

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.03.04

高精度激光自聚焦控制系统的设计与实现

王江萍, 赵春播, 张昱, 马丹妮

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术全国重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 在非合作目标激光测距场景中, 由于非合作目标表面特性复杂多样, 对激光的反射率较低, 且反射光向各个方向散射, 导致返回测量系统的光能量较弱。为实现在非合作目标场景下对激光回光能量的有效收集和光斑的精确聚焦, 设计了一种高精度激光变焦光机及自聚焦控制系统。该系统通过优化光学结构, 采用准直镜组、前端镜组、动镜组、后置镜组和补偿镜组的组合设计, 实现了光束的高效聚焦和能量最大化, 提升了系统在不同测距范围内的信噪比和稳定性; 同时, 优化了光轴稳定性设计和机械结构布局, 提高了聚焦一致性。在控制方法上, 引入基于图像识别的自聚焦策略, 借助高分辨力相机实时捕捉目标光斑, 运用图像处理技术提取光斑直径、形状、清晰度等关键特征, 动态计算最优焦距调整参数, 通过步进电机实现自动闭环调焦。实验结果表明: 该系统在 0.5 ~ 30 m 的工作距离内, 光斑质心偏移量不超过 65 μm , 满足设计要求, 并且能够有效实现光斑聚焦。

关键词: 非合作目标; 变焦光机; 自聚焦算法

中图分类号: TB96; TH122; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 03-0045-13

Design and implementation of high precision laser self-focusing control system

WANG Jiangping, ZHAO Chunbo, ZHANG Yu, MA Danni

(National Key Laboratory of Metrology and Calibration, AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: In laser ranging scenarios involving non-cooperative targets, the complex and diverse surface characteristics of these targets often result in low reflectivity and scattering of reflected light in various directions. Consequently, the optical energy returning to the measurement system is weak. To effectively collect the return optical energy and achieve precise focusing of the laser spot under such conditions, a high-precision laser zoom optical-mechanical system and auto-focusing control system have been designed. The optical structure of the system is optimized by incorporating a combination of collimating lens group, front lens group, movable lens group, rear lens group, and compensating lens group. This design ensures efficient beam focusing and maximizes energy, thereby enhancing the signal-to-noise ratio and stability across different ranging distances. Additionally, the focusing consistency of the system is improved by optimizing optical axis stability and mechanical structure layout. In terms of control methodology, an image recognition-based auto-focusing strategy is introduced. A high-resolution camera captures real-time images of the target laser spot. Image processing techniques are employed to extract key features such as spot diameter, shape, and clarity. These features are used to dynami-

收稿日期: 2025-03-19; 修回日期: 2025-04-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62475246)

引用格式: 王江萍, 赵春播, 张昱, 等. 高精度激光自聚焦控制系统的设计与实现[J]. 计测技术, 2025, 45(3): 45-57.

Citation: WANG J P, ZHAO C B, ZHANG Y, et al. Design and implementation of high precision laser self-focusing control system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(3): 45-57.



cally calculate optimal focal length adjustment parameters, enabling automatic closed-loop focusing via a stepper motor. Experimental results indicate that the system has a light spot centroid offset of no more than $65\text{ }\mu\text{m}$ within a working distance of $0.5\sim 30\text{ m}$, which meets the design requirements and can effectively achieve spot focusing.

Key words: non-cooperative target; variable focus optical machinery; self-focusing control algorithm

0 引言

在激光精密测量、光学检测等领域,激光变焦光机系统因其远距离高精度观测能力而被广泛应用^[1-2]。该系统的核心功能在于通过动态调整激光焦距,实现对不同工作距离目标的精确聚焦和能量接收,从而提升测量精度和系统稳定性^[3]。与固定焦距光学系统相比,变焦光机系统能够在不同焦距范围内灵活调整成像特性,适应多场景、高动态的测量需求^[4]。

非合作目标指无法主动配合测量系统、不具备特定合作标识或信号发射功能的目标物体,如空间中的自然天体、野外的未知物体、战场上的敌方目标等。在非合作目标激光测距的应用中,激光变焦测量系统的设计和应用面临多重挑战,研究者们提出了多种方案,但仍存在以下难点:

1) 回光能量弱,影响测距精度

非合作目标的表面反射特性对激光回波信号有显著影响。ZHU F等人^[5]的研究表明:在远距离非合作目标测距中,由于目标表面粗糙或呈漫反射特性,回光能量在传输过程中大幅衰减,到达接收端时,信号强度可能降至噪声水平以下,严重影响测量系统对目标的探测与识别能力。这使得系统难以获取清晰的目标回波信号,从而无法准确测量目标距离和进行精确聚焦。ZHANG Z等人^[6]提出采用高功率脉冲激光器和低噪声雪崩光电二极管探测器,有效提升了系统对非合作目标的探测距离和回光信号的接收质量。

2) 焦点偏移

当测量系统对非合作目标进行观测时,目标的运动状态、环境因素(如气流、温度变化)以及测量系统自身的振动等,都可能导致焦点发生漂移^[7]。GAO J等人^[8]指出,在实际测量中,目标的微小位移或姿态变化会改变激光束与目标表面的相对角度,进而使聚焦位置偏离预期。在连续变

焦过程中,由于光轴不稳定性或透镜组的机械运动误差,可能导致焦点偏移,进而影响远距离测量精度^[9],因此需要高精度光轴对准和实时反馈控制来校正偏差。徐晨曦等人^[10]提出一种基于荧光成像分析的焦点主动补偿方法。丁伟等人^[11]利用COMSOL软件建立了光学系统模型,模拟计算了不同功率、脉冲宽度、重复频率的激光作用下光学系统温度变化引起的焦点轴向偏移量,并提出通过改变对流系数来控制焦点位置,实现焦点偏移量的有效补偿。

3) 变焦滞后及操作复杂

传统变焦光机系统通常采用步进电机或机械凸轮驱动,其运动速度受限,导致变焦过程较慢,影响系统的动态响应能力。近年来,直线电机和智能伺服控制的引入显著提升了变焦机构的速度和精度,但在复杂测量环境下仍需优化其控制策略。此外,传统的变焦光机系统通常依赖手动调整焦距或外部传感器进行测距和焦距修正,存在操作复杂、测距误差大、环境适应性差等问题。在手动调焦模式下,操作人员需要根据观察到的目标图像或测量结果,手动调整焦距。然而,由于非合作目标的特性不明确,且目标状态可能快速变化,操作人员难以实时准确判断最佳焦距。从发现焦点不准确到完成手动调焦操作,存在明显的时间延迟,即变焦滞后^[12]。在对动态非合作目标进行跟踪测量时,手动调焦的滞后性可能导致目标在调焦过程中已经发生显著位移,使得调焦后的图像仍然无法清晰呈现目标特征,影响测量的实时性和准确性。针对手动调焦滞后问题,许多研究引入自动对焦算法,ZHANG X等人^[13]为了控制实时自动对焦,使用高斯曲线拟合方法处理光斑信息。江小坤^[14]提供了一种智能终端的变焦摄像模组,通过电磁挤压块调节镜头的位置,实现变焦功能。相比传统的手动变焦方式,该方案提高了变焦速度,减少了变焦滞后。

综上所述,在非合作目标下的高精度激光测量应用中,激光光斑的能量强弱、焦点位置、光斑大小及聚焦质量直接影响测量精度。在工业检测中,若焦距未能精准匹配测量距离,激光光斑可能发散变大,降低测量信号的信噪比,从而影响检测精度。因此,如何实现高精度、实时的自聚焦控制,成为当前激光变焦光机系统的重要研究方向之一。本文提出了高精度激光自聚焦控制系统,该系统由高精度激光变焦光机系统(硬件)和基于图像识别的自聚焦控制系统(软件)两部分组成,其中,高精度激光变焦光机系统负责激光的光学传输与变焦调节,自聚焦控制系统则基于图像识别技术实现实时自动聚焦调节。

1 高精度激光变焦光机系统

1.1 光学设计

1.1.1 方案设计

所设计的高精度激光变焦光机系统(后文简称“光机系统”)通过对光学调焦系统的优化,在0.5~30 m的测量范围内,实现635 nm激光的光斑接近衍射极限,并在整个变焦过程中(沿光轴方向定义为Z轴)确保光斑在X轴和Y轴方向的偏移最小化。光机系统采用高精度光栅尺进行变焦镜头动镜位置的实时定位,并通过斜面物理接触型光纤连接器(Angled Physical Contact Fiber Connector, FC/APC)光纤接口进行激光输入,确保光束的高效耦合和稳定传输。

1) 光学镜组设计

光学镜组是变焦光机系统的核心组件,其设计基于ZEMAX软件和CODEV软件进行光学仿真优化,以满足高精度成像需求。通过合理选择光学材料,实现宽波段范围内的色差校正,减少测量时的焦点漂移误差。镜组由动镜组和固定镜组组成,并采用标准化光纤接口设计,以提高光纤耦合效率和安装便捷性,确保测量距离、光斑尺寸等关键光学指标符合系统要求。

2) 光学系统结构

光机系统的光学系统结构如图1所示,主要由变焦镜组和会聚镜组组成。变焦镜组负责调整焦距,实现激光在不同测量距离下的最佳适配,确

保系统的动态适应能力;会聚镜组用于实现光束的精确聚焦,保证激光能量的高效传输,提高测量精度,增强远距离目标的信号回收能力。

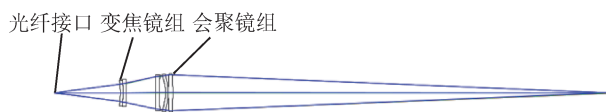


图1 激光变焦镜头光学原理图

Fig.1 Optical schematic of laser zoom lens

1.1.2 变焦曲线设计

在满足光学性能要求的前提下,变焦组件的运动行程与运动轨迹需经过优化分析,确保变焦镜片的平稳运动,并使其位置与不同工作距离精确对应,便于后续电控系统的实现与优化。光机系统中,变焦镜组的最大运动行程不超过23 mm,行程较短,有利于高精度导轨的选型、降低机械结构的复杂性,并保证光轴一致性,确保变焦过程中光学系统的精度。

为研究工作距离与镜组位移之间的关系,本文在光学设计软件中对0.5~60 m的测距范围进行采样。在每个工作距离点,基于光斑最小准则,通过调节动镜组位置获得当前距离下的最优聚焦位置,并记录对应镜组相对位移。将采样点绘制为离散坐标后进行拟合分析,结果表明:以对数函数进行曲线拟合时残差最小,拟合精度最优,优于线性、多项式等其他常用函数形式。光机系统的变焦曲线如图2所示,其中横坐标为工作距离,纵坐标为变焦镜相对于机械基准面的位移。

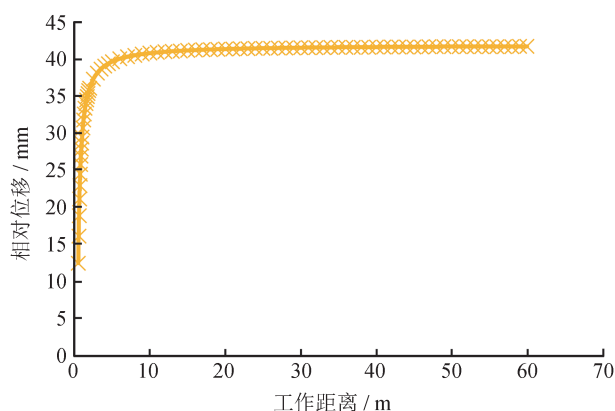


图2 光机系统的变焦曲线

Fig.2 Zoom curve of optical-mechanical system

在测距范围较近($\leq 10\text{ m}$)时, 镜组位移随距离变化较为剧烈; 而在远距离区域, 镜组位移变化趋于平缓。因此, 采用对数函数构建控制模型, 可更有效地反映变焦系统的非线性响应特性, 从而提升焦距, 调整精度与实时性, 增强系统对不同测距范围的适应能力, 并有效减小长距离测量中的焦点漂移误差, 提高系统一致性和测量精度。

1.2 结构设计

光机系统的结构设计如图3所示。

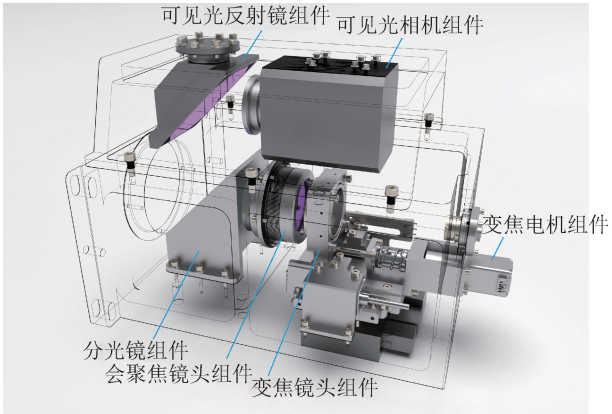


图3 光机系统的结构设计

Fig.3 Structural design of optical-mechanical system

图3中, 变焦镜头的机械结构是光学系统的重要组成部分, 其核心功能是固定与装配光学镜组, 并确保系统在变焦、对焦过程中保持高精度和高稳定性。为实现系统的高精度运动控制, 机械结构的优化设计涵盖镜筒固定、动镜组机械设计、运动控制与反馈等方面。

1.2.1 镜筒与镜片固定

光机系统的镜筒采用高精度定心车加工工艺,

以确保各光学镜片的同轴度和装配一致性。定心车工艺能够显著降低镜片安装误差, 减少光轴偏移对成像质量和激光聚焦精度的影响, 提高系统的光学性能和长期稳定性。

具体装配方案为: 物镜组件通过6个M2.5螺钉安装于主框架。移动模块组件通过8个M3螺钉通过4顶4拉的方式安装于主框架上, 后续通过螺钉顶拉精密调整移动镜片光轴一致性。反射镜组件通过6个M3螺钉固定在主框架上。上盖组件通过6个M4螺钉固定在主框架上, 上盖组件和主框架之间有2个直径5 mm的定位销, 以保证重复拆装精度。

1.2.2 动镜组机械结构

动镜组的机械设计直接决定了变焦系统的精度和稳定性。光机系统采用超高精度单导轨结构, 选择THK精密级型导轨, 行走平行度的值可以达到 $2\text{ }\mu\text{m}$, 确保变焦过程中镜片组的稳定运动轨迹, 减少机械抖动对光学系统的干扰, 从而提升测量精度和重复稳定性。

1.2.3 运动控制与反馈

动镜组采用精密传动机构与电机控制系统, 配备高精度光栅位置传感器, 提供纳米级精度的位置反馈, 电机采用直线步进电机加消除螺母的组合结构, 主要实现高精度控制, 最小步距为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。步进电机与电机驱动器的规格参数如表1所示。

结合运动控制算法, 可实现精准的焦距调整, 提高激光自聚焦系统的响应速度和稳定性, 确保测量精度的可靠性。

表1 步进电机与电机驱动器规格参数

Tab.1 Specification parameters for stepper motors and motor drivers

参数	电压	外形尺寸	步距角/细分设定	保持力矩
步进电机	2.5 V	21 mm × 21 mm × 28 mm	1.8°	$\geq 0.12\text{ kgf}\cdot\text{cm}$
电机驱动器	18 ~ 40 V 直流电压	55 mm × 86 mm × 21 mm	128 细分(二进制)	-

2 基于图像识别的自聚焦控制系统

为了确保基于图像识别的自聚焦控制系统(后文简称“自聚焦控制系统”)在不同测距场景下的

稳定运行与精确聚焦, 选用了一系列性能稳定、参数可调的核心器件, 共同构成了高精度、自闭环的自聚焦控制系统。自聚焦控制系统的光学、成像与执行组件的主要技术参数如表2所示, 涵盖

表2 自聚焦控制系统核心器件表
Tab.2 Core components list of self-focusing control system

组件名称	型号规格	核心参数描述
指示激光器(可见光)	635 nm红光激光模块	输出功率 60 mW 连续模式 用于目标对准与聚焦辅助
成像相机组件	CMOS ICR 一体机芯	帧率 ≥ 20 f/s 30 倍光学变焦 聚焦光斑尺寸: 衍射极限
变焦镜组	前端镜组、动镜组、后置镜组	通光直径 ≥ 40 mm 镜组长度 ≤ 200 mm 设计波长: 635 nm
步进电机 + 丝杆模组	21 mm × 21 mm × 28 mm	步距角: 1.8° 最小控制步距: 5 μm 保持力矩 ≥ 0.12 kgf·cm 导程: 0.050" 螺杆直径: 4.78 mm
光栅尺及编码器(位置反馈)	RESOLUTE 绝对式光栅 + 编码器	分辨力 1 nm 测量速度 100 m/s
控制器	树莓派 + 步进电机驱动模块	支持脉冲-方向 / 双脉冲控制 通信接口支持 RS485 / UART 支持光电隔离输入

激光器、图像采集、驱动机构等关键组件。

2.1 光斑图像获取与预处理

自聚焦控制系统利用高分辨力相机采集目标表面反射的光斑图像，并通过一系列预处理操作减少噪声，提高信号质量。由于环境光照、传感器噪声等因素的影响，直接使用原始图像进行聚焦评价可能会引入误差。因此，图像预处理包括以下步骤：①去噪处理：采用高斯滤波降低随机噪声，提高信噪比；②灰度化处理：将彩色图像转换为灰度图像，减少计算复杂度，并增强光斑对比度。

2.2 光斑聚焦判定参数

在自聚焦控制系统中，单一指标难以全面衡量光斑是否处于最佳聚焦状态。因此，自聚焦系统使用基于光斑直径、光斑中心位置、光斑形状特征及清晰度评价函数的多维聚焦判定标准，以提高系统对焦判断的精度、稳定性和适应性。自聚焦控制系统使用高斯拟合等方法处理光斑信息，通过多参数融合评估光斑状态，从而指导步进电机调整焦距，实现自动聚焦。本文采用三类核心

指标衡量光斑的聚焦状态：

1) 光束宽度(X 、 Y)

光束宽度是最基本的聚焦判定指标，当光束宽度最小时，理论上对应最佳聚焦状态，但由于光学像差、环境干扰等因素，仅依赖光束宽度可能导致误判，需要结合其他指标进一步分析。

2) 光斑椭圆率(E)

光斑形状的变化可用于判断是否存在像差或非理想散焦现象，采用椭圆率进行分析，计算方式如式(1)所示。

$$E = \frac{a}{b} \tag{1}$$

式中： a 和 b 分别为光斑的长轴长度和短轴长度。当椭圆率等于1时，表示光斑为理想的圆形；当椭圆率大于或小于1时，表示光斑呈椭圆形，且偏离圆形的程度越大，越可能存在光学畸变或失焦现象。

3) 清晰度评价函数(F)

清晰度评价函数用于量化光斑图像的锐度，提高聚焦判定精度。Tenengrad 清晰度评价函数是一种基于图像梯度的无参考图像清晰度评价方法，

其核心思想为：清晰的图像具有更大的梯度变化，因而其梯度能量总和较高；模糊图像则相反。本研究采用 Tenengrad 梯度函数作为光斑图像清晰度的评价函数，计算方式如式(2)所示。

$$F = \sum_{x,y} (G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2) \quad (2)$$

式中： $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别为图像在 x 方向和 y 方向上的梯度， G_x 和 G_y 为通过 Sobel 算子计算得到的梯度值。清晰度评价函数的评价值为无单位的大整数，数值越大代表图像越清晰。

2.3 光斑自聚焦控制方法

自聚焦控制系统采用闭环反馈控制策略，结合图像识别、清晰度评价与电机控制，实现高精度自动聚焦。其核心目标是确保光斑在测量过程中实时调整焦距，始终保持最优聚焦状态。其流程如下：

1) 光斑图像采集与分析

相机实时获取光斑图像，并通过 2.1 小节所述步骤进行图像预处理。

2) 焦距调整

为提升对焦效率，自聚焦控制系统采用粗调与细调双阶段调焦策略。

粗调阶段，系统的首要任务是快速锁定初步聚焦范围，以此降低初始失焦误差。具体操作是通过光束宽度(X, Y)计算光斑直径 D ，并将其与经验阈值 D_{th} 进行比较。若 $D > D_{th}$ ，意味着系统当前远离焦点位置，此时系统会驱动步进电机执行大步长搜索，使光斑直径不断缩小；当光斑直径成功缩小至 $D \leq D_{th}$ 时，粗调阶段结束，系统随即进入精调阶段。

精调阶段，系统着重于焦距的精细化调整，以进一步提升聚焦精度。此时，系统会同时监测多个关键指标：①持续关注光斑直径 D 的变化趋势；②计算光斑的椭圆率 E ，并与经验阈值 E_{th} 比较，判断椭圆率的变化情况；③运用 Tenengrad 梯度函数计算图像清晰度评价函数值，观察其变化走向。若在精调过程中，光斑直径 D 呈现变小趋势，同时椭圆率 E 逐渐接近于1，且图像清晰度评价函数值持续上升，说明聚焦状态在不断优化，系统将持续微调焦距。一旦出现光斑直径不再变

小，或者椭圆率和图像清晰度评价函数值中有未按预期范围变化的情况，系统将立即停止当前调整操作，并返回至上一个光斑直径、椭圆率和图像清晰度综合表现最佳的状态，判定为最佳聚焦点。

3 实验设计与结果

为确保系统验证过程中光轴的稳定性，实验采用五维微调平台对变焦镜头进行高精度安装与姿态调整，底座为长导轨大理石平台，具备优良的热稳定性与抗震能力。实验室内温度控制在 $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，避免外部热扰动干扰系统测量性能。虽然当前验证环境已具备一定的隔振能力，但后续仍需在实测场景中引入温度与振动干扰源，进行鲁棒性评估与补偿优化。

3.1 光机系统的光学结构验证

为了验证变焦光机系统的光学结构是否符合设计要求，实验将测试：①评估光学像差对 635 nm 光斑尺寸的影响，验证光机系统的聚焦性能及像差控制能力；②635 nm 光斑在不同测量距离下的位置一致性，评估红光的聚焦效果和成像稳定性。

3.1.1 实验装置与布局

实验装置由待测镜头、直线长导轨、五维位移台、635 nm 激光器(FC/APC 接头)、测试夹具、测试面板、水平仪以及驱动控制装置及其上位机软件组成。其中，驱动控制装置及其上位机软件主要包括镜头电机驱动及其控制软件(用于控制变焦镜头动镜的移动)、变焦镜头光栅编码器的 BiSS 转 485 模块及读数软件。

实验系统如图 4 所示，变焦镜头安装在五维调整台上，并放置于长导轨大理石台面。该平台可提供高精度的位移调整，确保实验过程中光轴高度和系统对准的稳定性。

变焦镜头通过五维调整台固定在长导轨大理石台面上，通过水平仪监测变焦镜头的水平状态，确保实验过程中光轴保持水平。设定 5 个测试点，分别位于距变焦镜头 1.95、14.95、20.95、26.95、32.95 m 处，每个测试点均保持与光轴等高，确保测试结果的可比性。

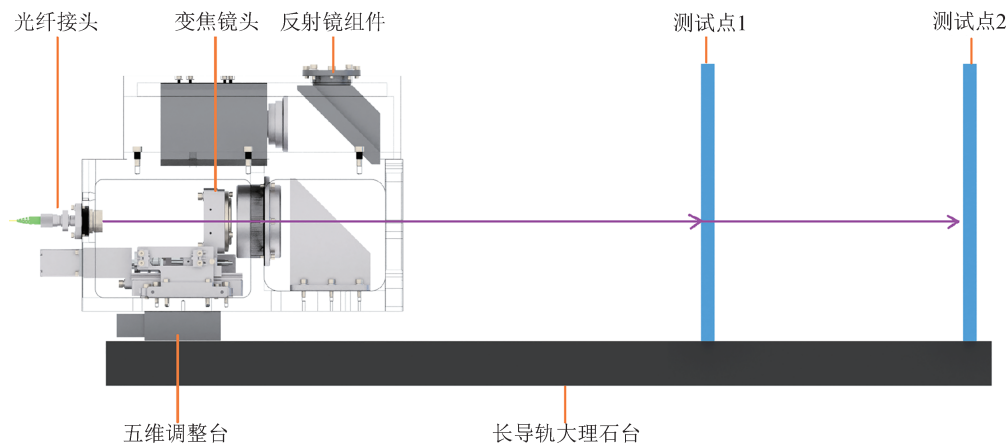


图4 实验系统搭建示意图
Fig.4 Experimental set-up

3.1.2 实验方法

1) 聚焦性能测试

光机系统适用于 635 nm 指示激光，针对激光在远场条件下的聚焦特性，光斑在不同距离能会聚到的最小光斑不超过艾里斑的大小，计算方式如式(3)所示。

$$r = 1.22 \times \frac{\lambda f}{D} \tag{3}$$

式中： r 为艾里斑的半径； λ 为入射光的波长，本实验中 λ 为 635 nm； f 为透镜的焦距，焦距越长，光线在经过透镜后会聚或发散的度越小，从而使得艾里斑的半径越大； D 为小孔或透镜的直径，其代表了光通过的孔径大小，本实验采用的透镜的通光直径为 40 mm。

在不同工作距离下的激光光斑理论尺寸如表3所示。

表3 不同工作距离下的激光光斑理论尺寸
Tab.3 Theoretical size of laser spot at different working distances

工作距离 / m	束腰光斑直径 / μm
0.5	19.4
1	38.7
3	116.2
5	193.7
10	387.4
30	1 162.1
60	2 324.1

在实际系统中，光斑会聚后的尺寸由理论计算光斑直径和光学像差导致的弥散斑共同决定。因此，为了评估光学像差对光斑尺寸的影响，对 635 nm 波段在不同测量距离下的聚焦弥散斑进行了采样仿真分析，如图5所示。图5中，每张图的左侧2行数据分别是X和Y两个方向视场的相对值和绝对值，0代表中心视场。

不同工作距离下的激光光斑理论直径与光学像差导致的弥散斑直径如表4所示。

表4 不同工作距离下的弥散斑直径与光斑理论值
Tab.4 Dispersion spot diameter and theoretical value of light spot at different working distances

工作距离 / m	理论直径 / mm	弥散斑直径 / mm
0.5	0.019	0.002
1	0.039	0.008
3	0.116	0.007
5	0.194	0.024
10	0.387	0.067
30	1.162	0.240
60	2.324	0.499

仿真结果表明：在各工作距离下，指示红光的弥散斑直径均远小于光斑理论尺寸。由于弥散斑较小，光学像差对其会聚效果的影响可忽略，不会影响指示光的可视性和使用效果。

2) 光斑质量测试

采用 Thorlabs BC106N 光束质量分析仪，记录

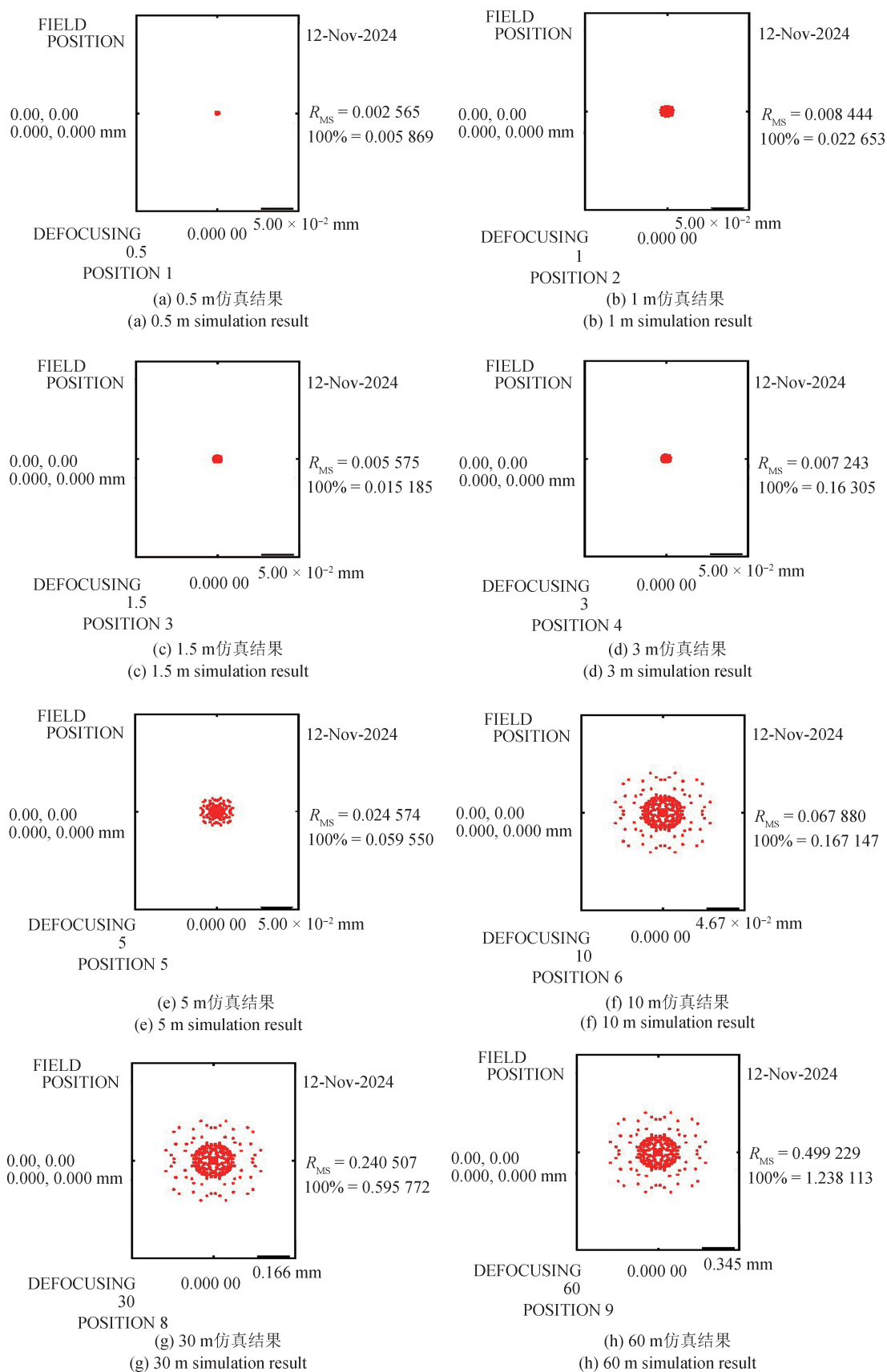


图5 635 nm波段在不同测量距离下的聚焦弥散斑仿真结果

Fig.5 Simulation results of focused diffuse spots in the 635 nm band at different measurement distances

光束在各测试点聚焦时的焦点特性，主要测量指标包括：光束宽度、光束椭圆度和质心偏移量，不同工作距离下的 635 nm 激光聚焦的光斑参数如表 5 所示。

表 5 不同工作距离下的 635 nm 激光聚焦光斑参数
Tab.5 635 nm laser spot parameters at different working distances

测试点 / m	光束宽度 X /μm	光束宽度 Y /μm	椭圆率	质心偏移 量 /μm
1.95	210.35	250.70	0.83	0.00
14.95	540.82	600.51	0.90	19.60
20.95	770.46	880.12	1.04	34.50
26.95	1 160.00	1 165.00	0.94	41.80
32.95	1 500.25	1 410.33	0.81	62.70

为评估不同测距距离下系统的光轴一致性和聚焦稳定性，设置了多个测距点位，并在目标物表面标记中心参考点。以 1.95 m 处测量点为对准基准，该位置处光斑中心与标记中心完全重合，因此定义偏移量为 0 μm；其余各测点的质心偏移量则通过计算光斑中心点相对于此参考点的欧氏距离获得。此方法可较为直观地反映在变焦测距过程中的光束中心漂移情况。

实验结果表明：光束宽度随测距距离增加呈增长趋势，符合高斯束远场扩展特性，且与理论趋势预测一致。椭圆率整体接近 1，说明系统在各测距范围内具备较好的光斑对称性。在光轴稳定性方面，以 1.95 m 为参考基线，测得其他测距点的质心偏移量均在 65 μm 以内，最大偏移出现在 32.95 m 处，但整体波动较小，仍保持在微米级范围，误差可接受，尤其在中远距离段(>15 m)，偏移量变化趋于稳定，进一步验证了光机系统结构设计对焦点稳定性的保障作用，表明系统具有良好的光轴稳定性与测距一致性。

表 4 中的理论光斑尺寸为在衍射极限条件下、近似高斯光束模型下估算的聚焦光斑直径，其数值依据公式(3)计算，适用于远场聚焦模型，并代表包含约 86.5% 能量的主瓣宽度。实测光斑则受激光发散角、光斑形状、镜片残余像差与调焦精度影响，在不同实验条件下存在差异，特别是在

近距离测量时，更易受到微小对焦误差的影响。因此，实测光斑在近距离范围内普遍大于理论值属于正常现象，进一步说明系统对对焦精度控制的高敏感性，验证本文提出的自聚焦算法的必要性。

3.1.3 实验结果分析

在不同工作距离下进行的光斑聚焦性能实验与聚焦光斑质量测试的实验结果表明：①光机系统光学设计合理，能够有效抑制像差，具有较好的光轴稳定性；② 635 nm 激光光束的质心偏移量小于 65 μm，椭圆率较稳定，远场光斑发散符合高斯光束传播特性，整体光轴稳定性较好。

本实验验证了光机系统的光学结构设计合理性，为后续自聚焦控制实验提供了基础支持。

3.2 自聚焦控制系统验证

为了验证基于光斑图像识别的自聚焦方法的有效性，实验将测试自聚焦控制系统对 635 nm 激光聚焦效果。

3.2.1 实验方法

首先，采用直线步进电机调节镜片位置，实现自动变焦功能；采用变倍高清摄像机记录光斑图像，实时计算光斑聚焦判定参数。然后，选取失焦位置进行聚焦测试，采用光斑聚焦判定参数判断光斑聚焦状态，并记录最终各状态下的光斑参数。

3.2.2 实验结果

失焦状态下 635 nm 激光光斑特征图如图 6 所示。聚焦状态下 635 nm 激光光斑特征图如图 7 所示。同时，记录在光斑自聚焦控制方法下的失焦到聚焦的 5 个过程状态，具体参数如表 6 所示。

从表 6 中可以看出，随着系统从失焦状态逐渐调整至聚焦状态，光束宽度 X 和 Y 均呈现减小趋势，等效束腰直径也相应减小。这表明：在聚焦状态下，光束更为集中，能量密度更高。因为椭圆率接近 1 表示光斑形状更接近圆形，根据表 6，椭圆率从失焦状态的 1.136 逐渐降低至聚焦状态的 0.977，说明光斑形状在聚焦过程中趋于理想圆形，有利于提高测量精度。

在本实验中，Tenengrad 清晰度值用于对比不同聚焦状态下图像的清晰程度，因此未对其进行

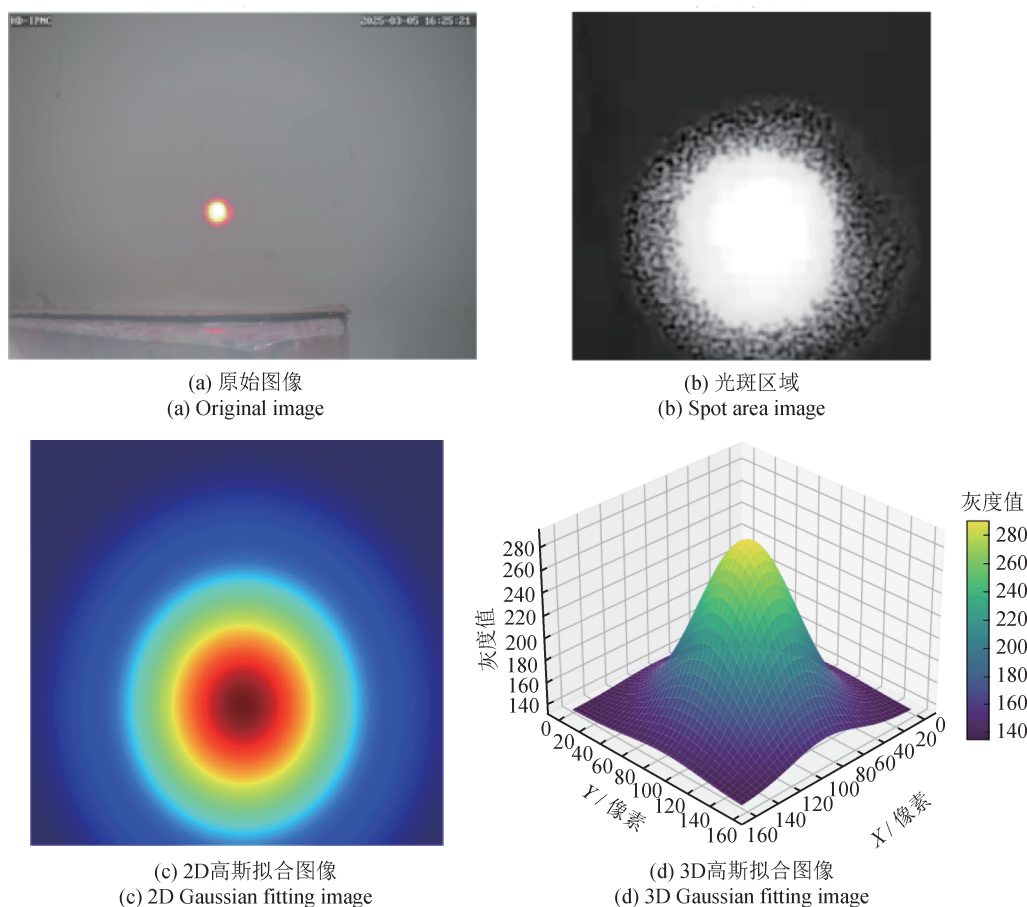


图6 失焦状态下635 nm激光光斑特征图

Fig.6 Characteristics of 635 nm laser spot in defocused state

归一化处理,但所有样本图像分辨力和亮度范围保持一致,保证了数值可比性。可以看出,Tenengrad清晰度值随着聚焦程度的提高而显著增加;在聚焦状态下,清晰度远高于失焦状态。这表明:聚焦状态下图像边缘信息更丰富,细节更清晰。

3.2.3 实验结果分析

综合光束宽度、椭圆率和Tenengrad清晰度3个参数分析,当光束宽度变小、椭圆率接近1且Tenengrad清晰度上升时,系统处于聚焦状态不断优化过程。这3个参数可以作为自聚焦控制系统判断聚焦状态和调整焦距的有效依据,通过监测这些参数并结合双阶段的焦距调整策略,能够实现激光光斑的精确聚焦。

4 结论

针对非合作目标激光测距场景中存在的回光能量弱、变焦滞后及焦点漂移等问题,本文设计

并实现了一种高精度激光自聚焦控制系统。该系统通过光学镜组、镜头机械结构及其附件的优化组合,构建了结构稳定、成像性能优良的变焦光学系统,实现了激光光束在不同工作距离下的高精度聚焦与目标反射能量的高效接收。同时,通过光轴稳定性设计与机械布局优化,有效抑制了变焦过程中的焦点漂移,提升了系统在多距离下的测量一致性。

在控制策略方面,系统引入基于光斑图像识别的自聚焦算法,实时提取光斑直径、形态特征和图像清晰度等关键参数,结合分阶段的自适应控制策略,驱动步进电机精确调节动镜组位置,形成闭环自动聚焦控制机制。系统在0.5~30 m测距范围内实现了全程自动聚焦控制,实验结果显示:不同测距条件下,光斑质心偏移量不超过65 μm ,椭圆率接近1,表明系统具备良好的聚焦精度与稳定性。

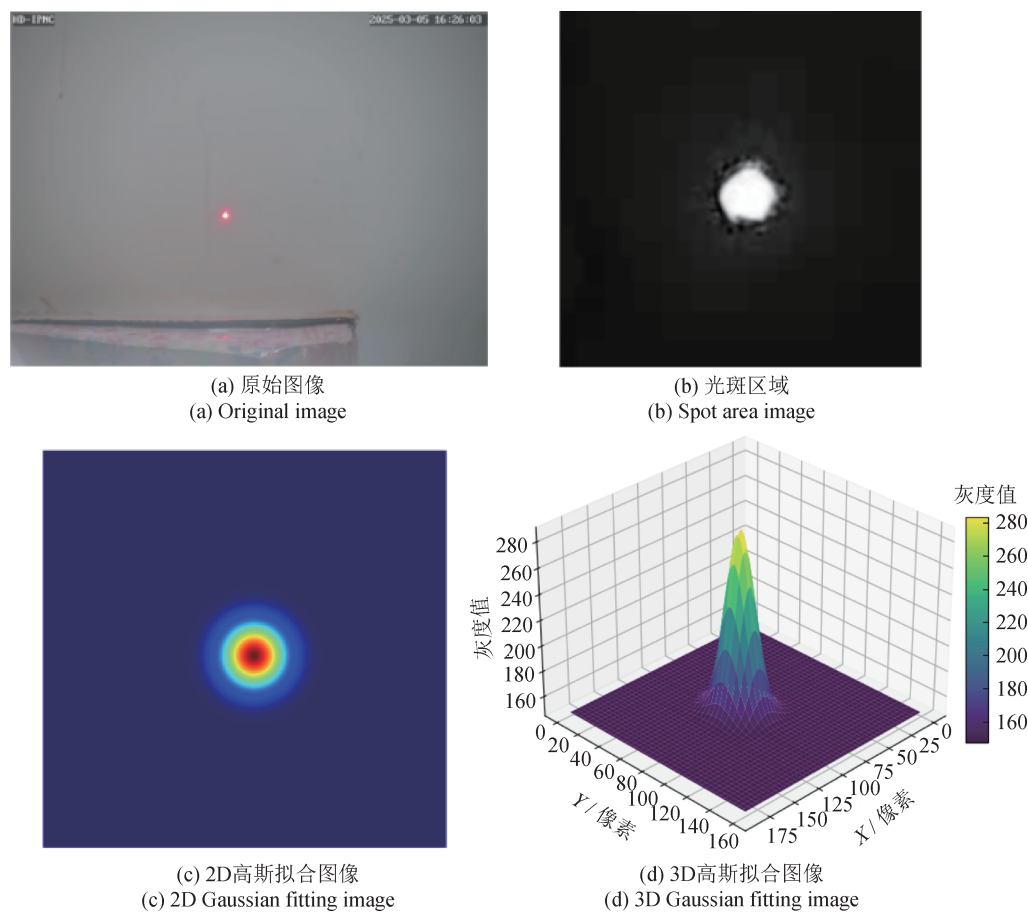


图7 聚焦状态下635 nm激光光斑特征图

Fig.7 Characteristics of 635 nm laser spot in focused state

表6 不同状态下的激光光斑参数

Tab.6 Laser spot parameters in different states

状态	光束宽度 X/px	光束宽度 Y/px	等效束腰直径/ px	椭圆率	Tenengrad 清晰度
失焦1	87.23	99.13	92.99	1.136	1.27×10^7
失焦2	70.32	75.17	72.70	1.069	2.48×10^7
失焦3	61.78	63.89	62.83	1.034	3.04×10^7
失焦4	39.36	39.12	39.24	0.994	4.18×10^7
聚焦	24.38	24.96	24.67	0.977	7.26×10^7

尽管当前国内外科科研人员已开展部分激光聚焦系统的研究，但大多集中于通信、雷达或工业视觉等领域，其测试波长、目标类型及测距条件与本研究存在显著差异，尤其在“非合作目标、长距离测距、弱反射信号”等典型应用场景下，尚缺乏具备可比性的实验数据。

在实际测距实验中，针对铝合金等低反射率目标，本文所提出的聚焦策略能够显著提升激光

回波能量，增强系统对弱信号的获取能力。测试表明：若不进行聚焦，回波信号易被系统本底噪声淹没，导致测距失败；而聚焦后系统可稳定获取有效信号，后续采用调频连续波(Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW)激光调制方式，通过对参考信号与回波信号形成的拍频信号进行解调处理，实现精确测距。在30 m测距范围内，系统测量误差为 $\pm 28 \mu\text{m}$ ，验证了系统在典型非合

作目标测距场景下的高精度聚焦能力与测距稳定性, 达到了设计预期的性能指标。

参考文献

- [1] 杨滨赫, 蔡引娣, 文志祥, 等. 长距离激光测量中光束漂移的自动补偿[J]. 光学精密工程, 2020(11): 2393–2402.
YANG B H, CAI Y D, WEN Z X, et al. Automatic compensation of beam drift in long-distance laser measurement [J]. Optics and Precision Engineering, 2020(11): 2393–2402. (in Chinese)
- [2] 夏清鹰, 钟学敏, 任培武, 等. 基于激光测距的飞机着陆滑行灯靶板自动化校准系统[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 41–47.
XIA Q Y, ZHONG X M, REN P W, et al. Automated calibration system for aircraft landing taxiway light target board based on laser ranging [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(6): 41–47. (in Chinese)
- [3] OLIVER A D, STEVENS L S, RODDEWIG M R, et al. Dynamic focus control in a coherent lidar using a fast MEMS mirror[C]// Proc. SPIE, 2024.
- [4] 武文彬, 左勇, 徐永. 一种远距离可变焦光谱测量装置设计[J]. 计测技术, 2013, 33(1): 26–28, 40.
WU W B, ZUO Y, XU Y. Design of a long-distance variable-focus spectral measurement device [J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(1): 26–28, 40. (in Chinese)
- [5] ZHU F, WANG L, GUO S, et al. Large dynamic range laser ranging system for non-cooperative target[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(1): 8–12.
- [6] ZHANG Z, LI S, ZENG H, et al. Simulation of laser ranging system for LEO non-cooperative targets based on Monte Carlo method[C]// Conference on Frontiers in Optical Imaging Technology and Applications, 2018.
- [7] 娄鑫鑫, 李华丰. 用于激光测振的聚焦扫描系统[J]. 计测技术, 2015, 35(2): 19–22.
LOU X X, LI H F. Focused scanning system for laser vibration measurement[J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(2): 19–22. (in Chinese)
- [8] GAO J, LI D, WU J, et al. Moving real-target imaging of a beam-broaden ISAL based on orthogonal polarization receiver and along-track interferometry [J]. Remote Sensing, 2024, 16. DOI: 10.3390/rs16173201.
- [9] ZOU T, TANG X, SONG B, et al. Robust feedback zoom tracking for digital video surveillance[J]. Sensors, 2012, 12(6): 8073–8099.
- [10] 徐晨曦, 刘一宁, 王怡洁, 等. 基于荧光成像分析的双光子直写离焦主动补偿方法(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(12): 448–457.
XU C X, LIU Y N, WANG Y J, et al. Active defocus compensation method for two-photon direct writing based on fluorescence imaging analysis (invited) [J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(12): 448–457. (in Chinese)
- [11] 丁伟, 王菲, 王孟洁, 等. 大功率激光作用下光学系统轴向焦移仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 314–320.
DING W, WANG F, WANG M J, et al. Simulation of axial focus shift in optical systems under high-power laser irradiation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 314–320. (in Chinese)
- [12] 张洪博, 闫阿奇, 何双亮, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 202–209.
ZHANG H B, YAN A Q, HE S L, et al. Design of a mid-wave infrared continuous zoom optical system with large zoom ratio [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 202–209. (in Chinese)
- [13] ZHANG X, FAN F, GHEISARI M, et al. A novel auto-focus method for image processing using laser triangulation [J]. IEEE Access, 2019(7): 64837–64843.
- [14] 江小坤. 一种智能终端的变焦摄像模组及其使用方法: CN201780095913.8[P]. 2025–03–09.
JIANG X K. Zoom camera module of smart terminal and its application method: CN201780095913.8[P]. 2025–03–09. (in Chinese)
- [15] BAUMER. Undeterred precision — how micrometer-accurate optical distance measurement becomes more reliable [EB/OL]. [2018–08–01]. https://www.baumer.com/us/en/undeterred-precision-how-micrometer-accurate-optical-distance-measurement-becomes-more-reliable/n/OM70_laser_distance_sensors+.
- [16] LIU Y, LI X, JIANG P, et al. Image-based auto-focus microscope system with visual servo control for micro-stereolithography [J]. 2024, 15(10). DOI: 10.3390/mi15101250.
- [17] 吴昂, 卢荣胜. 叠焦三维显微视觉测量聚焦评价算法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 102–111.

- WU A, LU R S. Research on focus evaluation algorithm for multifocus 3D microscopic visual measurement [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (1): 102–111. (in Chinese)
- [18] 袁琳, 郭彤, 郭心远, 等. 表面微/纳米计量中的光学测量方法综述[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 30–47.
- YUAN L, GUO T, GUO X Y, et al. Review of optical measurement methods in surface micro/ nano metrology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43 (1): 30–47. (in Chinese)
- [19] 邓烈刚, 李文峰, 杨雁南. 基于双目机器视觉的高精度激光充电瞄准系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 432–438.
- DENG L G, LI W F, YANG Y N. High-precision laser charging aiming system based on binocular machine vision [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58 (14): 432–438. (in Chinese)
- [20] HUNG J H, TU H D, HSU W H, et al. Design and experimental validation of an optical autofocusing system with improved accuracy [J]. Photonics, 2023, 10 (12). DOI: 10.3390/photonics10121329.
- [21] DU J, SUN S, LI F, et al. Large range nano autofocus method based on differential centroid technique [J]. Optics & Laser Technology, 2023, 159. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.109015.
- [22] WANG G, HUANG J, LYU J, et al. Fast autofocusing algorithm based on variable step search and curve fitting applied in the near- and far-field detection system with a common optical path [J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(6): 1742–1748.
- [23] WANG Y, WU C, GAO Y, et al. Deep learning-based dynamic region of interest autofocus method for grayscale image [J]. Sensors, 2024, 24 (13). DOI: 10.3390/s24134336.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 王江萍(1995—), 女, 助理工程师, 主要研究方向为精密仪器、图像识别。