

## 便携式定量相位显微成像系统设计

赵英然<sup>1,2\*</sup>, 闫克丁<sup>2\*\*</sup>, 李佳一<sup>2</sup>, 马岩<sup>3</sup><sup>1</sup>西安培华学院智能科学与信息工程学院, 陕西 西安 710125;<sup>2</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>3</sup>西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500

**摘要** 为实现无标记样本的定量检测,借助 NX12.0 搭配相关器件自主设计了一款小型化相位显微镜。相较于市面上售价高昂的相位显微镜,所设计显微镜无需相干器件,且在满足系统分辨率的前提下,将体积缩小了约 60%,大幅提高了便携性,同时成本仅需 5000 元左右。系统中还嵌入了自动对焦算法和基于变换域的视场校正算法,以加快检测速度和相位恢复的准确率。经测试,系统在 10 倍物镜下的分辨率达到了分辨率板极限  $2.19\ \mu\text{m}$ ,同时随机相位板的检测表明相位恢复的准确率也达到了基本需求。除此之外,还对活细胞结构和平面玻璃的缺陷进行了测试。结果表明,所提系统不仅能对活细胞进行较好的定量测量,还可以在透明/半透明平面缺陷的检测中发挥重要作用,更是证明了这种成本低、便携性高、可实现无标记样本定量的系统设计方案的可行性。

**关键词** 成像系统; 相位显微镜; 无标记检测; 活细胞定量测量; 平面缺陷检测; 3D 光固化技术

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230577

## Design of Portable Quantitative Phase Microscopy Imaging System

Zhao Yingran<sup>1,2\*</sup>, Yan Keding<sup>2\*\*</sup>, Li Jiayi<sup>2</sup>, Ma Yan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Intelligent Science and Information Engineering, Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, Shaanxi, China;

<sup>2</sup>School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

<sup>3</sup>School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China

**Abstract** To achieve quantitative detection of unlabeled samples, a miniaturized phase microscope is independently designed using NX12.0 and related devices. Compared to the expensive phase microscopes currently on the market, the newly designed microscope has an approximately 60% smaller volume while achieving the same system resolution, significantly improving portability; it does not require coherent devices, and the cost is only approximately 5000 yuan. The system also incorporates an autofocus algorithm and a field of view correction algorithm, based on transform domain techniques, to accelerate the detection speed and accuracy of phase recovery. After testing, the resolution of the system reached the resolution board limit of  $2.19\ \mu\text{m}$  using a  $10\times$  objective lens. Further, the detection of random phase plates indicates that the accuracy of phase recovery also meets the basic requirements. Additionally, defects in the structure of living cells and flat glass are also tested. The results indicate that the proposed system can quantitatively measure living cells and play an important role in detecting transparent/semitransparent plane defects. They also prove the feasibility of this low-cost and portable unlabeled-sample quantification system design scheme.

**Key words** imaging systems; phase microscope; unmarked detection; quantitative measurement of living cells; plane defect detection; 3D light curing technology

## 1 引言

近年来随着光学显微成像技术的发展,显微成像

逐渐摆脱了以光学成像系统直接获取目标图像的方式,转而利用相机获取图像后,通过图像处理与计算来间接获取图像的方式。这种方式可以获取许多传统显

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-02-22; 录用日期: 2023-03-22; 网络首发日期: 2023-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(11804263, 11747119)

通信作者: \*2856497933@qq.com; \*\*yankeding168@163.com

微技术难以直接获得的样本信息,例如细胞的三维信息等。然而,由于一些显微成像技术本身的固有特点,大多数无法对样本进行量化检测,如基于明场、暗场的显微成像<sup>[1-2]</sup>、基于荧光标记的显微成像<sup>[3-4]</sup>等。后来逐渐发展出来的基于微分干涉的显微成像技术可以实现细胞的定性检测,但难以做到定量测量。而对于观察活细胞的要求更为苛刻,尤其是依赖染色标记等侵入性的显微成像方法,其中的化学成分甚至可能会直接杀死细胞,使得细胞的活性观察完全失去意义。相比之下,基于光强传输方程(TIE)的相位恢复方法不仅可以实现定量测量,而且结构简单,无需复杂的辅助设备,计算速度快且无需迭代。

光强传输方程方法阐明了平行于光轴方向光强的变化与垂直于光轴平面的光波场的相位之间的定量关系。随着近年来的发展,基于光强传输方程的方法已经被广泛应用于显微成像领域。2017年,Martinez-Carranza等<sup>[5]</sup>利用光强传输方程提出了一个精确获得绝对相位图的方法,该方法可直接计算轴向强度导数。同年,Poola等<sup>[6]</sup>通过对红细胞进行定量检测,证明了光强传输方程的主要优点是结构简单、成本效益高且易于在传统显微镜上实现。2018年,Gong等<sup>[7]</sup>针对双视传输强度方程方法的视场不匹配问题,利用视场校正来识别和补偿欠焦和过焦图像之间的旋转、缩放和平移。结果表明,该方法在生物观察和医学诊断等各种应用中具有重要意义。2019年,Agnero等<sup>[8]</sup>采用光强传输方程方法对感染疟疾的红细胞进行三维折射率重建,最终可通过红细胞的形状、折射率的准均匀空间分布和血红蛋白的准均匀浓度来识别红细胞是否感染。2021年,Quan等<sup>[9]</sup>综述了基于离轴数字全息和光强传输方程的多模显微系统,实现了三维空间同步定量相位和荧光成像。这些研究结果表明,基于光强传

输方程的方法能够快速获取定量相位信息,为显微成像领域的研究提供了有力的支持。

针对市面所售卖的相位显微镜不仅体积庞大(约45 cm×50 cm×60 cm)、售价也高达数万元且部分高性能相位显微镜目前只存在于科研实验室中的问题,本文提出一款便携式相位显微镜,不仅将尺寸控制在25 cm×10 cm×20 cm内、成本控制在5000元以内,且性能良好。所设计的显微镜不仅可对活细胞进行实时的定量检测,而且可用于透明样本的缺陷检测。

## 2 系统原理分析

### 2.1 相位恢复原理

由于所提系统无需复杂的干涉器件,为了使系统结构更简单,采用基于光强传输方程<sup>[10-11]</sup>的方法来恢复相位:

$$-k \frac{\partial I}{\partial z} = \nabla \cdot (I \nabla \phi), \quad (1)$$

式中:光波波数  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $\nabla$  为作用于  $(x, y)$  平面的 Hamilton 梯度算子;  $I$  为聚焦图像的光强;  $\partial I/\partial z$  为焦点平面的光强沿光轴方向的变化梯度;  $\phi$  为物体相位。

根据传输方程可知,在整个系统中,仅需获取欠焦和过焦图像即可进行相位的恢复。其中:式(1)左侧  $k$  为光波波数,而微分则可以用两张相同离焦距离的离焦图像的差分来近似;为了减小误差,可利用两张离焦图像的加权平均来计算,而无需通过系统直接获得对焦图像。至此,可借助傅里叶变换法推导出相位的求解公式,其方程的求解示意图如图1所示。其中,  $\psi(\mathbf{r})$  为辅助函数<sup>[12]</sup>,  $\mathbf{r}$  为横向位置坐标  $(x, y)$ 。

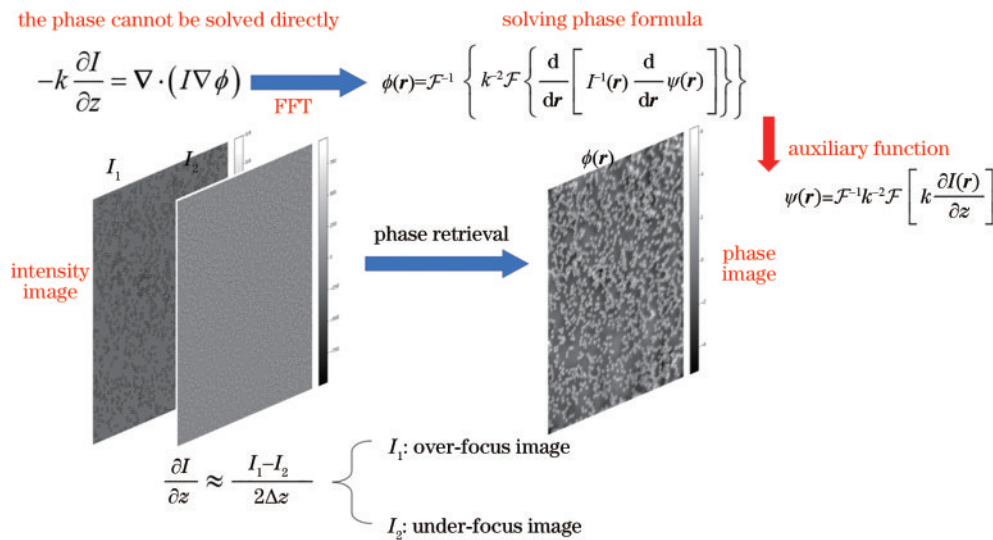


图1 光强传输方程的求解示意图

Fig. 1 Schematic diagram for solving the transmission equation of light intensity

### 2.2 系统总体设计

根据上述原理可知,整个系统仅需两张离焦图像即可计算出当前图像的相位分布  $\phi$ 。而为了提高相位恢复效率,采用两个闭环步进电机搭载两个 CMOS 成

像芯片来控制离焦量,以实现两张离焦图像的快速获取。随后在 PC 机上对图像数据进行相位恢复计算,并最终将相位分布/高度分布图像显示到交互软件中。系统的基本原理如图 2 所示。

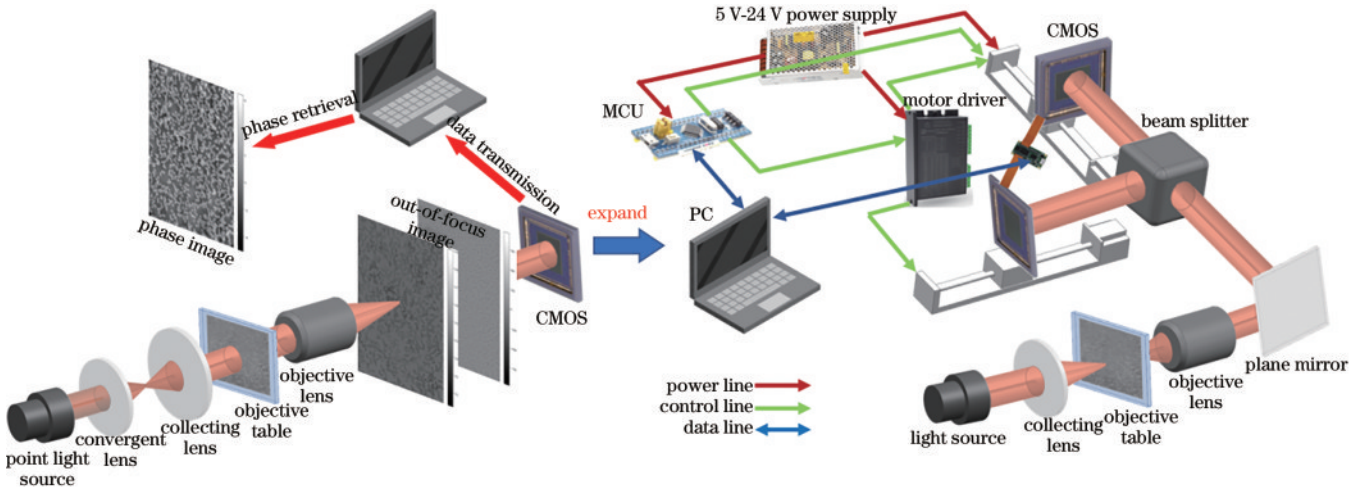


图 2 系统基本原理图

Fig. 2 Basic schematic diagram of the system

为了更加直观地描述便携式定量相位显微成像系统的功能,建立了如图 3 所示的系统框图。该设计包

含显微成像的硬件平台设计和交互软件设计以及整个成像系统的性能测试与应用测试。

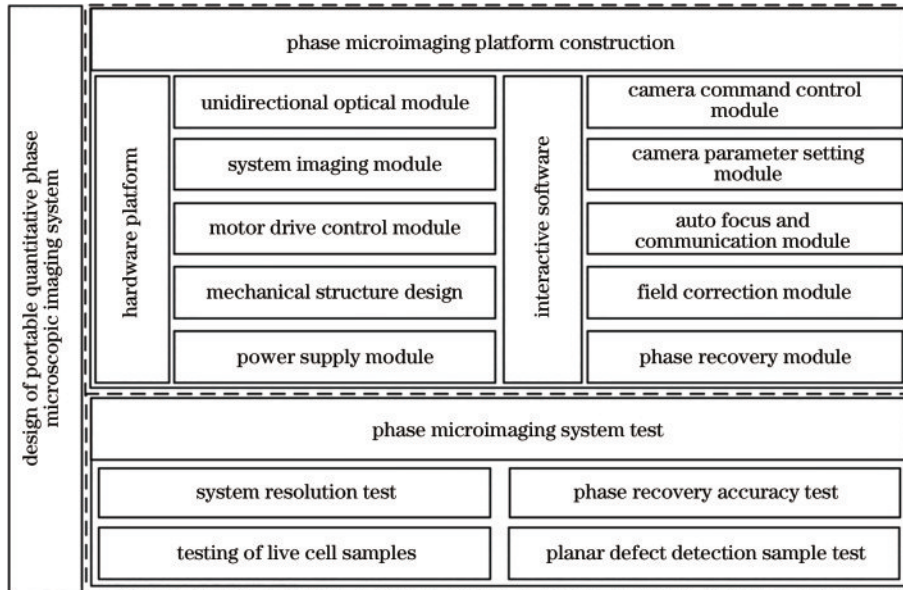


图 3 系统组成框图

Fig. 3 System composition block diagram

## 3 系统硬件平台设计

### 3.1 单向光路模块

以往的显微成像多采用正置光路,光路简单且光损少,但由于其工作距离较短,对样本的高度有一定的要求。为克服这一局限,本系统倒置光路,即按照光源-样本-物镜的顺序排列,这样不会受限于样本的高度,可轻松观察载物台上的各类样本。

### 3.1.2 相关器件选型

为了同时满足系统的性能和成本要求,对于相关器件的选型则显得尤为重要。对于光源,选择波长为 633 nm 且透射率较高的红光。对于物镜,选择校正了球差、彗差的无限远平场消色差物镜。在 10 倍和 20 倍的放大倍数下,获取到的图像畸变会很小。为了将光分成两束相同的光并将其传输到图像传感器中,采用了分光比为 1:1 的分束镜来实现。此外,使用直角反



射棱镜将光路反射 90°, 以确保携带样本信息的光能够进入图像传感器。

### 3.1.3 机械结构设计

为了缩小系统体积, 根据相关器件尺寸自主设计机械结构, 并考虑到成本问题, 大部分连接件采用光固化 3D 打印技术制备。需提及的是, 由于光路的严格

性, 细小的偏差都会对最终的成像造成很大的影响, 因此为保证光路结构的稳定性, 不仅两块固定板选用金属制作, 且在光源外壳、载物台及物镜固定板部件中增设筋膜组件, 使其固定面积大大增加。机械结构与装配实物图如图 4 所示。

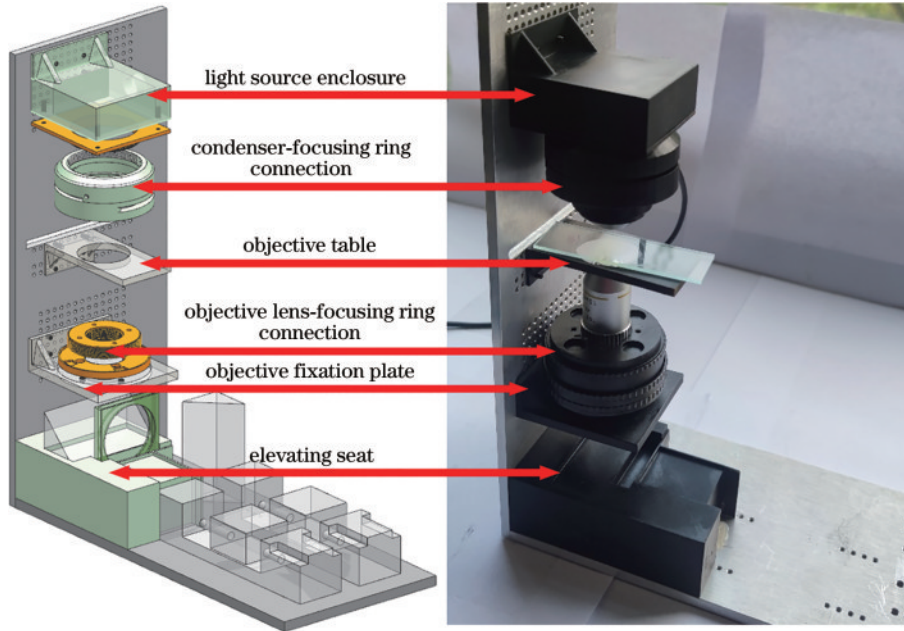


图 4 机械结构装配图及实物图展示

Fig. 4 Mechanical structure assembly drawing and physical drawing display

## 3.2 系统成像模块

在显微成像领域, 通常使用网络相机搭配高品质物镜进行成像, 考虑到设计成本, 系统摒弃了大尺寸的 CCD 成像器件, 采用像元尺寸为  $4.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$  的双 CMOS 芯片的大恒相机, 市场价格 3000 元。其详细参数如表 1 所示。

表 1 CMOS 相机的详细参数

Table 1 Detailed parameters for CMOS cameras

| Camera indicator | Performance parameter                      |
|------------------|--|
| Model of camera  | Daheng VEN-134-90U3M-D                     |
| Data interface   | USB 3.0                                    |
| Resolution       | $1280 \times 1024 \times 2$                |
| FPS              | 90   |
| Pixel size       | $4.8\ \mu\text{m} \times 4.8\ \mu\text{m}$ |

## 3.3 电机驱动控制模块

为保证电机移动的精度, 选用带有细分和旋转编码器的电机驱动器, 搭配闭环步进电机实现高精度的位移控制。

实际操作中由于最终的离焦距离的位移精度为微米级, 原始步进电机需 200 个脉冲转动一圈, 丝杆精度为 0.1 mm, 现设置为 10 细分后, 需 2000 个脉冲前进一圈, 即 1 mm。其电机控制部分的接线图如图 5 所示。

## 3.4 电源供电模块

在系统的供电方面, 电机驱动器需要 24 V 电压供电, 微控制器需要 5 V 供电, 一共两种电压的需求, 因此选择双输出电源, 可同时输出 24 V 和 5 V 的电压, 市场价格 200 元。后期可以考虑用大容量充电电池来替换, 并设计 24 V 转 5 V 电压转换模块来给微控制器供电, 提高其便携性。

## 4 系统交互软件设计

系统配套软件基于 C++ 语言开发, 使用大恒工业相机配套 SDK 开发包进行二次开发, 开发平台基于 Qt Creator 和 Opencv4.1.0 图像处理库, 具有优秀的扩展性及移植性, 定量相位实时显微成像交互软件的 GUI 界面如图 6 所示。

交互软件结合 CMOS 相机官方提供的 SDK 进行二次开发, 不仅可以实现端口扫描、相机的实时预览, 还可针对相机曝光时间、增益等相关参数进行调整。考虑到软件的简易可用性, 可通过读写配置文件来进行快速的相机参数设置, 以提高实验样本的观察效率。

软件结合了基于图像信息的自动对焦算法, 来快速获取对焦图像, 并通过串口实现电机与上位机之间的通信。其基本流程如下: 首先确定电机移动的初始坐标位置, “开始自动对焦” 则意味着电机在回归零点

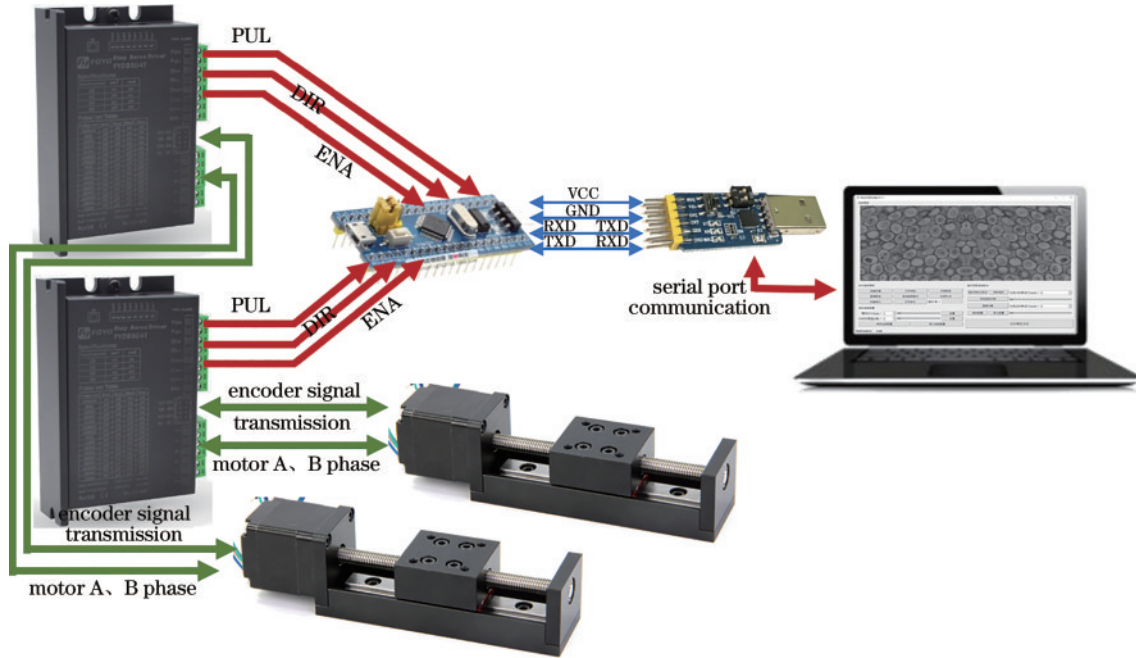


图 5 电机驱动电路接线原理图  
Fig. 5 Motor drive circuit wiring schematic diagram

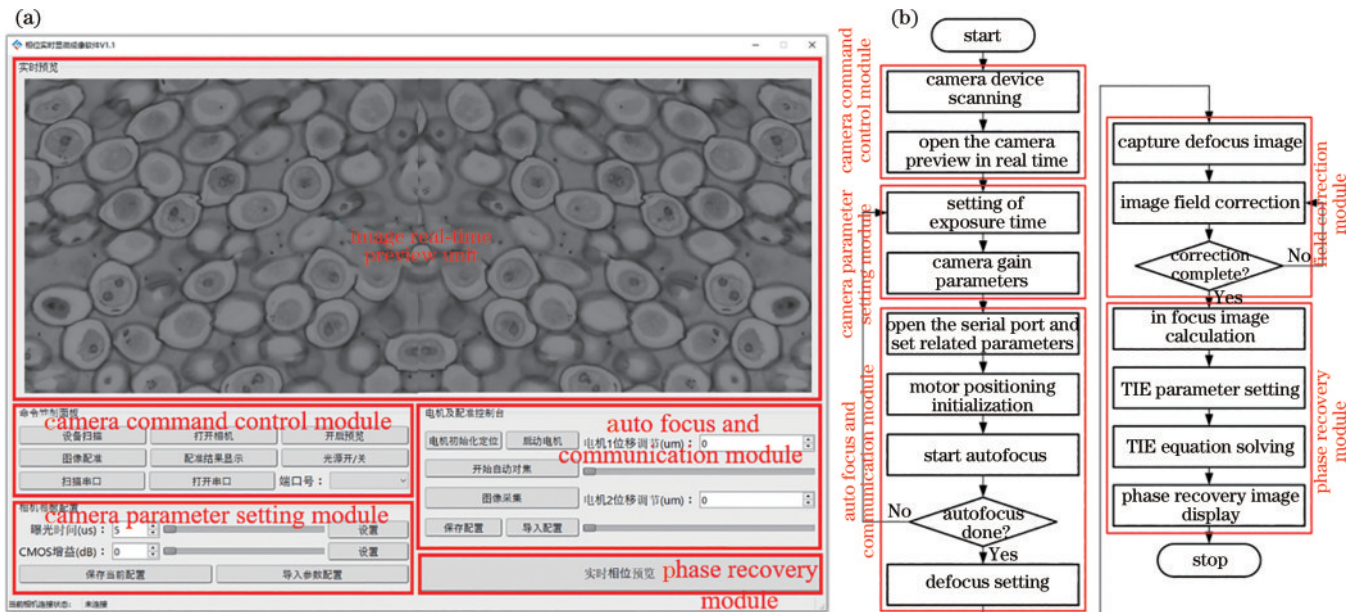


图 6 系统交互软件 GUI 界面及基本流程图。(a) GUI 界面及模块分布；(b) 软件基本使用流程图  
Fig. 6 System interactive software GUI interface and basic flow chart. (a) GUI interface and module distribution;  
(b) software basic usage flow chart

后, X轴和 Y轴电机分别会以一定的步长搭载相机向后移动 20 次, 每移动一次便对单帧图像进行清晰度评价并记录当前位置, 以评价函数值最高的位置作为对焦位置。

微控制器与上位机软件间的通信协议的制定如表 2 所示。上位机通过串口发送一系列命令, 微控制器在接收后会对 IO 口进行相应的动作。

由于装配误差及系统误差等因素, 最终呈现在两个 CMOS 中的图像视场不一致的现象会导致最终相

位恢复的准确率大幅降低, 因此本系统嵌入基于变换域的视场校正算法, 通过计算将图像频域中的偏差转换为偏移来进行迭代配准, 使得最终获取到的两张离焦图像保持一致的视场范围, 其精度可达亚像素级, 校正后的图像效果如图 7 所示。

在设置相同的离焦位置并获取两张离焦图像后, 将离焦图像送入视场校正模块进行视场校正, 最终可通过求解光强传输方程来求解相位图像, 软件提供了一个单独子窗口用于实时预览相位图像。



表 2 通讯协议制定

Table 2 Communication protocol formulation

| Name of code  | The meaning of the command                                   |
|---------------|--|
| $A=0/A=1$     | X-axis motor is off/enabled                                  |
| $B=0/B=1$     | Y-axis motor is off/enabled                                  |
| $X+=n/X-=n$   | X axis motor advances/back $n$ pulses                        |
| $Y+=n/Y-=n$   | Y axis motor advances/back $n$ pulses                        |
| $X_s=d/Y_s=d$ | X/Y axis motor moves to $n$ position in absolute coordinates |

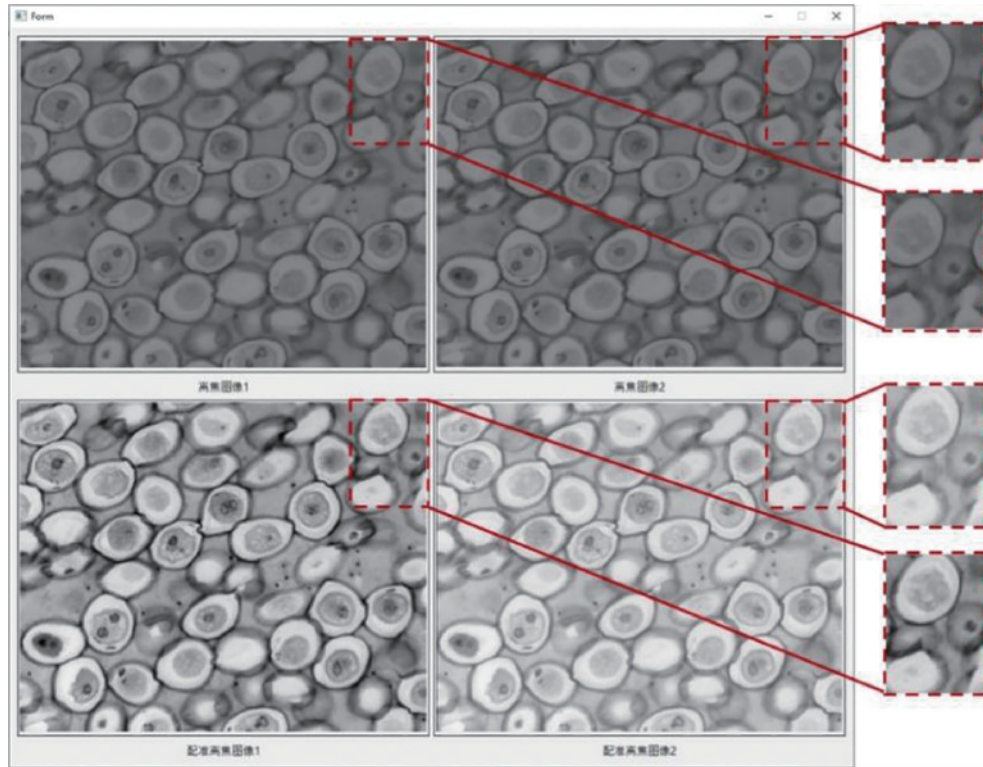


图 7 视场校正结果展示图

Fig. 7 Display of field correction results

以上就是小型相位显微成像系统的设计,模块之间相互关联,共同作用于系统。系统交互软件的设计,更简化了系统的使用,加快了样本的观察效率。最终经过计算,整个定量相位显微成像系统的成本在 5000 元左右,相对于市面上数万元的商用相位显微镜,虽性

能稍有下降,但大大缩小了系统体积且降低了生产成本。在后续仍可在机械结构上继续进行改进,进一步缩小系统体积并在算法实时性上进一步优化。图 8 为整个系统的软硬件联合图。

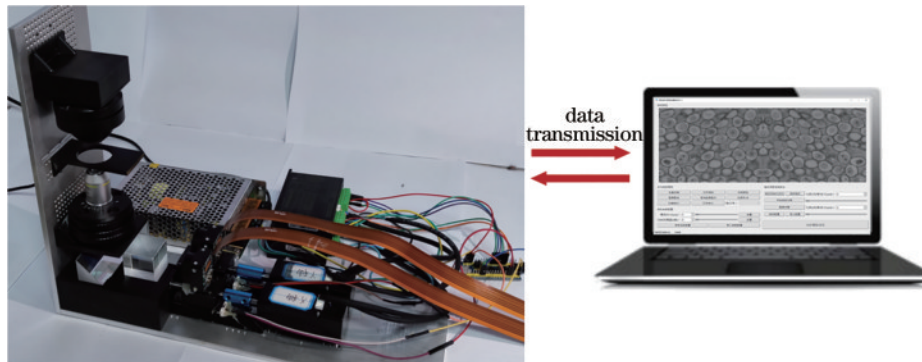


图 8 系统软硬件联合图

Fig. 8 System hardware and software joint image

## 5 系统测试及结果分析

### 5.1 分辨率测试

针对系统分辨率,利用 USAF1951 分辨率板进行实验检测。将分辨率板放置于载物台,分别利用 10 倍物镜及 20 倍物镜进行对焦成像,对焦成功后观察分辨率板中成像清晰且最远的位置,并通过分辨率板对应的分辨率表进行定位,即可得出系统的分辨率。图 9 为分辨率板的实物图。

由于相位成像的特点,使用 40 倍及更高倍物镜

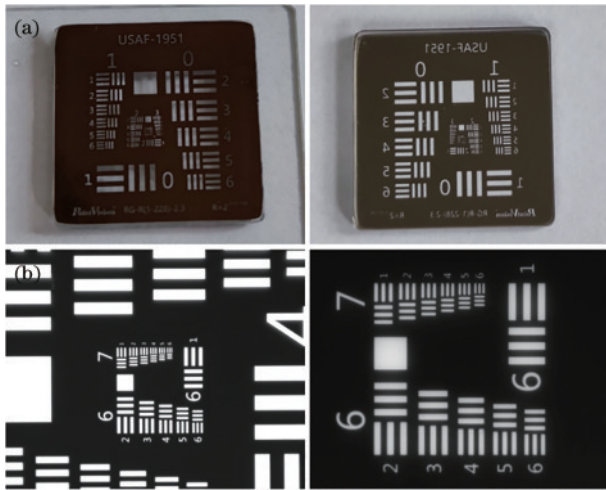


图 9 系统分辨率测试。(a) USAF-1951 分辨率板实物图;  
(b) 10 倍、20 倍物镜下的分辨率板图像

Fig. 9 System resolution test. (a) Physical image of USAF-1951 resolution board; (b) resolution plate image under 10 and 20 times objective lens

时,物镜采样距离无法满足成像关系,因此系统只考虑 10 倍及 20 倍物镜下的成像。

观察图像可得,使用 10 倍物镜时可清晰观察到第 7 组第 6 线,通过查阅配套的分辨率表可得,系统在搭载 10 倍物镜下系统分辨率可达到最高的  $2.19 \mu\text{m}$ ,而 20 倍物镜下的系统分辨率必定更高,由于受此分辨率板极限的限制,具体数值无法查知。

对于本系统所选的物镜参数而言,10 倍物镜的数值孔径为 0.25,其理想光学分辨率为  $1.525 \mu\text{m}$ ,这是由于系统内部存在的各种误差引起的,无法完全避免,且 10 倍物镜下的  $2.19 \mu\text{m}$  的分辨率对于本系统也完全满足使用要求,符合设计预期。

### 5.2 相位恢复的准确率测试

系统中多方面的因素都会导致最终的相位恢复产生偏差:如对焦图像获取不当会导致离焦图像发生偏差;视场校正算法的准确率大于像素级及光强传输方程求解相位本身为近似方法。因此为验证最终相位恢复的准确率,现利用标准随机相位板来进行相位成像,其相位分布呈阶梯状分布,阶梯的高度差近似为  $600 \text{ nm}$ ,由于本课题使用的为  $633 \text{ nm}$  波长的红光,因此搭配此相位板可计算出其阶梯的相位差大致为  $\pi$ 。

将随机相位板放置在载物台中,使用 10 倍物镜进行成像,离焦距离设置为  $0.5 \text{ mm}$  并进行视场校正,系统所获得的校正后的离焦图像及恢复后的相位图像如图 10(a)所示。

由于随机相位板的相位差大致为  $\pi$ ,因此可利用此数据来验证本系统相位恢复的准确性。图 10(b)为随机相位板的三维相位图像,沿虚线部分划开所得的

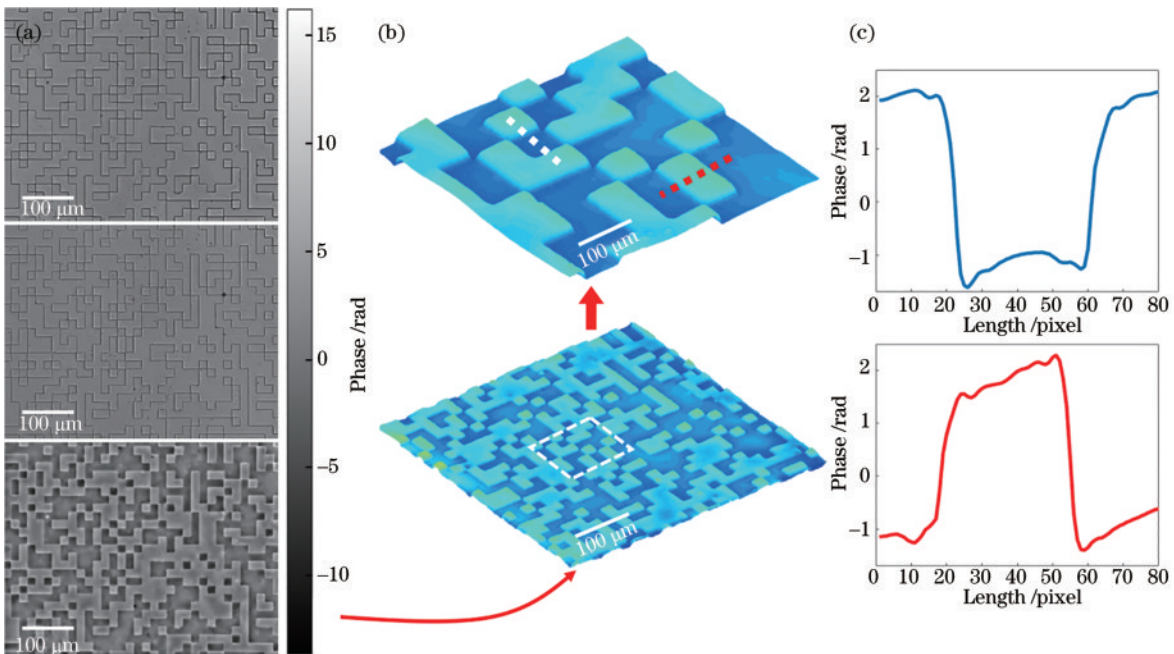


图 10 系统相位恢复准确率测试。(a)相位恢复板的离焦图像及相位图像;(b)三维相位分布;(c)沿虚线裁剪开的截面图像

Fig. 10 System phase recovery accuracy test. (a) The defocusing image and phase image of the phase recovery plate; (b) three-dimensional phase distribution; (c) a cross-section image cropped along the dotted line



剖面图如图 10(c)所示。

由于一些离焦图像的获取有误或者视场校正的误差较大时,便会造成更大的误差,由图 10(c)可知,随机相位板的相位差也同样大致在  $\pi$  左右,说明本系统的误差较小,可以满足相关使用。

## 6 系统应用场景分析

### 6.1 活细胞的定量检测

为探究活细胞的定量检测,采用耐受性较好的 Vero 细胞进行实时性观察,并加入胰蛋白酶来促使细

胞有较快的变化速度便于使用本系统进行观察。采集 Vero 细胞不同酶化阶段的部分离焦图像。随着酶化进程的推移,Vero 细胞逐渐由菱形变为圆形,此步骤采集到的图像均为经过视场校正并裁剪后的图像,离焦距离设置为 0.5 mm。

此时便可利用上文提到的相位恢复方法来进行相位求解,即利用傅里叶变换来求解光强传输方程,将光强图像转换为相位图像,进而可以观察到细胞的三维形态,不同时刻的二维相位分布图像及三维高度分布图像如图 11 所示。

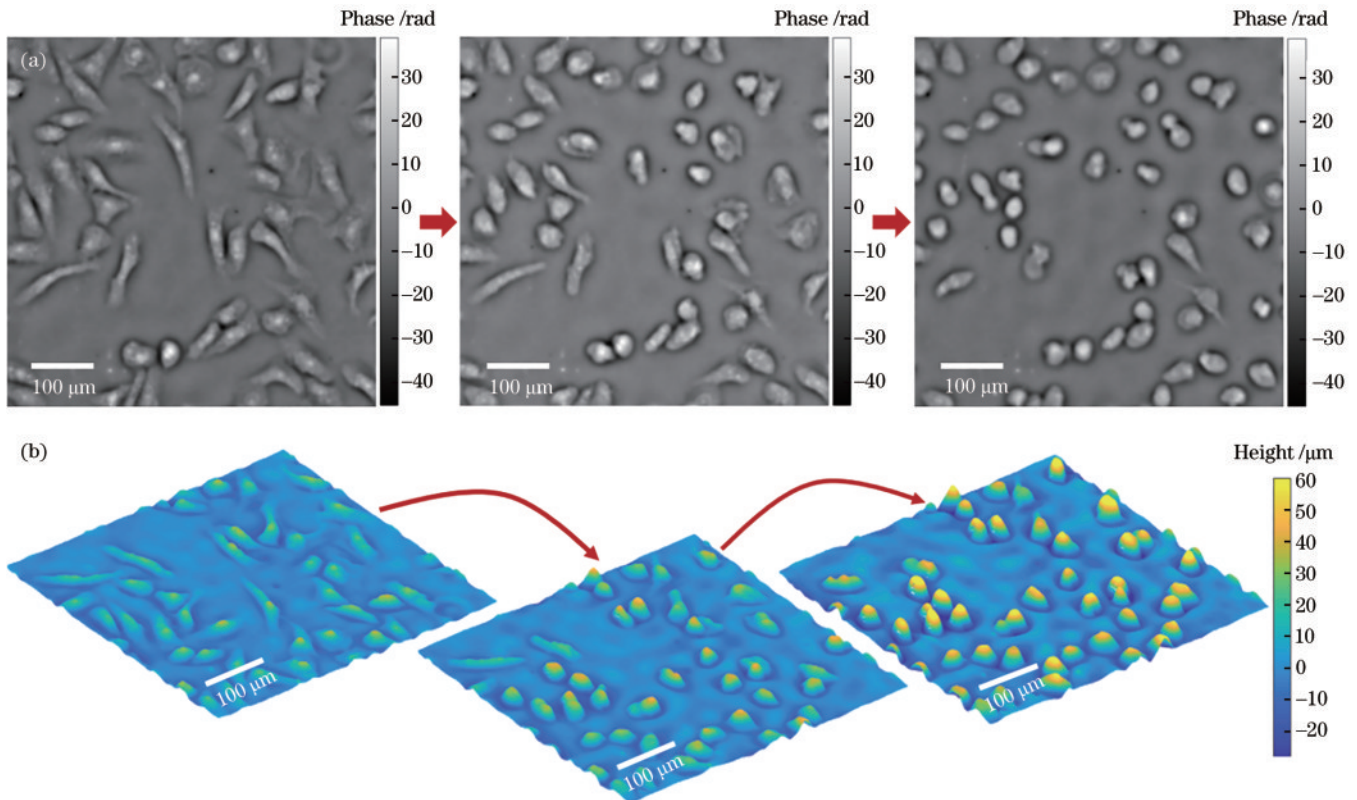


图 11 Vero 细胞酶化过程相位图及高度分布。(a) 二维相位分布图;(b) 三维高度分布图

Fig. 11 Phase diagrams and height distribution of Vero cell enzymatic process. (a) Two-dimensional phase distribution diagram; (b) three-dimensional height distribution

结果表明,本系统不仅能够实现细胞样本的定量测量,并且对于活细胞的实时观测也有较好的应用。不仅如此,本系统在活细胞对于外界因素影响的应激反应、细胞生长环境的优劣等方面具有一定的研究意义。

针对实时性方面的分析,由于相机所采集到的单张图像的分辨率为  $1280 \times 1024$ ,如果对原始图像进行相位恢复计算,则会产生由于计算量大造成的耗时间长的问題。实验结果表明,利用原始图像进行计算所需的时间为 1.03 s。为了减少计算量,提高系统的实时性,将选用原始图像中的  $500 \times 500$  个像素点进行计算,最终处理单张图像所需时间为 0.32 s,即 1 s 可处理 3 张相位图,并显示到上位机中。

### 6.2 平面缺陷检测

找寻标准的平面玻璃,对其进行随机的划痕,观察玻璃的微观图像。物镜倍数选用  $10\times$ ,离焦距离设置为 0.5 mm。图 12 为系统获取到平面玻璃的相关图像,该平面玻璃的三维信息图像如图 12 右 1 所示。

此时,由相位图像可看出具有三维效果的缺陷,从此时玻璃的三维图像可以得出详细的缺陷信息,实现了定量检测。结果同样表明,本系统完全可以实现平面透明玻璃的缺陷检测,剔除不满足标准范围的玻璃件,对缺陷检测领域有着重要意义。

综上所述,所设计的定量相位显微成像系统不仅可应用于活细胞的实时定量观察,而且在透明或半透明物体的缺陷定量检测中也能起到重要的作用,并且在其余的领域,如微生物识别、细胞形态分类等等,都



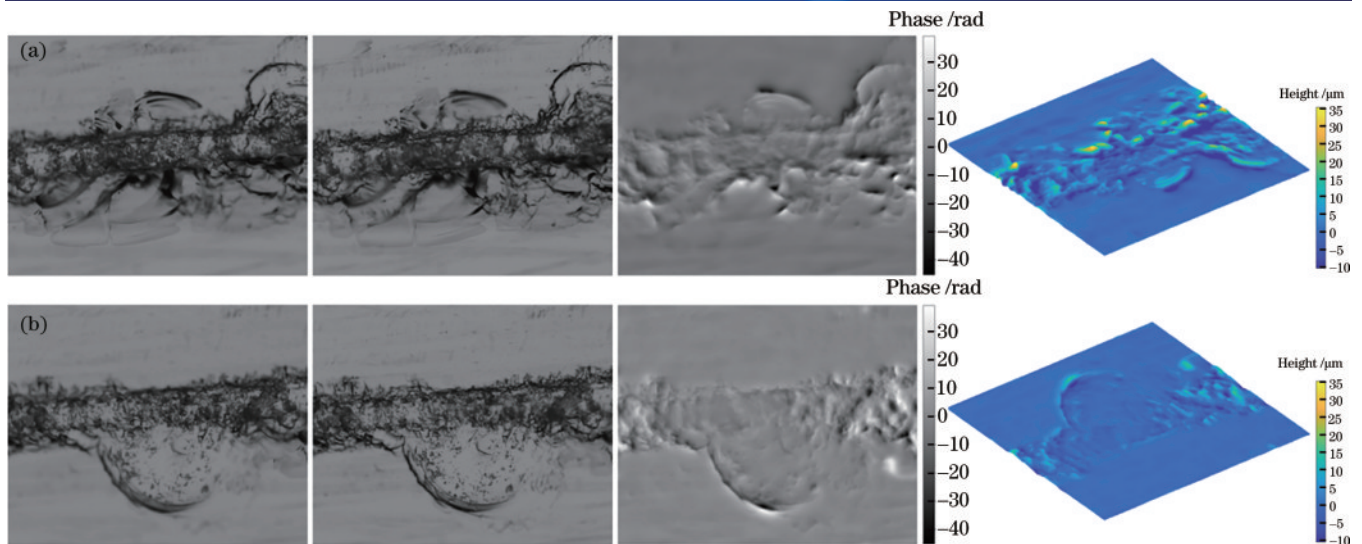


图 12 平面玻璃的离焦图像、相位图像和高度分布(左 1:欠焦,左 2:过焦,左 3:相位,右 1:高度)。(a)划痕缺陷视角 1;  
(b)划痕缺陷视角 2

Fig. 12 Defocusing image, phase image and height distribution of flat glass(left 1: underfocus, left 2: overfocus, left 3: phase, right 1: height). (a) Scratch defect perspective 1; (b) scratch defect perspective 2

能够完美应用其中。

相对比市面上所售卖的定量相位显微镜,两者均可实现活细胞的定量成像并具备相对完善的交互软件,且可以实时观测。然而为了简化结构、降低成本、提高便携性,本系统采用了 CMOS 成像器件,而不是昂贵的高分辨率、大视场、低噪声的 CCD 成像器件,摆脱了昂贵的干涉器件,从而大幅缩小了设备体积。如果需要追求更高的性能,可以替换为高性能的 CCD 相机,并加配高倍物镜(如 100 倍)以便观察更多的样本细节,但需考虑到视场畸变的问题。

## 7 结 论

1) 自主设计了系统的三维机械结构,并通过光固化 3D 打印技术搭建实验平台,最终尺寸仅有  $25\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ,比市面售卖的相位显微镜的尺寸缩小了约 60%,大幅提高了设备的便携性,满足了预期的设计需求。

2) 从器件选型、光路搭建到电路设计,开发了一套光、机、电一体化的相位显微成像设备。通过调用相机的 SDK 开发包实现图像的实时采集;使用双输出开关电源给设备供电;集成了相关的算法以保证相位恢复的准确率;在 USAF-1951 上的分辨率测试结果表明,10 倍物镜下系统的分辨率可达  $2.19\text{ }\mu\text{m}$ ,在随机相位板上的测试表明系统最终的相位恢复准确率达到可用标准。

3) 基于 Pyqt5 开发了一套人机交互友好的配套软件,不仅界面美观且操作简便。可完成图像的实时预览及相位恢复图像的实时计算显示,还可实现与下位机间的数据通信,联合实现高准确率的对焦算法。

4) 针对系统的应用场景,打破了传统显微镜只应

用在观察细胞或微生物的观念,对 Vero 活细胞酶化过程的观察和玻璃划痕缺陷的检测表明,系统不仅可完成活细胞的实时定量分析,还在透明/半透明平面缺陷的定量检测中起到了重要的作用。

5) 系统的分辨率测试和相位恢复的准确率测试表明,本系统成本低、便携性高,可实现无标记样本的定量测量。

## 参 考 文 献

- [1] 仇佳乐. 相位成像技术在微流通道细胞检测中的应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.  
Qiu J L. Research of phase imaging technology applied in micro-channel cell's detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [2] Pfeiffer F, Bech M, Bunk O, et al. Hard-X-ray dark-field imaging using a grating interferometer[J]. Nature Materials, 2008, 7(2): 134-137.
- [3] Zuo C, Chen Q, Qu W J, et al. Phase aberration compensation in digital holographic microscopy based on principal component analysis[J]. Optics Letters, 2013, 38(10): 1724-1726.
- [4] 左超, 陈钱, 孙佳嵩, 等. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像: 文献综述与最新进展[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609002.  
Zuo C, Chen Q, Sun J S, et al. Non-interferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy based on transport of intensity equation: a review[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0609002.
- [5] Martinez-Carranza J, Falaggis K, Kozacki T. Fast and accurate phase-unwrapping algorithm based on the transport of intensity equation[J]. Applied Optics, 2017, 56(25): 7079-7088.
- [6] Poola P K, John R. Label-free nanoscale characterization of red blood cell structure and dynamics using single-shot

- transport of intensity equation[J]. Journal of Biomedical Optics, 2017, 22(10): 106001.
- [7] Gong Q T, Wei Q, Xu J, et al. Digital field of view correction combined dual-view transport of intensity equation method for real-time quantitative imaging[J]. Optical Engineering, 2018, 57(6): 063102.
- [8] Agnero M, Konan K, Tokou Z, et al. Malaria-infected red blood cell analysis through optical and biochemical parameters using the transport of intensity equation and the microscope's optical properties[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3045.
- [9] Quan X Y, Kumar M, Rajput S K, et al. Multimodal microscopy: fast acquisition of quantitative phase and fluorescence imaging in 3D space[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(4): 6800911.
- [10] Streibl N. Phase imaging by the transport equation of intensity[J]. Optics Communications, 1984, 49(1): 6-10.
- [11] 王杰宇, 王华英, 王学, 等. 基于光强传输方程离散余弦变换求解的数字全息相位解调方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2109001.
- Wang J Y, Wang H Y, Wang X, et al. Digital holographic phase unwrapping based on transport intensity equation solved with discrete cosine transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2109001.
- [12] Gureyev T E, Roberts A, Nugent K A. Phase retrieval with the transport-of-intensity equation: matrix solution with use of Zernike polynomials[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(9): 1932-1941.