

## 激光三角法高精度测量模型

孙兴伟, 于欣玉, 董祉序, 杨赫然

(沈阳工业大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 为提高检测准确性, 提出激光三角法高精度测量模型, 由变阈值亚像素灰度重心提取算法和 CCD 倾角误差补偿模型两部分组成; 光斑中心定位算法对激光检测准确度起关键作用, 针对已有激光中心定位算法的缺陷, 提出了变阈值亚像素灰度重心提取算法, 通过梯度函数和高斯拟合算法设定阈值去除光斑边缘噪声区域对中心定位的影响, 并利用多项式插值提高灰度重心法精度; 同时为提高实际工业生产环境中的测量准确性, 建立 CCD 倾角误差补偿模型; 应用激光三角法高精度测量模型, 以 STM32F407 为硬件核心建立系统, 以锥螺纹为被测物进行实验; 实验结果表明: 该测量模型实现了对锥螺纹信息的准确采集, 且精度明显高于传统的灰度重心法, 可以将锥螺纹检测的误差控制在 10  $\mu\text{m}$  内。

**关键词:** 激光测量; 光斑中心; 误差补偿; 单片机

中图分类号: TN247; TP391 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0906008

## High accuracy measurement model of laser triangulation method

Sun Xingwei, Yu Xinyu, Dong Zhixu, Yang Heran

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In order to improve the measurement accuracy, the high accuracy measurement model of laser triangulation method was proposed, which consisted of variable threshold subpixel grayscale gravity center extraction algorithm and CCD tilt error compensation algorithm. The spot centering algorithm played a decisive role in the accuracy of laser detection. A variable threshold subpixel grayscale gravity center extraction algorithm was proposed according to the defect of the existing laser center localization algorithm. The gradient function and the Gaussian fitting algorithm were used to set the threshold to remove the effect of spot edge noise region on center location, and the polynomial interpolation were used to improve the precision of grayscale gravity method. CCD tilt error compensation algorithm was established to further improve accuracy. The system was established with STM32F407 as the hardware core. Taking taper thread as the measured object, the test was carried out. The results show that the laser spot can be accurate acquisition by the high accuracy measurement model. Precision is obviously higher than the traditional grayscale gravity center method, and successfully controls the error within 10 microns.

**Key words:** laser measurement; laser spot center; error compensation; single chip microcomputer

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-05-17

基金项目: 辽宁省百千万人才工程项目(2015-47); 辽宁省教育厅项目(2004D094)

作者简介: 孙兴伟(1970-), 女, 教授, 博士, 主要从事复杂曲面测量与数控加工轨迹优化、复杂曲面数控制造理论与技术、数控技术与智能制造等方面的研究。Email: sunxingw@126.com

## 0 引言

激光三角法以非接触、无测量力、分辨率高、测量范围大等优点,目前广泛应用于精密检测领域。引起激光三角测量误差的因素有很多,几何角度误差、光斑定位误差、被测物表面颜色、表面粗糙度等<sup>[1]</sup>。参考文献[2]对由被测表面粗糙度对激光测量精度产生的影响进行了深入的研究,结果显示,被测物面的粗糙度值较低时,激光在被测表面产生的镜面反射会对测量精度产生较大影响。参考文献[3]对被测表面的不同颜色对测量精度的影响进行了分析,分析表明红色表面对激光传感器测量准确度的影响最小,黑色最大。参考文献[4]、[5]对反射面的倾角误差进行研究并提出补偿模型。以上文献都对影响激光位移传感器精度的因素进行了研究,但是都将激光位移传感器内 CCD 感光元件上的光斑看为准确反映光线位置的一个理想点,对测量环境中光线在 CCD 上倾斜照射引起的定位误差未进行深入分析。

激光光斑中心提取的准确度直接影响最终测量结果的精度<sup>[6]</sup>。为了满足工业测量对精度的要求,近年来,国内外学者对激光中心定位这一问题进行了大量的研究。参考文献[7]提出了一种基于加权插值算法的激光光斑中心检测方法,该方法抗噪声干扰能力较弱;参考文献[8]提出了一种基于最优弧的激光光斑中心检测算法,有效地提高了中心定位精度,但计算量大,要求光斑对称性好。参考文献[9]提出小尺寸光斑中心的高精度定位算法,定位精度较高,但对光斑形状要求高,抗噪声能力差。

针对以上缺陷,为提高激光三角法的测量准确性,建立了激光三角法高精度测量模型。在对原始光斑数据定位处理方面,提出了变阈值亚像素灰度重心提取算法,充分发挥灰度重心法的优势,并弥补其易受噪声干扰的缺陷,实现了激光光斑中心位置的快速准确提取。在提高实际工业生产环境中的测量精度方面,建立了 CCD 倾角误差补偿模型,弥补了实际测量环境中当光线在 CCD 上倾斜照射时产生的光斑定位误差。实验证明:激光三角法高精度测量模型通过光斑中心准确检测和测量误差精确补偿两种途径有效提高了测量精度。

## 1 变阈值亚像素灰度重心提取算法

激光光斑中心定位的准确程度决定了图像在 CCD 感光元件中的位置坐标是否准确,也就决定了反算出的被测物的位置坐标精确与否,激光中心位置的精确提取是保证测量系统精准性的前提<sup>[10]</sup>。常用的光斑中心定位的方法有灰度重心法、高斯拟合法、Hessian 矩阵法、圆拟合法等。其中,灰度重心法算法简单,对光斑对称性要求较低,但是精度不高且易受光斑边缘噪声的影响;Hessian 矩阵法精度较高但是计算量大且易受到噪声影响;高斯拟合法精度高连续性好,但要求光斑规则。

如图 1 所示,为实现激光中心的高精度提取,文中提出了变阈值亚像素灰度重心提取算法,利用梯度阈值法和高斯拟合法准确去除光斑边缘噪声区域对灰度重心法的干扰,同时用多项式拟合插值法增强了灰度重心法的数据密度,明显提高了光斑中心的定位精度,也相应地增强了激光三角法的测量准确性。

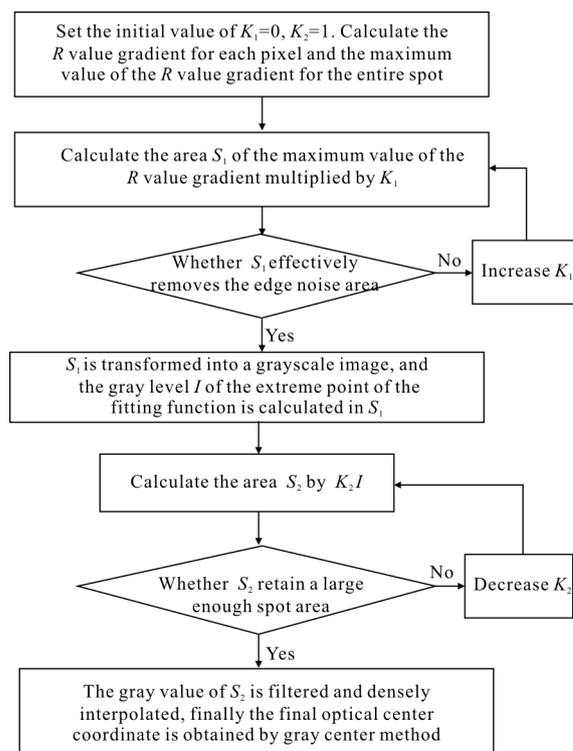


图1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flowchart

光斑的  $R$  值函数为  $f(x,y)$ , 在点  $(x,y)$  的梯度函数定义为:

$$G_{\text{定义}}[f(x,y)] = \left[ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (1)$$

梯度的数值就是  $f(x,y)$  在其最大变化率方向上的单位距离所增加的量, 考虑到激光光斑基本呈圆形, 沿  $f(x,y)$  与  $f(x+1,y+1)$  及  $f(x+1,y)$  与  $f(x,y+1)$  方向图像梯度最大。综合垂直照射和倾斜照射的情况, 与多次实际测试比较后, 得到以下梯度算子:

$$G[f(x,y)] = \left| \sqrt{3} f(x+1,y+1) - f(x,y) \right| + \left| \sqrt{3} f(x+1,y) - f(x,y+1) \right| \quad (2)$$

扫描整个图像, 以每个像素的  $R$  值进行梯度运算, 找到图像中的最大  $R$  值梯度数值。用最大梯度值的  $K_1(K_1 < 1)$  倍作为标识阈值, 其中  $K_1$  值可以根据定位准确程度进行调节,  $K_1$  的取值从 0 开始进行尝试选取, 以 0.1 为间距依次递增, 目的要有效剔除边缘噪声区域又要保留足够的有效区域以便进行下一步阈值确定。实验表明, 利用设计的梯度算子进行计算时, 标识阈值  $K_1$  在等于 0.2 时能取得最好效果。再次扫描图像, 将  $R$  梯度值等于标识阈值的像素点所围成的区域命名为初步阈值区域  $S_1$ , 将  $S_1$  内部图像保留并转化成灰度图, 灰度函数为  $g(x,y)$ , 以便在  $S_1$  内进行最终阈值区域  $S_2$  的确定。

对于多数激光光束, 其光强分布可近似为高斯分布, 取其高斯函数为:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (3)$$

初步阈值区域  $S_1$  内点的拟合方程组为:

$$B = AK \quad (4)$$

由于

$$\ln F(x,y) = T_\sigma - \left[ \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right] \quad (5)$$

$A$  的第  $i$  行为:

$$a_i = [x_i^2, y_i^2, x_i, y_i, 1]$$

$K$  为待定参数向量

$$K = \left[ \frac{-1}{2k_1}, \frac{-1}{2k_2}, \frac{x_i}{k_1}, \frac{y_i}{k_2}, -k_0 \right]^T \quad (7)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  为高斯函数的极值点坐标。用最小二乘法拟合, 使残差向量  $E$  的范数达到最小

$$\|E\|_2 = \|\ln g(x,y) - B\|_2 \quad (8)$$

求解出拟合函数的极值点  $(x_i, y_i)$ , 并将该点的灰度值标记为  $I$ 。然后设定标识阈值, 可以用  $I$  的  $K_2$  倍作为阈值,  $K_2$  值可以根据定位准确程度进行调节。而  $K_2$  的取值与  $K_1$  类似, 从 1 开始递减, 要尽量大地保留光斑形状规则理想的区域, 实验表明, 标识阈值在  $K_2=0.5$  时能取得最好定位效果。设定灰度阈值  $K_2 I$ , 灰度值大于灰度标识阈值的区域定义为最终阈值区域  $S_2$ , 并对  $S_2$  内的灰度值进行高斯滤波, 对滤波后的图像以 0.1 pixel 为间距进行多项式拟合插值密化, 并按公式(9)、(10)对密化后的亚像素点采用灰度重心法求出最终光心坐标。

$$x_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in S_2} xg(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S_2} g(x,y)} \quad (9)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{(x,y) \in S_2} yg(x,y)}{\sum_{(x,y) \in S_2} g(x,y)} \quad (10)$$

测量灵敏度是指被测物的位移与感光元件上检测到的光斑中心位移之比。实验用的 CCD 感光元件的每个像素长度为 10  $\mu\text{m}$ , 当测量灵敏度达到最大值 26.86, 成像光斑中心检测误差达到 1 pixel 时, 对被测物位置的测量误差可能达到 0.269 mm。可见对像素点进行插值密化可以有效提高定位精度。

## 2 误差分析及误差补偿

### 2.1 最佳几何模型

由激光测量基本原理可知, 测量结果精度受颜色、粗糙度、几何误差等多种因素影响。为了提高测量精度, 文中提出了激光三角法的最佳几何模型。

激光光束在 CCD 上投射的光斑情况会对激光测量的准确性产生很大影响, 当激光在 CCD 上垂直入射时光斑质量最佳<sup>[11]</sup>, 产生的偏移误差和倾斜误差最小, 以此作为激光测量的最佳几何模型并计算相应位置关系。图 2 为激光测量光路图。

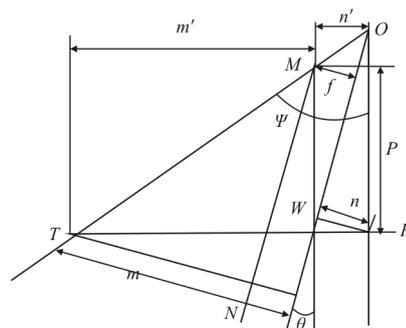


图 2 激光测量光路图

Fig.2 Optical path of laser measurement

为了保证被测对象点可以清晰地聚焦到 CCD 上,该激光光束应该满足 Scheimpflug 条件。如图 1 所示,光路与接收面垂直,OF 为接收面,T 点为物点,F 为像点,W 为透镜中心,OW 为透镜所在平面,MN 为前焦平面,OW 与 MN 的距离为焦距  $f$ , $m$  为物距, $n$  为像距。其中

$$P = \frac{f}{\sin\theta} \quad (11)$$

$$m = m' \cos\theta, n = n' \cos\theta \quad (12)$$

由透镜成像定理

$$\frac{1}{m} + \frac{1}{n} = \frac{1}{f} \quad (13)$$

得:

$$m = \frac{fn}{n-f} \quad (14)$$

最终得到最佳几何模型:

$$m' = \frac{n'f}{n' \cos\theta - f} \quad (15)$$

$$\tan\Psi = \frac{m' \sin\theta}{f} \quad (16)$$

$$TF = \frac{(n')^2 \cos\theta}{n' \cos\theta - f} \quad (17)$$

### 2.2 CCD 倾角误差补偿

当激光测量的位置关系不满足最佳几何模型时,由于反射光线与 CCD 感光元件不是垂直关系(图 3),检测到的光斑中心  $E$  无法反应光线中心的实际位置  $C$ 。当被测物表面发生位移时,光束也会发生位移,但光束位移与检测到的光斑中心位移不相等,形成激光三角测量的原理误差。

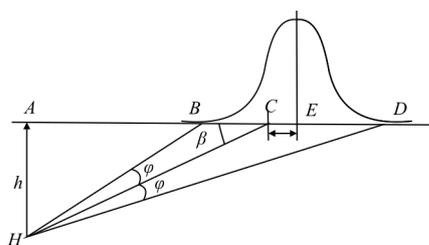


图 3 CCD 倾角误差原理图

Fig.3 CCD inclination error schematic

其中,定义激光波束角  $\varphi$ :

$$\tan\varphi = k \quad (18)$$

$$AC = h \cdot \cot\beta \quad (19)$$

$$AE = \frac{AB + AD}{2} = h \cdot \frac{(1+k^2)\tan\beta}{\tan^2\beta - k^2} \quad (20)$$

当光线与 CCD 感光元件夹角为  $\beta$  时,光束位移

与检测到的光斑中心位移的定位误差为  $\Delta_1$ :

$$\Delta_1 = CE = h \cdot \frac{k^2 (\tan^2\beta + 1)}{\tan^3\beta - k^2 \tan\beta} \quad (21)$$

当光线与 CCD 感光元件夹角为  $\beta + \gamma$  时,光束位移与检测到的光斑中心位移的定位误差为  $\Delta_2$ :

$$\Delta_2 = h \cdot \frac{k^2 [\tan^2(\beta + \gamma) + 1]}{\tan^3(\beta + \gamma) - k^2 \tan(\beta + \gamma)} \quad (22)$$

以此为根据建立 CCD 倾角误差补偿模型,当光线与 CCD 倾角为  $\beta$  时,若待测表面位移引起的光线角度变化量为  $\gamma$ ,此时引起的测距误差为  $\Delta_s$ :

$$\Delta_s = \frac{L(\Delta_1 - \Delta_2)\sin\beta}{L' \sin\alpha - (\Delta_1 - \Delta_2)\sin(\alpha + \beta)} \quad (23)$$

式中: $\alpha$  为入射光线与反射光线夹角; $L$  为物距; $L'$  为像距。

$$\Delta_1 - \Delta_2 = hk^2 \cdot \frac{\tan\gamma + \tan\gamma \tan^2\beta}{\tan\beta + \tan\beta \tan\gamma} \quad (24)$$

### 3 实验结果分析

验证变阈值亚像素灰度重心提取算法及 CCD 倾角误差补偿模型的正确性,以单片机 STM32F407 为硬件核心,以锥螺纹为被测物,建立锥螺纹激光检测系统进行实验。系统由激光位移传感器、控制器、单片机、脉冲编码器等几部分组成,如图 4 所示。在

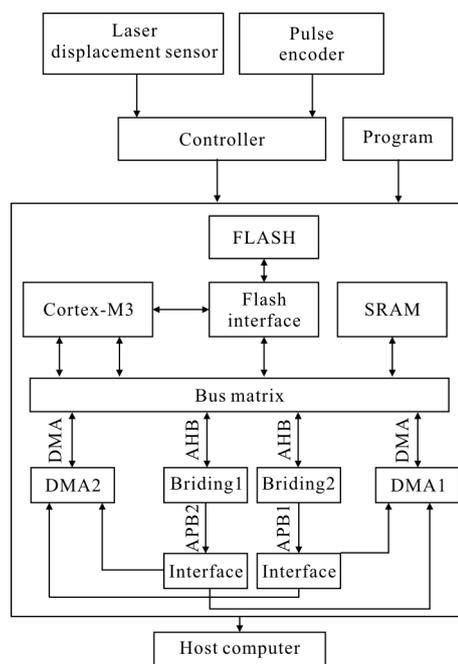


图 4 系统结构原理图

Fig.4 Schematic of system structure

刀架上安装激光位移传感器,在刀架的丝杠上安装脉冲编码器。激光位移传感器用于采集锥螺纹径向数据,脉冲编码器通过记录刀架的与锥螺纹轴向相对运动,实现了锥螺纹轴向信号的采集,轴向信号和径向信号同步传输给控制器。控制器根据算法程序对激光位移传感器内部的 CCD 感光元件上的光斑信息进行光斑中心定位、距离运算后将位置信号发送到单片机。单片机对位置信号进行滤波、拟合等数据处理来计算锥螺纹参数,并将结果送往上位机显示。

如图 5 所示,通过实验对 NC50 型石油管螺纹数据进行采集,并用三坐标测量仪的测量值作为螺纹数据的准确值。

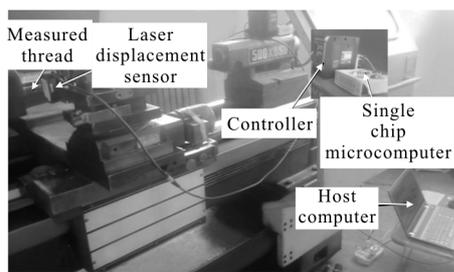
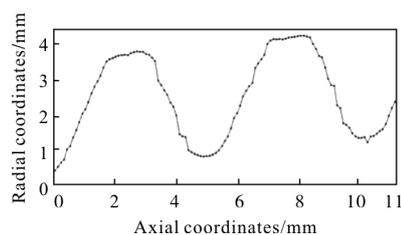


图 5 实际检测图

Fig.5 Chart of actual test

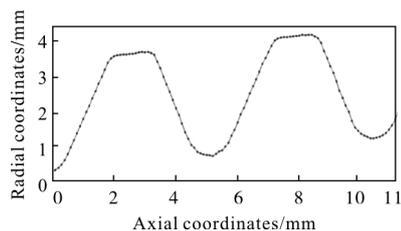
根据提出的最佳几何模型计算得出测量的最佳距离,并以此为标准设定一系列不同的测量距离对螺纹数据进行采集。由于激光位移传感器可以显示距离,刀架的移动可以实现对传感器位置的调节,所以通过对被测物与传感器之间距离的控制实现对光线角度的标定,并根据传感器内部结构参数计算出相应距离对应的补偿量对测量结果进行补偿。

为了对比变阈值亚像素灰度重心提取算法的优越性,如图 6 所示,实验第一部分为应用传统灰度重心法和变阈值亚像素灰度重心提取算法分别对同一螺纹在最佳距离进行的一次测量。图 6(a)为利用传统灰度重心提取算法在最佳距离处采集的一组螺纹型面数据,图 6(b)为利用变阈值亚像素灰度重心提取算法在最佳距离处采集的一组螺纹型面数据。图 6(a)的牙高误差为 0.011 mm,图 6(b)的牙高的误差为 0.003 mm,可以证明变阈值亚像素灰度重心提取算法的准确度优于传统算法。



(a) 利用传统提取算法采集的螺纹数据

(a) Thread data gathered by the traditional algorithm



(b) 利用变阈值亚像素灰度重心提取算法采集的螺纹数据

(b) Thread data gathered by the variable threshold

subpixel algorithm

图 6 实验采集的螺纹数据

Fig.6 Experimental collection of thread data

测量距离与最佳距离的差为相对距离(以第一个螺纹牙为基准),实验第二部分为利用变阈值亚像素灰度重心提取算法按照不同相对距离依次对螺纹进行测量,每个距离测量 20 次。牙型高度是检测螺纹是否合格的一项重要数据,对采集数据进行处理后依据国家标准计算出每次测量的第一个螺纹牙的牙型高度,取 20 次测量的均值作为这个距离的牙高测量结果。

测量结果的重复性在实际工业测量中占有非常重要的地位,测量设备的重复性是指在相同测量条件下,对同一被测量对象进行连续多次测量所得结果之间的一致性。应用贝塞耳公式(25)计算出的实验标准差  $S(x)$  大小来定量地描述测量设备重复性高低,标准差越大,测量结果越分散、一致性越差、重复性越低;反之,则测量结果越集中、一致性越优、重复性越高。

$$S(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (25)$$

表 1 为各个相对距离在 CCD 倾角误差补偿前后的牙型高度误差 (Tooth Height Error Before Compensation, THEBC. Tooth Height Error after Compensation, THABC)和各个相对距离进行的 20 次

测量的牙型高度标准差。实验结果表明:利用变阈值亚像素灰度重心提取算法可以实现较高精度的螺纹测量;最佳几何模型有效地降低了实验标准差,保证了测量的重复性;提出的距离 CCD 倾角误差模型成功地控制了牙高的测量误差。

表 1 误差补偿前后测量结果对比

Tab.1 Measurement results comparison before and after compensation

Relative distance /mm	THEBC /mm	THABC /mm	Tooth height mean variance/mm
-25	0.016	0.009	0.032 49
-20	0.012	0.007	0.028 47
-15	0.009	0.006	0.022 74
-10	0.006	0.004	0.019 30
-5	0.005	0.003	0.014 93
0	0.004	0.004	0.007 76
5	0.006	0.004	0.012 60
10	0.007	0.005	0.016 94
15	0.008	0.005	0.025 31
20	0.012	0.007	0.028 59
25	0.015	0.008	0.034 32

#### 4 结 论

文中提出了激光三角法高精度测量模型,其中,针对目前光斑中心定位算法缺陷,提出了变阈值亚像素灰度重心提取算法,利用梯度函数和高斯拟合算法设定阈值去除光斑边缘噪声,同时通过多项式插值提高灰度重心法精度。另外,为适应实际工业生产环境的测量条件,建立了 CCD 倾角误差补偿模型,以提高光线定位准确性。实验证明:激光三角法高精度测量模型明显优于传统测量方法,有效地提高了测量准确性。

#### 参 考 文 献:

[1] Zhou Xingmin, Liu Hengbiao, Ge Jianmin. Reflected spot center offset correction in laser triangulation measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (5): 0512001. (in Chinese)

[2] Zhou Kun, Ji Haijiao, Zhou Haibin. Analysis for the effect of measured surface character to the measuring accuracy of laser triangulation method measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 7(2): 70-73. (in Chinese)

[3] Shen Lei, Li Dinggen, Chu Jun, et al. Study on laser speckle correlation method applied in triangulation displacement measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 288-293. (in Chinese)

[4] Wang Zhiqian, Liu Zhaorong, Zhao Yan, et al. Precise center location algorithm for laser spot in distortion measuring system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2011, 25(6): 485-489. (in Chinese)

[5] Sun Bin, Li Bing. A quantitative error compensation model of the inclination angle of the laser displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(5): 996-1004. (in Chinese)

[6] Cai Huaiyu, Feng Zhaodong, Huang Zhanhua. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 0308006. (in Chinese)

[7] Zhang Qiuqia, Zhao Yuhua. Measurement method of laser spot center based on weight interpolation algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 81-84. (in Chinese)

[8] Cao Shikang, Li Dongjian, Xu Ruihua, et al. Algorithm of laser spot detection based on optimal arc [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (10): 3492-3496. (in Chinese)

[9] Zhao Jingxin, Zhou Fuqiang. High-precision center location algorithm of small-scale focal spot [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (8): 2690-2693. (in Chinese)

[10] Sun Junhua, Jie Zhang, Zhen Liu, et al. A vision measurement model of laser displacement sensor and its calibration method [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(12): 1344-1352.

[11] Qiu Zurong, Chen Haoyu, Hu Wenchuan, et al. Embedded angel vision inspection and error compensation for line structure light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21 (10): 2480-2487. (in Chinese)