

文章编号 1004-924X(2025)15-2378-12

激光三角二维速度与距离同步测量

王世纪, 张 浩*, 冯卫帅

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:传统的激光三角测量仅能测量轴向距离,且横向分辨率受表面微观结构的影响,测量精度通常为微米级。为拓展其在工业高精度测量领域的应用范围,提出可同步进行运动物体横向速度与表面轴向距离二维正交测量的方法和一种不受散斑噪声影响的边缘检测轴向距离测量方法。本研究结合直射式激光三角测量传感器所遵循的 Scheimpflug 定律,在理论层面构建被测物横向运动、轴向表面起伏与成像光斑特性变化的映射关系模型。在算法层面,基于几何光学与散斑效应,引入数字图像相关技术捕捉散斑内部纹理位移,并结合 Canny 算子与 Zernike 亚像素边缘检测算法实时定位光斑边缘动态变化,实现了移动表面的横向速度与轴向位置的同步测量。实验结果表明,测量的相对误差和相对不确定度可低至 10^{-4} ,基于边缘检测的横向测量分辨率可提高一个数量级且测量精度达到亚微米级。该方法拓展了激光三角传感器的测量和应用维度,可为多自由度的运动机械、流体力学等动态行为研究提供技术支撑。

关键词:激光三角测量;二维正交测量;散斑效应;数字图像相关;边缘检测

中图分类号:TP394.1;TH744 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253315.2378

CSTR:32169.14.OPE.20253315.2378

Laser triangulation based two-dimensional velocity and distance simultaneous measurement

WANG Shiji, ZHANG Hao*, FENG Weishuai

(College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

* Corresponding author, E-mail: hao.zhang@dlmu.edu.cn

Abstract: The conventional laser-triangulation method is limited to axial distance measurement; its lateral resolution is influenced by surface microstructure, and measurement accuracy typically remains at the micrometer scale. These limitations restrict applications such as obtaining the absolute shape (diameter and microstructure) of rotating workpieces in machine tools from a single axial-distance measurement. The present study introduces a novel method for simultaneous measurement of orthogonal two-dimensional velocity and distance of moving objects. An edge-detection-based distance measurement approach that is robust to speckle noise is also proposed to enhance applicability in high-precision industrial measurements. The method integrates the Scheimpflug principle with laser-triangulation sensors and establishes a theoretical mapping model that relates object lateral motion, axial surface variations, and variations in the imaging spot characteristics. Algorithms are developed on the basis of geometric optics and speckle statistics. Digital image correlation is employed to capture displacements of the speckle pattern's internal texture, while

收稿日期:2025-06-11;修订日期:2025-07-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52205555);辽宁省教育厅面上项目(No. JYTMS20230167)

the Canny operator combined with a Zernike-based subpixel edge-detection algorithm is used to track light-spot edge dynamics in real time. These techniques enable concurrent measurement of lateral velocity and axial position of moving surfaces. Experimental results demonstrate relative errors and uncertainties on the order of 10^{-4} . Lateral measurement resolution achieved via edge detection is improved by an order of magnitude, and axial measurement accuracy reaches the submicron level. The proposed methods extend the measurement capabilities of laser-triangulation sensors and provide technical support for investigations of multi-degree-of-freedom dynamic phenomena, including motion mechanics and fluid dynamics.

Key words: laser triangulation; 2D orthogonal measurement; speckle effect; digital image correlation; edge detection

1 引 言

在高端制造和前沿科研领域,实时距离与速度测量至关重要,如精密仪器的振动诊断^[1]、航天器微米级热变形监测^[2],以及粒子加速器纳米级装配监控^[3]等。尽管传统三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)可实现亚微米精度形貌重建^[4-5],但其接触式测量存在固有缺陷。探针易损伤软脆材料表面,测量效率低下难以满足实时需求,且对高速运动体、复杂曲面及微结构的适用性有限。为突破上述局限,光学测量技术凭借非接触、高精度和快速响应等特性成为研究热点。激光干涉^[6]、飞秒光频梳^[7-8]、光栅位移测量^[9]等方法,虽可达到亚微米级测量精度,但受限于使用成本、整体尺寸、系统集成等因素^[10],仍难以实现工业场景下的大规模应用。

得益于激光技术与光电探测器的飞速发展,激光三角传感器凭借高精度、响应速度快、宽量程以及非接触测量等优势,已广泛应用于几何量测量领域。Bian等^[11]提出一种基于激光三角测量的高温锻件在线检测系统,旨在提高锻造生产线的自动化和生产效率。该系统通过激光三角测量实现高温锻件三维点云成像,可实时监测锻件的温度等关键参数,从而优化锻压设备与工艺。Moreno-Oliva等^[12]利用激光三角测量技术对风力涡轮机叶片的振动模式进行了测量。结合理论分析模型,可高效估算叶片的自振频率和模态参数,且测量相对误差小于1%。Nan等^[13]将激光三角位移传感器应用于分配机器人的定位系统,并提出了一种快速激光调整算法,该算法利用最小二乘法拟合静态波形质心与峰值强

度的关系,优化峰值强度以减小干扰,并通过分析动态波形质心差异区分运动与静止模式,进而优化峰值强度间隔。实验结果表明,该传感器的动态响应时间可达0.5 ms,重复测量精度为2.7 μm 。然而,在对表面材质各异的物体或在不同环境条件下对同一被测物进行测量时,激光三角技术仍然面临着较大的测量误差。为最大限度地减小因光学系统设计缺陷引起的测量误差,Christian等^[14]采用迭代粒子群优化(Particle Swarm Optimizations, PSO)精确标定光源位置,降低系统误差,使X、Y方向测量误差分别由407 μm 和280 μm 降至3.4 μm 和8.3 μm 。陈念年等^[15]通过实验标定获取镜头畸变参数,结合图像校正与亚像素定位算法,将系统测量的均方根误差控制在24.9 μm 。为优化成像光斑处理算法以提高激光三角传感器性能,冯金城^[16]等融合倍频插值与灰度质心方法,开发出高速测距系统。在135 mm量程内,该系统测距精度达到0.03 mm,并实现每秒1 000~36 000个采样的实时测量。桂金瑶等^[17]提出神经网络光斑定位算法,将激光光斑转换为二值梯度图像,由神经网络优化传统算法获得的初始定位结果在强噪声环境下仍保持99%以上的定位精度。

Scheimpflug定律作为提升成像系统景深能力的重要光学原理,已在粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)、结构光三维测量、倾斜摄影、眼科成像等高精度视觉测量领域得到广泛应用,特别适用于解决浅景深条件下成像清晰度不足的问题。近年来,国内外学者广泛开展了基于Scheimpflug几何关系的成像建模、校准算法及三维测量系统的研究,提出了多种改进模

型,以适应线结构光、粒子图像测速和复杂曲面测量等高精度视觉任务。Scheimpflug 成像结构因其独特的楔形景深分布和恒聚焦特性,在解决微小目标清晰成像、增强系统测量稳定性和提高空间分辨率等方面展现出明显的优势,正逐步成为精密视觉测量系统的重要发展方向^[18-20]。

激光三角测量传感器虽已广泛应用于工业现场测量,但当前对该技术的研究主要集中在提高被测物轴向运动距离的测量精度和测量范围,以及优化光斑图像处理算法,而在多维同步测量方面尚处于探索阶段。为拓展激光三角测量技术在多维测量领域的应用,本研究构建了一种原理简明、结构紧凑且成本低廉的直射式激光三角测量传感器。该传感器基于散斑效应与光斑边缘动态变化特性,结合数字图像相关技术与亚像素边缘检测方法,可实现对光学粗糙表面的横向运动速度和表面形貌的同步测量。

2 原 理

2.1 激光三角测量传感器的光学结构

在直射式激光三角测量传感器中,半导体激光器通过光纤发射激光,经非球面平凸透镜准直后垂直入射至被测物表面,覆盖一个圆形照射区域。入射光在光斑位置发生漫反射,反射光经成像透镜聚焦后,在图像传感器 CMOS 的感光面上形成椭圆形光斑。当被测物发生位移时,CMOS 感光面上的成像光斑会随之变化,通过对光斑图像进行数字图像处理即可确定被测物的位移等信息。该系统的光路结构如图 1 所示,其中 α 为

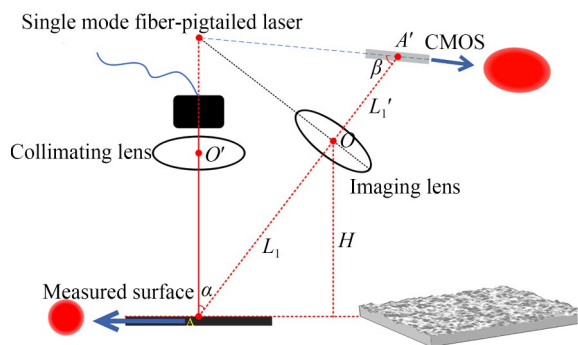


图 1 激光三角测量系统光学结构

Fig. 1 Optical schematic of laser triangulation measurement system

基准面入射光轴与漫反射光夹角, β 为漫反射光与 CMOS 感光面夹角, H 为成像透镜距基准面高度。

利用成像透镜对漫反射光进行聚焦是激光三角测量传感器的核心过程,对于运动中的金属被测物而言,由于成像透镜的景深有限,成像光斑只有在某一特定位置才能被精确聚焦,其余位置均处于离焦状态。这会导致 CMOS 感光平面上的成像光斑变得发散模糊,从而严重影响系统的测量精度。因此,为保证被测物在运动过程中 CMOS 感光面上的成像光斑始终保持清晰的实像,传感器的光学系统结构必须满足 Scheimpflug 成像定律^[21]。即要求半导体激光器的入射光轴、成像透镜的物方主平面以及 CMOS 感光平面的延长线三者相交于同一点,该定律可以表示为^[11]:

$$L_1 \cdot \tan \alpha = L_1' \cdot \tan \beta. \quad (1)$$

2.2 横向测速模型构建

入射高斯光束在被测物表面发生散射时,由于被测物表面结构在微观尺度上凹凸不平,漫反射光在传播过程中将不可避免地引入附加相位差。根据表面粗糙度的不同,附加相位差可达 2π 的若干倍。这些具有固定相位差的漫反射光在空间某一观测点相遇即会发生干涉,若散射光的相位差为 π 的双倍数时,满足干涉相长条件,即光强最大形成亮斑;若散射光的相位差为 π 的单倍数时,满足干涉相消条件,即光强最小形成暗斑;其余相位差不为 π 整倍数的光线相互干涉,其光点亮度就在最小亮度和最大亮度之间。3 种干涉现象随机产生,由此在 CMOS 感光面上形成亮暗分布不均的散斑^[22]。当被测物以一定的速度垂直于入射光方向进行横向运动时,成像光斑内部的散斑纹理即会随之发生相应位移,而光斑整体位置保持不变。

激光三角测量传感器即基于这一散斑效应实现横向速度测量,其原理如图 2 所示。被测物以一定速度进行横向运动时,入射光所覆盖的粗糙表面中某一位置由 M 运动至 N ,与此相对应,CMOS 感光面所捕捉到的成像光斑,其内部纹理由 M' 移动至 N' 。入射高斯光束中心两侧所对应的横向位移与成像光斑内部纹理映射关系不同,以光束中心为界,将移动距离分为 MA 与 AN 分

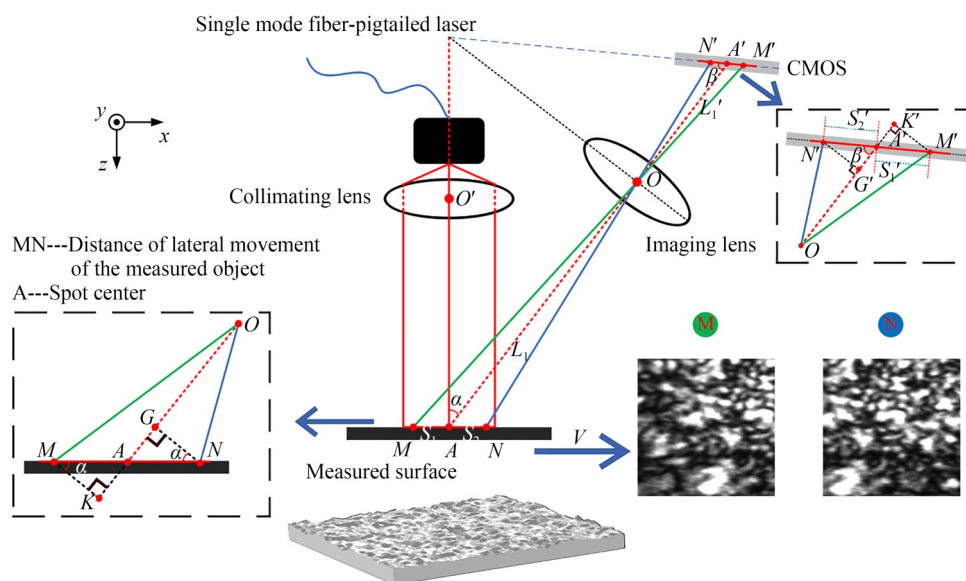


图 2 激光三角测量系统的横向测速原理

Fig. 2 Schematic diagram of lateral velocity measurement principle of laser triangulation system

别进行求解。首先,求解光斑内部左侧移动距离 MA ,两直角三角形 $\triangle OKM$ 与 $\triangle OK'M'$ 相似,进而可得:

$$\frac{OK}{OK'} = \frac{KM}{K'M'} \quad (2)$$

由直射激光三角光路的几何关系可知 $OK = L_1 + MA \cdot \sin \alpha$, $KM = MA \cdot \cos \alpha$, $OK' = L_1' + M'A' \cdot \sin \beta$, $K'M' = M'A' \cdot \sin \beta$ 。其中 $M'A' = S_1'$,是 CMOS 感光面上椭圆形光斑内部相对应的散斑纹理移动距离。 $MA = S_1$ 是激光束左侧覆盖粗糙表面的横向移动距离。

由成像透镜的高斯成像定律可知: $\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_1'} = \frac{1}{f}$, 经过推导 $\frac{1}{L_1'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{L_1}$, 可得 $L_1' = \frac{L_1 \times f}{L_1 - f}$, 式中 f 为成像透镜的理论焦距。联立上述等式,简化得出入射光斑左侧的横向运动距离公式:

$$S_1 = \frac{S_1' \cdot (L_1 - f) \sin \beta}{f \cdot \cos \alpha + S_1' \cdot \left(1 - \frac{f}{L_1}\right) \cos(\alpha + \beta)} \quad (3)$$

同理求解激光束右侧覆盖的粗糙表面移动距离,三角形 $\triangle ONG$ 与 $\triangle ON'G'$ 相似, $OG = L_1 - NA \cdot \sin \alpha$, $NG = NA \cdot \cos \alpha$, $OG' = L_1' - N'A' \cdot \cos \beta$, $N'G' = N'A' \cdot \sin \beta$ 。进行代入简化计

算,即可得光斑右侧的横向运动距离公式:

$$S_2 = \frac{S_2' \cdot (L_1 - f) \sin \beta}{f \cdot \cos \alpha - S_2' \cdot \left(1 - \frac{f}{L_1}\right) \cos(\alpha + \beta)} \quad (4)$$

激光三角测量传感器的横向测速量程,由入射光在被测物表面所覆盖的圆形区域直径所决定。高斯光束的截面半径公式为 $w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\lambda z / \pi w_0^2\right)^2}$, 其中 z 为光束传播距离, λ 为激光波长, w_0 为激光经准透镜会聚后的光束腰半径,由此可确定被测物表面的入射光斑半径为 w_1 。若图像传感器 CMOS 的采集间隔时间为 t , 则激光三角测量传感器可测的最大横向运动速度为 $v_{\max} = \frac{2w_1}{t}$ 。

2.3 轴向起伏测量原理

被测物轴向位移测量是直射式激光三角测量传感器的基本功能。当被测物沿着入射光方向在工作范围内进行整体轴向运动时,高斯光束在被测物表面所覆盖的区域是恒定的,成像光斑在 CMOS 感光面上进行相应的整体移动,而内部纹理不发生任何变化。在这种情况下,通过对成像光斑进行整体定位,确定其前后移动间距,即可计算被测物轴向运动距离。测距原理如图 3(a) 所示。初始对激光三角测量传感器进行标定,基准面所对应的椭圆型光斑位于 CMOS 感光

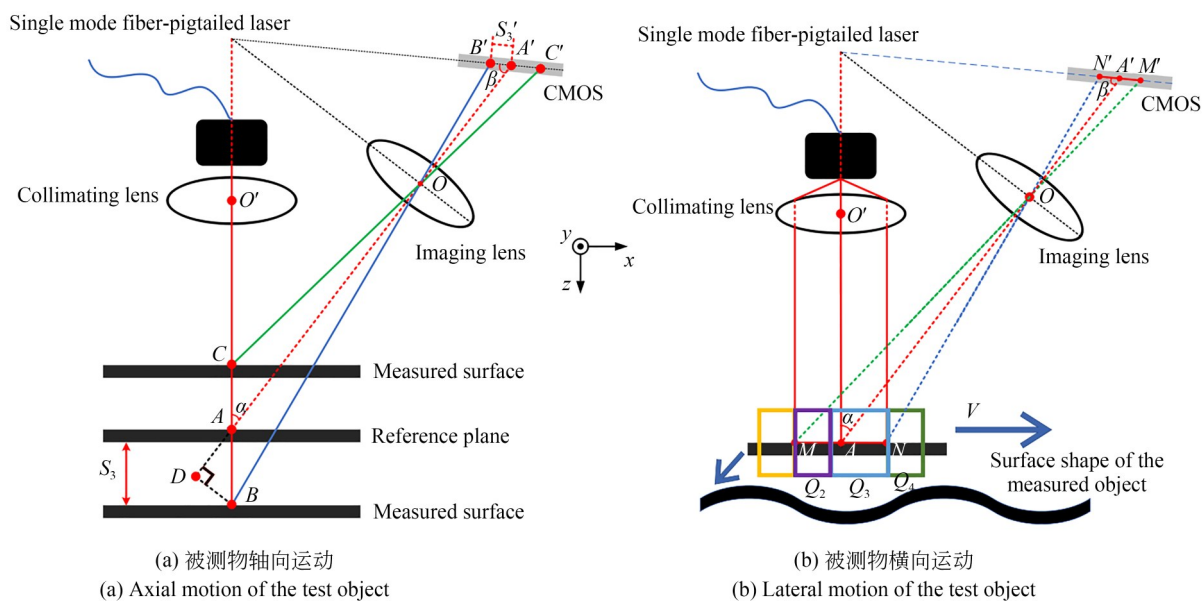


图 3 被测物轴向位移与横向位移的测距原理对比

Fig. 3 Comparison of distance measurement principles for axial and lateral displacement of measured object

面的中心。当被测物相对于基准面向下位移时,椭圆型光斑在 CMOS 感光面上向左移动,反之,椭圆型光斑向右移动。激光三角测量系统量程如下:

$$S_3 = \frac{S'_3 \cdot (L_1 - f) \sin \beta}{f \sin \alpha \pm S'_3 \cdot \left(1 - \frac{f}{L_1}\right) \sin(\alpha + \beta)}, \quad (5)$$

式中: S'_3 为成像光斑在 CMOS 感光面上的间隔值, S_3 为被测物的轴向运动距离。当被测物相对于基准面沿光轴方向向上运动时,量程公式分母取“+”;反之,当被测物相对于基准面向下运动时,量程公式分母取“-”。

当被测物以一定速度垂直于入射光向右进行横向运动,且其粗糙表面具有一定的起伏,表面谷峰至谷底的高度大于激光三角测量传感器的分辨力时,高斯光束所覆盖的被测区域实时发生变化,如图 3(b)所示。CMOS 感光面所采集到的椭圆型成像光斑,其内部纹理在不停地移动,而光斑整体位置保持不变。相对应发生实时变化的是光斑大小,即光斑边缘在发生紧缩或扩张。因此,本文提出了一种基于光斑边缘检测的激光三角测距方法,取代传统的光斑质心搜索法,消除散斑效应对测量结果的影响。

在每次 CMOS 的采集间隔,入射光斑最左侧均会新进宽度为 $v \cdot t$, 高度不定的粗糙表面区域

Q_1 , 并从光斑最右侧顶出去相同宽度的粗糙表面区域 Q_4 。在一次 CMOS 感光面采集中,新进部分 Q_1 代替了原光斑最左侧的 Q_2 位置。由于 Q_1 与 Q_2 的高低不定,成像光斑的边缘变化细分为两种情况。若新进粗糙表面高于原表面,则高斯光束的最左侧部分在 T 点折射角度变大,导致 CMOS 感光面上成像光斑的右边缘向外扩张 p' , 具体光路如图 4(a)所示。此时,利用激光三角测量传感器分母取“+”的轴向测距公式(4),令 $S'_3 = p'$, 即可确定新进粗糙表面较原表面的凸起距离。

若新进表面低于原粗糙表面,且高度变化不大于 $\frac{v \cdot t}{\tan \alpha}$, 高斯光束在 F 点的折射光路可正常在感光面上成像。此时,高斯光束的最左侧部分在 F 点反射角度变小,CMOS 感光面上成像光斑的右边缘向内紧缩,具体光路如图 4(b)所示。利用激光三角测量系统分母取“-”的轴向测距公式(4),令 $S'_3 = b'$, 即可确定新进粗糙表面较原表面的凹陷距离。

为量化被测物横向运动速度对其表面轮廓信息的测量影响,定义动态边缘区域占比为新进入光斑的区域宽度占入射光斑直径的比值。该比值为 $P_{\text{DER}} = \frac{v \cdot t}{2w_1}$, 与被测物横向运动速度 v 成

正比。由于本研究依赖于轮廓边缘信息进行被测物表面轴向距离变化测量,所以横向运动速度越快, P_{DER} 越大,其所覆盖的表面起伏信息越趋

向于平均化或宏观化,从而导致对表面微观形貌细节的辨识能力下降,即测量所能复现的表面起伏精细程度降低。

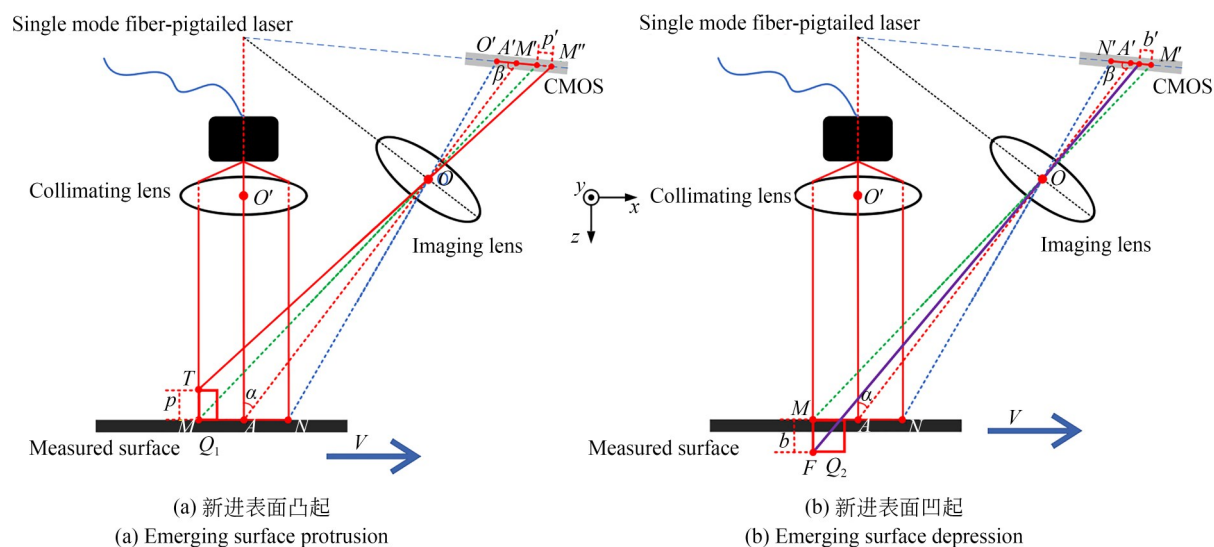


图4 被测物横向位移时表面起伏变化分析

Fig. 4 Analysis of surface profile variations during lateral displacement of measured object

3 数字图像相关与光斑边缘检测算法

3.1 数字图像相关

数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC)通过对图像传感器所捕获的相邻图像进行相关性计算,精确测定被测面的形变与位移^[23-25]。这里利用直射式激光三角测量传感器对金属被测物的横向移动速度进行实时监测时,其核心步骤即可确定CMOS感光面所捕捉到的散斑内部纹理位移值。首先,从基准光斑图中以点 (x_1, y_1) 为中心选取一个半径为 m , $(2m+1) \times (2m+1)$ 像素的正方形子区域,作为参考区域,用 $f(x, y)$ 表示;DIC的任务就是在后续相邻光斑图中搜寻一个以点 (x_2, y_2) 为中心的目标区域 $g(x, y)$,使其与参考区域的相关性最大,此时即可认为点 (x_2, y_2) 就是原中心点 (x_1, y_1) 位移后的所在位置。 $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ 即为散斑内部纹理的移动距离。本文使用零均值归一化差值平方和互相关函数(Zero-Normalized Sum

of Squared Differences, ZNSSD)在散斑内部搜索与基准光斑参考区域最相关的目标区域,具有抗干扰能力强、对光强线性变化不敏感等优势^[26]。

3.2 光斑边缘检测

3.2.1 整像素边缘定位

金属被测物在横向运动过程中,由于表面高度不断的起伏变化,激光三角测量传感器CMOS感光面上椭圆形光斑的边缘也相应地扩张或紧缩。为实时监测成像光斑边缘的动态变化,其定位过程细分为两步:通过传统边缘检测算子确定光斑边缘的整像素位置,在整像素的基础上精确定位边缘的亚像素坐标。

传统的边缘监测技术是基于图像灰度梯度分析,通过计算像素点邻域内灰度分布的一阶或二阶微分特征来实现边缘定位的。本研究综合比较低误判率、高定位精度和抑制虚假边缘3个指标,选定Canny算子进行整像素边缘检测。其核心思想为筛选经过高斯函数处理后的平滑光斑图像转折点作为CMOS感光面上光斑的整像素边缘点。具体步骤如下:

步骤1. 滤波预处理:采用高斯滤波算法对成

像光斑图进行平滑,以抑制图像噪声干扰;

步骤 2. 边缘点提取:基于“非极值抑制”方法,对滤波后光斑的梯度幅值矩阵进行细化处理,初步定位潜在的可能边缘点,确保光斑边缘完整性;

步骤 3. 筛选:通过双阈值检测机制对边缘点进行筛选,剔除伪边缘点,得到可靠的整像素边缘点集合。

3.2.2 亚像素边缘定位

当前,图像亚像素边缘检测算法^[27]主要分为三类:矩方法、插值法与拟合法。在实际测量中,Zernike 矩边缘检测算法不受图像旋转变化的影响且具备良好的抗噪性,因而得到了广泛应用。激光三角测量传感器根据 Zernike 矩的旋转不变性 $Z'_{nm} = Z_{nm} \cdot e^{-im\phi}$,确定成像光斑边缘的 4 个参数:背景灰度 h 、灰度突变 k 、单位圆中心至边缘的垂直距离 l 以及其垂线与 x 轴的夹角 ϕ ,即可实现对光斑边缘的亚像素定位。

图 5(a)为亚像素边缘检测的理想模型。在离散条件下,光斑图 $f(x, y)$ 的二维 Zernike 矩定义为 $Z_{nm} = \sum_x \sum_y f(x, y) \cdot V_{nm}^*(\rho, \theta)$,其中 V_{nm} 为 Zernike 多项式,*表示共轭。图 5(b)为原图绕 y 轴顺时针旋转 ϕ 角度后的光斑图 $f'(x, y)$,直线 L 与 x 轴垂直。由于旋转后光斑图关于 x 轴对称,可推知: $\iint_{x^2+y^2 \leq 1} f'(x, y) y dx dy = 0$, $I_m[Z'_{11}] = \sin \phi R_e[Z_{11}] - \cos \phi I_m[Z_{11}] = 0$ 。再进一步结合光斑图旋转前后的 Zernike 矩关系: $Z'_{00} = Z_{00}$, $Z'_{11} = Z_{11} \cdot e^{i\phi}$, $Z'_{20} = Z_{20}$,化简计算即可确定光斑图旋转角度 ϕ ,圆心距边缘的垂直距离 l :

$$\phi = \arctan \frac{I_m[Z_{11}]}{R_e[Z_{11}]}, l = \frac{Z_{20}}{Z_{11}} e^{-i\phi}, \quad (6)$$

本研究中 CMOS 感光面所采集的成像光斑为离散图像,通过 Zernike 矩定位亚像素边缘是由不同阶次的模板与 CMOS 感光面像素卷积得到的。当采用尺寸为 $N \times N$ 的模板在单位圆内进行采样时,圆的半径为 $N/2$,需将中心点至边缘的垂直距离 l 放大 $N/2$ 倍,以消除因模板放大对光斑边缘亚像素定位所带来的误差影响。成像光斑的亚像素边缘检测基于公式(7),其中 x, y 为

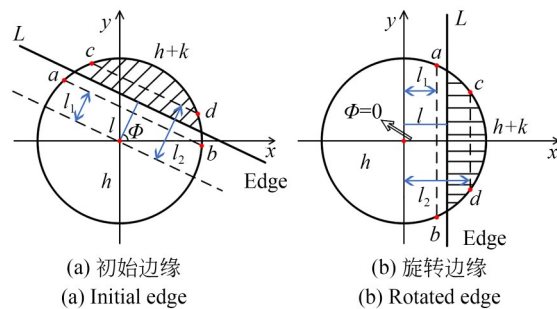


图 5 亚像素边缘检测理想图

Fig. 5 Ideal diagram of subpixel edge detection

Canny 算子检测确定的整像素光斑边缘位置:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{N}{2} \cdot l \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix}. \quad (7)$$

3.3 被测物实时测量算法整体流程

激光三角测量传感器的 CMOS 感光面一帧一帧的持续采集不断变化的漫反射光斑,并实时监测相邻光斑的特征变化,光斑处理算法的详细流程如图 6 所示。在横向测速阶段,CMOS 所采集的每一帧光斑均作为其相邻下一张光斑的基准图进行相应计算。利用灰度质心法确定基准光斑的中心,以 m 为半径创建参考窗口。值得注意的是,在确定 ZNSSD 搜索窗口半径时,需综合考虑计算复杂度、匹配精度与抗噪性能。在相邻光斑内以基准光斑的质心作为中心,创建相同大小的目标窗口,利用 ZNSSD 进行互相关系数的计算。目标窗口以光斑左边缘为始,右边缘为末沿水平方向横向滑动,每经过一个像素点均要计算目标窗口与参考窗口的互相关系数。互相关系数最大的窗口,其中心即是散斑内部纹理横向运动后的整像素点。接着,利用三次样条插值函数对每个像素的互相关系数进行拟合,并在整像素附近确定曲线的局部最大值,最大值所对应的横坐标即为横向运动的亚像素点,除以 CMOS 采集间隔即为横向运动速度。

同步所进行的轴向测距,通过分析目标窗口的横向位移以确定金属被测物的运动轨迹。若被测物相对于激光入射方向向右运动,则重点观察 CMOS 感光面上成像光斑的右侧边缘变化。其核心步骤如下:

步骤 1. 预处理:对相邻光斑进行相同程度的高斯滤波,去除干扰噪声以平滑图像;

步骤 2. 整像素筛选:利用 Canny 算子对光斑进行边缘检测,实现边缘整像素粗定位;

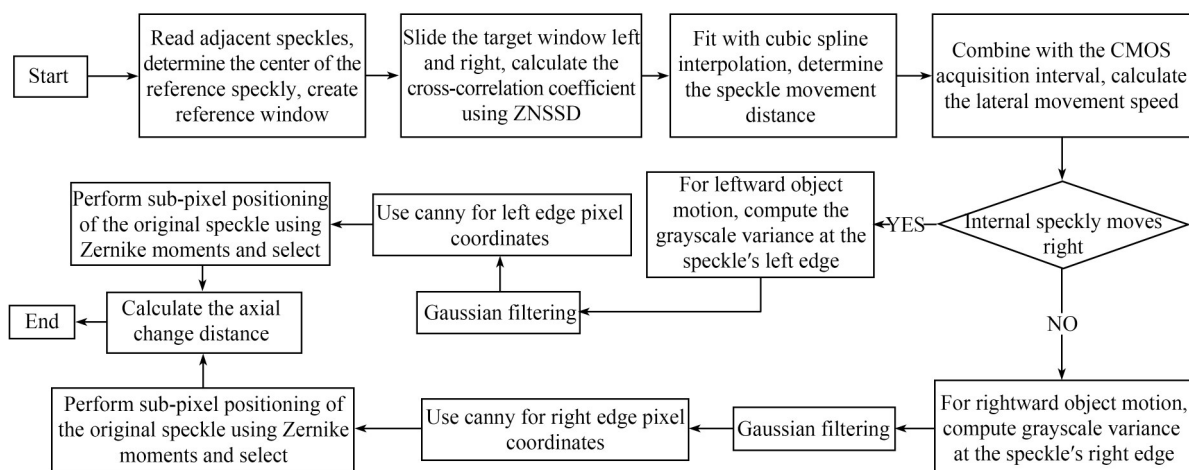


图 6 光斑处理算法流程

Fig. 6 Algorithm flowchart for light spot processing

步骤 3. 亚像素定位:根据 Zernike 矩公式求出模板系数,将模板系数与光斑整像素边缘区域进行卷积得到 Z_{00}, Z_{11}, Z_{20} 。代入式(6),确定相邻光斑的边缘亚像素坐标;

步骤 4. 轴向位移计算:基于光斑新进区域的灰度质心差异,滤除不符合常理的亚像素坐标。计算亚像素边缘位移,代入激光三角轴向测距公式(5),确定表面起伏变化。

4 测量实验与结果

4.1 激光三角测量传感器搭建

为验证激光三角测量系统在被测物的横向运动过程中,可实时测量其横向运动速度与轴向表面起伏的准确性与稳定性,本研究利用精英策略非线性规划遗传算法(Elite-Nonlinear Programming-Genetic Algorithm, E-NPGA)^[22]设计并组建了一个轴向分辨力为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的激光三角测量传感器。该系统的结构参数如下:基准面所对应的漫反射角度 $\alpha = 31.14^\circ$,成像透镜距基准面的高度 $H = 59.27\text{ mm}$,成像透镜的焦距 $f = 25\text{ mm}$,CMOS 感光面与基准面的漫反射光夹角 $\beta = 46.92^\circ$ 。实验平台如图 7 所示。其中,激光由单模光纤(LP660-SF40,波长为 658 nm)射出,经准直透镜(0.5 NA 非球面透镜,焦距为 2 mm)调整后,垂直入射至金属被测物表面形成圆形光斑。被测物固定在两个相互垂直的线性位移平台(分辨力为 $0.018\text{ }\mu\text{m}$, PI 公司)之上。轴向位移平台

通过前后微调,保证被测物处于激光三角测量系统的基准面位置,而横向位移平台控制被测物以不同的速度进行左右横向运动。高斯光束在金属被测物的表面发生漫反射,反射光束经成像透镜(0.2 NA 非球面透镜,焦距为 25 mm)聚焦后在倾斜的 CMOS 感光面(VEN-830-22U3M-M01,大恒图像)上成像为椭圆形散斑。投射到被测表面的光斑直径为 $440\text{ }\mu\text{m}$,图像中散斑区域几何尺寸为长轴长 $1\,022\text{ }\mu\text{m}$ 、短轴长 $772\text{ }\mu\text{m}$ 。在被测物横向运动过程中,CMOS 将以 100 Hz 的采集频率时刻对变化的散斑进行采集,并实时计算被测物的横向速度与轴向起伏高度变化。

4.2 实验结果

在实验过程中,被测物是经平铣处理且符合 GB/T6060.2-2006 标准,表面粗糙度为 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 的金属样块,实物如图 8(a)所示。控制轴向位移平台,保证金属被测物前后微调至激光三角测量传感器的基准面,此时漫反射光成像于 CMOS 感光面的中心位置,成像散斑如图 8(b)所示。

被测物在每一次横向运动之前,微调横向位移平台,使高斯光束入射于金属被测物的最右侧。开启 CMOS 图像传感器采集成像光斑,随后控制横向位移平台以某一恒定速度向右运动 22 mm ,直至高斯光束投射于被测物最左侧。在本研究中,横向位移平台的运动速度将从 1 mm/s 开始,每次增加 1 mm/s 直至 10 mm/s 。激光三角测量传感器对不同的横向运动速度分别重复测量 10 次,以评估系统稳定性。

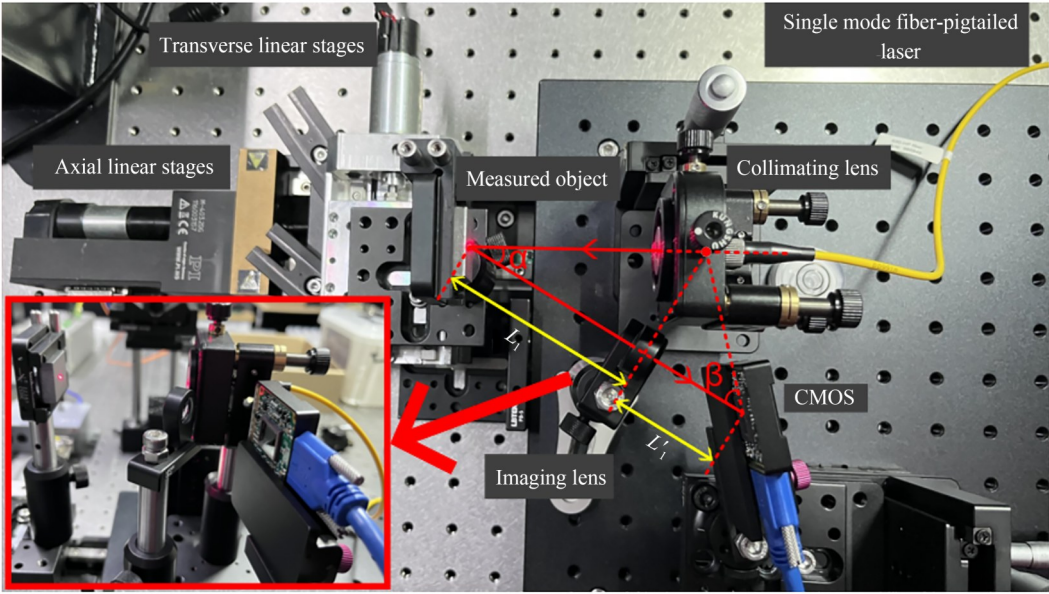


图 7 激光三角测量系统实验平台

Fig. 7 Experimental platform of laser triangulation measurement system

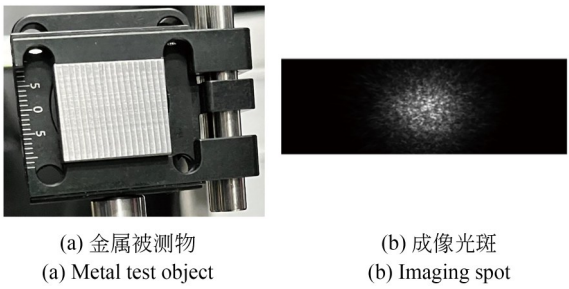
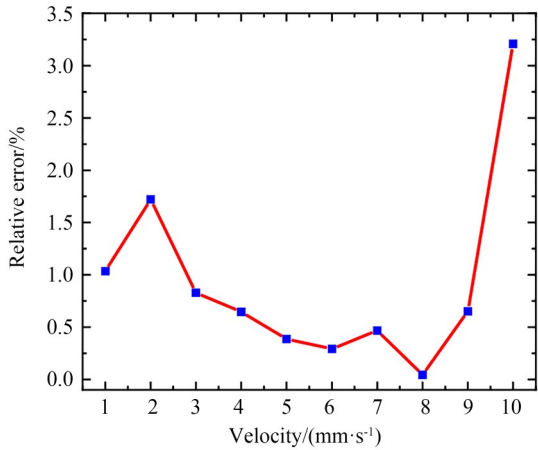


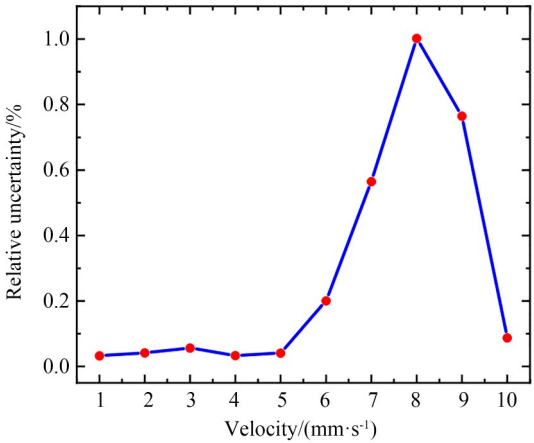
图 8 被测金属实物与散斑图
Fig. 8 Measured metal object and its speckle pattern

图 9(a)和 9(b)展示了以横向位移平台的运动速度为基准,激光三角测量传感器测量金属被

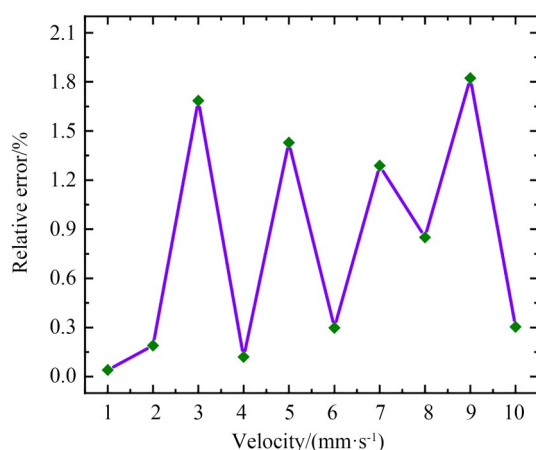
测物横向运动速度的相对误差与相对不确定度。测量误差在工作范围内呈非线性波动,最小相对误差为 0.044%(被测物横向运动速度 $v=8\text{ mm/s}$),最大相对误差 3.209%(横向运动速度 $v=10\text{ mm/s}$),其平均相对误差为 0.93%。测速最小相对不确定度为 0.033%(横向运动速度 $v=1\text{ mm/s}$),最大相对不确定度 1.002%(横向运动速度 $v=8\text{ mm/s}$),其平均相对不确定度为 0.28%。随着横向移动速度的增加,离焦导致相同采样时间下相邻两张散斑图像的差异增大,特别是速度达到 6 mm/s 之后,测速精度出现一定程度的下降。



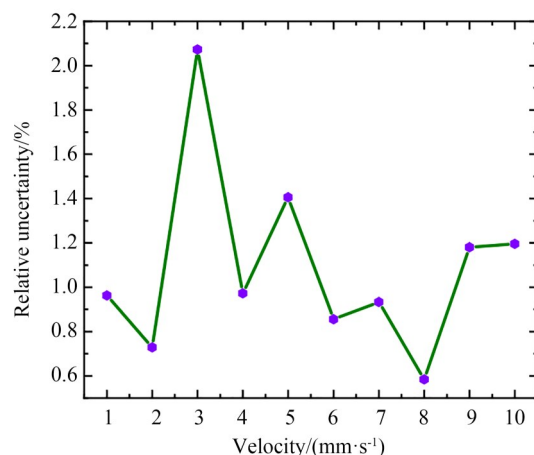
(a) 速度测量的相对误差
(a) Relative error of velocity measurement



(b) 速度测量的相对不确定度
(b) Relative uncertainty of velocity measurement



(c) 表面粗糙度测量的相对误差
(c) Relative error of surface roughness measurement



(d) 表面粗糙度测量的相对不确定度
(d) Relative uncertainty of surface roughness measurement

图9 实验结果

Fig. 9 Experimental results

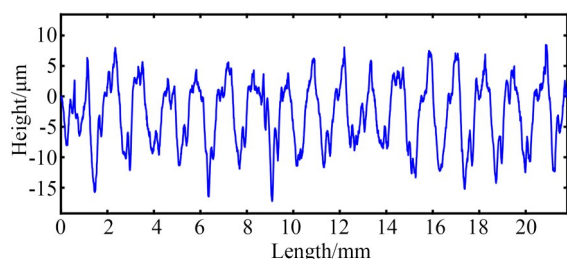


图10 金属被测物表面的二维形貌

Fig. 10 Two-dimensional surface topography map of measured metal object

在轴向测量表面起伏变化过程中,金属被测物的横向运动速度越快,直射式激光三角测量传感器所采集的光斑数据越少,导致还原金属被测物表面形貌时出现一定的误差。因此,本研究根据每个谷峰与谷底之间的平均值进行了误差校正,校正后的金属被测物二维表面形貌如图10所示。

激光三角测量传感器测量金属被测物在不同横向运动速度下,其表面粗糙度的相对误差与相对不确定度分别如图9(c)和9(d)所示。表面粗糙度的最小相对误差为0.04%(被测物横向运动速度 $v=1$ mm/s),最大相对误差为1.822%(横向运动速度 $v=9$ mm/s),绝对误差低至亚微米级。最小相对不确定度为0.584%(横向运动速度 $v=8$ mm/s),最大相对不确定度为2.073%(横向运动速度 $v=3$ mm/s)。同时,横向测量分

辨力 $R_s = v \cdot t$,当 $v=1$ mm/s时为 $10 \mu\text{m}$,相比基于整个光斑区域($440 \mu\text{m}$)的质心测距法,提升了一个数量级(44倍)。导致上述测量不确定度的主要因素包括振动及光电器件产生的噪声、数字图像相关和边缘检测算法的误差以及电控位移台移动速度和位置误差。基于Scheimpflug定律,相比于横向测速,离焦对轴向测距精度影响较小^[22]。

5 结 论

本文提出了可对被测物横向运动速度与表面起伏变化进行实时监测的激光三角测量系统。首先,详细推导被测物横向运动距离公式、轴向运动距离公式与直射式激光三角测量系统所要遵循的Scheimpflug定律。其次,编写核心算法对光斑的实时变化进行处理,利用零均值归一化差值平方和函数对散斑内部的纹理移动进行捕捉,结合Canny算子与Zernike矩实时定位光斑的边缘变化。由此实现对被测物体运动速度与表面起伏变化的实时监测。最后,搭建光学实验平台进行测试,结果表明测量精度可达 10^{-4} ,横向速度测量的相对误差和相对不确定度分别低至0.044%和0.033%,表面粗糙度测量的相对误差和相对不确定度分别达到0.04%和0.584%,绝对误差达到亚微米级,同时横向测量分辨率可提高一个数量级(44倍)。测量中,随着

横向移动速度的增加,离焦会导致相同采样时间下相邻两张散斑图像的差异增大,致使测速精度出现一定程度的下降。另外,振动及光电器件产生的噪声、数字图像相关和边缘检测算法的误差以及电控位移台移动速度和位置误差亦是影响测量精度的因素。

激光三角二维速度与距离同步测量技术拓展了三角传感器的测量和应用维度。在接下来的工作中,将继续进行硬件设计与算法优化,包括通过改进硬件系统结构参数减小离焦效应、使用图像预处理技术降低噪声干扰、改进数字图像

相关和边缘检测算法等,以在工业精密生产中,如车削过程中旋转工件的三维绝对形貌和表面缺陷损伤以及机床主轴多自由度误差和振动原位监测中进行部署和应用。

作者贡献声明:

王世纪:测量实验的设计,数据整理分析,论文构思和撰写;

张浩:测量方法的提出,方案研究,项目管理;

冯卫帅:结果分析,论文编辑。

参考文献:

- [1] SOAVE E, D'ELIA G, MUCCHI E. A laser triangulation sensor for vibrational structural analysis and diagnostics [J]. *Measurement and Control*, 2020, 53(1/2): 73-82.
- [2] 冯晓宇,杜建祥,侯闹,等. 光学系统焦距高精度测试方法[J]. *航天返回与遥感*, 2020, 41(4): 101-110.
FENG X Y, DU J X, HOU N, *et al.* A focal length testing method with high accuracy for the optical system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2020, 41(4): 101-110. (in Chinese)
- [3] HERTY A. *Micron Precision Calibration Methods for Alignment Sensors in Particle Accelerators* [M]. England: Nottingham Trent University (United Kingdom), 2009.
- [4] 何亚雄. 微纳米三坐标测量机空间误差补偿方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
HE Y X. *Study on Volumetric Error Compensation Method for Micro/Nano CMMs* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [5] SHEN Y J, REN J J, HUANG N D, *et al.* Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review[J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(2): 022006.
- [6] 王杰平. 基于光束整形的激光干涉绝对形貌测量传感器关键技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2024.
WANG J P. *Research on Key Techniques of Beam Shaping Based Laser Interferometric Sensor for Absolute Shape Measurements* [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2024. (in Chinese)
- [7] 葛萌,张铁犁,刘浩,等. 量子精密测量技术及其在测量领域的典型应用[J]. *宇航计测技术*, 2023, 43(6): 1-6.
- [8] GE M, ZHANG T L, LIU H, *et al.* Quantum precision measurement technology and its typical applications in measurement field [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2023, 43(6): 1-6. (in Chinese)
- [9] HEI K F, ANANDARAJAH K, MARTIN E P, *et al.* Absolute distance measurement with a gain-switched dual optical frequency comb[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8108-8116.
- [10] 高旭,李舒航,马庆林,等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.
GAO X, LI S H, MA Q L, *et al.* Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752. (in Chinese)
- [11] BOSCH T. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 10.
- [12] BIAN S S, ZHOU P Z, XU J W, *et al.* On-line detection device for high temperature forgings based on laser triangulation [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1885(5): 052035.
- [13] MORENO-OLIVA V I, FLORES-DIAZ O, ROMÁN-HERNÁNDEZ E, *et al.* Vibration measurement using laser triangulation for applications in wind turbine blades [J]. *Symmetry*, 2021, 13(6): 1017.
- [14] NAN Z J, TAO W, ZHAO H, *et al.* A fast laser adjustment-based laser triangulation displacement sensor for dynamic measurement of a dispensing robot[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7412.
- [15] MENTIN C, PRIEWALD R, BRENNER E. Accurate light source position estimation for a laser tri-

- angulation measurement device using particle swarm optimization[J]. *Measurement*, 2018, 125: 406-414.
- [15] 陈念年,张佳成,范勇,等. 一种高精度单点激光三角测距方法[J]. *计算机测量与控制*, 2010, 18(5): 984-986.
- CHEN N N, ZHANG J CH, FAN Y, *et al.* High precision distance measuring using single-point laser triangulation [J]. *Computer Measurement & Control*, 2010, 18(5): 984-986. (in Chinese)
- [16] 冯金城. 高精度实时激光三角测距系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- FENG J CH. *The Design of a Real-time and High-Precision Laser Triangulation System* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 桂金瑶,胡国华. 那神经网络的激光三角位移传感器光斑自动定位[J]. *激光杂志*, 2020, 41(10): 157-161.
- GUI J Y, HU G H. Neural network laser triangle displacement sensor spot automatic positioning[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(10): 157-161. (in Chinese)
- [18] SUN C, LIU H B, JIA M N, *et al.* Review of calibration methods for scheimpflug camera[J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018(1): 3901431.
- [19] 邱召新. Scheimpflug视觉自适应成像及测量方法研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- QIU ZH X. *Research on Scheimpflug Visual Adaptive Imaging and Measurement Methods* [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [20] 钱昱丞. 基于Scheimpflug原理的线结构光测量系统[J]. *信息与电脑(理论版)*, 2021, 33(7): 94-96.
- QIAN Y CH. Line structured light measurement system based on scheimpflug principle [J]. *China Computer & Communication*, 2021, 33(7): 94-96. (in Chinese)
- [21] 冯宇星,郑军,林劲松. 基于恒聚焦光路的线激光视觉传感器的标定方案[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2024, 64(4): 738-748.
- FENG Y X, ZHENG J, LIN J S. Calibration method of laser profiler based on constant focusing optical path [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(4): 738-748. (in Chinese)
- [22] ZHANG H, WANG S J, WANG J P. Automatic optimization design of laser triangulation ranging sensors using an improved genetic algorithm [J]. *Measurement*, 2025, 241: 115739.
- [23] SUTTON M, WOLTERS W, PETERS W, *et al.* Determination of displacements using an improved digital correlation method [J]. *Image and Vision Computing*, 1983, 1(3): 133-139.
- [24] WANG Y H, DAN X Z, LI J R, *et al.* Multi-perspective digital image correlation method using a single color camera[J]. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(1): 61-67.
- [25] LI J R, DAN X Z, XU W, *et al.* 3D digital image correlation using single color camera pseudo-stereo system [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 95: 1-7.
- [26] PAN B. Recent progress in digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2011, 51(7): 1223-1235.
- [27] 马奕. 基于区域灰度模型的亚像素边缘检测研究与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- MA Y. *Research and Implementation of Sub-Pixel Edge Detection Based on Partial Area Effect Model* [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)

作者简介:



王世纪(2000—),男,山东泰安人,硕士研究生,2022年于沈阳工业大学获得学士学位,主要从事激光三角传感器方面的研究。E-mail: w1120220187@dlnu.edu.cn

通讯作者:



张浩(1988—),男,博士,副教授,博士生导师,2019年于德国德累斯顿工业大学获得博士学位,主要从事超精密光学多维感知与测量技术研究,包括基于激光干涉、三角法和计算机视觉的物体三维形貌、微结构、振动原位测量技术和智能传感器系统,及其在先进制造相关领域中的应用。E-mail: hao.zhang@dlnu.edu.cn