工程与管理科学
Engineering and Management Science
第 8 卷◆第 9 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

迈克尔逊干涉仪自动计数与数据处理系统

程解超　王世玉　刘云云*
陕西科技大学镐京学院　712000

DOI：10.32629/ems.v8i9.22160

［摘　要］针对迈克尔逊干涉实验人工目视计数易致视觉疲劳、引入±3～5 环偏差，而批量加装专用工业相机成本高的问题，本文设计并实现一套低成本、全自动闭环测量系统。系统兼容智能手机、USB 摄像头、工业相机等通用采集端，经有线/无线双通道将干涉图像实时传输至上位机；依托 OpenCV 构建由光照均衡、两级圆心定位、极坐标降维、一维峰值检索、多帧滞后跟踪构成的分层算法，稳定统计干涉环收缩数量；STM32 驱动步进电机带动反射镜匀速位移，经 CH340 串口实现上下位机闭环通信，收缩环数达标即自动锁止电机；上位机内置逐差法与 A、B 类不确定度评定模块，录入位移数据后一键输出标准化测量结果。100 组对照实验表明，系统自动计数误差控制在±1 环以内，显著优于人工观测±3～5 环的偏差，测得激光波长 λ=(632.83±0.07)nm，相对不确定度稳定在约 0.011%，单套硬件成本降低 60%以上；全程无需人工干预，适用于高校物理光学实验教学。

［关键词］迈克尔逊干涉仪；OpenCV；条纹自动计数；不确定度评定

引言

迈克尔逊干涉仪是一种光路直观、结构精密的光学仪器，利用其测量激光波长是高校物理实验的经典项目。然而传统实验完全依赖人工操作：实验者需长时间直视激光、逐道记录干涉环收缩数量，易引发视觉疲劳，不同人员观测标准存在主观差异，导致条纹多数、漏数等主观错误，数据重复性差；手动启停微调螺旋存在操作延迟，易引入位移量与计数的系统性匹配误差；实验室光照不均、镜头积灰、十字分划板遮挡等因素进一步加大漏计、误计概率。批量配备工业相机虽可实现自动采集，但专用硬件采购与改造成本高，制约高校实验室的智能化、规模化升级。

随着嵌入式技术、数字图像处理与机器视觉的快速发展，对迈克尔逊干涉实验进行自动化改造成为突破上述局限的重要方向。现有方案主要分为光敏元件硬件计数[5-6]、CCD/摄像头图像处理[4,7-8]、手机图像采集[9]等，普遍存在硬件成本高、兼容性差、功能单一、缺乏闭环控制与标准化数据处理等短板。为此，本文融合多兼容图像采集、OpenCV 机器视觉与 STM32 嵌入式闭环控制，设计并实现一套低成本、全自动、高精度的干涉测量系统，实现干涉环自动计数、波长求解与不确定度评定的一体化。

1 迈克尔逊干涉实验原理

迈克尔逊干涉仪基于分振幅法实现双光束干涉[1-3]。来自光源 S 的光束投射到分光板 G1（半透半反射镜）上，被分为反射光与透射光两束：反射光射向平面镜 M1，透射光经补偿板 G2 射向平面镜 M2；两束光分别被 M1、M2 反射后，经 G1 的透射与反射在观察屏处重新叠加。两束光源于同一光源、满足相干条件，叠加时形成干涉图样。当 M2 经 G1 所成虚像 M2′ 与 M1 平行时，两束平行相干光以同一倾角 θ 入射，其光程差为 $\delta=2d\cos\theta$，其中 d 为 M1 与 M2′ 的间距。当 d 固定时，光程差仅随倾角 θ 变化，故形成明暗相间的等倾干涉同心圆环。当 d 缓慢增大时，光程差增大，干涉圆环从中心向外“涌出”并变细；当 d 缓慢减小时，圆环向中心收缩、逐渐变粗，最终“吞没”于圆心处。每当 d 变化半个波长（光程差变化一个波长），即有一个圆环从中心涌出或消失；若测得动镜位移 Δd 与涌出或消失的圆环数 ΔN，则激光波长满足。

$$\bar{\lambda}=\frac{2\Delta\bar{d}}{\Delta N} \qquad (1)$$

可见，ΔN 的准确与否对波长计算至关重要，这正是本系统实现干涉环自动计数与位移测量的物理基础。

2 系统的设计

2.1 总体设计思路

针对人工计数误差大、改造成本高的瓶颈，本文采用“通用图像采集＋机器视觉识别＋嵌入式闭环控制”的总体方案，将干涉条纹的自动识别、计数、位移控制与数据处理集于一体。整套系统由图像采集模块、上位机处理单元、串口通信

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

模块、下位机主控与电机驱动模块、机械传动结构五部分构成，形成完整的自动测量闭环，总体结构如图 1 所示。

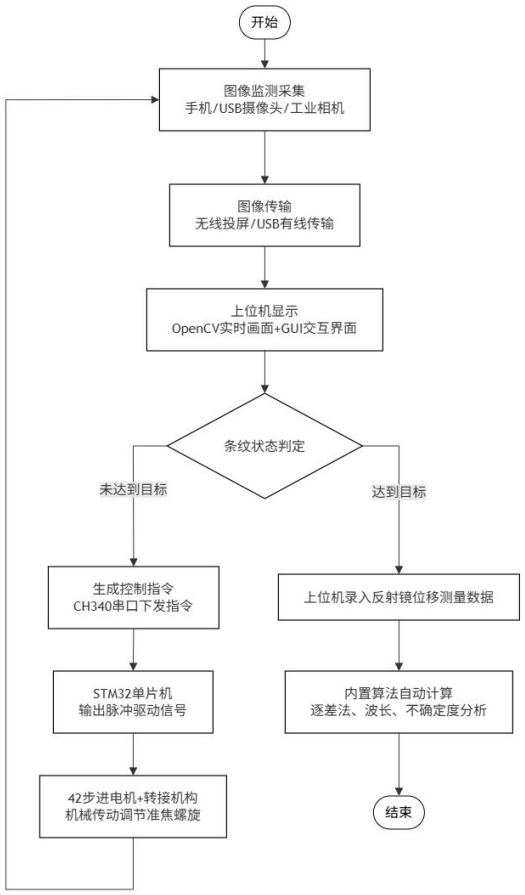

图 1　迈克尔逊干涉仪自动测量系统结构框图

2.2 硬件设计

图像采集模块摒弃专用工业相机，选用日常智能手机作为采集终端，经固定支架架设于观测窗口正前方，通过无线投屏实时推送视频流，并预留 USB 摄像头与工业相机接口，采集端可按实验室条件灵活替换。上位机为搭载 Python 环境的通用计算机，是系统数据处理与调度中枢，接收视频流经算法链解析后输出当前有效环数，达标时经串口下发停机指令，并内置逐差法与不确定度评定模块。串口通信采用 CH340 USB 转 TTL 芯片完成电平转换，波特率 115200，支持自动扫描端口并实时反馈连接状态。下位机以 STM32 为控制核心，持续输出脉冲信号（STEP）与方向电平（DIR）驱动 42 步进电机，经定制 3D 打印转接结构将电机输出轴与干涉仪细准焦螺旋刚性同轴连接，带动反射镜匀速平移，使干涉环低速稳定收缩。闭环控制以“匀速平移—达标锁止”为核心：上位机持续比对当前环数与预设阈值，达标即经 CH340 虚拟串口下发停机指令；STM32 配置串口接收中断，识别停机指令后立即锁止电机、切断脉冲输出，杜绝惯性位移与启停延时误差。系统整体硬件连接原理如图 2 所示。

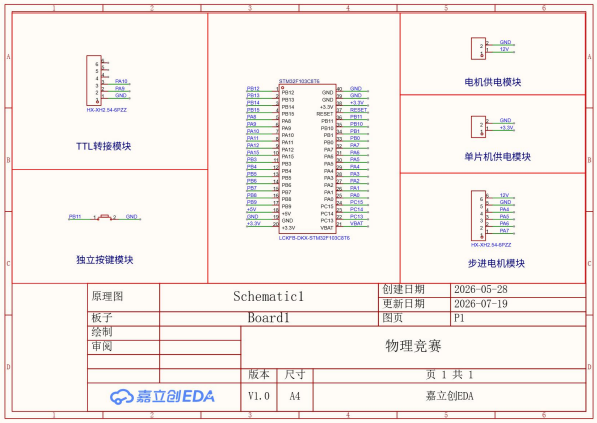

图 2　硬件原理图

上述连接关系明确了信号自采集端经上位机到控制端的完整流向，据此可将各模块集成为一套独立、便携的自动测量装置。按照上述原理搭建的实物测量系统整体外观如图 3 所示。

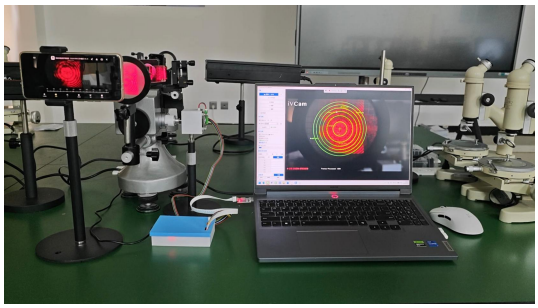

图 3　整体系统实物图

2.3 软件设计

上位机软件基于 opencv-python、numpy、scipy 开源库搭建[10]，针对手机自动曝光漂移、视角倾斜与几何畸变完成适配，处理流程分层递进[11-13]。预处理阶段先提取红色通道（干涉信号对比度最优）做高斯平滑，采用金字塔下采样背景扣除实现空间高通滤波以消除径向明暗差异，再以限制对比度自适应直方图均衡（CLAHE）在局部增强明暗反差，清晰还原边缘微弱干涉环。

圆心定位是极坐标变换精度的关键。系统采用由粗到精两级策略：粗定位以高斯核抹除条纹细节、仅保留中心高光，经像素极值检索得到粗略圆心；精定位在粗坐标周边网格内，以极坐标展开后一维亮度曲线的标准差与亮度分位数构建评分函数，遍历取最优坐标，抵消手机摆放倾斜带来的定位误

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

差。随后以精准圆心为原点做极坐标变换，环形条纹转化为水平平行直线，沿圆周 360° 方向做中位数投影生成一维径向亮度曲线，屏蔽十字分划板、局部高光与条纹断裂等异常像素，如图 4 所示。

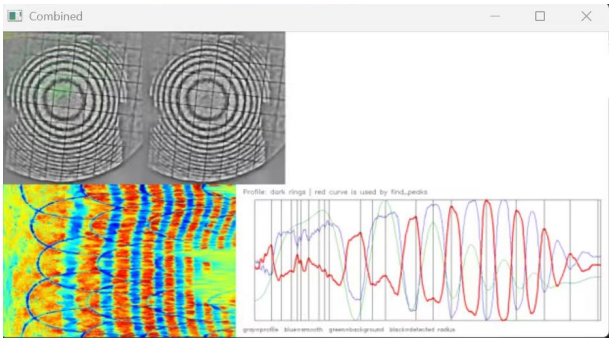

图 4　一维径向亮度曲线

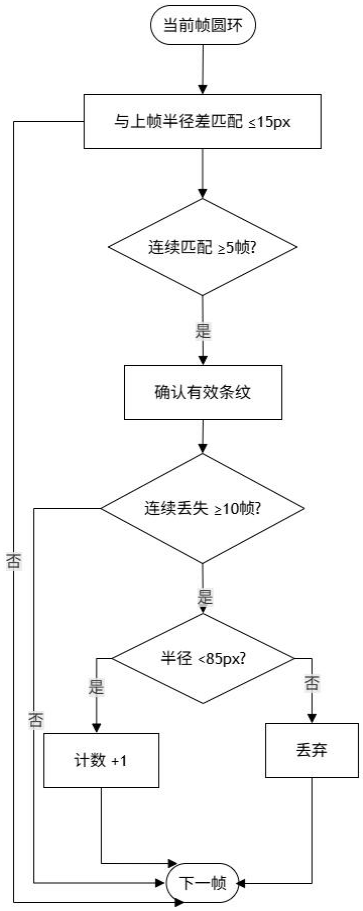

图 5　多帧目标跟踪状态机流程图

针对中心亮度偏高造成的基线偏移，再经一维高斯滤波提取低频包络做差值校正，并以相邻环最小间距、峰值显著度双重约束检索真实干涉条纹峰值。不同采集端的抖动与瞬时遮挡易造成单帧条纹消失，故设计邻近匹配搭配双阈值状态机抑制误检：相邻帧圆环按半径差关联，限定单帧最大收缩位移 15 像素；新圆环须连续 5 帧稳定匹配方判为有效，连续 10 帧无匹配则标记消失，消失时半径小于 85 像素即判定收缩并计数累加，流程如图 5 所示。

数据处理方面，实验采用等间隔多组读数配合逐差法减小随机误差，并按下列公式评定不确定度[14]：

$$\overline{\Delta d}=\frac{\Delta d_1+\Delta d_2+\ldots+\Delta d_n}{n} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda}=\frac{2\overline{\Delta d}}{\Delta N} \quad (3)$$

Δd 的 A 类不确定度 $u_A=\sqrt{\frac{\sum_i^6(\Delta d_i-\overline{\Delta d})^2}{n(n-1)}}$ （4）

Δd 的 B 类不确定度 $u_B=\frac{\Delta}{\sqrt{3}}=\frac{0.00005}{\sqrt{3}}$（仪器最大允差 $\Delta_{仪}$=0.00005mm）（5）

合成标准不确定度 $u_{\Delta d}=\sqrt{u_A{}^2+u_B{}^2}$ （6）

不确定度传递公式 $u_\lambda=\frac{2}{\Delta N}\sqrt{u_{\Delta d}{}^2}$ （7）

相对不确定度 $E_\lambda=\frac{u_\lambda}{\lambda_{理}}\times100\%$（$\lambda_{理}(He-Ne)=632.8$ nm）（8）

其中 $\Delta_{仪}$=0.00005mm 为干涉仪微动鼓轮的仪器最大允差（微动鼓轮分度值为 0.0001mm，允差取其一半），$\lambda_{理}$=632.8nm 为 He-Ne 激光理论波长，n 为逐差后有效差值数量。操作人员在图 6 所示界面填写总计数、记录步长、环差 ΔN 后，程序自动生成位移记录表格；填入螺旋读数并点击计算，即同步输出位移均值、平均波长、A/B 类不确定度、合成误差、波长误差与相对不确定度共 8 项指标，空白单元格与非数字字符自动跳过。以一组单次完整测量为例：总圈数 550、步长 50、ΔN=300、逐差跨度 6，12 个位移点逐差得 6 个 Δd 值，均值 $\overline{\Delta d}$=0.09502mm，波长 $\bar{\lambda}=2\times0.09502/300=633.47$nm；A 类 $u_A=1.28\times10^{-5}$mm，B 类 $u_B=2.89\times10^{-5}$mm，合成 $u_{\Delta d}=3.16\times10^{-5}$mm，波长不确定度 u_λ=0.21nm，故单次结果 $\lambda=(633.47\pm0.21)$nm，相对不确定度 $E_\lambda\approx0.033\%$；最终不确定度保留 2 位有效数字，波长末位与之对齐。

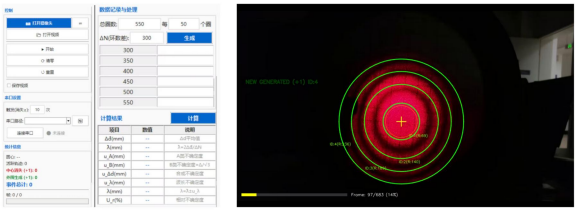

图 6　上位机界面图

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2705-0637(P) / 2705-0645(O)

2.4 数据测量及结果分析

硬件包含常规教学迈克尔逊干涉仪、普通智能手机、STM32 主控、42 步进电机配套驱动与 CH340 串口模块；软件环境为 Python3 及 opencv-python、numpy、scipy 依赖库；光源选用 632.8nm 氦氖激光，在普通实验室室内光照下完成测试。为验证系统性能，设定目标收缩环数 50 环，完成 100 组独立标准计数测试，同步采集自动计数与人工目视观测结果：系统自动计数误差控制在±1 环以内，人工观测普遍存在±3～5 环偏差。分别从人工 20 组与机器 100 组测量数据中各抽取前 10 组核心计算结果进行对比，见表 1、表 2。

表 1　人工读数 20 组中的 10 组核心计算结果

序号	Δd(mm)	Δd 平均值(mm)	λ (nm)	u_A(mm)	u_B(mm)	$u_{\Delta d}$(mm)	u_λ(mm)	E_λ(%)
1	0.09432	0.09437	629.14	1.96×10^{-5}	2.90×10^{-5}	3.49×10^{-5}	2.33×10^{-7}	0.037
2	0.09438	0.09432	628.78	2.53×10^{-5}	4.06×10^{-5}	4.78×10^{-5}	3.19×10^{-7}	0.050
3	0.09434	0.09436	629.08	1.16×10^{-5}	2.28×10^{-5}	2.56×10^{-5}	1.70×10^{-7}	0.027
4	0.09434	0.09438	629.18	1.78×10^{-5}	3.34×10^{-5}	3.87×10^{-5}	2.58×10^{-7}	0.041
5	0.09436	0.09431	628.71	1.75×10^{-5}	3.22×10^{-5}	3.67×10^{-5}	2.44×10^{-7}	0.039
6	0.09428	0.09432	628.77	1.83×10^{-5}	3.19×10^{-5}	3.68×10^{-5}	2.45×10^{-7}	0.026
7	0.09437	0.09441	629.37	1.30×10^{-5}	2.05×10^{-5}	2.43×10^{-5}	1.62×10^{-7}	0.025
8	0.09443	0.09440	629.32	1.29×10^{-5}	2.01×10^{-5}	2.39×10^{-5}	1.59×10^{-7}	0.048
9	0.09428	0.09432	628.80	2.23×10^{-5}	3.93×10^{-5}	4.52×10^{-5}	3.01×10^{-7}	0.038
10	0.09434	0.09434	628.91	1.12×10^{-5}	2.16×10^{-5}	2.43×10^{-5}	1.62×10^{-7}	0.026

表 2　机器自动测量 100 组中的 10 组核心计算结果

序号	Δd(mm)	Δd 平均值(mm)	λ (nm)	u_A(mm)	u_B(mm)	$u_{\Delta d}$(mm)	u_λ(mm)	E_λ(%)
1	0.09493	0.09493	632.84	5.10×10^{-6}	0.92×10^{-5}	1.05×10^{-5}	0.70×10^{-7}	0.011
2	0.09491	0.09492	632.83	4.95×10^{-6}	0.95×10^{-5}	1.07×10^{-5}	0.71×10^{-7}	0.011
3	0.09491	0.09492	632.83	5.40×10^{-6}	0.89×10^{-5}	1.04×10^{-5}	0.70×10^{-7}	0.011
4	0.09493	0.09492	632.82	5.21×10^{-5}	0.94×10^{-5}	1.07×10^{-5}	0.71×10^{-7}	0.011
5	0.09491	0.09493	632.84	5.20×10^{-5}	0.94×10^{-5}	1.00×10^{-5}	0.66×10^{-7}	0.010
6	0.09492	0.09492	632.83	4.11×10^{-6}	0.86×10^{-5}	1.00×10^{-5}	0.63×10^{-7}	0.010
7	0.09493	0.09493	632.84	4.53×10^{-6}	0.86×10^{-5}	1.00×10^{-5}	0.65×10^{-7}	0.010
8	0.09491	0.09493	632.84	5.10×10^{-6}	0.89×10^{-5}	1.03×10^{-5}	0.68×10^{-7}	0.010
9	0.09492	0.09492	632.82	4.70×10^{-6}	0.96×10^{-5}	1.07×10^{-5}	0.71×10^{-7}	0.011
10	0.09492	0.09493	632.84	5.04×10^{-6}	0.89×10^{-5}	1.02×10^{-5}	0.68×10^{-7}	0.011

由表 1、表 2 可见，机器自动测量的波长 λ 稳定聚集在 632.8nm 附近，相对不确定度 Eλ 约 0.009%～0.013%；人工读数受视觉疲劳与操作延迟影响，λ 在 628.71～629.37nm 区间波动（相对理论值偏差约 0.6%），E_λ约 0.021%～0.050%。机器测量的 B 类不确定度 u_B（0.86×10^{-5}～0.96×10^{-5}mm）与波长合成不确定度 uλ（0.63×10^{-7}～0.71×10^{-7}mm）均显著小于人工（u_B为 2.05×10^{-5}～4.06×10^{-5}mm，u_λ为 1.59×10^{-7}～3.19×10^{-7}mm），u_λ约为人工的 1/3～1/4；机器中心值偏差约 0.005%，远优于人工约 0.60%。

2.5 实验结果

综合测试结果表明，系统在精度、成本与自动化方面具备显著优势：（1）识别精度高，100 组对照实验计数误差控制在±1 环以内；（2）成本低，复用日常手机替代工业相机，单套硬件改造成本降低 60%以上；（3）抗干扰能力强，强光、弱光、手机曝光波动场景下均可稳定提取条纹，十字分划板、微小灰尘与轻微晃动不触发误计数；（4）自动化程度高，全

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

程无需值守，环数达标即自动停机，内置逐差与不确定度评定单元，数据自动保存便于复盘。

3 结论与反思

本文针对传统迈克尔逊干涉实验人工观测误差大、流程繁琐、改造成本高的问题，设计并实现了一套基于手机成像、OpenCV 机器视觉与 STM32 嵌入式驱动的低成本自动化干涉测量系统。系统以消费级智能手机替代专用工业相机构建多端兼容采集架构，单套硬件成本降低 60%以上；依托光照均衡、两级圆心定位、极坐标降维、一维峰值检索与多帧滞后跟踪的鲁棒算法链稳定完成干涉环自动计数；通过 CH340 串口实现上下位机闭环控制，环数达标即自动锁止电机，并集成逐差法与不确定度评定模块一键输出标准化结果。100 组对照实验表明，系统自动计数误差控制在±1 环以内，显著优于人工观测±3～5 环的偏差，波长测量相对不确定度稳定在约 0.011%，远低于 5%的优质判据，有效规避了人眼观测主观误差、读数误差与计时误差。

本系统采用模块化、松耦合的设计，采集端、图像处理与下位机控制相互独立，具备良好的通用性与可扩展性：采集端兼容智能手机、USB 摄像头与工业相机等多类终端，可平滑迁移至其他干涉类光学实验；算法链分层清晰，可在收缩计数基础上进一步拓展双向跟踪与多工况识别；上下位机基于标准串口协议交互，便于后续向嵌入式与边缘端轻量化部署。上述特性赋予系统持续的优化空间与推广应用前景，为高校物理光学实验教学的智能化、规模化升级提供了可行方案。

[参考文献]

[1]赵凯华,钟锡华.光学[M].北京:北京大学出版社,1984.

[2]姚启钧.光学教程[M].5 版.北京:高等教育出版社,2014.

[3]杨述武,孙迎春,沈民权.普通物理实验(3):光学部分[M].5 版.北京:高等教育出版社,2015.

[4]CRESCENTINI L, FIOCCO G. Automatic fringe recognition and detection of subwavelength phase perturbations with a Michelson interferometer[J]. Applied Optics, 1988, 27(1): 118-123. DOI: 10.1364/AO.27.000118.

[5]高世卿,杨智博,齐海成.迈克尔逊干涉仪自动计数器的设计[J].电子制作,2023(8):42-45.

[6]毛巍威,李永涛,包刚,等.迈克尔逊干涉仪自动计数器的设计[J].电脑知识与技术,2012,8(34):8308-8310.

[7]林江豪,马文华,漆建军,等.一种新的迈克尔逊干涉条纹计数方法[J].微计算机信息,2010(11):141-142.

[8]宾峰,邓敏,唐付桥,等.迈克尔逊干涉条纹自动测量方法[J].光学与光电技术,2015,13(4):36-40.

[9]马红玉,武福平,吴兴林.基于 Excel 与手机自主计数的迈克尔逊干涉仪实验改进[J].商洛学院学报,2025,39(6):84-87.

[10]BRADSKI G R, KAEHLER A. Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2008.

[11]ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Graphics Gems IV. San Diego: Academic Press Professional, 1994: 474-485. DOI: 10.1016/B978-0-12-336156-1.50061-6.

[12]SHAPIRO V. Fringe pattern recognition by using the polar-coordinate transform[J]. Experimental Mechanics, 1995, 35(4): 322-328. DOI: 10.1007/BF02317541.

[13]QIAN K. Links between fringe pattern analysis and digital image correlation: windowed, optimal, and tracking (WOT)[C]//Interferometry XVII: Techniques and Analysis. Bellingham: SPIE, 2014, 9203: 92030M. DOI: 10.1117/12.2059757.

[14]国家质量监督检验检疫总局.测量不确定度评定与表示:JJF 1059.1—2012[S].北京:中国标准出版社,2012

基金项目：2025 年校级教学团队《物理实验教学团队》，项目编号:JXTD25020。

通讯作者：刘云云（1991-），女，汉族，山西省临汾市人，讲师，理学硕士，研究方向：凝聚态物理。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.