

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514127

基于反正切边缘模型拟合的激光三角光斑定位算法*

路思意¹, 贾 菊², 南卓江¹, 陶 卫¹, 郑朝晖²

(1. 上海交通大学自动化与感知学院 上海 201100; 2. 上海季丰电子股份有限公司 上海 201100)

摘要:高精度光斑定位算法是保证激光三角位移传感器精度的关键环节,为了解决光照环境变化引起的激光光斑成像不稳定对传感器精度的影响问题,提出了一种基于反正切边缘模型拟合的光斑定位算法。首先采用双向差分对初始光斑信号进行包络提取,以去除底噪、散斑噪声及尖峰噪声等干扰。然后建立反正切边缘模型,通过对反正切函数进行对称移轴处理,得到符合光斑波形特征的拟合函数。为进一步提高拟合精度,推导了具有物理含义的拟合初始参数计算公式,建立了待拟合参数与光斑特征的关系。采用梯度算法提取包络波形的物理特征构建特征集合,由包络物理特征集计算出拟合初始参数,最后通过Levenberg-Marquardt法进行最小二乘拟合求解出待拟合参数,实现亚像素级光斑质心定位。在激光三角位移传感器中验证算法,实验结果表明:该算法在成像光斑呈现淹没、正常及过曝等细节特征缺失情况下,均可将单点测量重复性误差降低至0.04 pixels,传感器全量程非线性误差降至0.02%。该算法通过对光斑强度分布进行数学拟合,降低了传感器对严苛成像条件的要求和激光器调节算法的依赖,且采用单帧处理实时性高,算法复杂性适中,适合高速高精度激光三角位移传感器集成开发。

关键词: 激光三角法;光照变化;反正切边缘模型;包络提取

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

Laser triangulation spot positioning algorithm based on arctangent edge model fitting

Lu Siyi¹, Jia Ju², Nan Zhuojian¹, Tao Wei¹, Zheng Zhaohui²

(1. School of Automation and Intelligent Sensing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 201100, China;
2. Giga Force Electronics Co., Ltd., Shanghai 201100, China)

Abstract: High-precision spot localization algorithms are critical for ensuring the accuracy of laser triangulation displacement sensors. To address the impact of unstable laser spot imaging caused by lighting environment variations on sensor precision, a spot localization algorithm based on arctangent edge modeling is proposed. The method first employs bidirectional differential processing to extract envelope signals from initial spot data, effectively eliminating interference such as background noise, speckle noise, and spike noise. An arctangent edge model is then formulated through symmetrical shift processing of the arctangent function, generating a fitting function that aligns with spot waveform characteristics. To enhance fitting accuracy, physically meaningful initial parameter calculation formulas are derived, establishing relationships between fitting parameters and spot features. A gradient algorithm is used to extract physical characteristics from envelope waveforms, forming a feature set from which initial fitting parameters are calculated. Finally, the Levenberg-Marquardt method is applied for least squares fitting to determine optimal parameters, achieving sub-pixel-level spot centroid localization. Verified through laser triangulation sensor experiments the algorithm shows reduced single-point measurement repeatability errors to 0.04 pixels and full-scale nonlinearity errors to 0.02% across various imaging conditions, including submerged, normal, and overexposed scenarios. By mathematically modeling spot intensity distribution, this algorithm lowers sensor requirements for harsh imaging environments and reduces dependence on laser adjustment algorithms. Its real-time processing capability with single-frame handling, moderate complexity, and suitability for integrated development of high-speed, high-precision laser triangulation sensors make it an ideal solution.

Keywords: laser triangulation; light changes; arctangent edge model; encapsulated extraction

0 引 言

随着工业化进程的不断推进,材料制造精度已经实现了从毫米级、微米级到纳米级的飞跃。光学无损精密测量支撑工业制造不断发展,其中激光三角测量方法以其高精度、非接触、快速响应等特性,在精密制造、半导体加工、航空航天等领域^[1-5]发挥着巨大的作用。激光三角位移传感器可达到亚微米级精度,结构简单安装方便^[6-10],适用于精密仪器设备中的直线距离测量。

激光三角法测量以激光束投射到被测物体表面形成的漫反射光点为传感器信号,其光斑质量严重影响到传感器的精度。经典的定位方法,如加权灰度质心法、高斯拟合法以及高斯模板互相关法,在光斑呈标准高斯分布时能够提供较高的定位精度。王丽丽等^[11]利用光斑图像中的不饱和点对光斑进行高斯拟合,并以拟合函数的幅值点作为光斑中心,利用人工光斑对该算法进行验证,结果表明该算法误差 ≤ 0.1 pixels。鲍勃屹等^[12]提出一种改进高斯拟合的方法实现对标识点光斑中心的定位,首先根据图像中标识点的灰度差异对其进行兴趣区域(region of interest, ROI)粗定位去除背景反光影响,随后对目标图像采用 K 均值(K-means)聚类算法实现目标分割,最后通过剔除中心冗余信息的改进高斯拟合提取标识点光斑中心,其中心提取稳定性误差 < 0.1 pixels。

然而实际应用中,光斑形态往往受到诸多不可控因素的影响而失去标准高斯分布,例如散斑效应导致电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)相机拍摄到的图像中光斑强度不均匀且伴随有较强的噪声以及衍射干扰造成的结果偏差。为应对上述问题,学者们研究了大量解决办法,周兆钦等^[13]提出了一种面向遮挡锥套的定位特征提取算法,设计自适应均值滤波器获取加油口质心信息,提出基于凸包检测的离群点排除算法增强图像特征提取的抗干扰性能,对实际锥套进行特征提取实验较其他经典算法精度上提高了 49.3%,提取误差均值为 0.79%,且在锥套被遮挡的特殊情况下提取误差控制在 2%以内。贺锋涛等^[14]提出了一种基于随机抽样一致算法的水下激光光斑圆拟合中心定位算法,使用随机抽样一致算法剔除噪声数据点的干扰,用圆拟合算法进行光斑中心定位,计算的光斑中心坐标均方根误差(root mean square, RMS)最小为 2.206 3 pixels。Liu 等^[15]提出了一种基于主成分分析(principal component analysis, PCA)的光斑中心定位算法,能够在激光和相机不对准的情况下,精确定位激光光斑中心,并在水下光无线通信系统中取得优异的定位效果,平均定位误差控制在 3 个像素内。传统的方法多侧重于抑制散斑和优化质心提取算法,而

忽视了散斑中潜在的关于物体运动的信息。为解决这一问题,Cui 等^[16]提出了利用散斑模式与被测物体运动之间的相关性进行实时误差补偿的方法,在没有专门散斑减少机制的情况下,该方法能够有效降低测量误差,尤其对于表面粗糙度在 Ra 0.4~3.2 之间的物体,其 RMS 可降到 3~5 μm 。

针对光斑的形状和强度分布变得复杂的问题,吴文波等^[17]通过 SAE(stacked auto encoder)模型自动学习激光图像中的层次化特征捕获激光图像的复杂变化模式并以各个特征像元的空间近邻信息为依据完成激光图像的梯度特征提取,采用形态滤波筛选出激光图像在空间分布上的独特特征,划分网格计算网格可信度和中心坐标,实验表明定位结果与真实值之间的欧氏距离均在 1.5 pixels 以内,定位结果的可信赖程度为 98%左右。为了解决光斑图像的多峰、散斑、平顶及形状变化等问题,解玉成等^[18]提出了一种基于传统灰度重心法的粗定位与距离倒数加权多项式插值亚像素光斑中心定位方法,通过对光斑图像进行中值滤波预处理,利用自适应阈值分割法将光斑与背景分离,最终实现了亚像素级的精确定位,精度可达到 0.01 pixels。

为了在光斑图像特征缺失的情况下仍然精确定位中心,本文提出了一种基于反正切边缘模型拟合的激光三角光斑中心定位算法。该算法利用移轴对称处理的反正切函数能够模拟淹没、正常、削顶光斑波形的特性,对光斑波形进行数学拟合,实现精确的光斑中心定位。反正切边缘模型拟合算法不仅提高了传感器对光照环境的适应性还克服了传统方法的复杂性问题,提升算法的实时性,适合于高速高精度激光三角位移传感器的开发应用。

1 原 理

1.1 激光三角测距原理

常规激光三角位移传感器的测量原理如图 1(a)所示。激光入射到被测物体表面发生漫反射,通过成像透镜投影到高分辨率互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)上成像^[19]激光发射器在生成平行光束的情况下,会通过汇聚透镜将大部分光线聚集在物体表面,形成点状光斑,成像透镜则将其漫射光线反射到线阵 CMOS 上。

当被测表面沿激光束方向移动时,不同位置生成的光斑反射在 CMOS 上生成相应的像,通过测量 CMOS 上所成像的位置,即可测量被测表面在激光束方向的距离。如图 1(a)所示在量程范围内从开始端 A 到结束端 B 的移动过程中所对应得到 CMOS 上光斑波形中心也在像素轴 A' 到 B' 上移动。

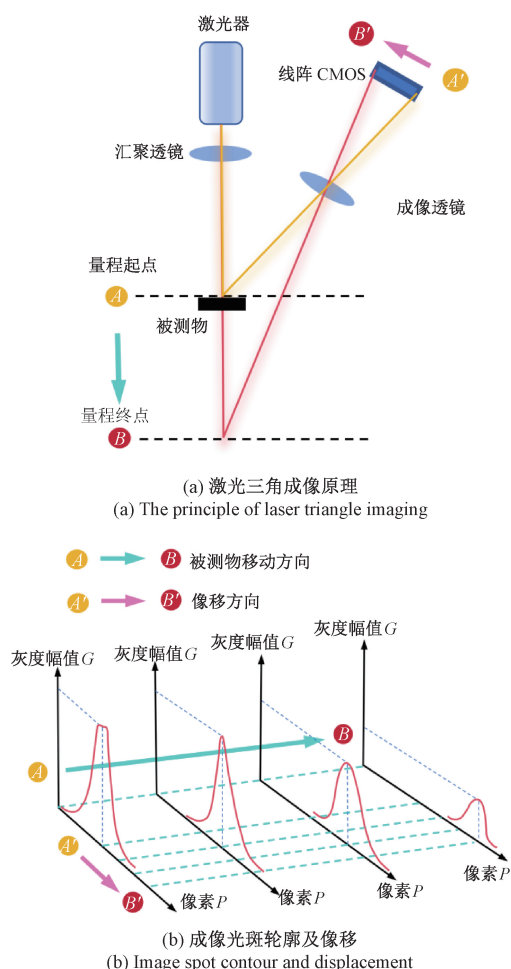


图1 激光三角位移传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of the laser triangular displacement sensor

像的位置一般通过成像光斑的能量中心位置来确定,当被测表面对激光光斑形成均匀散射时,在 CMOS 的像面上生成的像的光强分布与入射到被测表面上的激光束光强分布相似,光斑的能量中心对应激光光斑的中心位置。

1.2 激光器调节算法原理与成像条件分析

在理想情况下,激光光斑能量分布接近高斯分布,其对应的成像光斑中心为波形峰值对应的位置。而波形峰值灰度受激光器功率、曝光时间、反射表面特性、被测物距离共同影响作用^[20]。激光发射器的功率越高,CMOS 受光量越高;设置 CMOS 传感器的曝光时间越长,光斑区域积累光能量越高;被测物体表面反射率越高(如镜面或高反射材料),导致反射光强度大会使 CMOS 接受到的更多的光;被测物距离越近,光损失越少则漫反射光强度越大也会使光敏面受光量增加^[21]。

当被测物在传感器量程的近端时反射光信号过强,CMOS 会产生一个超过模数转换器(analog to digital

converter, ADC) 动态范围的模拟电压信号。ADC 存在固定的最大可转换电压值,该值由 ADC 的分辨率和参考电压决定。如果输入信号的电压超过该最大值,ADC 将无法正确地记录超过部分的信号,导致输出信号达到最大值不再增加,形成了削顶波形。这种情况下,光斑的细节信息丢失,无法准确提取光斑的中心位置。而在物体测量的远端,光信号能量较弱,波形峰值较低,与随机噪声叠加容易淹没于噪声当中而无法被精确识别。

如图 1(b)所示,在激光器功率恒定的情况下,从传感器量程近端到远端成像波形依次呈现出过曝、正常及淹没现象。针对该问题,从硬件方面,可以通过采用数模转换器(digital to analog converter, DAC)模块控制调节激光器功率使各个测量位置波形均满足正常分布,但激光二极管的稳定性差,调节功率时光斑位置会有一些的随机波动,且电路波动会引入随机噪声。

因此可考虑从算法方面,开发一种适用各个测量位置波形特征的光斑中心定位算法,且该算法还需对随机波动具有一定的滤波作用,以保证测量结果的重复性精度。

2 算法提出

2.1 算法整体流程

本文采用的光斑中心定位算法的核心在于将反正切函数进行移轴对称处理后,其边缘形状模型能够对激光三角位移传感器测量过程中出现的各种特征波形进行拟合定位^[22-23]。以点激光为光源的直射式激光三角位移传感器采用线阵 CMOS 作为成像元件,如图 2(a)所示,反射光斑随被测物的轴向移动在线阵 CMOS 上移动,线阵 CMOS 捕获的波形实际为光斑的截面如图 2(b)所示。而光斑截面的能量分布形状可用移轴对称变换后的反正切函数进行模拟如图 2(c)、(d)所示,所以考虑建立反正切函数边缘模型对光斑中心进行拟合定位。边缘模型解析了模型参数 a 、 b 、 c 、 d 、 e 与波形特征之间的关系,波形特征包含波形的定位中心,峰值及半宽,于是可以通过计算模型参数值解算波形中心。

如图 3 所示,算法整体流程包括波形预处理、反正切函数边缘模型建立和最小二乘拟合定位 3 部分。预处理环节包括双向差分去噪和离散波形特征提取,双向差分去噪不仅能滤除原始波形底的噪和多峰,同时保留了原始波形的特征,为后续的拟合处理提供了足够的波形数据支撑。在双向差分去噪的基础上采用梯度算法对离散的波形数据进行特征提取包括半宽、峰值、峰值索引值从而构建特征集合。集合的建立为拟合初始参数计算提供

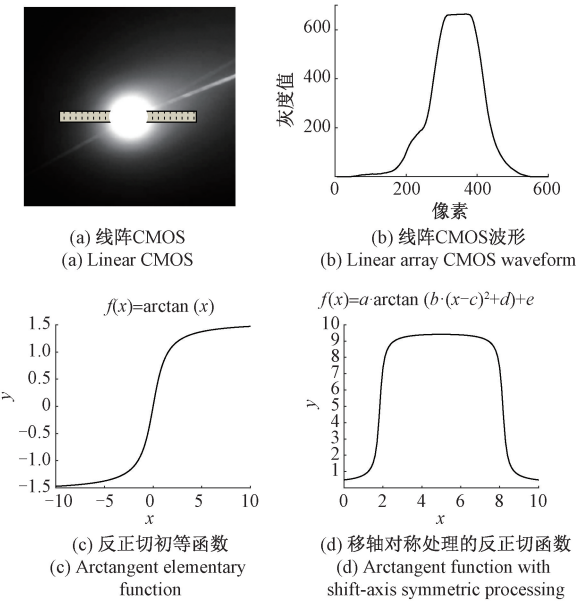


图 2 反正切函数对光斑截面能量分布的模拟

Fig. 2 Simulation of the spot cross-sectional energy distribution using the arctangent function

具有物理意义的数据能够大大提高拟合的精度。反正切函数边缘模型的建立通过对反正切函数进行移轴对称处理得到符合光斑截面波形分布的拟合函数,调整函数参数使其能够模拟出不同成像条件下的光斑波形,包括淹没、正常及削顶波形。进一步推导出波形特征与边缘模型参数之间的解析公式,为拟合定位提供精确的初始参数计算公式。最后将预处理后的波形数据及依据边缘模型计算的拟合初参进行最小二乘拟合,得到波形的中心位置坐标,实现波形中心的精确定位。

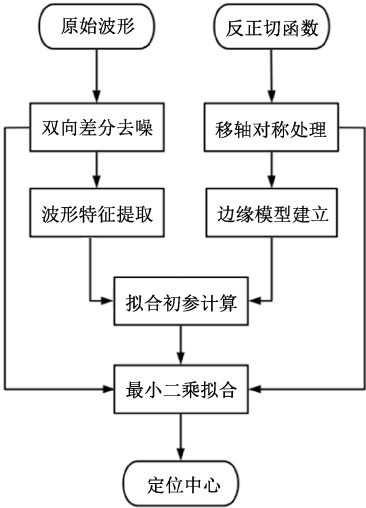


图 3 算法整体流程

Fig. 3 The overall algorithm process

2.2 波形预处理

利用线阵 CMOS 开展激光光斑图像采集时,获取的图像容易包含多种噪声,如图 4 所示,采集的光斑原始波形包含底噪以及多峰,底噪是由于硬件电路的热噪声,多峰则是由于散斑反射。这些干扰数据使得拟合波形无法较好地模拟贴合从而影响光斑定位精度和效率,为解决此问题提出采用双向差分滤波方法对激光光斑图像噪声展开抑制处理。

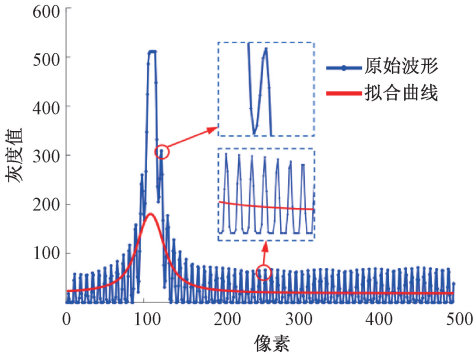


图 4 噪声及多峰现象对拟合定位的影响

Fig. 4 The influence of noise and multi-peak phenomenon on fitting positioning

双边滤波器的好处是可以保留边缘特征,一般用高斯滤波降噪会较明显地模糊边缘,对于高频细节的保护效果并不明显。双边滤波方法能够将图像的空间邻近度与像素值相似度结合处理,保证在保留图像边缘信息的基础上,有效完成对激光三角光斑图像噪声的有效抑制。双向差分分的整体思想是通过作差比较找到像素点领域里的灰度最大的值,领域的宽度即比较点的个数,宽度的设置不能过大也不能过小,过大会失去边缘特征,而过小会使得部分噪声保留。若宽度设置为 3 个像素,则需从第 4 个像素开始前后各进行 3 次比较差分运算,依次遍历循环到第 $n-3$ 个像素,并返回所有局部最大值。双向差分滤波的效果如图 5 所示,多峰及底噪均被滤除,可以看出滤波结果返回的像

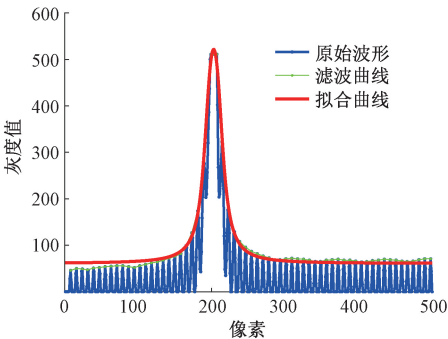


图 5 双向差分滤波效果及对拟合的影响

Fig. 5 Bidirectional differential filtering effect

素点及其幅值即原始波形信号的包络,这极大地保留了原始波形的特征,且采用包络数据进行拟合定位,拟合曲线更加贴合,定位精度更高。

2.3 反正切边缘模型及波形特征识别

以初等反正切函数为基函数进行移轴对称处理。变形后的反正切函数为:

$$f(x) = a \cdot \arctan[b \cdot (x - c)^2 + d] + e \quad (1)$$

边缘模型如图6(a)所示,由式(1)知 a 为函数幅值增益,当 $e = 0$ 时,由于初等反正切函数的值域范围为 $[-\pi/2, \pi/2]$,所以边缘模型 $f(x)$ 的值域下界则为 $-a\pi/2$, e 为值域增量, $e = a\pi/2$ 可使函数的值域落在非负的区域模拟图6(b)波形分布; c 为自变量 x 轴方向的偏移量,即图6(b)中波形的最值索引位置 $x_{\max}Q$; 当 $x = c$ 时 $f(c) = a \cdot \arctan(d) + e$, a, d, e 共同决定了函数的值域范围,即图6(b)中波形灰度最大值与最小值之差 $\max Q = a \cdot \arctan(d) + a\pi/2$, d 为函数 y 轴方向的偏移量, d 和 b 共同作用于函数曲线与 x 轴的交点 $\sqrt{d/b}$ 即图6(b)中波形半宽 D 。

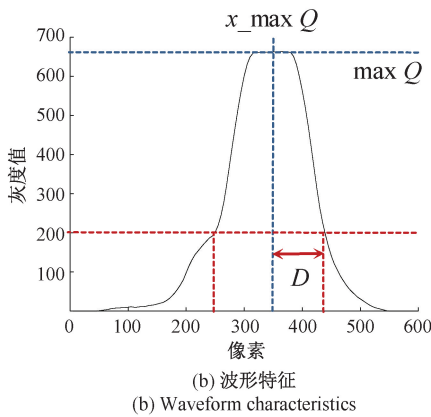
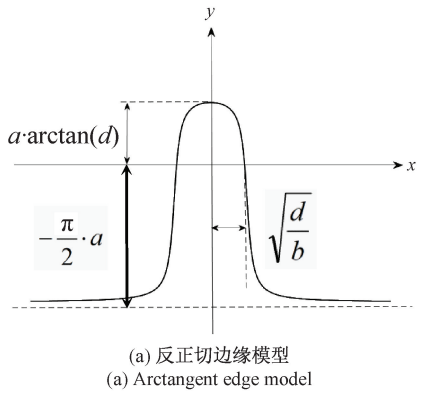


图6 反正切边缘模型参数与波形特征关系

Fig. 6 Relationship between waveform characteristics and edge model parameters

至此,建立了实际激光三角光斑波形特征与反正切边缘模型参数之间的关系。只需获取图6(b)中的波形

特征参数 $x_{\max}Q$ 、 $\max Q$ 和 D 即可通过关系式计算模型参数 a, b, c, d, e 并对光斑进行拟合定位。波形特征参数中峰值 $\max Q$ 及峰值索引 $x_{\max}Q$ 值的提取可采用遍历比较各个像素的灰度采样值。而半宽 D 变化情况复杂,无法采用简单的阈值分割算法,于是提出梯度算法对半宽 D 进行识别提取。梯度算法即根据波形采样值的梯度变化进行识别,根据图6可知 $D = \sqrt{d/b}$,半宽 D 实则为反正切边缘模型与 x 轴的交点即函数零点,此时梯度变化率的绝对值最大,于是对光斑波形相邻的像素点进行梯度运算,梯度极值位置即为波形半宽位置如图7(a)所示,梯度极值为 ± 26 分别发生在像素 119 及 135 处,该梯度极值由像素组 (119, 343) (120, 369) 及像素组 (135, 372) (136, 346) 产生如图7(b)所示,2组像素对应间距均值的一半即为波形半宽则计算出半宽 D 为 8 pixels。

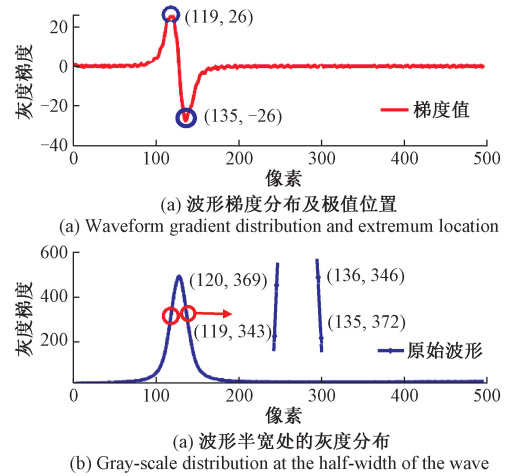


图7 梯度算法计算波形半宽

Fig. 7 The gradient algorithm calculates the half-width of the wave

2.4 最小二乘拟合定位

反正切函数边缘模型是非线性模型,采用最小二乘法求解需要通过迭代优化算法来逐步逼近最优解。本文的迭代过程采用 Levenberg-Marquardt 法。去噪处理后的光斑灰度分布为 G , 采样数据点 $\{(x_i, G_i)\}$, 其中 x_i 表示像素位置, G_i 为对应的光斑灰度采样值,拟合值与采样值之间的残差为:

$$r_i(\mathbf{p}) = F(x_i, \mathbf{p}) - G_i \quad (2)$$

其中, $\mathbf{p} \{a, b, c, d, e\}$ 为反正切边缘模型参数向量。目标是找到一组参数,使得残差的平方和 $S(\mathbf{p})$ 最小。

$$S(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i^2(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \| \mathbf{r}_i(\mathbf{p}) \|^2 \quad (3)$$

采用 Levenberg-Marquardt 法迭代求解目标函数 $S(\mathbf{p})$, 对于每次迭代 k , 计算当前残差向量 $\mathbf{r}(\mathbf{p}_k)$ 及雅可比矩阵 $\mathbf{J}_{ij}(\mathbf{p}_k)$ 。

$$\mathbf{r}(\mathbf{p}_k) = \begin{bmatrix} r_1(\mathbf{p}_k) \\ r_2(\mathbf{p}_k) \\ \vdots \\ r_n(\mathbf{p}_k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$J_{ij}(\mathbf{p}_k) = \frac{\partial r_i(\mathbf{p}_k)}{\partial p_j} \quad (5)$$

构建并计算求解 LM 方程,即:

$$(\mathbf{J}^T(\mathbf{p}_k)\mathbf{J}(\mathbf{p}_k) + \lambda_k \mathbf{I})\Delta \mathbf{p}_k = -\mathbf{J}^T(\mathbf{p}_k)\mathbf{r}(\mathbf{p}_k) \quad (6)$$

其中 \mathbf{I} 是单位矩阵, λ_k 是当前阻尼因子。计算结果可使得参数 \mathbf{p} 更新, 如果满足式(7), 则停止迭代。

$$|S(\mathbf{p}_{k+1}) - S(\mathbf{p}_k)| < \bar{\omega} \quad (7)$$

式中: $\bar{\omega}$ 是一个很很小但不为 0 的值; 最终的参数向量 \mathbf{p}_{k+1} 是最小二乘问题的近似解。迭代算法的收敛性和效率高度依赖于初始参数的选择, 准确的初始值能够帮助算法快速收敛到全局最优解。本文所建立的反正切边缘模型不仅提供的非线性拟合模型, 还给出了初始拟合参数的计算公式, 即:

$$a_0 = \frac{\max G}{\pi} \quad (8)$$

$$b_0 = \frac{-d_0}{c_0^2} \quad (9)$$

$$c_0 = \frac{L_c}{2} \quad (10)$$

$$d_0 = |x_{\max} Q - c_0| \quad (11)$$

$$e_0 = \frac{\max Q}{2} \quad (12)$$

式中: $\max Q$ 是波形峰值; $x_{\max} Q$ 是峰值所在的像素索引; L_c 是波形半宽 D 处索引的均值。由边缘模型给出的初始参数计算结合波形特征具有一定的物理实际含义, 大大提高了拟合定位精度。

3 实验

3.1 实验系统组成

为了验证光斑中心提取方法的有效性, 采用实验室自研激光三角位移传感器 LK-N05, 工作距离 50 mm, 量程 ± 10 mm, 采样频率为 89 kHz, 0.01 ms 采集一帧波形数据, 通过 RS232 总线将光斑波形数据传输到上位机中进保存处理。

实验测试系统如图 8 所示, 由步进电机 (SUMTOR 57HS5630B4)、标准光栅尺 (万濠 WTB5-1100 MM) 的移动平台、传感器 (LK-N05) 构成。传感器固定在导轨前端, 被测物由光学干涉板固定在导轨的移动平台上, 以光栅尺的读数为真值, 通过步进电机使传感器在量程内移动。

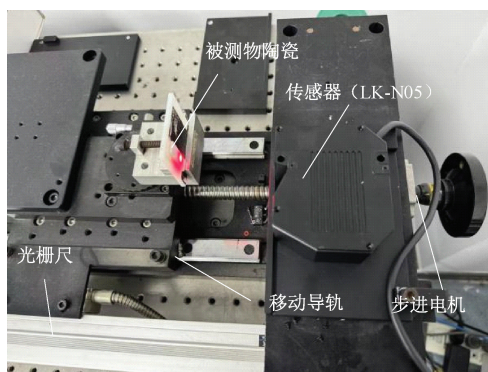


图 8 光斑中心提取实验系统组成

Fig. 8 Composition of the spot center extraction experimental system

3.2 定点调光强重复性测试

实验被测物为白色氧化铝陶瓷, 将其移动至传感器量程中点并固定。激光器由现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 控制发光功率, 调节值可从 150, 按照 50 分度递增, 直至 1 000 为满功率输出。每次调节激光器功率采集 10 组波形数据, 采样间隔为 1 s, 共 180 帧波形数据。采用本文提出的定位算法进行拟合, 不同激光调节值下返回波形定位中心像素如表 1 所示。根据表 1 数据得到每组测量数据的均值分布及误差曲线如图 9 所示, 该测量点像素定位值在 217.5 pixels 附近, 重复性误差不超过 0.045 pixels。

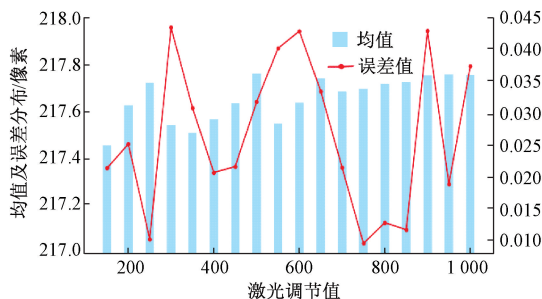


图 9 不同激光调节值下光斑定位均值及误差

Fig. 9 Composition of the spot center extraction experimental system

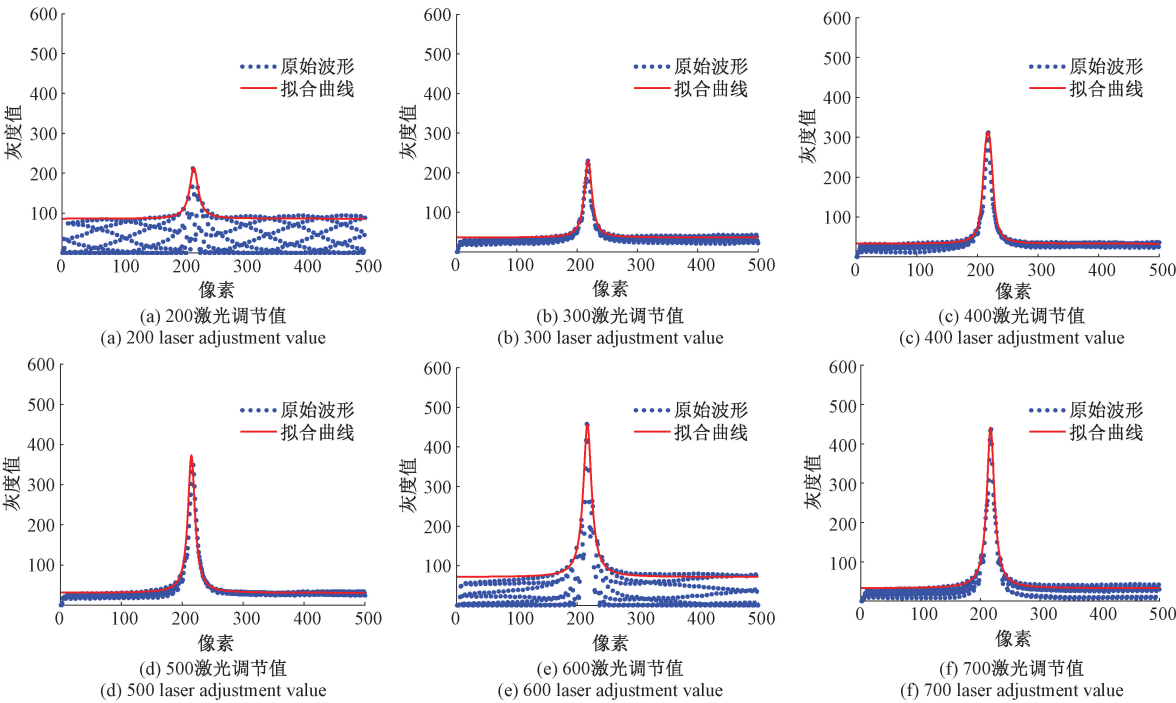
波形图像及拟合情况如图 10 所示, 实验结果表明激光调节值从 200~400 过程如图 10(a)~(c) 所示, 光斑波形噪声明显, 灰度峰值较低, 淹没于噪声信号中; 随着激光功率的增加, 峰值灰度逐渐增加, 500~700 过程如图 10(d)~(f) 所示, 波形具有较稳定的尖峰; 而 700~1 000 过程, 波形峰值超过 ADC 动态范围不再发生变化发生削顶失去峰值细节如图 10(g)~(i) 所示。采用本文算法对采集的数据进行中心拟合定位, 每帧波形均实现拟合定位, 定位中心重复精度可至 0.04 pixels。

表 1 150~1 000 激光调节值下光斑定位中心像素值

Table 1 Pixel coordinates of the spot positioning center under different laser adjustment values

序号	150 激光	200 激光	250 激光	300 激光	350 激光	400 激光	450 激光	500 激光	550 激光
1	217.481 196	217.690 882	217.734 311	217.535 933	217.510 667	217.561493	217.610 456	217.743 002	217.610 114
2	217.431 839	217.594 375	217.724 753	217.519 792	217.569 347	217.456 913	217.657 315	217.776 263	217.601 820
3	217.475 857	217.620 108	217.723 669	217.492 194	217.496 269	217.543 577	217.645 870	217.766 354	217.561 719
4	217.442 099	217.641 666	217.706 551	217.457 551	217.492 809	217.561 767	217.646 843	217.728 580	217.543 461
5	217.443 401	217.636 769	217.721 871	217.548 484	217.446 899	217.560 365	217.654 438	217.746 006	217.505 021
6	217.461 522	217.599 209	217.727 818	217.573 584	217.517 208	217.589 776	217.625 413	217.746 814	217.544 933
7	217.452 049	217.654 107	217.720 577	217.515 835	217.547 637	217.590 283	217.632 855	217.779 724	217.594 799
8	217.451 535	217.628 972	217.710 845	217.533 338	217.566 772	217.577 606	217.613 025	217.796 188	217.666 283
9	217.462 559	217.604 294	217.714 612	217.534 696	217.511 473	217.562 892	217.627 963	217.786 421	217.507 238
10	217.476 847	217.597 016	217.732 274	217.564 911	217.494 535	217.584 766	217.653 247	217.730 696	217.448 954

序号	600 激光	650 激光	700 激光	750 激光	800 激光	850 激光	900 激光	950 激光	1 000 激光
1	217.715 398	217.731 663	217.685 106	217.687 130	217.715 559	217.715 980	217.748 492	217.733 661	217.769 017
2	217.719 581	217.751 267	217.693 549	217.682 392	217.708 097	217.723 696	217.767 569	217.772 479	217.733 422
3	217.648 772	217.743 202	217.696 040	217.710 710	217.723 055	217.740 566	217.773 533	217.746 137	217.751 310
4	217.617 152	217.753 580	217.706 595	217.701 281	217.713 085	217.711 956	217.756 069	217.779 700	217.739 364
5	217.653 958	217.731 840	217.678 394	217.693 534	217.721 984	217.723 419	217.762 538	217.772 061	217.721 751
6	217.629 240	217.646 636	217.697 050	217.705 689	217.714 521	217.724 259	217.764 878	217.745 425	217.778 735
7	217.658 274	217.678 610	217.699 633	217.692 911	217.723 080	217.721 518	217.758 180	217.767 399	217.720 705
8	217.620 624	217.713 714	217.679 365	217.699 432	217.704 238	217.722 119	217.733 686	217.760 669	217.766 555
9	217.638 101	217.682 126	217.659 839	217.706 210	217.735 568	217.732 596	217.765 757	217.740 019	217.796 895
10	217.585 689	217.735 298	217.664 060	217.689 877	217.719 454	217.723 116	217.706 673	217.755 362	217.774 622



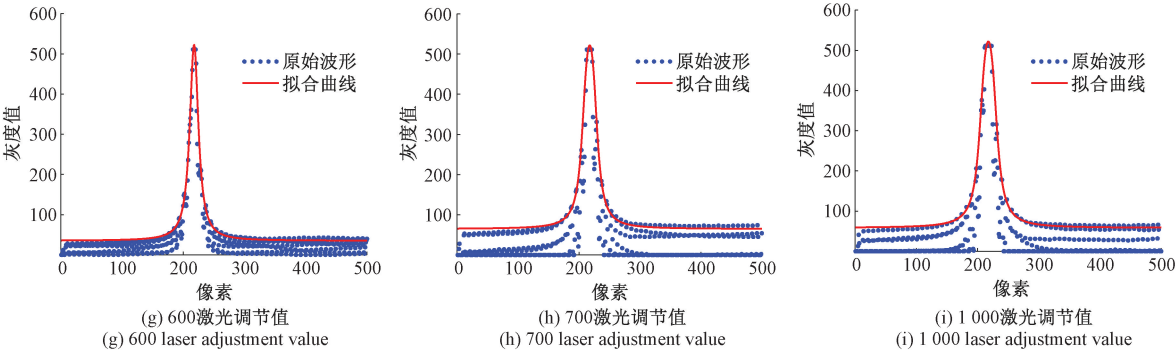


图 10 激光调节过程中的光斑波形及拟合情况

Fig. 10 Spot image and fitting condition during the laser adjustment process

3.3 全量程线性度测试

根据定点调光强重复性测试实验结果,设定激光功率调节值为 800,此时量程中段波形具有较稳定的波峰。被测物由光学干涉板固定在导轨的移动平台上,在量程范围内每隔 400 μm 设置一个测量点,共 50 个测量点,步进电

机带动光学干涉板平台在测量导轨上从量程近端开始依次移动被测物至测量点,由外置光栅尺记录测量点所在的位置,采集每个测量点的波形数据并返回其定位中心。

全量程测量点波形拟合情况如图 11 所示,位置上,在被测物由量程近端到远端的移动过程中波形中心在线

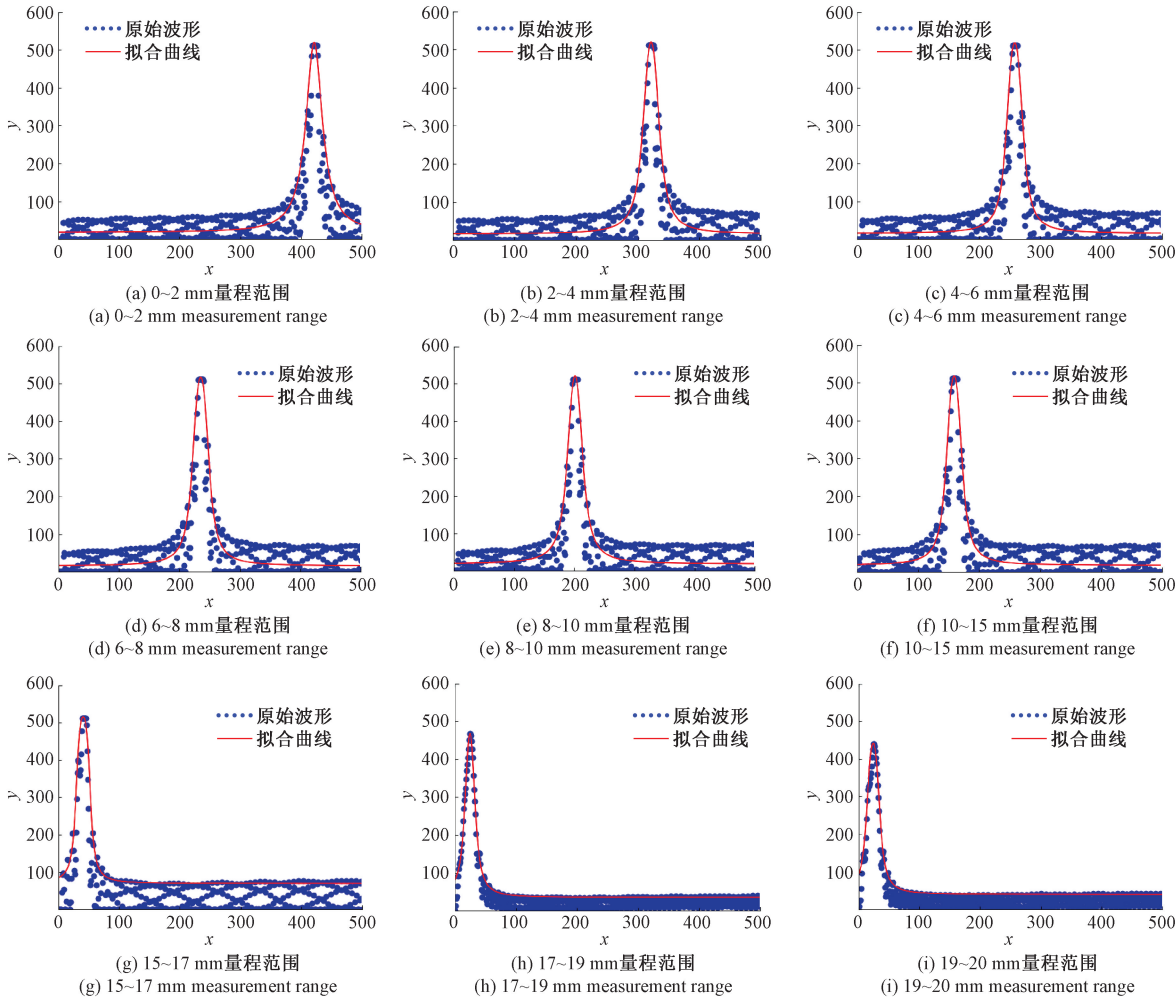


图 11 全量程光斑波形变化及拟合情况

Fig. 11 Full-range spot waveform variation and fitting results

阵 CMOS 上从右往左移动;形态上,如图 11(a)~(f),近端由于距离激光器较近光强度较大波形呈现过曝,随着移动距离增加如图 11(g)~(i)光强度减弱过曝情况逐渐消失,波形峰值减小。全量程所设测试点的波形采用本文算法均能实现拟合定位。

表 2 是传感器在 20 mm 量程内返回的被测物表面在测量点的位移及其所对应的 CMOS 波形中心像素值。将测量位移与光栅尺真实位移对比如图 12 所示,传感器的线性度较佳,测量曲线与真值曲线几乎完全重合,进一步计算非线性误差。

表 2 被测表面沿激光轴位移量与对应的成像光斑在 CMOS 光敏面上的像素值
Table 2 The surface displacement value along the laser axis corresponding to the pixel value of the image spot on the CMOS photosensitive surface

序号	位移 /mm	像素	序号	位移 /mm	像素	序号	位移 /mm	像素	序号	位移 /mm	像素	序号	位移 /mm	像素
1	0.000	467.766 336	11	4.030	365.590 280	21	8.458	250.202 302	31	12.077	160.802 143	41	16.092	82.787 691
2	0.405	471.514 741	12	4.432	354.167 737	22	8.860	240.647 901	32	12.479	152.610 836	42	16.496	74.857 676
3	0.806	446.242 672	13	4.836	342.922 685	23	9.261	231.199 856	33	12.880	144.485 476	43	16.900	66.757 769
4	1.207	430.489 583	14	5.236	332.083 706	24	9.661	222.097 204	34	13.280	136.534 466	44	17.304	58.637 691
5	1.608	433.654 682	15	5.637	321.381 827	25	10.061	213.116 650	35	13.680	128.694 040	45	17.707	50.527 631
6	2.014	425.166 065	16	6.038	310.803 147	26	10.461	204.088 498	36	14.081	120.936 491	46	18.109	42.404 187
7	2.419	412.865 177	17	6.441	300.224 557	27	10.862	195.283 300	37	14.482	113.233 153	47	18.510	34.214 132
8	2.823	496.999 947	18	6.846	289.947 978	28	11.266	186.494 754	38	14.887	105.723 340	48	18.910	26.079 960
9	3.228	388.597 625	19	7.252	279.777 057	29	11.671	177.725 217	39	15.287	98.310 210	49	19.310	17.876 321
10	3.630	379.894 982	20	7.654	269.779 813	30	12.077	169.189 607	40	15.688	90.907 691	50	19.710	9.736 192

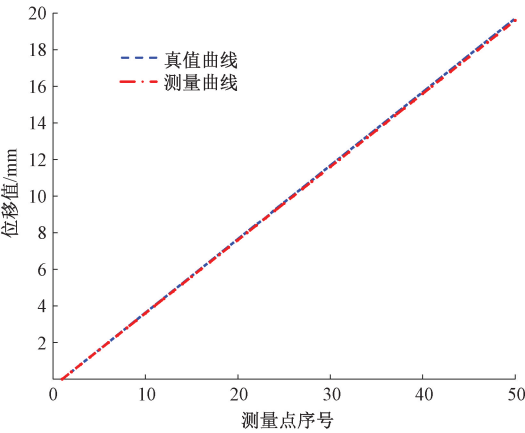


图 12 传感器标定曲线
Fig. 12 Sensor calibration curve

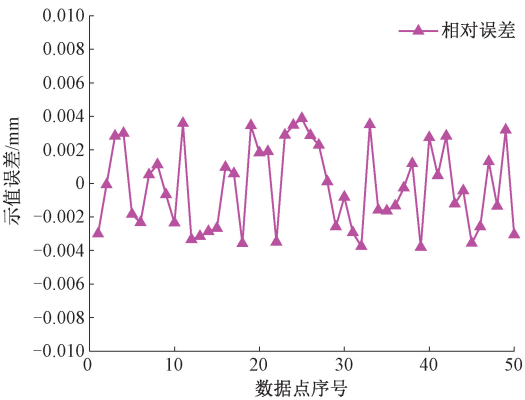


图 13 传感器测试点示值误差曲线
Fig. 13 Sensor test point indication error curve

传感器的非线性误差定义为测量点的最大示值误差与量程之比,即:

$$\xi_{L} = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{y_{F.S}} \times 100\%$$

(13)

图 13 是根据表 2 及图 12 数据绘制的实验结果,在全量程范围内出现的最大示值误差为 0.004 mm,根据式(13),传感器量程为 20 mm,可计算出采用该定位算法的激光三角位移传感器的非线性误差为 0.02%,线性度较佳。

4 结 论

针对激光三角位移传感器测量过程中光斑成像条件不稳定引起波形特征缺失对传感器性能影响的问题,提出了反正切边缘模型拟合光斑中心的解决方法。首先采用双向差分去噪处理原始波形去除底噪和多峰同时保留波形的包络特征,然后建立反正切边缘模型,对反正切函数进行移轴对称处理得到拟合函数,推导拟合参

数与波形特征的关系为拟合初始参数计算提供含有物理意义的公式。采用梯度算法提取包络波形的物理特征构建特征集合,由包络物理特征集计算出拟合初始参数,最后采用 Levenberg-Marquardt 法进行最小二乘计算得到拟合定位中心。经过调整激光功率的重复性测试实验和全量程线性度测试,实验结果表明:在过曝、淹没及正常波形下该算法均能够精确定位激光三角位移传感器波形中心,定位重复精度可达 0.04 pixels。传感器在全量程测量的非线性误差为 0.02%,降低了激光三角位移传感器对于成像条件以及激光器调节算法的依赖,且算法复杂性适中适用于高速高精度型激光位移传感器开发。

参考文献

- [1] 陈旭辉,李兴强,崔昊,等. 基于多波长协作的切削液残留表面激光位移测量误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2023,44(4):151-162.
CHEN X H, LI X Q, CUI H, et al. Displacement error compensation method of laser measurement for surface with cutting fluid residue based on multi wavelength cooperation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4): 151-162.
- [2] 王成武,陆惠宗,吴俊杰,等. 激光三角法位移测量多项式拟合及误差修正[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):1-8.
WANG CH W, LU H Z, WU J J, et al. Study of polynomial fitting and error correction method for laser triangulation displacement measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 1-8.
- [3] 南卓江,陶卫,赵辉. 激光三角测量技术的应用与前景[J]. 自动化仪表,2019,40(12):1-5.
NAN ZH J, TAO W, ZHAO H. Application and prospect of laser triangulation technology[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(12): 1-5.
- [4] 李陈,叶茂,尹奎波,等. 原子制造过程的可视化与原位检测[J]. 沈阳工业大学学报,2024,46(5):702-709.
LI CH, YE M, YIN K B, et al. Visualization and in-situ detection of atomic manufacturing processes[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2024, 46(5): 702-709.
- [5] 崔永俊,张强. 基于激光三角法的火炮身管内径测量系统设计[J]. 电子测量技术,2021,44(9):26-30.
CUI Y J, ZHANG Q. Design of gun barrel inner diameter measurement system based on laser triangulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(9): 26-30.
- [6] YANG Y R, CHEN X H, HUANG L H, et al. High precision and large dynamic range measurement of laser triangulation displacement sensor using diffraction grating[J]. IEEE Access, 2023, 11: 27395-27400.
- [7] YE G Y, ZHANG Y H, JIANG W, et al. Improving measurement accuracy of laser triangulation sensor via integrating a diffraction grating[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 143: 106631.
- [8] 万科,黎荆梅,韩启金,等. “句芒号”激光光斑质心提取方法与稳定性分析[J]. 光学学报,2024,44(6):370-381.
WAN K, LI J M, HAN Q J, et al. Laser spot centroid extraction method and stability analysis of “Gou Mang”[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(6): 370-381.
- [9] 朱庆芹,刘昕伟,孙浩. 激光三角位移传感器误差补偿的建模研究[J]. 激光杂志,2023,44(3):242-246.
ZHU Q Q, LIU X W, SUN H. Modeling research on error compensation of laser triangular displacement sensor[J]. Laser Journal, 2023, 44(3): 242-246.
- [10] 黄志昌,唐诗,陆涛. 基于强化学习的激光三角光斑定位方法研究[J]. 激光杂志,2024,45(10):250-254.
HUANG ZH CH, TANG SH, LU T. Research on laser triangular spot localization method based on reinforcement learning[J]. Laser Journal, 2024, 45(10): 250-254.
- [11] 王丽丽,胡中文,季杭馨. 基于高斯拟合的激光光斑中心定位算法[J]. 应用光学,2012,33(5):985-990.
WANG L L, HU ZH W, JI H X. Laser spot center location algorithm based on Gaussian fitting[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 985-990.
- [12] 鲍勃屹,张辉,朱成顺,等. 基于改进高斯拟合的红外相机视角下标识点中心定位方法[J]. 激光杂志,2024,45(4):59-64.
BAO B Y, ZHANG H, ZHU CH SH, et al. A method for locating the center of identification points from the perspective of infrared cameras based on improved gaussian fitting[J]. Laser Journal, 2024, 45(4): 59-64.
- [13] 周兆钦,赵科东,孙永荣,等. 面向遮挡锥套的定位特征提取方法[J]. 电子测量与仪器报,2024,38(7):208-216.
ZHOU ZH Q, ZHAO K D, SUN Y R, et al. Localization feature extraction method for obscured drogue [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(7): 208-216.
- [14] 贺锋涛,郭少辉,王瑞娜,等. 背景光干扰下水下激光光斑中心定位方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2025,62(5):46-54.

- HE F T, GUO S H, WANG R N, et al. Underwater laser spot center positioning method under background light interference[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2025, 62(5): 46-54.
- [15] LIU W J, JIANG Y Y, HUANG N, et al. Distorted laser spot center positioning based on captured image under laser-camera misalignment in UOWC [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(3): 7302206.
- [16] CUI H, LI X Q, CONG R G, et al. Real-time uncertainty reduction in laser triangulation via dynamic speckle correlation[J]. *Measurement*, 2024, 234: 114842.
- [17] 吴文波, 萧秋兰, 李俊梅. 梯度特征深度学习下激光图像光斑中心定位[J]. *激光杂志*, 2025, 46(4): 134-139.
- WU W B, XIAO Q L, LI J M, Localization of laser image spot center based on gradient feature deep learning[J]. *Laser Journal*, 2025, 46(4): 134-139.
- [18] 解玉成, 孙晓, 于柳, 等. 旋转测量状态下光斑中心定位方法[J]. *机电工程技术*, 2024, 53(3): 45-49, 62.
- XIE Y CH, SUN X, YU L, et al. Spot center positioning method under rotational measurement state[J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2024, 53(3): 45-49, 62.
- [19] 王一帆, 徐欣, 谈宜东. 激光精密测距技术进展[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(6): 22-33.
- WANG Y F, XU X, TAN Y D. Laser precision ranging technology [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2021, 42(6): 22-33.
- [20] 刘凌霄, 王德成, 程鹏, 等. 基于机器视觉的光照强度修正方法研究[J]. *制造业自动化*, 2022, 44(9): 1-4, 35.
- LIU L X, WANG D CH, CHENG P, et al. Research on illumination intensity correction method based on machine vision[J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(9): 1-4, 35.
- [21] 谢忠旭, 王志乾, 沈铖武, 等. 基于光斑轮廓特征的目标快速识别算法研究[J]. *激光与红外*, 2024, 54(2): 289-294.
- XIE ZH X, WANG ZH Q, SHEN CH W, et al. Research on fast target recognition algorithm based on spot contour feature [J]. *Laser and Infrared*, 2024, 54(2): 289-294.
- [22] 孙秋成, 孙维健, 徐中宇, 等. 基于反正切函数拟合的亚像素边缘检测方法[J]. *控制工程*, 2017, 24(4):

905-908.

SUN Q CH, SUN W J, XU ZH Y, et al. Sub-pixel edge detection algorithm based on arctangent function fitting[J]. *Control Engineering of China*, 2017, 24(4): 905-908.

- [23] 张惠, 李国平, 张勇, 等. 基于三维反正切函数拟合的光斑质心提取算法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 268-275.

ZHANG H, LI G P, ZHANG Y, et al. Spot centroid extraction algorithm based on three-dimensional arctangent function fitting [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 268-275.

作者简介



路思意, 2023 年于中国计量大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为现代传感与光学检测。

E-mail: lucy_lusiyi641@sjtu.edu.cn

Lu Siyi received her B.Sc. degree from China Jiliang University in 2023. She is currently a master's student at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include modern sensing and optical detection.



贾菊, 2022 年于江苏科技大学获得学士学位, 现为上海市季丰电子股份有限公司任系统开发高级工程师, 主要研究方向为 FPGA 开发。

E-mail: ju.jia@giga-force.com

Jia Ju received her B.Sc. degree from Jiangsu University of Science and Technology in 2022. She serves as a Senior System Development Engineer at Shanghai Jifeng Electronics Co., Ltd. Her main research interest is FPGA development.



陶卫(通信作者), 分别在 1997 年, 1999 年, 2003 年于哈尔滨工业大学获得学士、硕士、博士学位, 现为上海交通大学自动化与感知学院教授, 主要研究方向为现代传感器、机器视觉、光电检测技术等。

E-mail: taowei@sjtu.edu.cn

Tao Wei (Corresponding author) received her B.Sc., M.Sc., and Ph.D. degrees from Harbin Institute of Technology in 1997, 1999, and 2003, respectively. She is currently a professor with the School of Automation and Intelligent Sensing at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include modern sensors, machine vision and optoelectronic detection technologies.