

# 激光光斑中心高精度定位补偿算法研究

蒋佳雯, 康杰虎, 吴斌\*

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

**摘要** 关节型激光传感器是一种新型的基于非正交轴系架构的非接触式三维坐标测量仪器, 测量时需保证系统左右单元激光束精密交会。因此, 实现高精度激光光斑中心定位是保证其测量精度的前提和基础。光斑中心定位误差分为随机误差和系统误差两部分。对于随机误差, 采用边缘阈值法进行消除; 对于系统误差, 提出一种基于非线性最小二乘拟合的补偿方法。基于直线度误差评定方法, 对激光光斑中心定位和补偿方法的效果进行对比分析。实验结果表明, 所提方法能将质心法的定位精度提高至 0.12 pixel, 明显优于现有其他方法, 满足关节型激光传感器的高精度测量要求。

**关键词** 测量; 数字图像处理; 系统误差; 质心法; 误差补偿

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1412002

## High Precision Positioning and Compensation Algorithm for Laser Spot Center

Jiang Jiawen, Kang Jiehu, Wu Bin\*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** Articulated laser sensor is a new-fashioned non-contact three-dimensional coordinate measuring instrument based on non-orthogonal axis architecture, which requires the intersection accuracy of laser beams from the left and right units. Therefore, the acquisition of high precision laser spot center is the premise and basis for ensuring measurement accuracy. The spot center-positioning error can be divided into random and system errors. For random error, the edge threshold method is used to eliminate them. For system error, a compensation method based on nonlinear least square fitting is proposed. Based on the straightness error evaluation method, the results of the above positioning and compensation method of laser spot center are compared and analyzed. The results show that the positioning accuracy of the centroid method can be improved to 0.12 pixel using the proposed method. Additionally, the proposed method performs better than other existing methods and satisfies the high precision measurement requirements of articulated laser sensor.

**Key words** measurement; digital image processing; system error; centroid method; error compensation

**OCIS codes** 120.4630; 120.4820; 120.6150; 100.2000

## 1 引言

随着现代工业和制造业的高速发展, 三维测量技术及仪器广泛应用于航空航天、智能制造及基础设施建设等领域<sup>[1-4]</sup>。为了提高三维测量的效率和精度, 一些测量系统(例如三维激光扫描仪<sup>[5-7]</sup>)利用激光

器向被测物体主动投射激光, 通过采集被测物体表面调制后的激光光点或光条的图像, 解算物体的三维信息。

关节型激光传感器<sup>[8-10]</sup>是一种用于常规尺寸测量的跨尺度、全方位、高精度的非接触式三维坐标测量仪器。类似于传统的前方交会坐标测量仪器, 关

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-05; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61771336)、天津市自然科学基金(18JCZDJC38600)

通信作者: \*wubin@tju.edu.cn

节型激光传感器的测量是基于测量区域内两个激光束的精确交汇的。当左激光束与右激光束精确交汇于空间点时,基于左右单元转台转动的角度和传感器的数学模型,可以计算出交会点的三维坐标。因此激光光斑中心的高精度定位是保证关节型激光传感器测量精度的重要前提。

传统的激光光斑中心定位算法<sup>[11]</sup>主要分为两种:一是基于灰度的定位算法,二是基于边缘的定位算法。其中基于灰度的定位算法利用目标的灰度分布信息求取光斑中心,主要包括灰度质心法<sup>[12]</sup>和高斯拟合法。基于边缘的定位算法利用目标的边缘形状信息求取光斑中心,主要有质心法和椭圆拟合法<sup>[13]</sup>。灰度质心法适用于光斑能量分布均匀的情况,且周围环境光对定位结果影响较大,算法不稳定;高斯拟合法定位精度高,但只对光斑能量呈均匀高斯分布的情况有效,且运算时间过长;椭圆拟合法的抗干扰性较差,只能应用在光斑边缘质量较好的场合。

目前,国内外研究都集中在采用新的亚像素细分方法来提高激光光斑中心坐标的提取精度。吴泽楷等<sup>[14]</sup>对圆拟合算法进行改进,多次迭代后算法能够更准确地输出光斑中心位置。吴頔等<sup>[15]</sup>针对基于差分激光三角法的海面溢油油膜厚度测量系统中光斑图像中心提取的问题,提出了一种基于互相关和改进高斯拟合的光斑中心提取方法,该方法将测量精度提高至 0.55 pixel。Vázquez-Otero 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于反应扩散的提取算法,该算法能迅速找到激光光斑并进行高精度提取。上述算法虽然提高了激光光斑中心的定位精度,然而这些算法并没有分析图像的误差来源,且直接对图像离散化采样的灰度信息进行计算,无法真正地消除误差。

本文采集到的激光光斑图像的灰度接近饱和且边缘质量一般,不能采用高斯拟合和椭圆拟合法。采用质心法可以实现亚像素的图像处理,能得到很好的定位精度。为了进一步提高激光光斑中心的定位精度,对质心法的误差来源进行分析,提出一种基于傅里叶函数模型的误差补偿方法,采用非线性最小二乘法对误差补偿模型进行拟合。

## 2 补偿方法

### 2.1 误差来源分析

利用 CMOS 相机验证激光光斑中心的定位算法,其实验造成的误差主要分为两类:随机误差和系统误差<sup>[17-19]</sup>。随机误差主要是指由 CMOS 相机产

生的热噪声、散粒噪声、复合噪声与 1/f 噪声等,及实验过程中周围环境光的变化。系统误差主要是指 CMOS 相机成像的离散化误差。CMOS 相机的成像过程:当光线入射到 CMOS 图像传感器上,图像传感器上的光电二极管接收光子能量产生电荷信号,该电荷信号在像元内被直接转换为电压信号,当选通开关开启时直接输出。从信号分析的角度看,CMOS 相机成像的过程是以像素为间隔对连续的能量信号进行离散化采样的过程。

以质心法为例,质心法实质上是指图像能量信号的一阶空间矩和零阶空间矩的比值。假设图像上激光光斑的中心坐标为  $(x_0, y_0)$ ,用图像平面的能量重心代替中心,即

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\iint_s x f(x, y) dx dy}{\iint_s f(x, y) dx dy} \\ y_0 = \frac{\iint_s y f(x, y) dx dy}{\iint_s f(x, y) dx dy} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $s$  为有效质心窗口,包含了光斑图像所有的有效像素点; $f(x, y)$  为图像灰度函数。(1)式的积分为连续积分,但实际上 CMOS 相机生成的图像是离散的,只能得到像素点的采样值,因此(1)式变形为

$$\tilde{x}_0 = \frac{\sum_{k=1}^K x_k f_k}{\sum_{k=1}^K f_k}, \tilde{y}_0 = \frac{\sum_{k=1}^K y_k f_k}{\sum_{k=1}^K f_k}, \quad (2)$$

式中: $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$  为新计算出来的几何中心坐标; $K$  为单个光斑包含的有效像素点个数; $f_k$  为第  $k$  个有效像素点的灰度采样值。由(1)、(2)式可以得知,光斑质心的计算方式从有效区域连续积分变成了离散点求和,利用离散化采样后的像素几何中心坐标代替像元连续积分所得的结果时必定有误差,对于其他定位算法,这种误差也是不可避免的,该误差可以看作系统误差。

### 2.2 误差补偿方法

针对定位算法的误差,分别对随机误差和系统误差进行处理,以减小其影响。

#### 2.2.1 随机误差的分析

对于随机误差,连续高帧采集多幅处于同一位置的光斑图像,将光斑中心坐标的平均值作为真实信号的质心位置。采用边缘阈值法,寻找一个合适的阈值,可有效地减小背景噪声的影响,提高图像的信噪比,本文选择 otsu 阈值法寻找合适的阈值。

### 2.2.2 系统误差的分析

系统误差是离散化采样后的像素几何中心坐标代替像素连续积分产生的。对于系统误差,很难用解析方法从误差模型函数中直接求取,因此本文针对质心法,提出了一种非线性最小二乘补偿方法。利用 MATLAB 软件仿真得到的质心位置与误差的对应关系,采用非线性最小二乘法对残差曲线进行拟合,得到最佳误差补偿曲线,利用该曲线来补偿系统误差。由于  $x$ 、 $y$  方向的系统误差是等同的,只讨论光斑沿着  $y$  方向移动的情况。

假设光斑中心在某个像素内,将每个像素分成 5 份,每次光斑中心沿  $y$  方向移动 0.2 pixel,移动 20 次,记录每次质心法得到的光斑中心坐标  $y_k$  及与真实中心坐标  $y_c$  的残差  $\Delta y_k$ ,得到残差和质心位置的对应关系,如图 1 所示。

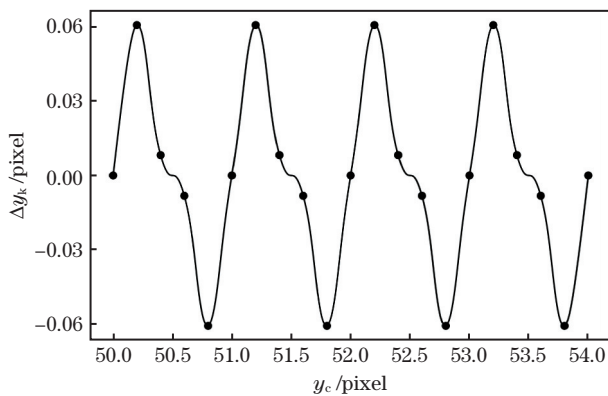


图 1 残差  $\Delta y_k$  与中心位置  $y_c$  的关系

Fig. 1 Relationship between residual  $\Delta y_k$  and center position  $y_c$

从图 1 可以发现,残差  $\Delta y_k$  与中心位置  $y_c$  的关系存在周期性规律,周期为 1 个像素,但难以预测在一个周期内的残差变化。由于任何周期函数都可以由正弦函数和余弦函数构成,则可以采用含有三角函数的傅里叶函数模型表示像素坐标的误差模型:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}x\right) \right], \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为各离散点测得误差的拟合值; $x$ 为光斑中心真实坐标值; $T$ 为周期; $a_0$ 为常数项; $n$ 为谐波次数; $a_n$ 、 $b_n$ 均为傅里叶系数。

根据实验仿真数据,经过非线性最小二乘法拟合,得到的误差补偿函数为

$$f(y) = a_0 + a_1 \cos(\omega y) + b_1 \sin(\omega y) + a_2 \cos(2\omega y) + b_2 \sin(2\omega y), \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_0 &= -1.086\exp(-16); a_1 = -4.244\exp(-16); \\ b_1 &= 0.05017; a_2 = -3.569\exp(-16); b_2 = 0.0226; \\ \omega &= \frac{2\pi}{T} = 6.83. \end{aligned}$$

则误差补偿后的光斑中心坐标为

$$y_r = y_d - f(y), \quad (5)$$

式中: $y_r$ 为补偿系统误差后的坐标值; $y_d$ 为质心法得到的质心坐标值; $f(y)$ 为误差补偿值。

补偿后的残差  $\Delta y_k$  与中心坐标  $y_c$  的关系如图 2 所示。

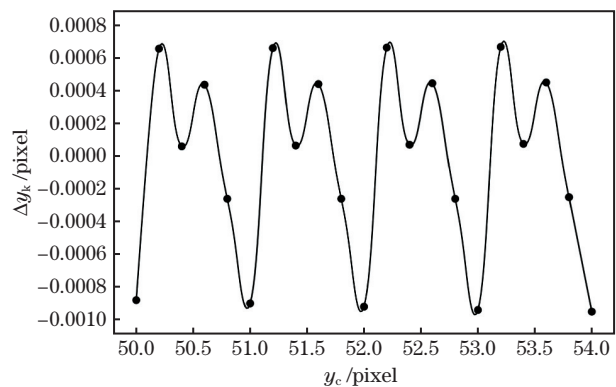


图 2 误差补偿后残差  $\Delta y_k$  与中心位置  $y_c$  的关系

Fig. 2 Relationship between residual  $\Delta y_k$  and center position  $y_c$  after error compensation

对比图 1 和图 2 可以得知,在没有进行系统误差补偿前,质心法的定位精度在 0.07 pixel,经过误差补偿后,质心法的定位精度优于 0.007 pixel,由仿真结果可以看出,该补偿方法有效。

## 3 实验验证

### 3.1 实验步骤

用于验证激光光斑中心定位补偿算法的实验系统如图 3 所示,主要由高精度电动升降台、激光器、CMOS 相机和光斑接收平面组成。其中,激光器采用小功率红光半导体激光器,波长为 658 nm;相机分辨率为  $2448 \times 2048$ ,像元尺寸为  $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ ;镜头焦距为 35 mm;高精度升降台精度为  $1 \mu\text{m}$ 。

对定位补偿算法进行验证的实验步骤如下。

1) 将激光器固定在电动升降平面上。

2) 调整并固定激光光斑接收平面,使其距激光器约 500 mm。利用激光跟踪仪测量激光光斑接收平面和电动升降平面的法向量,计算法向量夹角,使激光光斑平面和电动升降台平面近似垂直。

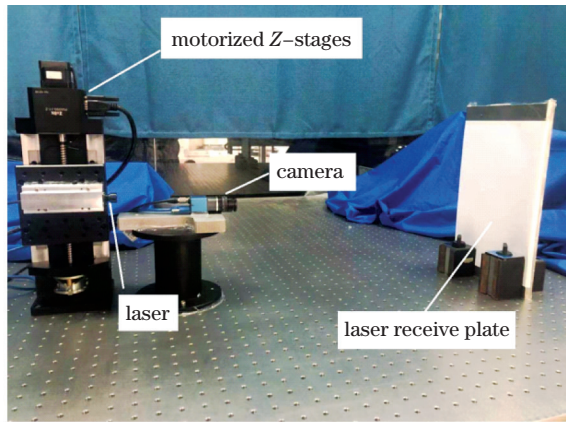


图 3 验证定位算法的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for verifying the localization algorithm

3) 调整相机近似正对光斑成像平面,并使光斑位于图像的中心;微调镜头聚焦,使光斑清晰成于像面。

4) 控制电动升降台以  $10 \mu\text{m}$  的步长平移,每平移一次拍摄 10 张光斑图片,用不同定位算法求取光斑中心坐标。为了去除 COMS 噪声和杂散光等因素的影响,将多幅处于同一位置的光斑图像的中心坐标的平均值作为真实信号的质心位置。

5) 连续平移 20 次,计算出每个位置的光斑中心坐标平均值。

6) 为了排除外界干扰造成的粗大误差,使电动升降台从同一起始位置移动,重复步骤 4) 和 5) 5 次。

实验过程中采集到的激光光斑图像如图 4 所示。由于电动升降台移动方向与光斑成像平面接近垂直,光斑在  $x$  方向上的位移近似为 0,因此只讨论  $y$  方向的移动情况。

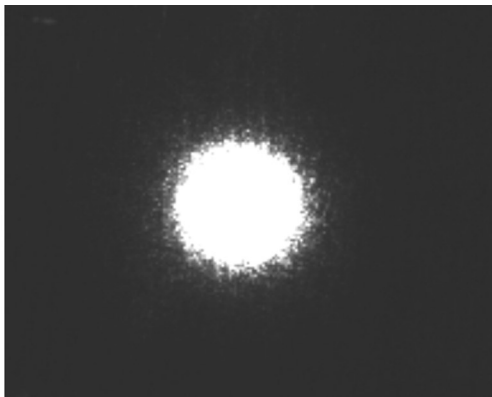


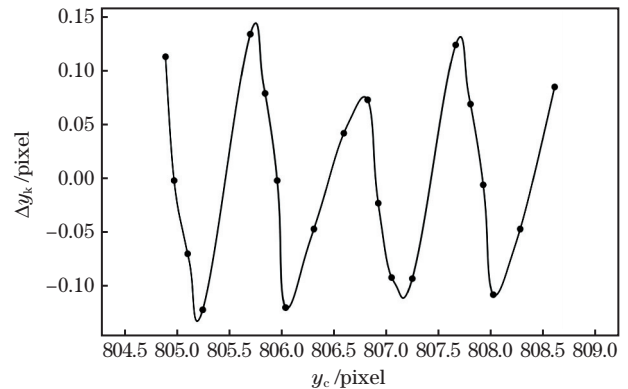
图 4 激光光斑图像

Fig. 4 Laser spot image

### 3.2 误差补偿结果

用质心法对实验数据进行处理,剔除粗大误差,取 5 次实验数据的残差平均值,得到残差与中心位

置的关系,如 5 所示,实验结果与理论仿真一致,残差大致在一个像素内周期性变化,但由于噪声等因素的影响,残差曲线不够平滑。

图 5 实验得到的残差  $\Delta y_k$  与中心位置  $y_c$  的关系图Fig. 5 Measured relationship between residual  $\Delta y_k$  and center position  $y_c$ 

对残差曲线进行非线性最小二乘拟合,误差补偿曲线如图 6 所示。随机选取 10 个点,列出其补偿前后的误差,如表 1 所示,可知补偿后的坐标定位精度明显优于补偿前的定位精度。

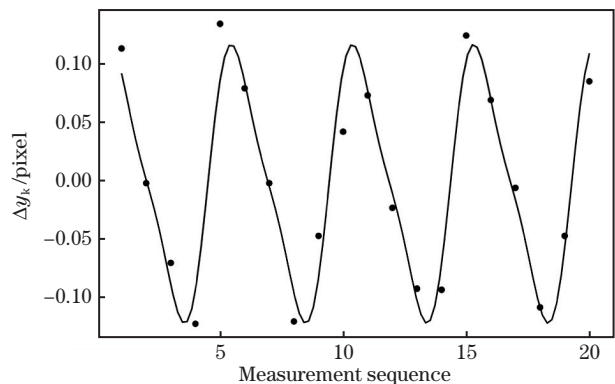


图 6 误差补偿曲线

Fig. 6 Error compensation curve

### 3.3 定位算法精度验证

#### 3.3.1 评价指标选取

激光光斑中心定位算法的常用评价指标为重复性验证和准确性验证。重复性是指在光斑稳定的情况下,在同一位置对光斑进行多次拍摄和测量,对各个测量值与测量平均值的最大差值进行对比分析。准确性是指激光光斑中心坐标测量值与真值的差值。但在实际情况下,无法得知激光光斑中心坐标的准确真值,所以使用直线度来评价定位算法的准确性。当激光光束沿着某一条直线移动时,光斑中心坐标移动路径必定为一条直线,选取拟合直线的直线度作为光斑定位精度的评价指标。直线度越小,表明定位算法的准确性越好。

表 1 误差补偿结果

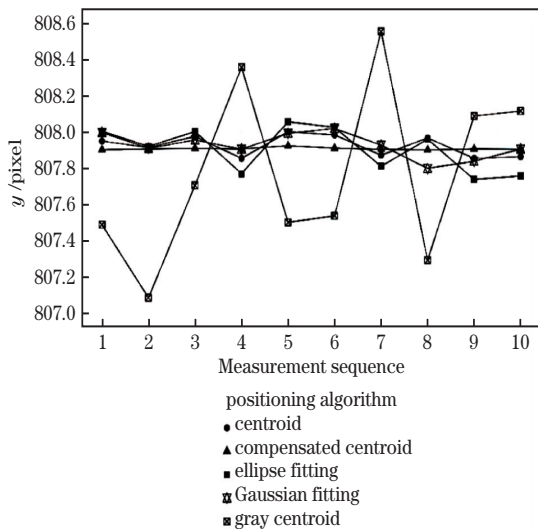
Table 1 Result of error compensation

unit: pixel

No.	Real value $y_c$	Coordinate $y_d$ before compensation	residual $\Delta y_k$ before compensation	Coordinate $y_r$ after compensation	residual $\Delta y_k$ after compensation
1	805.364	805.242	-0.122	805.335	-0.030
2	805.562	805.696	0.134	805.610	0.048
3	805.759	805.838	0.079	805.753	-0.006
4	805.956	805.954	-0.002	805.959	0.003
5	806.153	806.034	-0.120	906.129	-0.024
6	806.351	806.304	-0.047	806.386	0.036
7	806.745	806.818	0.073	806.741	-0.004
8	906.942	806.919	-0.023	806.929	-0.013
9	807.140	807.047	-0.092	806.150	0.010
10	807.534	807.658	0.124	808.555	0.021

## 3.3.2 重复性实验结果

随机选取 10 次实验中某个相同位置的光斑中心坐标的数据结果,由于是在同一位置上拍摄的,光斑中心坐标理应不变。5 种定位算法计算出的  $y$  方向上的光斑中心坐标如图 7 所示。

图 7  $y$  方向上的光斑中心坐标Fig. 7 Spot center coordinates in  $y$  direction

计算这 5 种算法检测结果的残差和标准差,结果如表 2 所示。可以得出:补偿后的质心法重复性最好;质心法、高斯拟合法和椭圆拟合法其次;灰度质心法的重复性较差。

表 2 定位算法重复性分析

Table 2 Repeatability analysis of positioning algorithms

unit: pixel

Algorithm	Residual	Standard deviation
Centroid	0.147	0.059
Gray centroid	1.470	0.482
Gaussian fitting	0.220	0.070
Ellipse fitting	0.318	0.123
Compensated centroid	0.070	0.006

## 3.3.3 准确性实验结果

当电动升降台沿着  $y$  方向移动时,提取的光斑中心坐标在  $y$  方向上也必定为一条直线,将该直线的直线度作为评价定位算法准确性的标准。表 3 为不同步长下 5 种定位算法的直线度结果。从表 2、3 中可以看出,补偿后的质心法稳定性较好,且直线度为 0.12 pixel,远高于其他算法的定位精度,证明补偿方法具有有效性。

表 3 定位算法的直线度分析

Table 3 Straightness analysis of positioning algorithm

Algorithm	Straightness/pixel
Centroid	0.25
Gray centroid	1.47
Gaussian fitting	0.23
Ellipse fitting	0.25
Compensated centroid	0.12

## 4 结 论

为了满足关节型传感器需要对激光光斑中心进行高精度定位的要求,对激光光斑中心定位误差来源进行分析。将误差分为由 COMS 热噪声和环境噪声等造成的随机误差和 COMS 相机离散化采样造成的系统误差。针对随机误差,提出背景阈值法提高图像的信噪比。针对系统误差,根据残差与中心坐标的关系,提出一种基于傅里叶级数模型的补偿方法,并采用非线性最小二乘法对误差补偿模型进行拟合,实现了对光斑中心定位误差的补偿。实验结果表明,所提补偿方法能将质心法的定位精度从 0.25 pixel 提高至 0.12 pixel,优于其他定位算法,是一种切实可行的补偿方法。

## 参 考 文 献

[1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, et al. Overview of

- non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [2] Shu A, Pei H D, Ding L, et al. Binocular visual position and attitude measurement method for a spatial non-cooperative target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1712003.  
束安, 裴浩东, 丁雷, 等. 空间非合作目标的双目视觉位姿测量方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1712003.
- [3] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(2): 149-158.
- [4] Zhou L, Wang Z H, Sun D C, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1869-1878.  
周亮, 王振环, 孙东辰, 等. 现代精密测量技术现状及发展 [J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1869-1878.
- [5] Guo J P, Peng X, Li A, et al. Automatic and rapid whole-body 3D shape measurement based on multinode 3D sensing and speckle projection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8759-8768.
- [6] Xiong S J, Zhao F, Zhao H, et al. Three-dimensional shape measurement system based on auto-synchronous scanners with line structured-light [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(11): 1112004.  
熊胜军, 赵飞, 赵恒, 等. 线结构光自同步扫描三维形貌测量系统 [J]. *光子学报*, 2014, 43(11): 1112004.
- [7] Feng J Y, Chen H Y, Shi C, et al. Three-dimensional measurement of highly-reflective surface using structured light technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(22): 221202.  
冯建洋, 湛海云, 石础, 等. 基于结构光技术的高反射表面三维测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(22): 221202.
- [8] Duan X D, Wu B, Kang J H. Calibration method for spatial pose of laser beam with high-accuracy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0812002.  
段晓登, 吴斌, 康杰虎. 激光束空间位姿高精度标定方法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0812002.
- [9] Kang J H, Wu B, Xue T. Articulated laser sensor for three-dimensional precision measurement [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 121255-121264.
- [10] Kang J H, Wu B, Duan X D, et al. A novel calibration method of articulated laser sensor for trans-scale 3D measurement [J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1083.
- [11] Tang G Q. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center [J]. *Journal of Beijing Institute of Machinery*, 2009, 24(1): 61-64.  
唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较 [J]. *北京机械工业学院学报*, 2009, 24(1): 61-64.
- [12] Shortis M R, Clarke T A, Short T. Comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2350: 1-12.
- [13] Pan D, Li Y L, Gao D, et al. Center extraction method of multiple and overlapping faculae based on ellipse fitting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(14): 1410001.  
潘登, 李艳丽, 高东, 等. 基于椭圆拟合的多光斑/重叠光斑中心提取方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1410001.
- [14] Wu Z K, Li G Q, Wang W T, et al. Laser spot center detection based on improved circle fitting algorithm [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 346-350.  
吴泽楷, 李恭强, 王文涛, 等. 基于改进圆拟合算法的激光光斑中心检测 [J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 346-350.
- [15] Wu D, Lü Q N, Lu L, et al. Spot center extraction based on cross correlation and improved Gaussian fitting [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2017, 28(2): 202-210.  
吴颀, 吕且妮, 卢琳, 等. 基于互相关和改进高斯拟合的光斑中心提取方法 [J]. *光电子·激光*, 2017, 28(2): 202-210.
- [16] Vázquez-Otero A, Khikhlukha D, Solano-Altamirano J M, et al. Laser spot detection based on reaction diffusion [J]. *Sensors*, 2016, 16(3): 315.
- [17] Yang J, Zhang T, Song J Y, et al. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 1002-1010.  
杨君, 张涛, 宋靖雁, 等. 星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 1002-1010.
- [18] Chen Y J, Feng Y, Wei L A, et al. Experiment research on subpixel location error of the facula centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(2): 80-84.  
陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究 [J]. *光电工程*, 2010, 37(2): 80-84.
- [19] Zhu J G, Zou J, Lin J R, et al. Error-compensation algorithm with high-accuracy for photographic image processing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0912004.  
郝继贵, 邹剑, 林嘉睿, 等. 摄影测量图像处理的高精度误差补偿法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0912004.