

## 浮游藻类细胞微流控-显微图像形变校正方法

胡翔 殷高方 赵南京 何前锋 梁天泓 黄朋 徐敏 贾仁庆

### Microfluidic-microscopic image deformation correction method for planktonic algal cells

HU Xiang, YIN Gao-fang, ZHAO Nan-jing, HE Qian-feng, LIANG Tian-hong, HUANG Peng, Xu Min, JIA Ren-qing

#### 引用本文:

胡翔, 殷高方, 赵南京, 何前锋, 梁天泓, 黄朋, 徐敏, 贾仁庆. 浮游藻类细胞微流控-显微图像形变校正方法[J]. *中国光学*, 2023, 16(4): 788-795. doi: 10.37188/CO.2022-0244

HU Xiang, YIN Gao-fang, ZHAO Nan-jing, HE Qian-feng, LIANG Tian-hong, HUANG Peng, Xu Min, JIA Ren-qing. Microfluidic-microscopic image deformation correction method for planktonic algal cells[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 788-795. doi: 10.37188/CO.2022-0244

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0244>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 微流控SERS芯片及其生物传感应用

Microfluidic SERS chip and its biosensing applications

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 513 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0513>

#### 大偏离度非球面检测畸变校正方法

Distortion correcting method when testing large-departure asphere

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 383 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0383>

#### 结构光照明超分辨光学显微成像技术与展望

Structured illumination super-resolution microscopy technology: review and prospect

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 307 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0307>

#### 双色荧光辐射差分超分辨显微系统研究

Dual-color fluorescence emission difference super-resolution microscopy

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 329 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0329>

#### 眼科光学相干层析成像的图像处理方法

Image processing method for ophthalmic optical coherence tomography

中国光学 (中英文). 2019, 12(4): 731 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0731>

#### 细胞内单颗粒示踪技术的进展

Advances in single particle tracking in living cells

中国光学 (中英文). 2018, 11(3): 281 <https://doi.org/10.3788/CO.20181103.0281>

文章编号 2097-1842(2023)04-0788-08

## 浮游藻类细胞微流控-显微图像形变校正方法

胡翔<sup>1,2</sup>, 殷高方<sup>1,2,3\*</sup>, 赵南京<sup>1,2,3,4\*</sup>, 何前锋<sup>5</sup>, 梁天泓<sup>2,3</sup>, 黄朋<sup>1,2</sup>, 徐敏<sup>2,3</sup>, 贾仁庆<sup>2,3</sup>

(1. 合肥学院 生物学院, 安徽 合肥 230601;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院  
环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

4. 安徽大学, 安徽 合肥 230601;

5. 安徽省合肥生态环境监测中心, 安徽 合肥 230088)

**摘要:** 流式细胞显微图像分析是水体浮游藻类自动鉴别的重要发展方向, 快速进样条件下细胞显微图像将产生形变, 影响浮游藻类自动鉴别准确率。本文基于搭建的浮游藻类微流控-显微成像实验系统, 通过对不同进样流速下藻类细胞显微形变和图像清晰度的分析, 研究了流速对显微成像形变的影响规律。分析基于卷帘快门拍摄运动物体产生形变原理, 提出了单向偏移像素的图像形变校正方法, 并与藻类细胞静态条件下获取的图像进行了对比分析。实验结果表明: 静态条件下, 湖生卵囊藻细胞的图像长宽比及清晰度均值分别为 1.16 和 116.53; 动态进样过程中, 随着流速增大细胞图像形变(长宽比)逐渐增大、清晰度降低; 95  $\mu\text{L}/\text{min}$  进样流速下, 校正前后细胞图像长宽比均值分别为 1.35 和 1.26, 形变离散程度由校正前的 0.33 降至 0.1, 与静态细胞形态接近且校正前后图像清晰度基本不变。本文研究结果为提升水体浮游藻类细胞自动鉴别准确率提供了依据。

**关键词:** 浮游藻类; 微流控-显微成像; 图像形变; 校正方法

中图分类号: X832

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0244

收稿日期: 2022-11-28; 修订日期: 2023-01-06

基金项目: 安徽省科技重大专项(No. 202203a07020002, No. 202003a07020007); 国家重点研发计划(No. 2022YFC3103901, No. 2021YFC3200100); 国家自然科学基金(No. 61875207); 深圳市可持续发展科技专项(No. KCXFZ20201221173007020)

Supported by Anhui Province Science and Technology Major Special Project (No. 202203a07020002, No. 202003a07020007); National key research and development program (No. 2022YFC3103901, No. 2021YFC3200100); the National Natural Science Foundation of China (No. 61875207); Shenzhen Sustainable Development Science and Technology Project (No. KCXFZ20201221173007020)

## Microfluidic-microscopic image deformation correction method for planktonic algal cells

HU Xiang<sup>1,2</sup>, YIN Gao-fang<sup>1,2,3\*</sup>, ZHAO Nan-jing<sup>1,2,3,4\*</sup>, HE Qian-feng<sup>5</sup>, LIANG Tian-hong<sup>2,3</sup>, HUANG Peng<sup>1,2</sup>, Xu Min<sup>2,3</sup>, JIA Ren-qing<sup>2,3</sup>

(1. College of Biology, Hefei University, Hefei 230601, China;

2. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

4. Anhui University, Hefei 230601, China;

5. Anhui Hefei Ecological Environment Monitoring Center, Hefei 230088, China)

\* Corresponding author, E-mail: gfyin@aiofm.ac.cn; njzhao@aiofm.ac.cn

**Abstract:** Flow cytomicrographic analysis is an important development in the automatic identification of planktonic algae in a water column, but the accuracy of this process is affected by the deformation of microscopic images under rapid injection conditions. Based on a microfluidic-microscopic imaging system for planktonic algae, the effects of flow rate on the deformation of microscopic images were investigated by analyzing the deformation of algal cells and image clarity at different injection flow rates. Based on the principle of deformation caused by photographing a moving object using a rolling shutter, a method of image deformation correction with unidirectional offset pixels is proposed and analyzed by comparing its results with images acquired under static conditions of algal cells. The experimental results showed that the average aspect ratio and sharpness of  $L$  values for oocystis cell images under static conditions were 1.16 and 116.53, respectively; during the dynamic injection process, the deformation (aspect ratio) of the cell images gradually increased and the sharpness decreased as the flow rate increased; the average values of aspect ratio before and after correction were 1.35 and 1.26 respectively at 95 $\mu$ L/min injection flow rate, and the dispersion of deformation decreased from 0.33 before correction to 0.1. The results are close to that of static cell morphology and the image sharpness is basically same. The results provide a method for improving the accuracy of the automatic identification of planktonic algal cells in a water column.

**Key words:** planktonic algal; microfluidics-microscopic imaging; image deformation; correction method

### 1 引 言

浮游植物是水体初级生产者,也是自然环境的重要组成部分,其丰度和优势种群可以有效反映人类活动环境的情况<sup>[1]</sup>。浮游藻类的异常增殖会造成水华,环境污染<sup>[2]</sup>。对浮游植物的研究、开发和利用,都离不开对其种类的分类和计数<sup>[3]</sup>。基于显微成像的藻类分类鉴别方法是当前主要发展方向之一<sup>[4]</sup>,其中快速获取高质量的藻细胞图像是分类鉴别的基础<sup>[5]</sup>。

目前藻类图像获取方法主要是以光学显微镜为主,但操作过程繁琐,且需要操作人员具有专业的生物学知识,费时费力,极易因观察者的主观判断造成误差<sup>[6]</sup>。微流控芯片与显微成像相结合是实现藻类显微成像的一种有效方式<sup>[7]</sup>。微流控芯片具有成本低、易制造、透光性好等优点而被广泛应用于细胞研究,可与显微成像技术耦合实现细胞清晰成像<sup>[8]</sup>。彭冉等人搭建了基于微流控技术的图像采集装置,实现了对压载水微藻细胞的全自动检测、计数和尺寸判定<sup>[9]</sup>。楚惠等基于手机图像采集结合微流控技术实现了海洋藻类细胞

形态特征的提取与辨别,但该方法往往不能兼顾样品的进样速度和图像质量<sup>[10]</sup>。且要在保证图像质量的情况下,获得高流速需使用延时积分技术的高速 CMOS 相机<sup>[11]</sup>,目前 4K 高帧率相机比较罕见且价格昂贵,数据量大且难以储存和处理<sup>[12]</sup>。故普遍采用通用的卷帘快门相机,但卷帘快门会受到快门值的影响,当相机曝光时间不足或者物体移动较快时,会出现部分曝光、斜坡图形等现象,俗称“果冻效应”<sup>[13]</sup>。果冻效应会造成藻细胞粒径和形态产生变化,而粒径和形态是影响藻细胞分类识别准确度的重要因素。

针对以上问题,本文提出了一种浮游藻类细胞微流控-显微图像形变校正方法。根据卷帘快门相机逐行扫描并读取曝光前后两像素行的固定时间差,通过单向偏移像素的图像形变校正藻类图像形变,并结合基于 Sobel 算子的 Tenengard 函数评价图像清晰度,实现高流速下浮游藻类细胞的形变校正。

## 2 实验装置和材料

搭建的水体浮游藻类微流控-显微成像实验系统原理框图如图 1 所示。系统主要由微流控进样模块、明场成像模块、计算控制模块等组成,其中,微流控进样模块采用高精度注射泵(5 ml 量级)实现样品自动进样,精准控制微流控通道中的样品流速;明场成像模块采用透射式光路实现微流控通道中藻细胞显微成像,由激发光源 LED、物镜(尼康 ELWD 系列 20×0.45)、管镜(E0 型号尼康 MXA22018)、双远心光路组成,其中双远心

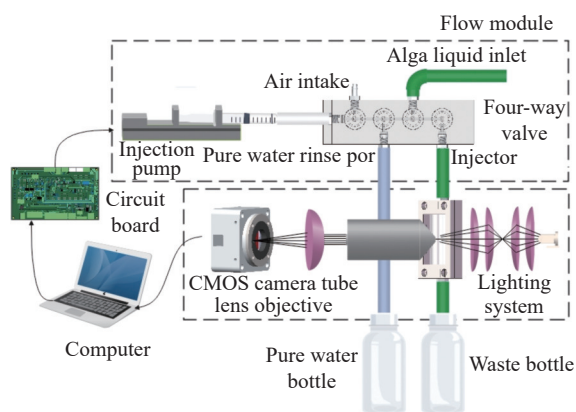


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

光路用于使 LED 投射后的数值孔径与物镜相匹配。

微流控芯片是本文流式成像的核心,设计的微流控芯片实物图如图 2 所示,芯片微通道尺寸为  $5000\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ ,材料为肖特 33。制造过程中先通过氢氟酸溶液湿法腐蚀玻璃通道至  $50\ \mu\text{m}$ ,后将玻璃芯片放入键合机内抽高真空加热并加压键合玻璃芯片,从而完成微流控芯片的加工制造。

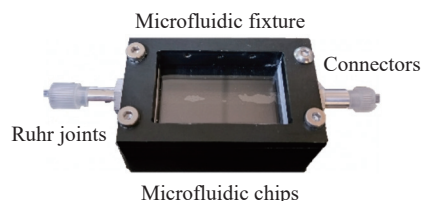


图 2 微流控芯片封装实物图

Fig. 2 Physical view of microfluidic chip package

选取湖生卵囊藻(采购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库)为实验对象,该藻种粒径为  $15\ \mu\text{m}$ ,规则圆形。实验过程中对藻原液进行稀释,选取培养的湖生卵囊藻液 1.5 mL,加入 28.5 mL BG11 培养基(青岛海博生物技术有限公司,产品编号: HB8793),将稀释后的 30 mL 湖生卵囊藻平均分成 10 份。注射泵分别以 0、25、50、60、70、80、85、90、95、100  $\mu\text{L}/\text{min}$  将藻液推入显微成像区域,相机曝光时间设定为 0.1 ms,白平衡后采用 Rising View 软件以 30 frame/s 采集 4 K 图像 60 张。

## 3 图像校正与评价方法

### 3.1 图像的形变校正方法

图像形变是影响成像质量的重要因素,其决定了藻类图像识别效果。卷帘快门拍摄运动物体会产生形变,这种形变源于其逐行扫描工作方式。在曝光开始时相机传感器逐行扫描逐行读取,受快门值(帧率和曝光时间)影响,相机每曝光一行,后一行与前一行存在固定时间差,如图 3(a)所示。拍摄静态物体无形变产生(图 3(b)),拍摄运动物体时则存在斜坡形变现象(图 3(c))。由此可见,每行图像的像素偏移量随曝光扫描顺序逐行增加,且各行图像像素偏移量与流速成正比,流速越高像素偏移越明显,图像形变越严重。

根据卷帘快门相机拍摄运动物体产生变形原

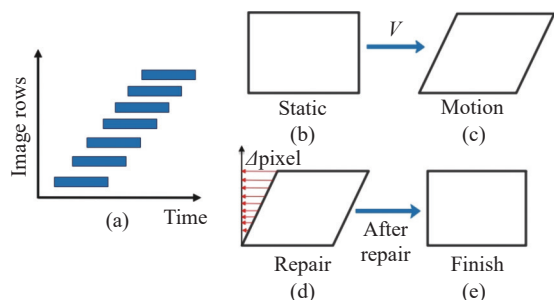


图3 卷帘快门工作方式及图像形变校正方法

Fig. 3 Rolling shutter working mode and image deformation correction method

理,相机拍摄运动物体图片时,垂直运动速度分量为0,不产生像素值偏移,水平运动方向上像素值逆运动方向偏移,每行像素偏移量逐行线性增加,如图3(d)所示。本文提出的单向偏移像素图像形变校正方法中,图像首行像素偏移值为零。首先,根据粒子运动流速计算图像末行像素偏移值 $\Delta\text{pixel}$ ,再根据每行像素偏移值逐行线性增加的特征,计算每行像素偏移值,利用每行偏移值对图像像素进行逆向移动,实现运动图像的逐行校正。

根据卷帘快门相机的相关参数,计算图像末行像素偏移值 $\Delta\text{Pixel}$ ,如(1)式所示。

$$\Delta\text{pixel} = \frac{Q \cdot T \times 10^4}{M \times X} \times L \cdot N \quad (1)$$

式中 $Q$ 为粒子运动速度( $\mu\text{m/s}$ )、 $T$ 为相机快门值(ms)、 $X$ 为相机像元大小( $\mu\text{m}$ )、 $M$ 为相机总像素行数、 $L$ 为粒子的平均粒径( $\mu\text{m}$ )、 $N$ 为物镜放大倍率。

相机的快门值 $T$ 等于设定的曝光时间 $T_{\text{Exposure}}$ (ms)与其读出时间 $T_{\text{Readout}}$ (ms)之和(式(2)),其中读出时间与相机设定的帧率(FPS)相关,如式(3)所示。

$$T = T_{\text{Readout}} + T_{\text{Exposure}} \quad (2)$$

$$T_{\text{Readout}} = \frac{1}{\text{FPS}} \quad (3)$$

在微流体中,常规 $\mu\text{L/min}$ 或 $\mu\text{L/s}$ 条件下微流路中多数流体为低雷诺数层流,各层流间粒子运动速度相差较大,在各个层流间粒子相对运动速度和该粒子所在层流流速近似相同。有:

$$V \times 10^9 = 60 \times Q \cdot A \quad (4)$$

式中 $V$ 为层流流速( $\mu\text{L/min}$ )、 $A$ 为微流控芯片通

道的截面积,求得粒子运动速度 $Q$ ( $\mu\text{m/s}$ ),代入式(1)即可求得图像末行像素偏移值 $\Delta\text{pixel}$ 。

### 3.2 图像清晰度评价方法

图像清晰度评价主要分为有参考和无参考两种方式。自然界的同种属浮游藻类也存在粒径大小和形状差异,难以人为标定清晰度,因此本研究中藻细胞图像清晰度的判定,选择基于边缘检测Tenengrad函数的无参考图像清晰度评价方法,利用多方向Sobel算子分析图像边缘,保留图像中物体的形状信息,减少所需处理的信息量,评价结果具有良好的稳定性和抗噪性<sup>[14]</sup>。

Tenengrad函数以Sobel算子作为边缘检测算法,计算图像在水平方向和垂直方向的梯度,获得图像清晰度值 $Ten$ ,如式(5)所示:

$$Ten = \frac{1}{N} \times \sum_1^n G_n(x, y) \quad (5)$$

式中 $N$ 表示采集的藻类数量, $G_n(x, y)$ 表示水平及竖直方向上的梯度平方和,为使图像边缘梯度放大,对梯度进行平方运算,如(6)所示:

$$G_n(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (6)$$

$$G_x = I(x, y) \times g_x \quad (7)$$

$$G_y = I(x, y) \times g_y \quad (8)$$

$$\begin{cases} g_x = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ g_y = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $I(x, y)$ 代表二维灰度图, $g_x$ 和 $g_y$ 分别是水平方向和垂直方向的Sobel算子, $G_x$ 和 $G_y$ 分别表示图像与Sobel的卷积。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 藻类成像实验结果

在静态条件下,利用微流控显微成像实验系统拍摄的湖生卵囊藻如图4(a)(彩图见期刊电子版)所示,图中藻类只占少部分区域,为了准确评价图片中藻细胞成像质量,通过边缘检测方法提取出图中每个藻细胞图像,如图4(b)(彩图见期刊

电子版) 所示。利用式 (5) 计算每个细胞图像的清晰度值, 本研究所用湖生卵囊细胞外形近似圆形, 可用长宽比表征细胞图像的形变程度。结果表明: 在静态条件下拍摄湖生卵囊藻细胞长宽比均值为 1.162, 离散程度为 0.1; 藻细胞图片的清晰度均值为 116.53, 离散程度为 2.37。

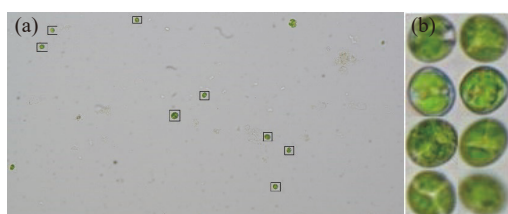


图 4 静态条件下拍摄的(a)藻类图片和(b)算法提取出的单个藻类图片

Fig. 4 (a) Algae images taken under static conditions and (b) individual algae images pictures extracted by the proposed algorithm

进一步在各流速下随机抽取 20 至 40 帧图像中的藻细胞图像, 得到各流速下单藻细胞图像, 如图 5(彩图见期刊电子版) 所示, 计算各细胞图像的长宽比和清晰度值如图 6(彩图见期刊电子版) 所示。结果表明: 随着流速增大, 图像清晰度均值呈下降趋势, 但下降幅度较小, 清晰度均值处于 113.64~116.86 之间, 与静态条件无明显差异; 其次, 随着流速增大, 图像形变程度(长宽比)均值呈上升趋势且长宽比离散程度不断增加: 流速在  $70 \mu\text{L}/\text{min}$  以下, 图像的长宽比均值在 1.16~1.29 之间, 离散程度在 0.1~0.26 之间, 此时藻细胞虽有变形, 但图像形态与静态细胞接近; 流速超过  $70 \mu\text{L}/\text{min}$ , 图像形变加剧, 图像长宽比均值在 1.29~1.68 之间, 离散程度在 0.26~0.33 之间;  $100 \mu\text{L}/\text{min}$  时长宽比均值达 1.68, 较静态条件变化了 30.83%。由此可见, 过高流速将使图像产生严重形变, 严重影响自动鉴别准确率。

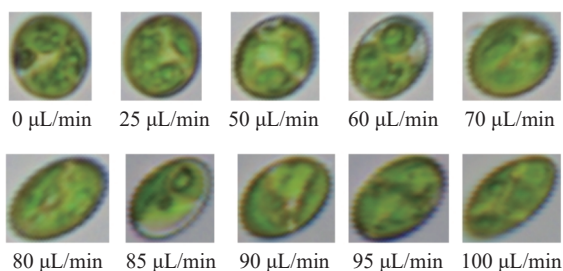
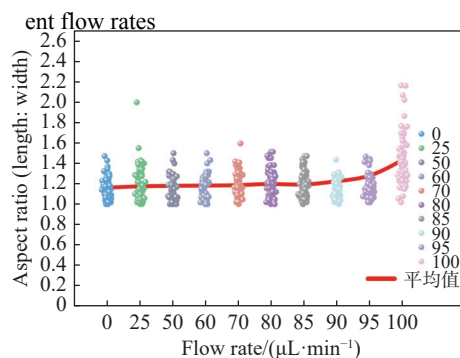
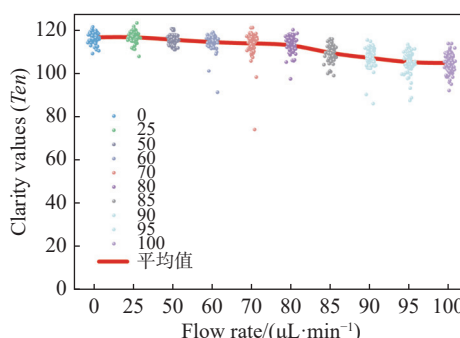


图 5 不同流速下湖生卵囊藻单细胞图片

Fig. 5 Pictures of single cells of Oocysts lacustis at differ-



(a) 长宽比  
(a) Aspect ratio



(b) 清晰度值  
(b) Clarity values

图 6 不同流速下湖生卵囊藻图像质量

Fig. 6 Image quality of Oocysts lacustis at different flow rates

#### 4.2 图像形变校正结果

基于单向偏移像素法的藻类图像形变校正结果如图 7(彩图见期刊电子版) 所示, 可见, 不同流速下 ( $0 \mu\text{L}/\text{min}$  至  $100 \mu\text{L}/\text{min}$ ) 校正后的藻细胞形态与静态细胞接近。

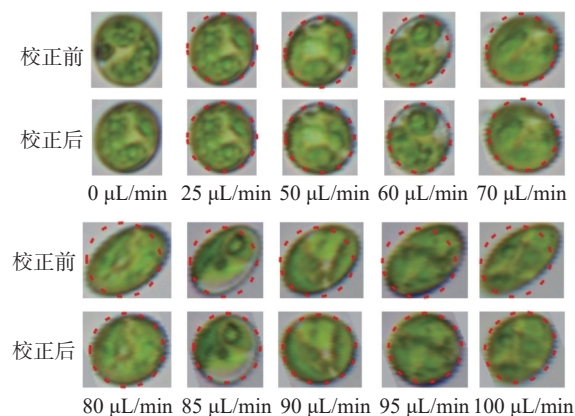


图 7 不同流速下校正前后湖生卵囊藻单细胞图像

Fig. 7 Pictures of single cells of Oocysts lacustis before and after restoration at different flow rates

各流速下随机抽取 20 至 40 帧图像, 提取藻细胞图像得到校正前后长宽比值、细胞图像清晰

度及长宽比均值,如图 8 和图 9(彩图见期刊电子版)所示。结果表明:第一,该方法对图像形变校正效果明显,各个流速区间藻细胞形变程度均值区间由校正前的 1.162~1.68 下降到 1.16~1.44 之间,离散程度区间由校正前 0.1~0.33 下降到 0.1~0.27。流速在 95  $\mu\text{L}/\text{min}$  以下时,校正后的图像形变程度(长宽比)均值均小于 1.26,较静态细胞形态变化不超过 8.18%,此范围内校正后藻细胞形态与静态细胞接近;流速超过 95  $\mu\text{L}/\text{min}$  时,图像校正效果不断下降,流速达到 100  $\mu\text{L}/\text{min}$  时细胞图像长宽比均值达 1.44,较未校正前下降了 14.29%,离散程度从 0.3 下降至 0.23。第二,校正前后藻细胞图像的清晰度未有明显下降,清晰度值区间由校正前的 116.53~104.76 下降到 116.86~103.44 之间,较校正前下降 0~1.7%。因此,基于本文提出的单向偏移像素图像形变校正方法,能够在不影响图像清晰度的前提下实现藻类细胞图像形变的有效校正。

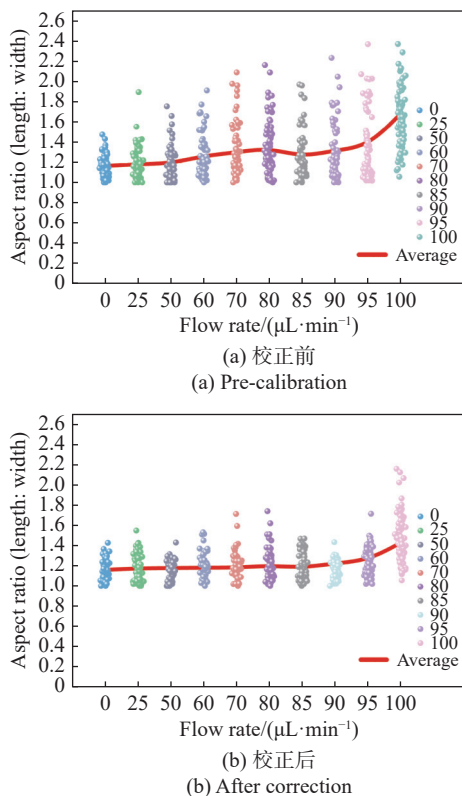


图 8 不同流速校正前后藻类细胞长宽比  
Fig. 8 Aspect ratios of algal cell before and after correction at different flow rates

参考文献:

[1] 张春梅, 米武娟, 许元钊, 等. 南水北调中线总干渠浮游植物群落特征及水环境评价[J]. 水生态学杂志, 2021,

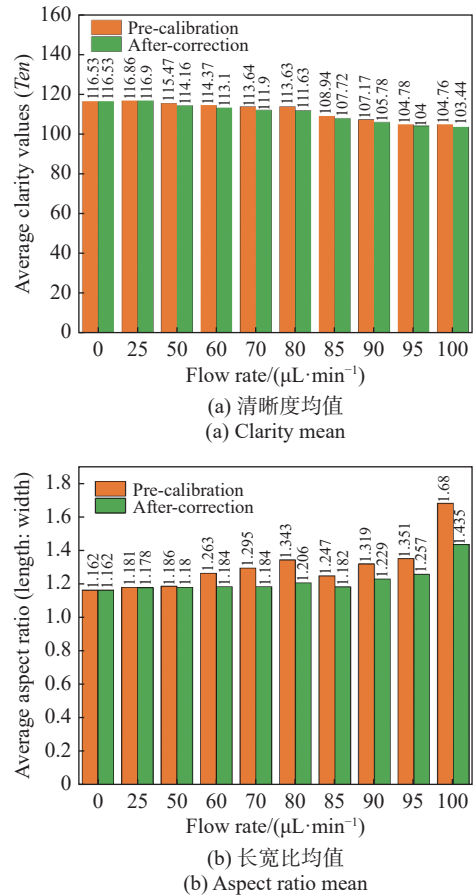


图 9 不同流速下湖生卵囊藻校正前后平均图像质量  
Fig. 9 Average image qualities before and after restoration of *Oocysts lacustis* at different flow rates

5 结 论

在微流控-显微成像中,流速对获取高质量图像的影响不可忽略。本文以湖生卵囊藻为测试藻种,分别在 0、25、50、60、70、80、85、90、95、100  $\mu\text{L}/\text{min}$  流速条件下获取藻细胞图像,基于单向偏移像素的图像形变校正方法并结合 Tenengrad 函数评价图像清晰度值。结果表明:随着流速增大,图像形变程度(长宽比)均值和离散程度呈上升趋势、图像清晰度均值呈下降趋势;通过图像形变校正,可将 95 $\mu\text{L}/\text{min}$  时流速细胞图像长宽比均值由校正前的 1.35 修复到 1.26,形变离散程度由校正前的 0.33 降至 0.1,与静态细胞形态接近。该方法为藻类流式显微成像识别技术发展提供了有效图像校正手段。

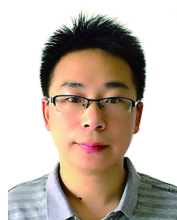
- 42(3): 47-54.
- ZHANG CH M, MI W J, XU Y ZH, *et al.*. Phytoplankton community characteristics and water environment assessment in the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 47-54. (in Chinese)
- [2] 张帅, 彭福利, 季雨来, 等. 耦合敏感参数实时识别的新型数据同化算法研究——以湖泊藻类模拟为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(6): 1877-1889.
- ZHANG SH, PENG F L, JI Y L, *et al.*. A new data assimilation method coupled with real-time detection of sensitive parameters: an example of phytoplankton modeling in lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(6): 1877-1889. (in Chinese)
- [3] 唐诗俊. 藻类图像的精确识别算法的研究与应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- TANG SH J. Research and application of accurate recognition algorithm for algae image[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [4] 王义强, 林方睿, 胡睿, 等. 大视场光学显微成像技术[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(6): 1194-1210.
- WANG Y Q, LIN F R, HU R, *et al.*. Large field-of-view optical microscopic imaging technology[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(6): 1194-1210. (in Chinese)
- [5] 张雯. 基于形态学与不完全树形小波分解的藻类图像纹理识别算法的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- ZHANG W. Research of the algae image texture based on morphology and none entirely tree wavelet decomposition [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020. (in Chinese)
- [6] 胡圣, 刘浩兵, 刘辉, 等. 基于深度学习技术的藻类智能监测系统开发[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(1): 200-210.
- HU SH, LIU H B, LIU H, *et al.*. Research on monitoring system of algae detection and classification based on deep learning[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(1): 200-210. (in Chinese)
- [7] QIAO X Y. Research on imbalanced microscopic image classification of harmful algae[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 125438-125446.
- [8] 王立凯, 冯喜增. 微流控芯片技术在生命科学研究中的应用[J]. *化学进展*, 2005, 17(3): 482-498.
- WANG L K, FENG X Z. Microfluidic network for research and application in life sciences[J]. *Progress in Chemistry*, 2005, 17(3): 482-498. (in Chinese)
- [9] 彭冉. 基于微流控芯片船舶压载水中微藻检测及分选研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- PENG R. Automatically detecting and sorting algae in ships' ballast water on a microfluidic chip[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [10] 楚惠. 基于图像流式细胞技术的微藻检测系统设计[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- CHU H. Design of micro algae detection system based on image micro-fluidic[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [11] 陶淑苹, 冯钦评, 陈晓龙, 等. 数字域时间延迟积分CMOS遥感相机动态传函建模分析[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 983-991.
- TAO SH P, FENG Q P, CHEN X L, *et al.*. Dynamic MTF modeling and analysis of digital domain TDI CMOS remote sensing camera[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 983-991. (in Chinese)
- [12] HAN Y Y, GU Y, ZHANG A C, *et al.*. Review: imaging technologies for flow cytometry[J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(24): 4639-4647.
- [13] 张博研, 孔德柱, 刘金国, 等. 卷帘快门式CMOS探测器的星图像移补偿[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1276-1284.
- ZHANG B Y, KONG D ZH, LIU J G, *et al.*. Compensation of star image motion for a CMOS image sensor with a rolling shutter[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1276-1284. (in Chinese)
- [14] 曾海飞, 韩昌佩, 李凯, 等. 改进的梯度阈值图像清晰度评价算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(22): 2211001.
- ZENG H F, HAN CH P, LI K, *et al.*. Improved gradient threshold image sharpness evaluation algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(22): 2211001. (in Chinese)



## 作者简介:



胡翔(1998—),男,安徽铜陵人,硕士研究生,2016年于滁州学院获得学士学位,2020—2023年就读于合肥学院,2021—2023年在中国科学院安徽光学精密机械研究所进行联合培养。主要从事微流控-显微成像方面的研究。E-mail: 1962471065@qq.com



殷高方(1979—),男,安徽枞阳人,博士,研究员,博士生导师,2003年于安徽师范大学获得学士学位,2011年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,现为中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所研究员,主要从事水体浮游生物和微生物光学检测技术的研究。E-mail: gfyin@aiofm.ac.cn



赵南京(1976—),男,安徽砀山人,博士,研究员,博士生导师,1999年于合肥工业大学获得学士学位,2005年于中国科学院安徽光学精密机械研究所获得博士学位,现为中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所研究员,主要从事环境光学检测技术研究。E-mail: njzhao@aiofm.ac.cn