

基于智能手机压电基片上目标微液滴实时跟踪研究

章安良

武夷学院微电子系, 福建 武夷山

收稿日期: 2023年2月13日; 录用日期: 2023年3月7日; 发布日期: 2023年3月17日

摘要

为了实时掌握压电基片上目标微液滴位置, 确保微流分析可靠完成, 提出了基于智能手机的压电基片上目标微液滴实时跟踪方法。智能手机首先分析微液滴特征区内目标微液滴图像特征信息, 并每隔 Δt 时间自动捕获压电基片图像, 并分析有效基片区的图像颜色信息, 识别目标微液滴, 确定其坐标, 画出其轨迹, 实现实时跟踪。应用自行开发的基于智能手机目标微液滴跟踪系统对载玻片和压电基片上黑墨水溶液微液滴进行实时跟踪实验, 结果表明, 所开发的APP可以实时跟踪压电基片上目标微液滴。

关键词

智能手机, 目标微液滴, 实时跟踪, 颜色信息, 压电基片

Real-Time Tracking a Droplet on a Piezoelectric Substrate Using a Smartphone

Anliang Zhang

Department of Microelectronics, Wuyi University, Wuyishan Fujian

Received: Feb. 13th, 2023; accepted: Mar. 7th, 2023; published: Mar. 17th, 2023

Abstract

In order to grasp the location of a target droplet on a piezoelectric substrate for successfully implementing microfluidic analysis, a smartphone-based method for real time tracking the target droplet is presented. The feature information of the target droplet in the extraction area was first extracted using the smartphone. Then, an image was automatically captured every Δt time, and its color information in the valid substrate area was analyzed to distinguish the target droplet. The location of the target droplet was then obtained and its orbit was drawn for real time track. Black ink solution droplets on a glass substrate and a piezoelectric substrate were real time tracked us-

ing the self-developed app. Results show that the developed APP can successfully track the target droplet on the piezoelectric substrate.

Keywords

Smartphone, Target Droplet, Real Time Track, Color Information, Piezoelectric Substrate

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

片上微流分析是将常规实验室分析单元集成在若干平方厘米的基片上,完成生化分析功能。相对于常规的实验室分析,片上微流分析具有试剂消耗量小、分析效率高、人为误差较小等优点,备受关注[1] [2],并在单细胞分析、毒品检测、食品安全等痕量、微量物质检测中获得应用[3] [4] [5]。根据片上工作微流体形式来分,它主要包括两大类,即,工作于片上微通道内的连续或不连续微流体和开放基片上数字微流体(微液滴)。相对于微通道连续微流体形式的微流分析系统,开放式片上微液滴形式的微流分析,具有更少的试剂消耗量、无需集成微阀和微泵等复杂的微流单元,大大简化了微流分析过程,降低了微流分析成本和工艺成本[6] [7]。因此,开放式片上微流分析得到了广泛关注,并获得了快速发展。根据微液滴驱动原理不同,开放式片上微流分析系统包括电润湿和声表面波驱动的片上微流分析系统两大类[8] [9]。电润湿原理驱动微液滴主要通过电场改变基片对微液滴的润湿性,实现微液滴在基片上运动。工艺上需要上、下极板构造电极阵列,并在阵列电极上依次有序施加电场,驱动上、下极板间微液滴,实现微流操作和分析。该方法需要控制电极阵列产生有序电场的控制电路,且随着电极阵列的增加,电路复杂性和基片面积也随之增加。而声表面驱动微液滴可以克服电润湿驱动微液滴的缺点,它借助声表面的声流驱动微液滴在压电基片表面运动,大大降低了工艺复杂性,提高了微液滴运动灵活性[10] [11]。因此,压电基片上开放式微流分析成为微流分析领域的重要分支,获得快速发展。然而,它需要实时掌握微液滴在压电基片上输运位置,便于样液和试剂能在合适的位置实现混合、反应,以完成微流分析[12] [13]。为实时确定微液滴在压电基片上位置,典型的方法是在压电基片上制作叉指换能器阵列,通过检测输出叉指换能器频率响应特性或外接放大器构成振荡电路的振荡频率变化来确定微液滴所处位置[14]。该方法需要网络分析仪或外接多个放大电路,且只能获得微液滴在压电基片上的粗略位置,有待改进。

智能手机的广泛普及[15],为压电微流分析微液滴实时跟踪开拓了新思路,并为其实现提供了物质条件。本文探索智能手机实时跟踪压电基片上目标微液滴方法,为压电微流分析提供基础。

2. 实验

2.1. 声表面波驱动压电基片上微液滴原理

压电微流分析系统中,为实现样液和试剂在合适时间和合适位置上进行混合、反应和结果的获取,需要对压电基片上微液滴进行输运操作。在压电基片上采用微电子工艺制作叉指换能器,其上施加合适频率(叉指换能器的声同步频率附近)和足够强度的电信号功率,当叉指换能器激发的声表面波遇到其传播方向上微液滴时,在微液滴上产生瑞利角为 θ_R 声流力,驱动微液滴沿声表面波传播方向运动。微液滴在声表面波作用下产生声流力的示意图如图1所示。

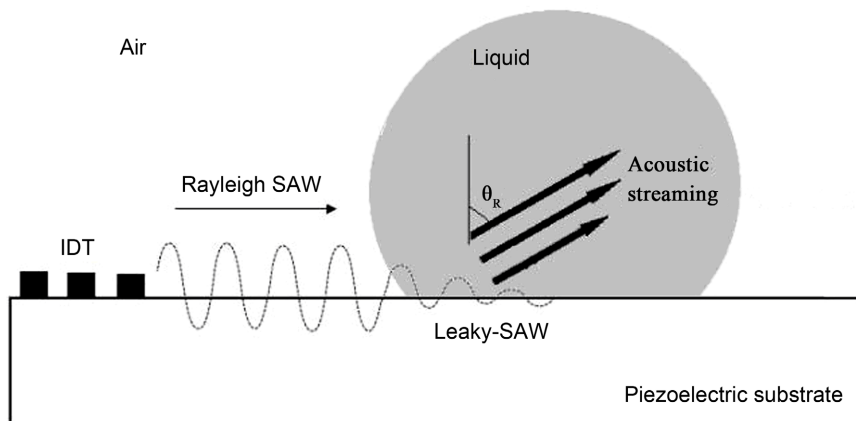


Figure 1. Surface acoustic wave radiation into a droplet
图 1. 声表面波作用液微液滴示意图

声表面波在微液滴上产生的声辐射力大小决定于施加在压电基片上电信号功率，当施加较大的电信号功率时，产生足够强度的声辐射力，驱动微液滴在压电基片表面运动。

2.2. 实验装置

为实现压电基片上目标微液滴实时跟踪，提出了采用智能手机图像分析方法，并实时标示微液滴轨迹，实现目标微液滴实时跟踪，为压电微流分析提供技术支持。智能手机实时跟踪压电基片上目标微液滴实验装置如图 2 所示。

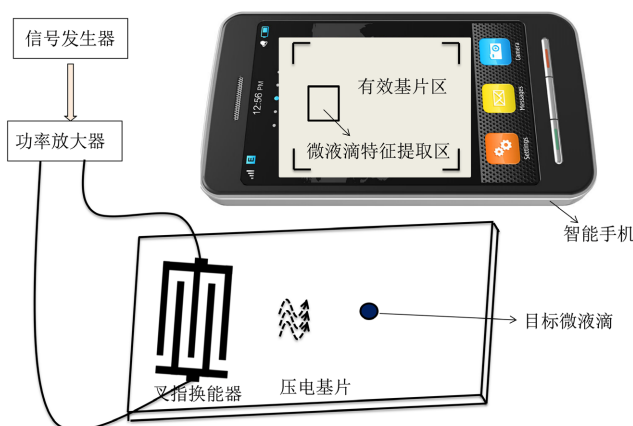


Figure 2. Experimental setup for tracking the droplet on the piezoelectric substrate
图 2. 压电基片上目标微液滴实时跟踪实验装置

图 2 中，叉指换能器采用微电子工艺制作在 1280 YX-LiNbO₃ 压电基片上，信号发生器(SPI461, EPRE, China)产生正弦波信号，并通过功率放大器(TSA002A, TSH, China)放大后施加到该叉指换能器，以激发声表面波。激发的声表面波驱动压电基片上微液滴，使其在压电基片上运动，微液滴运动轨迹由放置于压电基片上方的智能手机实时监测、跟踪。为获取待跟踪目标微液滴特征，在智能手机界面上设计微液滴特征提取区。同时，为减少智能手机图像分析运算量，在智能手机界面上设置有效基片区范围。

2.3. 基于智能手机压电基片上目标微液滴实时跟踪 APP 开发

为实现压电基片上微液滴实时跟踪，首先，分析微液滴特征区内目标微液滴图像特征信息，并每隔

Δt 时间自动捕获基片图像，并分析有效基片区的图像颜色信息，识别目标微液滴，确定其坐标，画出其轨迹，实现实时跟踪，并在 Android 平台上，以智能手机 OPPO PBAM00 (1300 万高清摄像头、8 核 CPU) 进行目标微液滴实时跟踪的应用程序开发。其流程图如图 3 所示。

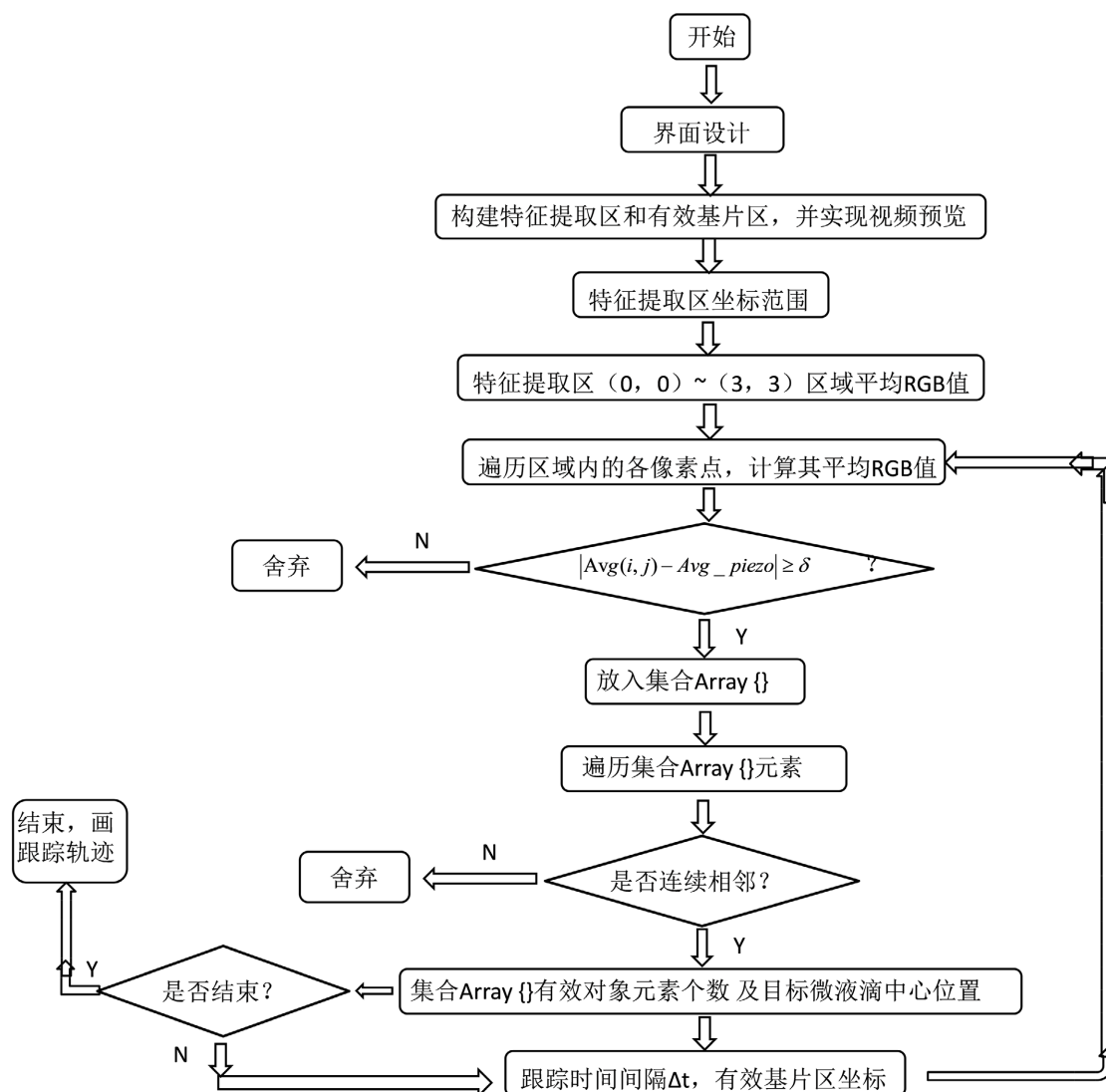


Figure 3. The chart for developing an app to track the droplet on the piezoelectric substrate in real time

图 3. 压电基片上目标微液滴实时跟踪 APP 开发流程图

由实验装置，根据开发的 APP，采用黑墨水溶液微液滴为实验对象进行目标微液滴的跟踪实验。先在载玻片上放置黑墨水目标微液滴，移动载玻片，进行目标微液滴的跟踪实验；接着，在压电基片上，由声表面波驱动微液滴，进行目标微液滴的实时跟踪实验，跟踪结果直接显示在智能手机上。

3. 结果与讨论

为验证所开发应用系统跟踪目标微液滴的可靠性，以黑墨水微液滴为实验对象，进行载玻片上微液滴跟踪实验，每隔 300 ms 获取图像信息。在载玻片上放置 6 微升黑墨水微液滴，移动载玻片，使得微液滴一起随着载玻片的移动而移动，并在智能手机上实时显示跟踪轨迹。图 4 是实时跟踪的视频截图。

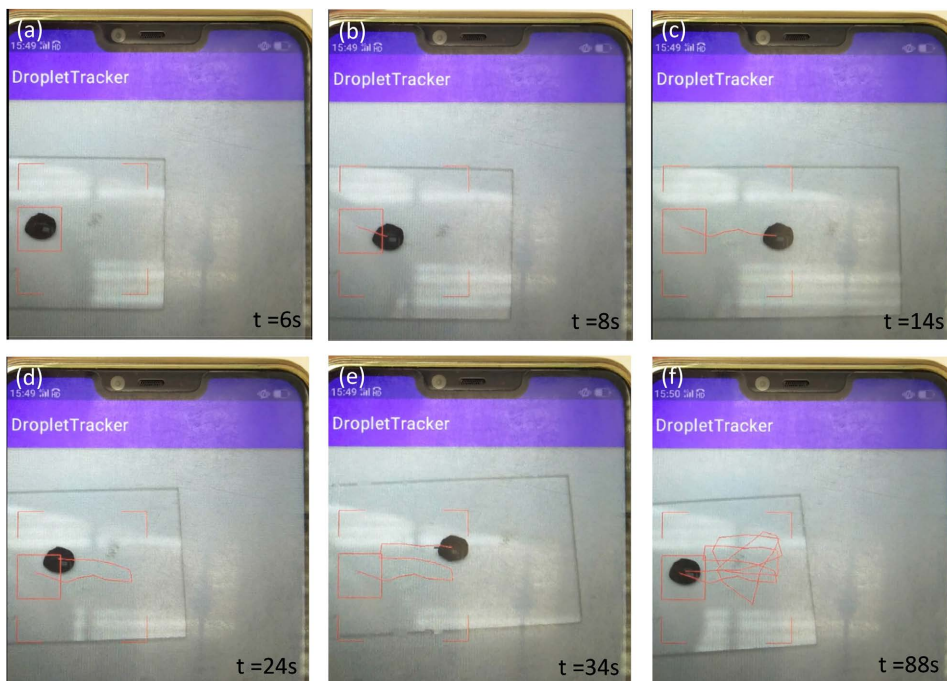


Figure 4. Snapshot of a 6 uL black ink droplet moving on a glass slide in valid substrate area
图 4. 载玻片上 6 uL 黑墨水微液滴在有效基片区内运动的实时跟踪视频截图

图 4 中, 图 4(a) 为 6 uL 微液滴放置在载玻片上, 并处于微液滴特征提取区内的视频截图, 图 4(b)~(f), 移动载波片, 使得微液滴在有效基片区范围内不同位置时的实时跟踪轨迹的视频截图。由图 4 可知, 所开发的应用软件能实时跟踪目标微液滴, 验证了所开发系统的可靠性。

作为应用, 在压电基片上采用微量进样器进样 1 uL 黑色墨水微液滴, 在叉指换能器上施加电信号, 并逐渐增加到 32.1 dBm, 驱动微液滴, 使其在压电基片上进行输运, 调整获取图像信息时间间隔为 1 s, 采用所开发的 APP 实现微液滴的实时跟踪。此外, 为了能实时显示各时刻坐标位置, 将实时坐标位置也显示在屏幕上, 实时跟踪视频截图如图 5 所示。

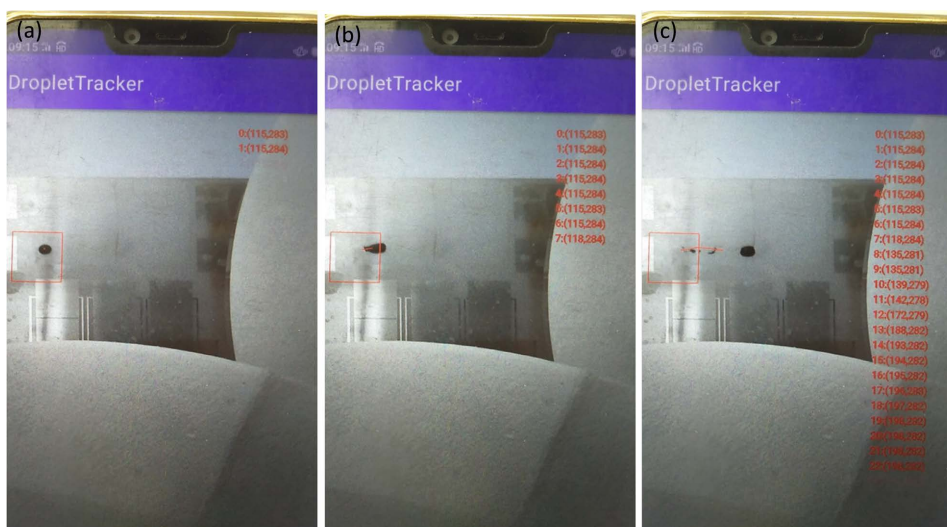


Figure 5. Snapshot of a 1 uL black ink droplet moving on the piezoelectric substrate
图 5. 实时跟踪压电基片上 1 uL 黑墨水目标微液滴的视频截图

图 5 中, 图 5(a) 是 1 μL 黑墨水目标微液滴放置在微液滴特征提取区内, APP 对微液滴特征提取区内的黑墨水目标微液滴完成特征提取, 并获取其中心坐标位置。图 5(b) 和图 5(c) 是目标微液滴在声表面波驱动下沿压电基片上运动, 并实现了目标微液滴中心坐标的实时跟踪。

为进一步直观地观察 1 μL 黑墨水目标微液滴各坐标的位置, 将各时刻的位置在坐标系上绘出, 如图 6 所示。

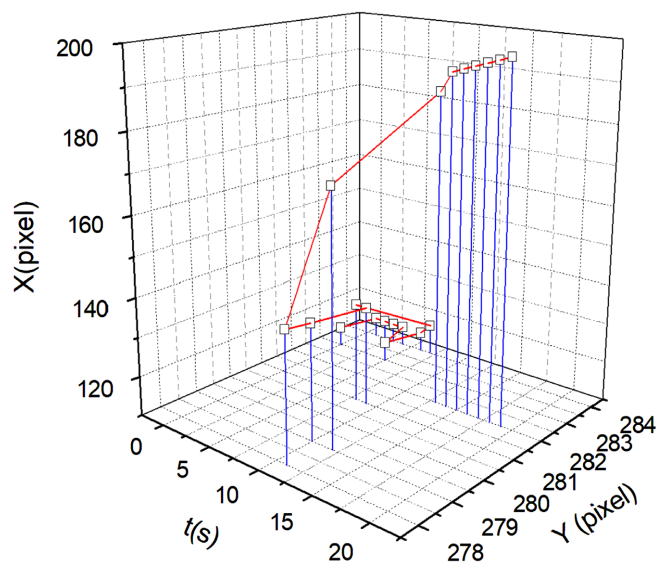


Figure 6. Coordination of the 1 μL black ink droplet at different time
图 6. 1 μL 黑墨水目标微液滴在不同时刻坐标值

图 6 可直观的看出, 目标微液滴在水平 x 方向较大移动, 在垂直 y 方向略有偏移, 表明目标微液滴在压电基片上运动部分偏离声表面传播方向, 原因是基片上疏水层不平整所致。

4. 结论

提出了实时跟踪基片上目标微液滴的方法, 根据智能手机每隔 Δt 时间捕获基片图像, 并对其进行颜色信息分析、识别, 获得目标微液滴在基片上实时位置。在 Android 平台上开发了基于智能手机的压电基片上目标微液滴实时跟踪系统。以黑墨水微液滴为实验对象应用所开发的目标微液滴实时跟踪系统对载玻片和压电基片上目标黑墨水微液滴进行实时跟踪实验, 验证了所开发的目标微液滴实时跟踪的可靠性。

基金项目

本文由福建省自然科学基金项目(2020J01394)资助。

参考文献

- [1] Singh, P.K., Patel, A., Kaffenes, A., *et al.* (2022) Microfluidic Approaches and Methods Enabling Extracellular Vesicle Isolation for Cancer Diagnostics. *Micromachines*, **13**, Article No. 139. <https://doi.org/10.3390/mi13010139>
- [2] Wang, R., Huang, X., Xu, X., *et al.* (2022) A Standalone and Portable Microfluidic Imaging Detection System With Embedded Computing for Point-of-Care Diagnostics. *IEEE Sensors Journal*, **22**, 6116-6123. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148768>
- [3] Quinn, M.M., Ribeiro, S., Juarez-Hernandez, F., *et al.* (2022) Microfluidic Preparation of Spermatozoa for ICSI Produces Similar Embryo Quality to Density-Gradient Centrifugation: A Pragmatic, Randomized Controlled Trial. *Human*

- Reproduction*, **37**, 1406-1413. <https://doi.org/10.1093/humrep/deac099>
- [4] Shi, H., Song, B., Chen, R., *et al.* (2022) Microfluidic-Enabled Ambient-Temperature Synthesis of Ultrasmall Bimetallic Nanoparticles. *Nano Research*, **15**, 248-254. <https://doi.org/10.1007/s12274-021-3466-0>
- [5] Schneider, M.M., Emmenegger, M., Xu, C.K., *et al.* (2021) Microfluidic Characterisation Reveals Broad Range of SARS-CoV-2 Antibody Affinity in Human Plasma. *Life Science Alliance*, **5**, e202101270. <https://doi.org/10.26508/lsa.202101270>
- [6] Yonemoto, Y., Tomimitsu, I., Shimizu, K. and Kunugi, T. (2021) Wettability Model for Water-Ethanol Binary Mixture Droplet on Roughened Low-Surface-Energy Solids. *International Journal of Multiphase Flow*, **137**, Article ID: 103569. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103569>
- [7] Xia, Y., Huang, L.-X., Chen, H., *et al.* (2021) Acoustic Droplet Vitrification Method for High-Efficiency Preservation of Rare Cells. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 12950-12959. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c01452>
- [8] Huang, Y., Zhao, R., Liang, Z., *et al.* (2021) Dielectrowetting Actuation of Droplet: Theory and Experimental Validation. *Chinese Physics B*, **30**, 457-462. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac1926>
- [9] Lim, H., Back, S.M., Choih, H. and Nam, J. (2020) Acoustic Mixing in a Dome-Shaped Chamber-Based SAW (DC-SAW) Device. *Lab on a Chip*, **20**, 120-125. <https://doi.org/10.1039/C9LC00820A>
- [10] Inui, T., Mei, J., Imashiro, C., *et al.* (2021) Focused Surface Acoustic Wave Locally Removes Cells from Culture Surface. *Lab on a Chip*, **21**, 1299-1306. <https://doi.org/10.1039/D0LC01293A>
- [11] Gach, P. C., Shih, S. C., Sustarich, J., *et al.* (2016) A Droplet Microfluidic Platform for Automating Genetic Engineering. *ACS Synthetic Biology*, **5**, 426-433. <https://doi.org/10.1021/acssynbio.6b00011>
- [12] Sudeepthi, A., Nath, A., Yeo, L.Y. and Sen, A.K. (2021) Coalescence of Droplets in a Microwell Driven by Surface Acoustic Waves. *Langmuir*, **37**, 1578-1587. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03292>
- [13] Naji, M., Kirici, E.Y., Javili, A. and Erdem, E.Y. (2021) Describing Droplet Motion on Surface-Textured Ratchet Tracks with an Inverted Double Pendulum Model. *Langmuir*, **37**, 4810-4816. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03610>
- [14] Renaudin, A., Sozanski, J.-P., Verbeke, B., *et al.* (2009) Monitoring SAW-Actuated Microdroplets in View of Biological Applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **138**, 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.02.031>
- [15] Inagaw, A. and Uehara, N. (2020) Development of Colorimetric Analysis with Smartphones-captured Images Based on RGB-spectrum Conversion Methods. *Bunseki Kagaku*, **69**, 693-706. (In Japanese) <https://doi.org/10.2116/bunsekikagaku.69.693>