


Fig. 5 The different accuracy of light spot when using different adaptive control methods

感器,环境光为不均匀的红色LED光。

3.3.1 不调整成像参量 图4和图5中的成像参量不变曲线表明,随着环境光的变化,光斑定位精密度和准确度都发生了较大的改变,这对于位移测量是不期望的。

3.3.2 调整曝光时间和激光强度 图4和图5中的调整曝光时间曲线表明,虽然环境光发生了改变,但是由于同时对曝光时间和激光强度进行了调整,使得 $S_{sig}$ 和 $S_{noi}$ 部分都分别保持不变,光斑定位的精密度和准确度都没有产生变化。

3.3.3 调整增益和激光强度 图4和图5中的调整增益曲线表明,虽然环境光发生了改变,但是由于同时对增益和激光强度进行了调整,使得 $S_{sig}$ 和 $S_{noi}$ 部分都分别保持不变,光斑定位的准确度没有产生变化。由于增益的减小不影响精密度,而激光强度的增加能够提高定位的精密度,因此,如图4调整增益曲线所示,光斑定位的精密度得到提高。

实验的结果表明,本文中提出的方法能够自适应地调节图像传感器成像参量,抵抗实际测量环境中被测物体表面颜色、粗糙度和环境光强弱的干扰,有效地保证并提高光斑定位的精密度和准确度,实现应用范围广,测量精度高的位移测量。但是自适应地调节图像传感器成像参量需要对当前的 $S_{sig}$ 和 $S_{noi}$ 值进行计

算,数据处理单元会带来额外的工作量,在数据处理单元处理能力不足的情况下,可能会带来测量效率的降低。同时较小的环境光干扰对光斑定位的精密度和准确度影响不大,当数据处理单元处理能力不足,对是否采用自适应调节设定环境光干扰的阈值,若环境光干扰超过某值后,开始采用成像参量自适应调节。

## 4 结论

通过分析图像传感器成像参量对位移测量精密度和准确度的影响,得到了提高位移测量精密度和准确度的思路,并运用该思路设计了一种新的图像传感器成像参量自适应控制的方法,该方法能够通过分析图像传感器图像,自适应地调整光源强度、增益和曝光时间等成像参量,有效地提高光斑定位的精密度和准确度,实现高精度的位移测量。通过实验表明,该方法能够极大地提高激光三角位移传感器的环境适应性和测量的精度,拓展该传感器的应用领域。

## 参考文献

- [1] JI Z, LEU M C. Design of optical triangulation devices[J]. Opt & Laser Technol, 1989, 21(5): 335-338.
- [2] WU J B, LUO Q M. Biomedical applications of laser triangulation [J]. Laser Technology, 2006, 30(1):1-4(in Chinese).
- [3] ZHAO J L, HAO J H, LI E P, et al. A method of improving CCD's resolution in laser triangulation measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 1997, 26(11):998-1002(in Chinese).
- [4] QIAN X F, LÜ X X, ZHONG L Y, et al. A novel method for improving measuring accuracy in laser triangle method[J]. Laser Journal, 2000, 21(3):54-55(in Chinese).
- [5] JIA Y H. Research on auto-exposure and dynamic measure system based on laser triangulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007:21-30(in Chinese).
- [6] YU D Y, TAN H Y. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2005:74-77(in Chinese).
- [7] MENG R, YU D R, WANG Y Q, et al. Influence factors analysis of flat field and research of correction method for monochrome CCD camera[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2006, 21(4):68-70(in Chinese).
- [8] HU B L, MA C W, SUN Y Sh, et al. CCD auto adjust light[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(4):504-506(in Chinese).
- [9] LI W M, XING X Zh, DAI L R, et al. Application of DSP in the linear CCD measuring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(2):183-185(in Chinese).
- [10] LIU L B, ZHAO H, ZHANG H B, et al. Adaptive control method for light intensity in laser triangulation system[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(5):24-27(in Chinese).
- [11] YANG Y Q, ZHANG D Q, YANG Y. A calibration method for large-scale laser range sensor based on triangulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4):35-36(in Chinese).