

## 基于无线传输的小型化细胞显微图像采集系统设计

刘润娜\*, 刘静, 田华, 郑三婷, 郑婷婷

西安外事学院医学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 设计一款可以无线传输的小型化、低成本、便携式细胞显微图像采集系统, 该系统的尺寸为 13 cm×5 cm×20 cm。基于 Unigraphics NX 软件设计结构并进行三维打印实现低成本轻量化, 质量为~1.5 kg, 使用 OpenCV 库中的函数设计智能显微图像采集软件平台。经测试, 所提系统可通过 WiFi 进行显微图像的无线传输, 实现细胞计数及细胞迁移, 满足普通细胞观察的实验要求, 分辨率达 1.5 μm, 可应用于教学及科学研究。

**关键词** 显微镜; 无线传输; 细胞计数; 三维打印

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241029

## Design of a Miniaturized Cell Microscopic Image Acquisition System Based on Wireless Transmission

Liu Runna\*, Liu Jing, Tian Hua, Zheng Santing, Zheng Tingting

College of Medicine, Xi'an International University, Xi'an 710077, Shaanxi, China

**Abstract** A miniaturized, low-cost, and portable cell microscopic image acquisition system designed for wireless transmission has been developed, using Unigraphics NX software and three-dimensional printing for system structure to achieve cost efficiency and lightweight. The system measures 13 cm×5 cm×20 cm and weighs ~1.5 kg. An intelligent microimage acquisition software platform is built using functions from the OpenCV library. Testing results demonstrate that the proposed system successfully transmits microscopic images wirelessly via WiFi, performs cell counting and cell migration, and meets the requirements of standard cell observation experiments. The resolution of system is 1.5 μm, which is suitable for both teaching and scientific research applications.

**Key words** microscope; wireless transmission; cell counting; three-dimensional printing

### 1 引言

近年来, 科学技术的发展导致对微观世界的探索愈重要, 研究人员在分子领域中也取得很大的突破。尤其是生物工业的发展越来越需要对微观物质进行更多的探索, 显微镜正是一个不可或缺的解密工具, 它在已知的宏观世界和奇妙的未知微观世界之间架起了桥梁<sup>[1]</sup>。显微镜的应用领域非常广泛<sup>[2]</sup>, 可协助科研人员进行生物、医学研究, 在动植物养殖行业中可用来观测幼体生长, 并应用于虫、藻、菌、水质化验等方面的研究<sup>[3]</sup>。

显微镜的出现及发展使科学界能更好地了解生物世界, 并在科学与分析方面实现更高水平的创新<sup>[4]</sup>。尽管光学成像技术发展迅速, 但大多先进的显微成像技术仍需要复杂而昂贵的设备, 这极大程度限制了它

们在装备良好的实验室之外的场景和教育领域作为科学教学工具的使用<sup>[5-6]</sup>。与此同时, 在资源有限的情况下, 与科研领域不同, 实验室环境中这种成像设备应考虑体积、质量、成本效益、准确度和操作难易程度, 以便实验室人员及学生操作。而当前显微镜体积往往较大, 在大多数场合中不方便使用<sup>[7-8]</sup>。基于此, 众多学者致力于研究轻量化和低成本显微镜。便携式显微镜 Foldscope 由于其结构紧凑、质量小和易维护等优点, 目前已经普遍应用于很多领域<sup>[9]</sup>: 在诊断领域, 2018 年 Waliullah 用集成到手机中的折叠镜来研究组织病理学分析, 并测试折叠镜对人体血液组织病理学样本研究(如血细胞计数和形态学分析)的适用性; 在公共卫生方面, 2019 年 Rathod 等<sup>[10]</sup>、2020 年 Burgohain 等<sup>[11]</sup>设计可用于快速鉴定废水中微生物的 Foldscope; 在教育领域, 为让学生更好地掌握科学知识, 2021 年 Das 等<sup>[12]</sup>

收稿日期: 2024-04-03; 修回日期: 2024-05-06; 录用日期: 2024-05-28; 网络首发日期: 2024-06-11

通信作者: liurunna@xaiu.edu.com

带领学生认识折叠镜并动手指导,帮助学生实现对生物学微观领域更深的理解。此类显微镜虽然便携、成本低,但其放大倍率有限<sup>[13]</sup>,在弱光条件下使用时需配备光源且必须在干燥的环境下进行<sup>[14-15]</sup>。此外,由于其载玻片面积较小,能放置的样品数量有限<sup>[16]</sup>且焦点外清晰度较低,在调焦时会导致活体受伤,观察细胞时敏感性较差<sup>[17-18]</sup>。综上,Foldscope的功能和稳定性仍面临很多限制因素,无法满足教学及科学研究需求。

在当前学术研究氛围中,显微镜与图像处理技术的结合为科学研究、医学诊断、教育等多个领域带来显著的进步<sup>[19-20]</sup>。在对获取到的细胞进行计数和观察细胞迁移时,往往需要人工辨识与计算,不仅费时费力,而且精准度较低,存在误差。对于特殊图像还需要有经验的人员进行处理<sup>[21]</sup>,一定程度上造成时间和人力的浪费,给进一步开展研究带来很多困扰。

基于此,本文设计并实现一款小型化的智能显微图像采集系统。该系统的优势在于体积小、成本低且操作简单。该系统采用3D打印技术完成机械结构,实现设备的轻量化,通过WiFi将采集到的细胞图像传输到配套软件平台,并在软件平台中加入通用显微图像处理算法,实现对显微图像细胞的计数和迁移,满足教学及科学研究领域的基本需求。

## 2 显微图像采集系统设计

该系统主要由两部分组成,即小型化显微镜系统和智能显微图像采集软件。小型化显微镜系统主要从电路、光路和机械结构这3个部分展开。智能显微图像采集软件通过WiFi模块与显微镜系统建立连接,可实现图像的预览、处理及数据的存储功能。基于无线传输的小型化显微图像采集系统设计如图1所示,其中CMOS为互补金属氧化物半导体器件。

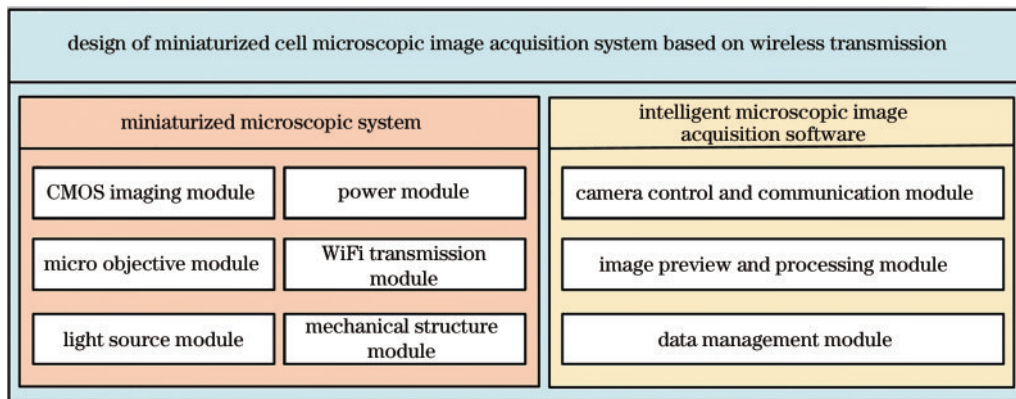


图1 基于无线传输的小型化显微图像采集系统设计框图

Fig. 1 Design block diagram of miniaturized microscopic image acquisition system based on wireless transmission

### 2.1 小型化显微镜系统设计

市面上的光学显微镜成像性能好,但体积大、价格贵且软件产品不支持二次开发,因此在设计显微镜系统时,本着实现小型化、低成本等目标确定各模块选型。采集到清晰的图像在显微镜系统设计中至关重要,系统采用无线网络相机(杭州海康威视数字技术股份有限公司)对细胞显微图像进行采集,该图像传感器具备成本低、功耗低、集成度高等优点,提供软件开发工具包(SDK),经过测试该相机能采集到清晰的细胞图像。

物镜的选择直接影响显微镜的分辨能力,系统采用195型消色差物镜,放大倍数为10倍,有效工作距离为6.5 mm。采用多个电容并联的连接方式为光源供电,光源由1个8位串行移位并行输出寄存器(74HC595D)、4个行驱动管(SDM4953)和64个发光二极管(LED)阵列组成,贴片LED的体积小、寿命长,符合轻量化设计要求。

小型化显微镜系统的机械结构模块设计主要包括支架设计、载物台设计、底座设计和光机一体化设

计4个部分。利用Unigraphics NX软件设计机械结构,通过3D打印技术实现设计好的3D模型,并将其进行组装。

电源是维持整个系统正常工作的基础,系统采用电压为12 V的锂电池为各模块供电。12 V锂电池直接为CMOS相机供电,通过AMS1117-5 V稳压器将电压从12 V降到5 V,再利用AMS1117-3.3 V稳压器将电压从5 V降到3.3 V,为WiFi模块和光源模块供电。显微镜和个人计算机(PC)之间通过WiFi传输数据。WiFi模块选用ESP8266,该模块成本低、易操作,通过串口调试助手工具配置好工作模式和用户名密码之后就可以实现显微镜和PC之间的数据传输。图2为小型化显微镜系统实物图与系统各模块的展示,搭建好的显微镜系统尺寸为13 cm×5 cm×20 cm,质量为~1.5 kg。

### 2.2 智能显微图像采集软件设计

为使小型细胞显微图像采集系统更智能从而方便用户使用,设计一款配套的智能显微图像采集软件,其软件主界面及使用流程如图3所示。该软件设计包括

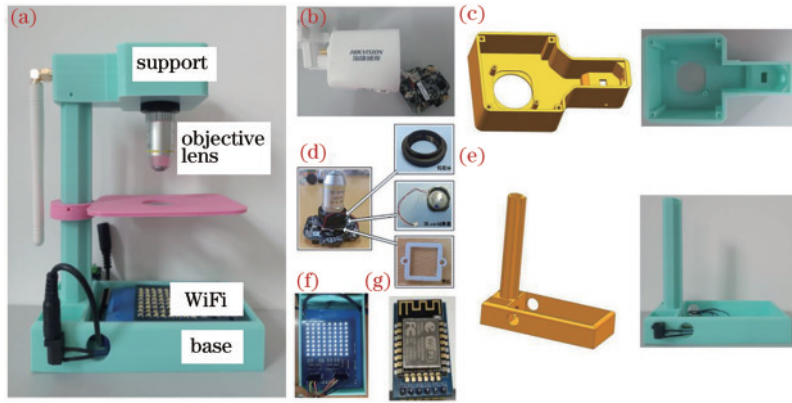


图 2 小型化显微镜实物图。(a)小型化显微镜系统;(b) COMS 成像相机;(c)支架 3D 模型与实物图;(d)主板与物镜组合图;(e)底座 3D 模型与实物图;(f) LED 阵列;(g) WiFi 模块

Fig. 2 Pictures of miniaturized microscope. (a) Miniaturized microscope system; (b) COMS imaging camera; (c) physical drawing of support and its 3D model; (d) combination diagram of motherboard and objective lens; (e) physical drawing of base and its 3D model; (f) LED array; (g) WiFi module

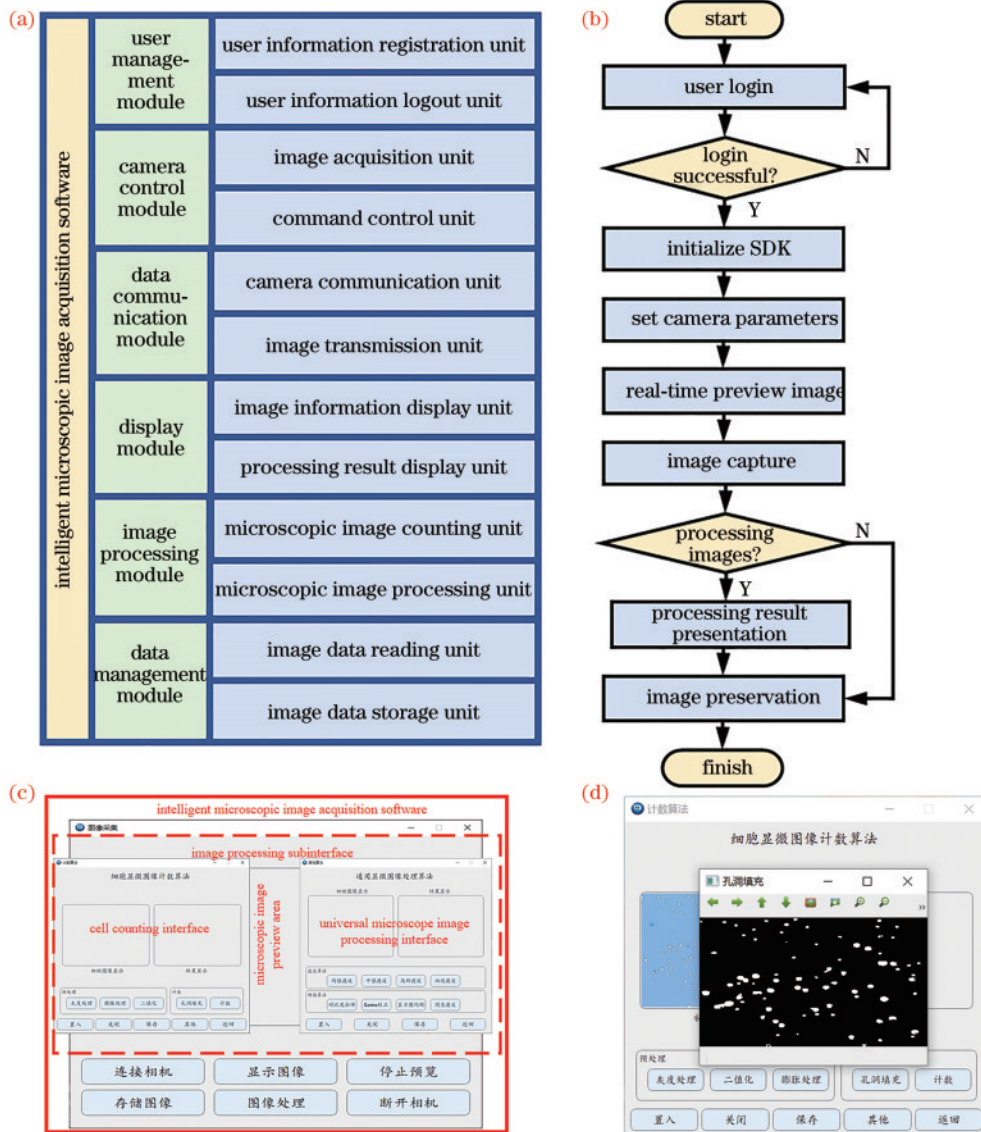


图 3 智能显微图像采集软件。(a)软件总体设计;(b)软件使用流程;(c)显微图像采集软件界面;(d)细胞显微图像计数孔洞填充结果

Fig. 3 Intelligent microscopic image acquisition software. (a) Overall design of the software; (b) usage flowchart of the software; (c) interface of microscopic image acquisition software; (d) counting hole filling result of cell microscopic image



用户管理模块、相机控制模块、数据通信模块、显示模块、图像处理模块和数据管理模块这 6 个功能部分。该软件可实现与相机互联、实时预览图片、存储数据等功能。需要后期对采集到的图像进行一系列研究处理,因此在所提软件中添加图像处理的功能,主要包括细胞计数功能和其他通用显微图像处理功能。

将相机与电脑连接前需要配置参数,通过设置不同的参数来控制采集图像的清晰度和精度。首先初始化相机的 SDK,然后设置设备的 IP 地址、端口号、用户名、密码,同时获取设备的配置信息并进行设置,完成相机的连接配置。点击“显示图像”按钮可在图像采集界面实时查看显微系统通过 WiFi 传输过来的细胞图像。点击“存储图像”按钮对细胞显微图像进行抓图,保存经过图像处理后的图片,图片以 PNG 格式存储到指定目录下。

图像处理模块用来处理采集到的细胞显微图像,主要包括细胞显微图像计数模块和通用显微图像处理模块;细胞显微图像计数模块对细胞图像进行预处理和计数;通用显微图像处理模块对细胞图像进行滤波增强。

### 3 显微图像处理算法

显微图像处理算法是一类用于处理和分析细胞显微图像的算法,主要包括通用显微图像处理算法和细胞显微图像计数算法,这些算法可用来提高图像质量、提取关键信息,为研究人员后续研究提供便利。

在采集和成像过程中,拍摄仪器的限制,以及光照、环境等因素的变化使采集的细胞显微图像存在噪声、图像的边缘模糊且不连续、目标和背景图像对比度低等问题。因此在对图像中的细胞进行计数前需要进行图像预处理。预处理算法主要包括灰度处理、边缘检测、膨胀处理和图像二值化等。

#### 3.1 细胞计数算法

无论是在细胞培养研究中还是临床检测中,细胞计数都占据非常重要的应用地位,细胞计数时需要考虑进行全画幅计数或只对感兴趣的区域内计数。如对部分区域的细胞计数则需要预处理时进行图像裁剪,本文只讨论全画幅计数。因为要对不同品种的细胞进行计数,而不同细胞有各自的成像模式,用统一算法实现比较困难,所以设计一种根据图像的实际调整的方法——基于面积的计数方法。该方法将预处理后的图像进行孔洞填充,让目标区域细胞图像变完整,以便于统计细胞个数,从而完成细胞图像全画幅计数,细胞计数算法流程如图 4 所示。

通用显微图像处理算法分为显微图像滤波算法和增强算法。图像滤波适用于时域和频域,它能增强一些图像特征或除去图像中一些不被需要的部分。通过调用 OpenCV 库中 Blur 函数、medianBlur 函

数、GaussianBlur 函数、bilateralFilter 函数等实现均值滤波、中值滤波、高斯滤波和双边滤波算法。

图像增强在显微细胞图像处理中发挥着关键作用,因为直接采集到的显微细胞图像通常有低对比度、含噪声、图像模糊等特点。图像增强能提高原始图像质量、突出细节、减少噪声,从而使细胞的特征更明显,有助于研究人员识别和分析细胞结构。在该平台中实现了对比度拉伸、Gamma 校正、直方图均衡化和同态滤波等增强处理,其图像处理结果如图 4 所示。

#### 3.2 细胞迁移算法

通过细胞迁移实验可了解正常细胞的基本功能、生长发育和生理过程,如胚胎发育、伤口愈合等,并探究细胞修复能力,因为在伤口愈合、组织再生等过程中,细胞需要通过迁移来填补损伤区域。通过细胞迁移实验还可揭示细胞间相互作用,例如肿瘤细胞可能通过诱导周围细胞的迁移来促进自身生长和扩散。因此细胞迁移实验结果可作为评估治疗效果的一个指标。

该实验是采用细胞划线的方法人为制造“伤口”,观察不同试剂下细胞迁移的速度,从而评估“伤口”愈合情况。首先按照固定密度接种细胞,并将培养皿置于培养箱中培养 36 h 直至细胞完全覆盖孔板底部。随后用枪头在孔板底部进行划线操作制造“伤口”,按照行序依次加入不同试剂完成前处理,之后将细胞进行划线操作,最后在设置的时间间隔采集图像。将采集图像进行处理,首先对其进行灰度化使其成为灰度图像,然后通过边缘检测区分细胞边缘轮廓,对图像进行多次膨胀可使区域划分更明显,随后进行垂直投影得到每一列的黑白像素值,再找出平均阈值,最终找到细胞迁移边界线,实现细胞迁移的功能。图 5 为细胞迁移算法实现流程及处理结果。

## 4 显微图像系统测试与分析

#### 4.1 显微图像采集测试

对各模块组装完成后即可完成细胞显微图像的采集与处理工作。给小型化显微镜通电并打开智能显微图像采集软件,用户登录成功后设置相机参数并将其与显微镜连接,当观察到清晰的细胞图像时可抓取图像并将其保存。针对明场成像特点,需要选取染色后的样本进行成像测试,选取单子叶植物根茎横切、洋葱鳞片叶、心肌纵切、血红细胞、小肠切片、大肠切片这 6 种染色样本,在 10 倍物镜下对其拍摄进行成像测试,拍摄的显微图像如图 6 所示,分辨率可达到  $1.5 \mu\text{m}$ 。

#### 4.2 细胞迁移算法测试

图 7 为加入 mockmock 试剂后图像处理结果、面积占比计算值与相应趋势。从划痕框定面积占比随时间变化曲线中可以直观地看到,所有样本的划痕框定面积占比均随时间的增加而减小。

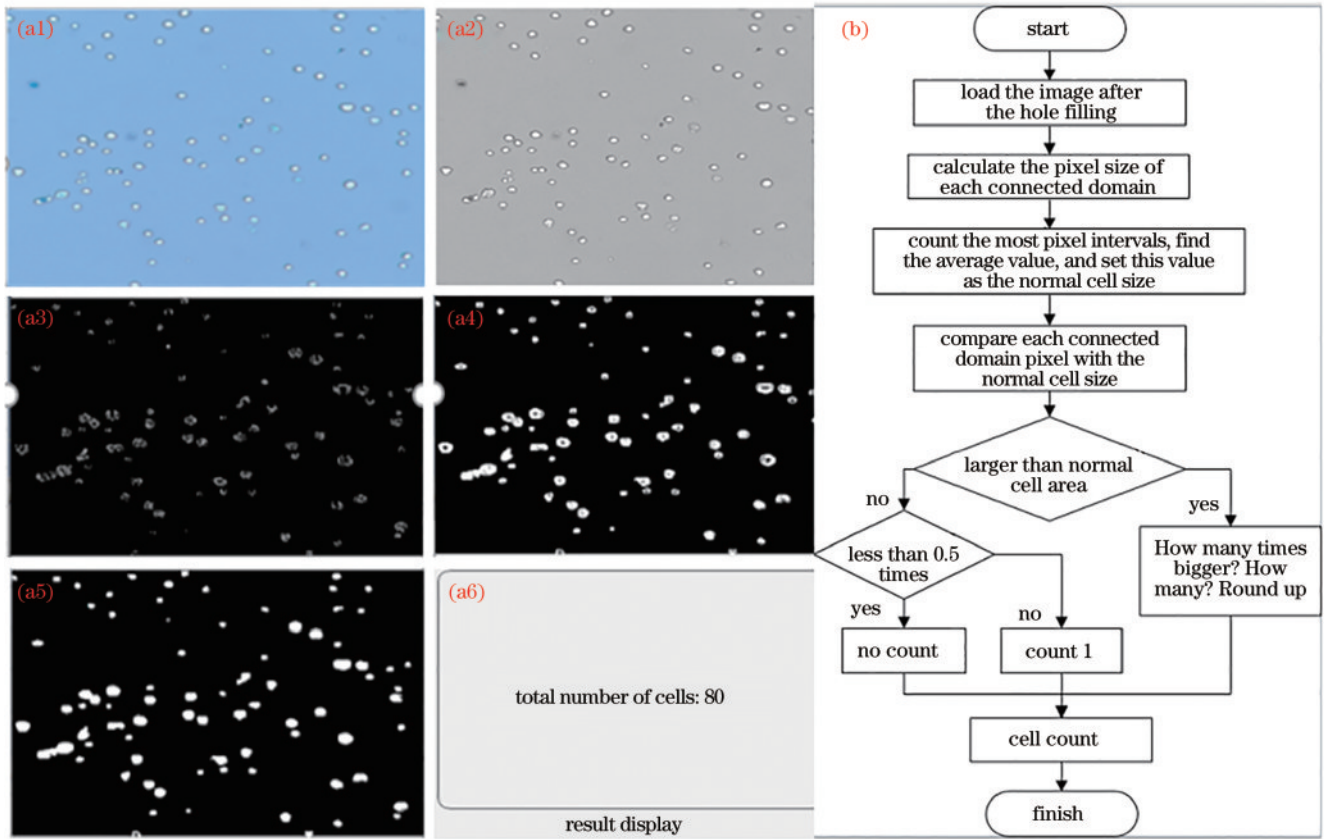


图 4 细胞计数算法流程及细胞图像处理结果。(a1)原始图像;(a2)灰度化图像;(a3)二值化图像;(a4)膨胀图像;(a5)孔洞填充图像;(a6)计数结果;(b)细胞计数算法流程

Fig. 4 Flowchart of cell counting algorithm and cell image processing results. (a1) Original image; (a2) grayscale image; (a3) binary image; (a4) expansion image; (a5) hole filling image; (a6) counting result; (b) flowchart of cell counting algorithm

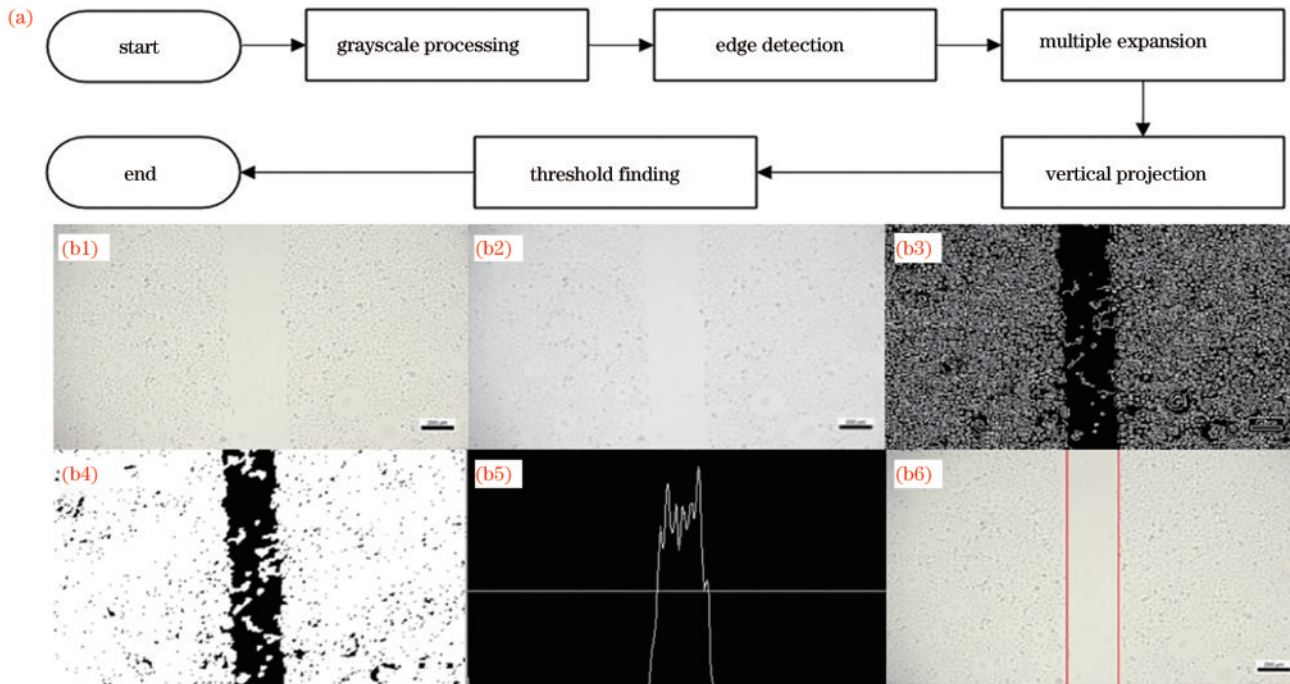


图 5 细胞迁移流程及处理结果。(a)细胞迁移流程;(b1)原始图像;(b2)灰度化图像;(b3)边缘检测图像;(b4)多次膨胀图像;(b5)阈值寻找图像;(b6)划定区域图像

Fig. 5 Cell migration flowchart and processing results. (a) Cell migration flowchart; (b1) original image; (b2) grayscale image; (b3) edge detection image; (b4) multiple expansion image; (b5) threshold finding image; (b6) delineate area image



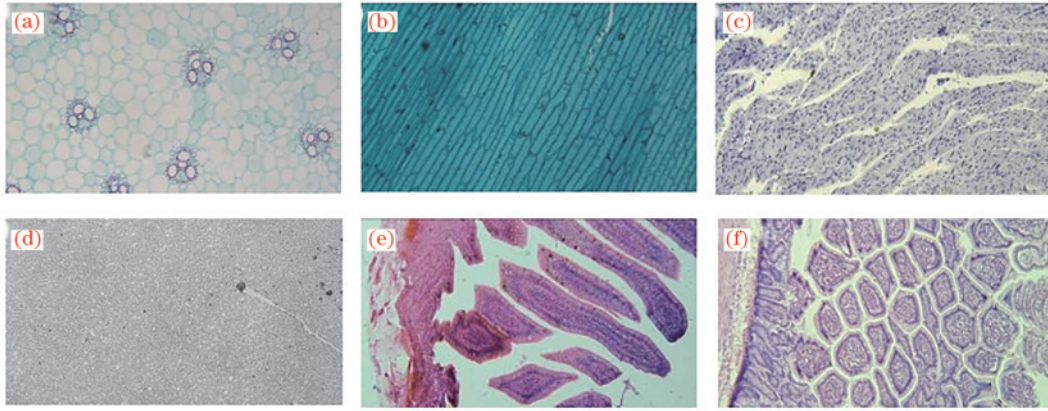


图6 小型化显微镜在10倍物镜下的成像结果。(a)单子叶植物根茎横切;(b)洋葱鳞片叶;(c)心肌纵切;(d)红细胞;(e)小肠切片;(f)大肠切片

Fig. 6 Imaging results by miniaturized microscope under 10 times objective. (a) Rhizome cross-cut of a monocotyledonous plant; (b) onion scale leaves; (c) myocardial longitudinal cut; (d) red blood cells; (e) small intestine section; (f) large intestine section

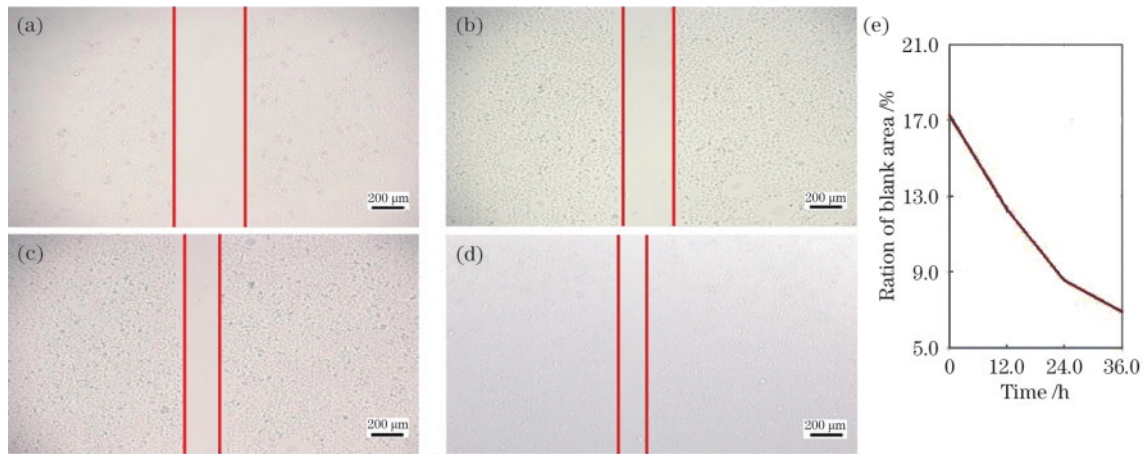


图7 加入 mockmock 试剂后的细胞迁移结果。(a) 0 h; (b) 12 h; (c) 24 h; (d) 36 h; (e) 空白部分面积占比随时间的变化

Fig. 7 Cell migration results after adding mockmock reagent. (a) 0 h; (b) 12 h; (c) 24 h; (d) 36 h; (e) variation in ratio of blank area with time

## 5 结 论

用网络相机代替传统光学显微镜的目镜,通过自主设计机械结构结合3D打印技术,设计一款基于无线传输的小型化细胞显微图像采集系统,并运用该系统采集细胞图像验证细胞计数算法和通用显微图像处理算法。

1) 系统结合光学成像原理,运用3D打印设计各机械模块,搭建好的显微镜系统尺寸为13 cm×5 cm×20 cm,达到小型化、低成本和便携性,相比于传统显微镜体积大、成本高、不易移动等问题,该系统有一定改善。但随之而来的是成像性能的减退,应用领域受限。

2) 通过WiFi传输模块建立显微镜与计算机系统的通信,用户登录账号后即可控制相机,完成细胞图像的采集与传输。无线传输功能使用户操作更方便、系统更灵活、传输速度更快、安全性更高。

3) 设计智能显微图像采集软件,为用户提供直观的显微细胞图像观察和存储功能,同时支持细胞计数

和通用显微图像处理功能。

4) 在采集到显微细胞图像的基础上,在软件平台中加入细胞计数算法和迁移算法,实现图像中细胞计数功能和对细胞动态状态分析功能,应用性较强。

5) 对整套显微图像采集系统进行测试。经测试,通过该系统采集到的细胞图像清晰,分辨率可达到1.5 μm。

## 参 考 文 献

- [1] 孙阳青, 张涵, 谢群. 显微镜发展简史[J]. 生物学教学, 2022, 47(12): 94-96.  
Sun Y Q, Zhang H, Xie Q. A brief history of microscope development[J]. Biology Teaching, 2022, 47(12): 94-96.
- [2] 赵英然, 杨树蔚, 刘静, 等. 基于明暗场成像的小型化双模显微镜设计[J]. 电子显微学报, 2022, 41(3): 249-257.  
Zhao Y R, Yang S W, Liu J, et al. Design of miniaturized dual-mode microscope based on light and dark field imaging[J]. Journal of Chinese Electron

- Microscopy Society, 2022, 41(3): 249-257.
- [3] 赵伟高, 崔丽敏, 贾世超, 等. 原子力显微镜在水处理领域的应用及展望[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 219-226.  
Zhao W G, Cui L M, Jia S C, et al. The application and expectation outlook of atomic force microscopy (AFM) in the field of water treatment[J]. Environmental Engineering, 2019, 41(s1): 219-226.
- [4] Denaro F, Gabriel M, Noe A, et al. [Developing tools for STEM education: the foldscope, a very inexpensive monocular microscope for biological research](#)[J]. Microscopy and Microanalysis, 2018, 24(s1): 1374-1375.
- [5] Byagathvalli G, Challita E J, Bhamla M S. [Frugal science powered by curiosity](#)[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2021, 60(44): 15874-15884.
- [6] Veeraraghavan R, Silverstein J. [Microscopes in education: unlocking unseen worlds and undreamed-of futures](#)[J]. Microscopy Today, 2021, 29(2): 48-51.
- [7] Joshi N, Bhosale S. Interpretation of physical properties like crystallinity of maize starch powder effectively by foldscope[J]. International Journal of Pharmaceutics and Drug Analysis, 2018, 6(9): 592-598.
- [8] 赵英然, 闫克丁, 杨树蔚. [小型 Wi-Fi 智能显微镜设计](#) [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 2211002.  
Zhao Y R, Yan K D, Yang S W. [Small Wi-Fi smart microscope design](#)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 2211002.
- [9] Lee T B. [Clinical microscopy: performance, maintenance and laser safety](#)[J]. The Korean Journal of Clinical Laboratory Science, 2019, 51(2): 125-133.
- [10] Rathod M, Suthar D, Patel H, et al. [Microemulsion based nasal spray: a systemic approach for non-CNS drug, its optimization, characterization and statistical modelling using QbD principles](#)[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2019, 49: 286-300.
- [11] Burgohain M, Kakoti N, Sarmah P, et al. Utility of foldscope in biological research[J]. International Research Journal of Biological Science, 2020, 9(4): 45-49.
- [12] Das K, Dutta P, Gogoi J. [‘Foldscope’ -A simple and economical microscope](#)[J]. Journal of Biological Education, 2021, 55(2): 217-222.
- [13] Fulzele P, Bodkhe H, Patil R, et al. [Enhancing magnification in foldscope for improved microscopy](#)[J]. European Journal of Molecular and Clinical Medicine, 2020, 7(7): 1625-1630.
- [14] Dhawan S, Dua J. [Foldscope™ as a teaching and learning tool: an indian perspective](#)[J]. Bioscene, 2021, 47(1): 64-71.
- [15] Wangdi L P, Pradhan A, Mangar S. [Foldscope as a research tool in the diagnosis of fungal leaf spot diseases](#) [J]. Current Science, 2019, 117(8): 1261.
- [16] Cybulski J S, Clements J, Prakash M. [Foldscope: origami-based paper microscope](#)[J]. PLoS One, 2014, 9 (6): e98781.
- [17] Pfeil J, Dangelat L N, Frohme M, et al. [Smartphone based mobile microscopy for diagnostics](#)[J]. Journal of Cellular Biotechnology, 2019, 4(1/2): 57-65.
- [18] Vasiman A, Stothard J R, Bogoch I I. [Mobile phone devices and handheld microscopes as diagnostic platforms for malaria and neglected tropical diseases \(NTDs\) in low-resource settings: a systematic review, historical perspective and future outlook](#)[J]. Advances in Parasitology, 2019, 103: 151-173.
- [19] Jiang P, Liu J, Luo Q, et al. [Development of automatic portable pathology scanner and its evaluation for clinical practice](#)[J]. Journal of Digital Imaging, 2023, 36(3): 1110-1122.
- [20] Prakash K, Diederich B, Reichelt S, et al. [Super-resolution structured illumination microscopy: past, present and future](#)[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2021, 379(2199): 20200143.
- [21] Balluet M, Sizaire F, El Habouz Y, et al. [Neural network fast-classifies biological images through features selecting to power automated microscopy](#)[J]. Journal of Microscopy, 2022, 285(1): 3-19.