

触控式光诱导介电泳操控方法研究^①

刘天波^{②*} 戴永庆^{*} 袁 帅^{*} 董 挺^{**} 焦念东^{③***}

(* 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168)

(** 工业和信息化部电子工业标准化研究院 北京 100007)

(*** 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016)

摘 要 对光诱导介电泳 (ODEP) 这项微纳米操控技术进行了研究,指出现有 ODEP 操作存在操作界面与观察界面分离,导致操作者在这两个界面中的动作往往不同步,从而影响了 ODEP 操作的直观性和效率。针对这一问题,提出了一种触控式光诱导介电泳方法,并设计了包括结构光投影模块、视频监控模块、运动控制模块的一体化触控操作界面,操作者在同一个触控操作界面下不仅可对样本进行观察,而且可以以触控方式直接对观察的样本进行 ODEP 操作。该操作方式提高了 ODEP 操作的直观性和效率,为 ODEP 微纳操作提供了一种新的操作方式。

关键词 光诱导介电泳 (ODEP), 触控式操作, Net Framework 平台, 微纳操作

0 引 言

2005 年《自然》杂志刊登了加州大学伯克利校区 Wu 课题组提出的光诱导介电泳 (optically-induced dielectrophoresis, ODEP) 技术^[1],该项技术在微纳领域获得了广泛关注,也成为了微纳米技术领域的热门研究方向。基于光诱导介电泳 (OPEP) 原理^[2,3],科研人员实现了不同尺寸聚苯乙烯微粒的分离^[4,5]、单个微粒的捕获^[6,7]、批量微粒的收集和排列^[8],而且利用 ODEP 系统也实现了碳纳米管和碳纳米颗粒的高效率、自动化、批量化的输运^[9-11]、收集和排列。在光诱导的正介电泳力的作用下,通过光诱导电化学沉积实验,可以批量化沉积生成各种形状的金属电极^[12,13]。因此利用 ODEP 系统构建微纳米结构具有很强的灵活性,可实现形状可控、尺寸可控的自动化、批量化的微纳米结构加工。

现有的 ODEP 系统主要包括结构光图形绘制界

面、投影设备、CCD 图像采集模块及图像显示界面 4 个部分^[14]。由于现有的 ODEP 系统中图形绘制界面与图像显示界面是分离的,这两个界面显示在不同的显示器上,ODEP 操作过程中操作者在图形绘制界面绘制图形并控制图形运动,然后在图像显示界面观察 ODEP 操作的结果,这期间往往需要在图形绘制界面与图像显示界面反复观察、多次调试才能得到较为理想的实验结果,效率较低。由于图形绘制界面与图像显示界面是分离的,因而导致在这两个界面中的操作动作往往不能同步,影响了 ODEP 操作的直观性和效率。本研究针对该问题提出了一种触控式光诱导介电泳 (ODEP) 方法。触控式 ODEP 系统是把图形绘制界面与图像显示界面整合在一个界面上,在图形绘制及操作的同时也接受 CCD 采集图像的反馈,这样操作者就可以在同一个界面下直观地进行光控操作并观察操作的结果。另外,本研究将新设计的界面显示在触控显示器上,因而操作者可以用手指直接在界面上绘制并移动图

① 国家自然科学基金(61573339)资助项目。
② 男,1976 年生,硕士生导师,教授;研究方向:计算机控制技术,机器人导航与控制,图像处理与模式识别;E-mail: liu_th@sjzu.edu.cn
③ 通信作者,E-mail: ndjiao@sia.cn
(收稿日期:2017-08-10)

形,直观灵活地实现触控式 ODEP 操作。该触控式 ODEP 操作方法为 ODEP 微纳操作提供了一种新的操作方式,将极大提高 ODEP 操作的直观性和效率。

1 触控式 ODEP 操作原理

ODEP 系统的结构框图如图 1 所示。本研究使用的触控式 ODEP 系统主要由触控式 ODEP 操作界面、投影设备以及 CCD 图像采集模块三部分组成,如图 2 所示。相比于图 1,本研究将结构光绘制显示界面和图像显示界面整合到了同一个界面上,提高了 ODEP 操作的直观性和效率。

(1)触控式 ODEP 操作界面:操作者在触控式 ODEP 操作界面用手指画出不同形状的结构光图形,操作者可以在该界面中直观地进行光控操作并观察操作的结果。

(2)投影设备:投影设备将结构光图形投影到 ODEP 芯片上,本研究采用的是 0.55 英寸、分辨率为 1024 × 768 的 LCD 投影机 (VPL-F400X, Sony, Japan) 作为投射光源,单个像素的面积为 10.9 μm × 10.9 μm 。

(3) CCD 图像采集模块:采用显微镜 (Zoom 160, OPTEM, USA) 来实时观测、记录以及反馈粒子的运动情况。通过 CCD 图像采集模块来记录粒子的运动轨迹,同时把采集到的图像实时反馈在触控式 ODEP 操作界面上,并使反馈图像的虚拟光斑与手指画的结构光图形重合。进而在触控式 ODEP 操作界面可以实时同步地改变结构光图形的位置对粒子进行输运和分离操作。

触控式 ODEP 操作具体过程:经由投影机投射出的光经过 50 倍聚光物镜 (Nikon, MS Plan 50 ×) 后,投射在 ODEP 芯片上面的光斑的像素面积为 0.218 μm × 0.218 μm 。封装好的 ODEP 芯片放置在 3D 移动平台上来保证足够大的操作面积,此时将信号发生器 (Tektronix, AFG 3022B, USA) 产生交流信号施加在 ODEP 芯片上的透明导电层,芯片中的氢化非晶硅电导的变化使得外加交流电压作用在悬浮溶液层,进而在光电极周围生成非均匀电场。悬

浮液中的微纳米颗粒在非均匀电场作用被极化而受到介电泳力的作用,进而实现收集、输运、排列等 ODEP 操作。

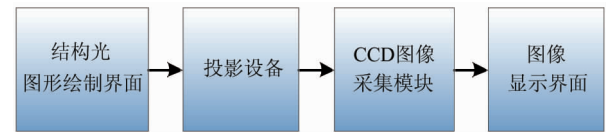


图 1 光诱导介电泳系统结构框图

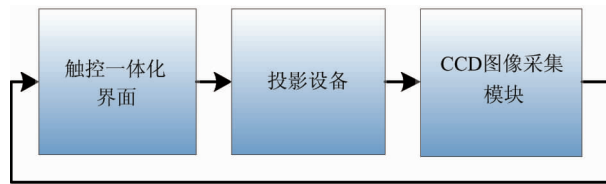


图 2 触控式光诱导介电泳系统结构框图

2 触控式 ODEP 系统的软件设计

触控式 ODEP 系统的软件开发工具包 (software development kit, SDK) 采用的是 Visual Studio 2010, 由于它具有友好的界面和可操作性以及对 C#, VC ++ ,BV. NET, Jscrip. NET 编程语言规范的兼容支持,Net Framework 中的公共语言运行库 (common language runtime, CLR) 设计目的就是统一运行时引擎,这样开发人员就能够使用一套单独的运行库服务,混合使用 VC ++ 、C#等多种语言。NET 类库提供了很多有助于开发人员重利用代码的类。这些类库最大的特点就是可以用于支持多种编程语言。这意味着任何可用于某种语言的功能也可以用于其他任何 .NET 语言。NET 框架强大的兼容性为本文对已有 ODEP 系统的改进提供了基础。

触控式 ODEP 系统的软件设计采用 C#模块化设计方案。根据触控式 ODEP 系统的软件控制的需求分析设计了软件的整体流程图,如图 3 所示。

由图 3 可以看出,该软件主要包括 CCD 图像的获取、透明窗体上绘图并投影、触控移动图形三部分。系统功能模块^[15]如图 4 所示。

CCD 图像获取是三个模块中很重要的部分,它主要功能是进行视频流捕获、单帧图像采集和保存。

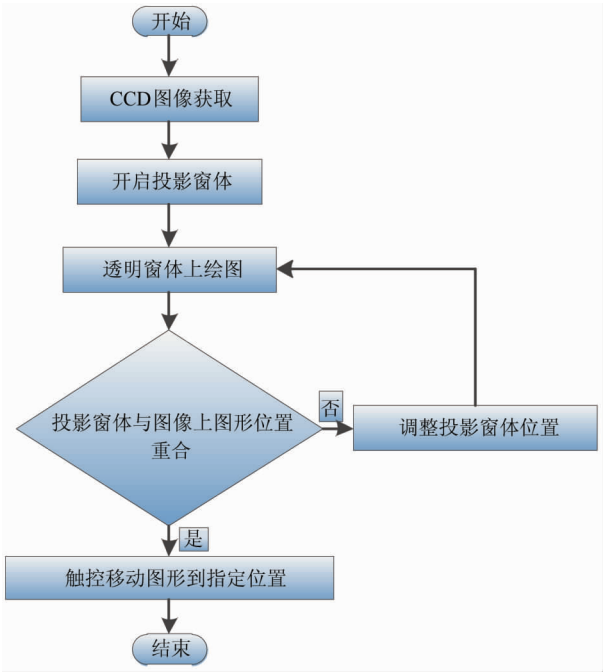


图3 触控式光诱导介电泳系统软件流程图

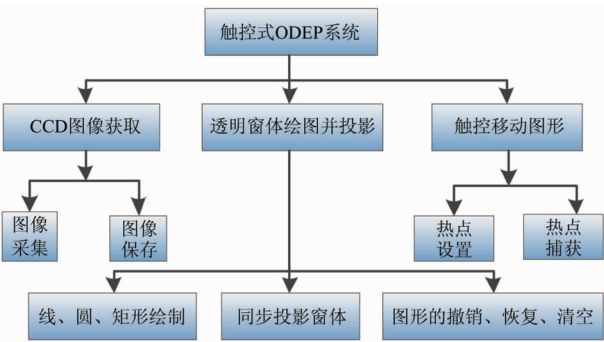


图4 软件系统功能模块图

当获取 CCD 实时采集的图像后,系统会在图像上覆盖一层透明的绘图窗体。此时,用户在透明窗体上绘制图案,并把绘制的图案通过实时同步的 Project 窗体投影到 ODEP 芯片上。当然,用户也可以随时更改、变换图像。当用户得到理想的图案时,就可以通过热点捕获的功能捕获并移动图案,受介电泳力的影响,微粒或细胞就可以随之运动。

3 触控式 ODEP 系统的硬件结构

触控式 ODEP 系统硬件的结构包括:触控式 ODEP 显示器、投影仪、三维移动平台、显微镜、光诱

导芯片、信号发生器及 CCD 图像采集,结构如图 5 所示。

它们的具体功能如下:

- (1) 触控式 ODEP 显示器:负责绘制图案以及接受 CCD 采集的图像。
- (2) 投影仪:通过与显示器同步的 Project 窗体,把绘制的图像投影到光诱导芯片上。
- (3) 三维移动平台:主要用来实现 ODEP 芯片的 X、Y、Z 三个方向的微米级移动。
- (4) 显微镜:对芯片进行实时图像观测。
- (5) 光诱导芯片:是微粒或细胞寄宿的载体。
- (6) 信号发生器:产生交流信号施加在 ODEP 芯片上的透明导电层,产生非均匀电场。
- (7) CCD 图像采集:对显微镜观测的实时图像进行采集。

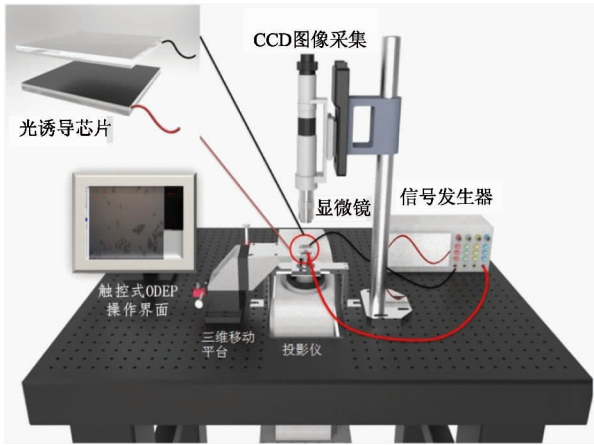


图5 触控式光诱导介电泳系统硬件结构

4 触控式 ODEP 操作界面

触控式 ODEP 操作界面显示在触控显示器上,此操作界面是触控式 ODEP 系统的核心控制模块,通过它可以进行图像采集及显示、图形绘画、触控 ODEP 操作等一系列操作,如图 6 所示。以下将重点介绍该操作界面的开发过程。

触控式 ODEP 操作界面是由 3 个窗体组成,分别是 CCD 采集图像子窗体、透明的画图主窗体以及与画图主窗体同步的投影子窗体。

其中,透明主窗体和 CCD 采集图像子窗体是重合的。画图的主窗体由 14 个按钮、2 个 PictureBox、

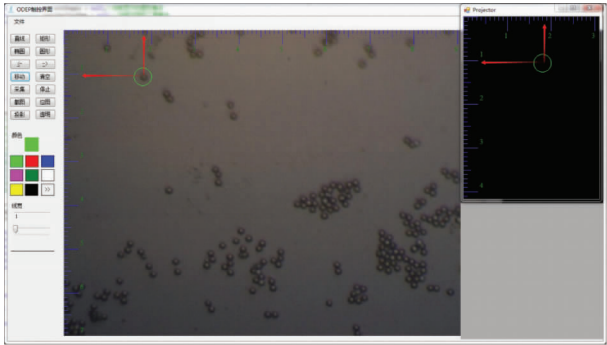


图 6 触控式 ODEP 操作界面

2 个 GroupBox、1 个 TrackBar、1 个 TextBox 组成。14 个按钮分别控制绘图的直线、矩形、椭圆、圆形以及撤销图案、恢复图案、移动图案、清空窗体、采集 CCD 图像、停止采集、CCD 采集图像的截图、显示位图、打开投影窗体、开启透明窗体。当点击开启透明窗体按钮时, CCD 将开始工作, 同时会把采集到的实时图像显示在桌面指定位置。此时, 用户可以在透明的主窗体上绘图, 再点击“投影”按钮, 会自动弹出和绘图主窗体同步图案的子窗体。投影仪会把子窗体上的图案投影到 ODEP 芯片上, 形成该图案的虚拟电极。与此同时, 摄像机会把芯片上的细胞或者颗粒以及虚拟电极图案采集到 CCD 采集图像子窗体上。

最后, 当用户移动透明绘图主窗体上的图案时, 投影子窗体的图案会随之移动, 芯片上的虚拟电极图案也会随之移动。伴随着虚拟电极图案移动, 细胞或者微粒也会随之移动, CCD 会把虚拟电极图案带动微粒移动的过程传递到 CCD 采集图像子窗体上。给用户带来的视觉效果就是, 可以手动圈选细胞或微粒, 同时可以把它们移动到指定位置, 极具有触觉及视觉反馈效果。

下面介绍触控式 ODEP 操作界面的 3 个模块, 如前面图 4 所示, CCD 图像获取是 3 个模块中很重要的部分, 图像获取模块的实现采用的是大恒图像提供的数字摄像机应用接口库, 包括图像的采集和保存。CCD 摄像机直接通过 1394 接口与计算机进行通信。整个软件开发工具包 (SDK) 框架示意图如图 7 所示, 在框架最底层是 1394 驱动程序库, 对 1394 接口进行直接操作。最高层是用户应用程序, 它直接利用应用接口库提供的函数进行编程。应用

接口库主要包括主功能接口 HVDAILT. dll, 图像处理接口 Raw2Rgb. dll 以及其他接口。其中主功能接口包括打开摄像机、采集图像、控制摄像机等接口。在应用接口和 1394 驱动程序接口之间还有两层接口库, 分别是设备接口库和抽象设备接口库, 它们分别实现对 1394 接口功能不同程度的封装。

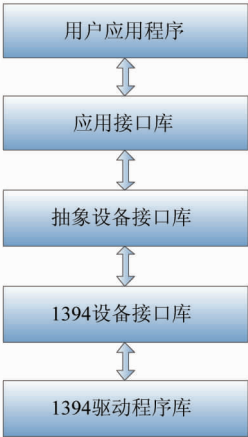


图 7 SDK 框架示意图

利用数字摄像机应用接口库对摄像机进行图像采集和保存的流程如图 8 所示。由于大恒摄像机接口库支持多摄像机, 因此通过调用 HVGetDeviceTotal 函数检测目前系统中连接的摄像机数目。然后调用 BeginHVDevice 函数启动摄像机设备, 这是直接对摄像机进行操作。同时利用 HVCommand 功能接口获取当前摄像机功能参数。

在完成硬件参数的设置后需要在内存开辟图像缓冲区、注册回调函数, 这通过调用 HVOPenSnap 函数来实现。HVStartSnap 用于控制摄像机开始采集图像, 采集的所有图像都存放在缓冲区中。在图像采集过程中可以根据图像的质量利用 HVCommand 接口函数进行相应功能参数的设置。图像采集完成后还需要将控制摄像机停止采集, 完成这一功能的是 HVStopSnap 函数, 与 HVStartSnap 函数功能对应。然后调用 HVCloseSnap 回收内存的图像缓冲区、注销回调函数。最后调用 EndHVDevice 关闭摄像机硬件设备。

这样就实现了 CCD 图像的实时捕获和存储, 接下来就需要在 CCD 采集的图像上覆盖一层透明的窗体进行绘图, 并把绘制的图像通过实时同步的

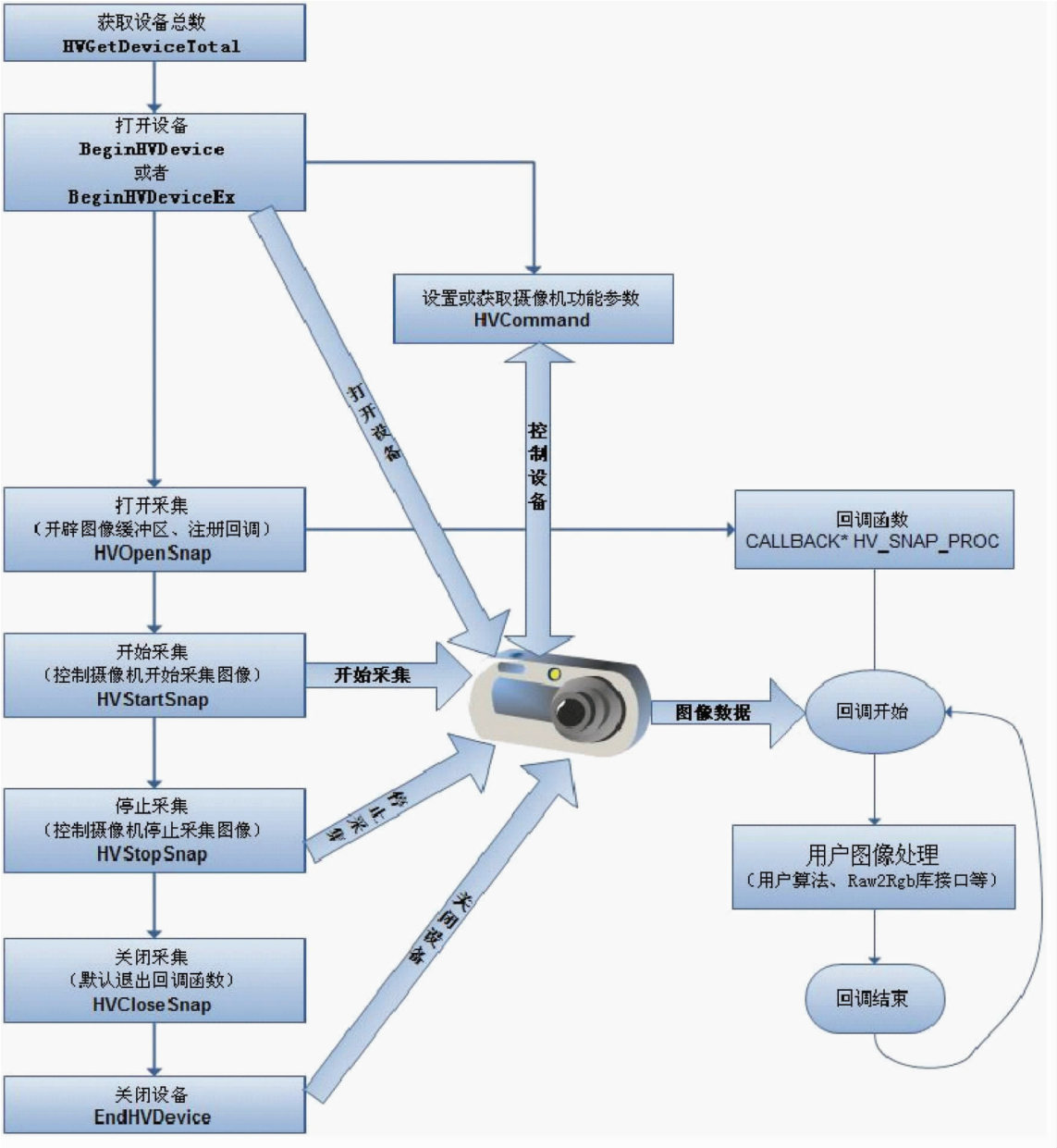


图 8 CCD 图像获取主流程示意图

Project 窗体投影到 ODEP 芯片上。透明窗体上绘图并投影模块的结构类图如图 9 所示。

绘图功能是由 2 个基类 (BaseTool、BaseShape) 和 9 个子类 (LineTool、CircleTool、RectangleTool、EllipseTool、HandleTool、LineShape、CircleShape、RectangleShape、EllipseShape) 组成。其中,BaseTool 声明了 mouseUp、set、mouseDown、mouseMove、mouseDrag、unSet 6 个不带返回值的虚方法,子类 LineTool、CircleTool、RectangleTool、EllipseTool、HandleTool 对这 6 种虚方法进行重写。同样,BaseShape 声明了 setHit-

Point、copySelf、catchShape、copySelf、draw 5 个不带返回值的虚方法,LineShape、CircleShape、RectangleShape、EllipseShape 对这 5 种虚方法也进行了重写。这样一种动态性的设计实现了一个函数一对多的关系,可以通过同个名字但是不同地址去操作不同的函数。

同步投影窗体的方法写在 CADFrame 类中,它是通过 Click 事件新建一个 Projector 对象,然后在 Projector 类中的 pictureBox1_Paint 事件下,调用 CADFrame 类的 Draw 方法。这样也就实现了绘图

窗体和投影窗体的实时同步。

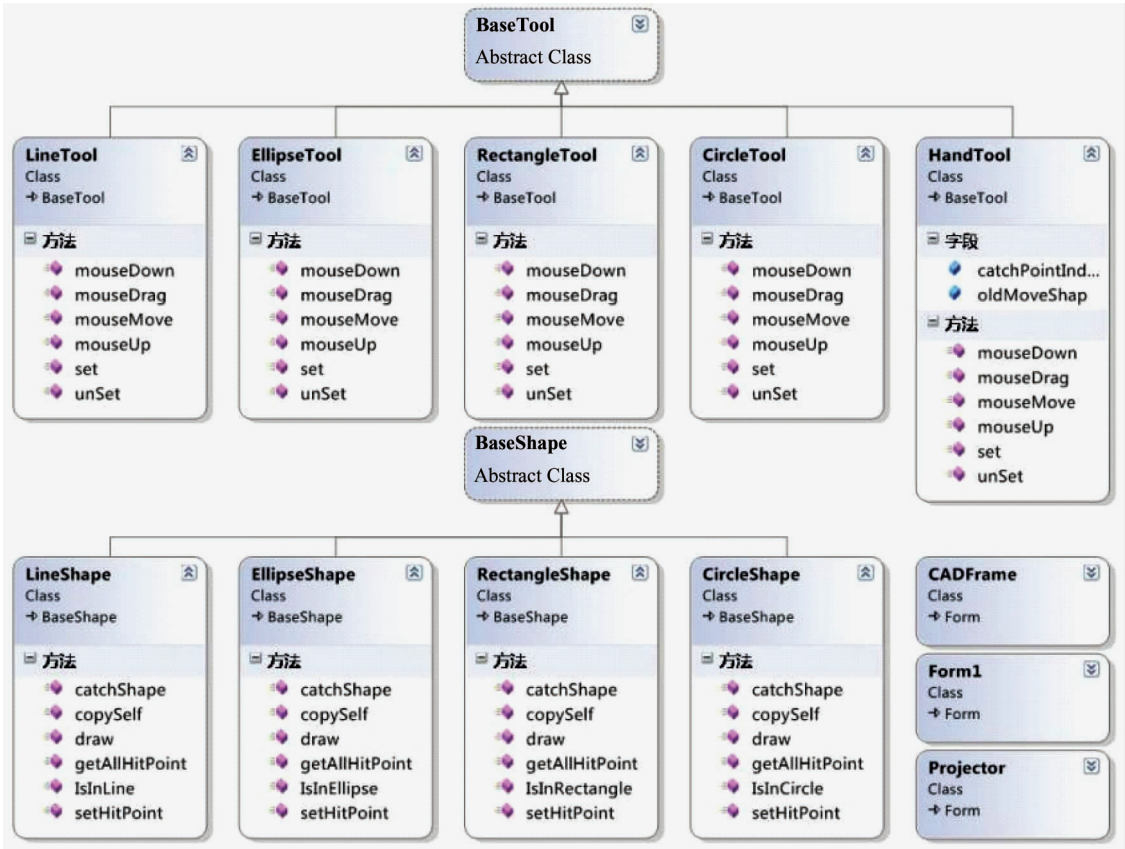


图 9 绘图窗体的结构类图

图形的撤销、清空和恢复分别是在 CADFrame 类中定义的 undo、clear、redo 三种方法实现。撤销和恢复通过 undoIndex 变量的增加和减少将历史快照取回到当前图形的中。清空是通过重新创建两个新的 ArrayList 集合 setHistoryShapes 和 setCurrentShapes 实现的。

触控移动图形模块主要体现在对图形热点的捕捉。首先,设置捕捉热点的索引 catchPointIndex = -1, 接下来调用 this. getOperShape(). setUnSelected() 函数需要清除之前操作对象中选中的状态,紧接着得到画板上的所有图形 ArrayList allShapes = this. getRefCADPanel(). getCurrentShapes(), 再对每个图形进行捕捉测试 catchPoint = ((BaseShape) allShapes[i]). catchShapPoint(this. getNewMovePoint())。捕获到后,将临时的热点设置到工具属性中 catchPointIndex = catchPoint, 设置捕捉到的图形为选中状态((BaseShape) allShapes[i]). setSelected()。最后把选中的图形设定到本类的操作图形的状态中去

this. setOperShape(((BaseShape) allShapes[i]))。

5 实验验证

图 10 是触控式 ODEP 操作界面实物图,主要包括了触控式 ODEP 操作界面、CCD 图像采集模块、投影设备和信号发生器。为了验证开发的触控式 ODEP 系统可以对微粒进行触控分离、捕获和定向运输,采用 500nm 的二氧化硅微粒进行实验验证。结果如图 11 和图 12 所示。操作者首先在触控式 ODEP 操作界面中用手指绘制一条竖直的直线,然后通过手指移动直线可实现将二氧化硅微粒从右侧移动到左侧,完成了二氧化硅的微粒的分离。图 12 是操作者首先通过手指绘制一个圆形选中 7 颗二氧化硅,然后微粒在负介电泳力的作用下被捕获,最后操作者在触控式 ODEP 操作界面任意位置移动被选中的二氧化硅微粒完成微粒的运输。

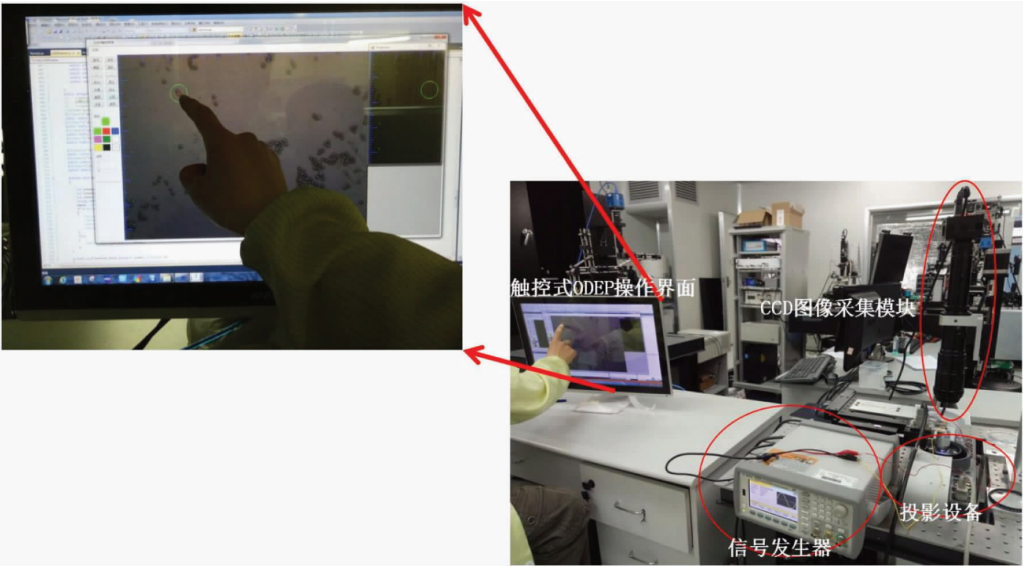


图 10 触控式 ODEP 操作界面实物图

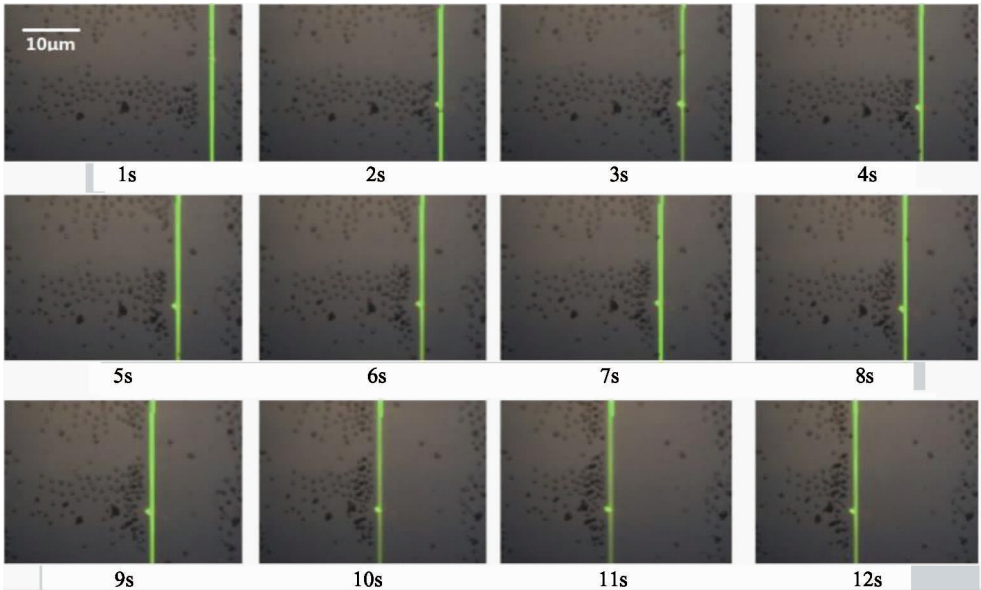


图 11 触控式 ODEP 操作实现二氧化硅微粒的分离

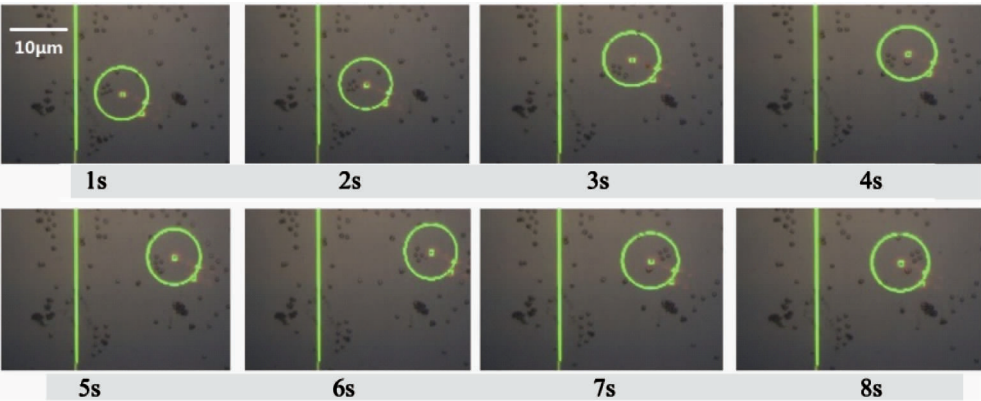


图 12 触控式 ODEP 操作实现二氧化硅微粒的运输

ODEP 实现该捕获操作的原理:圆形图案通过投影仪照射在光诱导芯片中的光电导材料上,价带中的电子吸收一个光子的能量跃迁到导带,并在价带中产生一个带正电的空穴,产生的电子-空穴对增加了光诱导芯片中半导体材料的载流子数目,使得光照区域光导层的电导率迅速增大,进而在光电极周围产生非均匀电场,此时位于悬浮液中的微粒在非均匀电场作用下被极化,进而受到负介电泳力的作用而随光电极的移动而运动^[16]。当圆形光电极移动的速度增加时,粒子的速度也会随之增加。根据斯托克斯方程 $f = 6\pi\varphi av$, 其中 φ 为溶液的粘滞系数, a 为粒子半径, v 是粒子的运动速度。当粒子的速度增加时,粒子所受的粘滞阻力增大。当粘滞阻力大于介电泳力时,粒子将不被捕获移动。

图 13 反映了当光电极移动速度为 $5\mu\text{m/s}$ 时, SiO_2 小球被移动的成功率为 92%;当光电极移动速度为 $20\mu\text{m/s}$ 和 $35\mu\text{m/s}$ 时,小球移动的成功率有所下降;当光电极移动速度为 $50\mu\text{m/s}$ 时,小球移动的成功率迅速下降。因此,为保证小球移动有较高的成功率,光电极的移动速度最好控制在 $20\mu\text{m/s}$ 到 $35\mu\text{m/s}$ 之间。

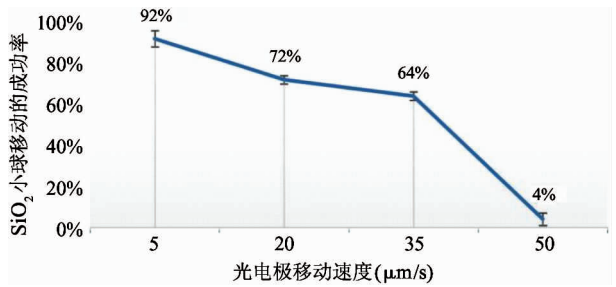


图 13 SiO_2 小球移动成功率和速度的关系

从图 11、图 12 中,可以看到无论是直线还是圆形图案形成的虚拟电极,它们带有一个光点。其实,那就是当用户手指触碰到虚拟电极图案时,系统捕捉到的热点,从而选中电极图案控制虚拟电极的运动。这个捕捉的过程是瞬间触发,没有丝毫延时。

相比传统的光电极移动操作,触控式 ODEP 系

统具有一些优势,如表 1 所示。一方面,传统的 ODEP 系统需要用户确定目标粒子或细胞的位置,然后在另外一个纯黑色背景的显示器上画出虚拟电极图案,最后需要用户反复地观察两个显示器来回移动虚拟电极图案才能捕捉到目标粒子。这个过程一般需要几分钟时间,但在触控式 ODEP 操作界面上完成这个操作只需要几十秒。用户观测到目标粒子后可以直接用手指圈选并移动,因此提高了 ODEP 操作的效率。另一方面,传统的 ODEP 系统要想完成目标粒子的移动只能用键盘的按键操作,这就意味着虚拟电极只能 90° 或 180° 移动。要是用鼠标移动的话,鼠标的箭头图案也会被当做虚拟电极投影到芯片上。但在触控式 ODEP 界面上,用户可以任意角度用手指移动虚拟电极的位置。触控式 ODEP 系统大大简化了用户的操作难度,用户可以只在一个操作界面上通过触控方式实时完成对微粒的捕获和运输,因此提高了 ODEP 操作的直观性。该触控式 ODEP 操作方法可以实现直观、高效的 ODEP 操作,为规模化微纳操作提供了新的操作方式。

表 1 传统 ODEP 系统与触控式系统的性能比较

种类	传统 ODEP 系统	触控式 ODEP 系统
性能		
时间	捕获粒子需要反复调试, 花费时间几分钟左右。	直接锁定粒子, 花费时间 20s 左右。
方向	控制粒子的位移, 只能进行 90° 或 180° 移动。	任意角度。

本文利用触控式 ODEP 系统开展了其应用研究。操作者用手指可灵活地移动微纳米颗粒、生物细胞等,将感兴趣的样本分离出来。结合 Raji 细胞 (Burkitt 淋巴瘤细胞) 的尺寸和电特异性差异,本实验实现了 Raji 细胞和血红细胞两类细胞的免标记提纯与分离,如图 14 所示。该方法对其他生物学研究具有普适性和通用性,在生物医学领域具有重要应用价值。

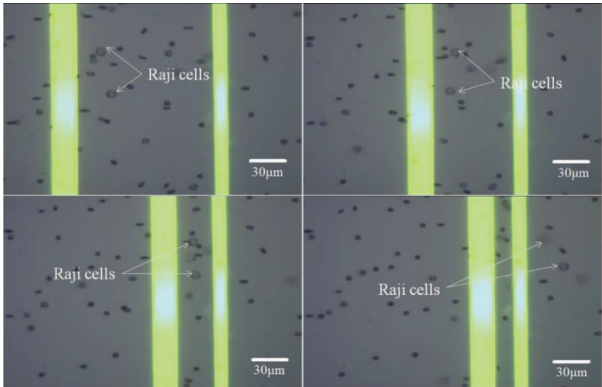


图 14 分离 Raji 细胞和红细胞实验过程

通过触控式 ODEP 操作,可高效、灵活地对不同微结构(PEGDA 材料)进行装配,图 15 显示了通过手指移动、装配“T”型微结构与“n”型微结构的过程。该触控式 ODEP 操作极大地提高了操作的直观性和高效性,为微纳米操作、装配提供了新的技术途径。

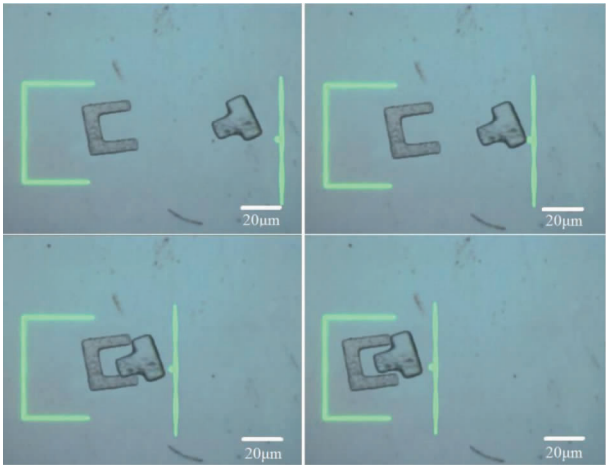


图 15 多点触控实现 PEGDA 微结构的组装

除了可以收集、移动及装配微结构,触控式 ODEP 系统也可以实现银电极的快速加工。图 16 是对厚度 $0.5\mu\text{m}$ 非晶硅芯片采用 50mM/L 的硝酸银溶液进行实验研究。交流电压峰峰值为 10Vpp , 输入交流电压频率 (100kHz) 沉积时间间隔为 5s 。可以清晰观察到生成银电极的情况。

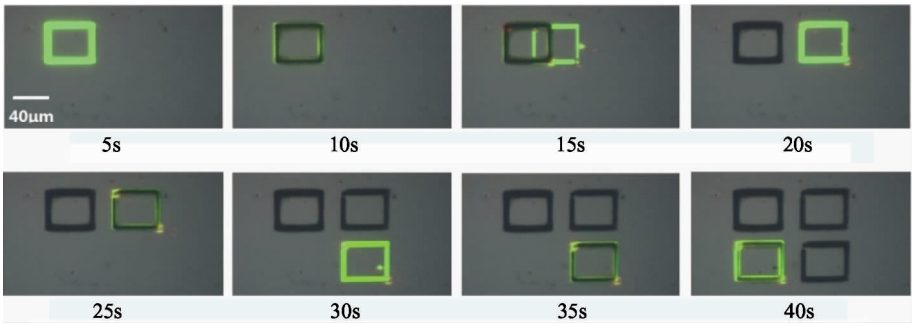


图 16 银电极一体化制造

操作过程如下:首先取 50mM/L 的硝酸银溶液注射到封装好的光诱导介电泳芯片中,此时静置 $1\sim 2\text{min}$ 使得芯片中的溶液静止;操作者在触控式 ODEP 操作界面上用手指绘制一个矩形图案。矩形图案通过投影设备投射到光诱导介电泳芯片,在电压和频率为 10Vpp 和 100kHz 的交变电场激发下,溶液中存在氧化性较强的金属银离子无法置换水溶液中的氢离子,银离子将获得电子被还原为零价银原子,进而吸附在电极表面,需要 5s 就可以形成晶核并逐渐堆积形成金属沉积层聚集在芯片基底上。

然后继续移动矩形图案,每间隔 5s 就可以生成一个矩形金属沉积层。总共用时 40s 就可以完成 4 个矩形银电极的制造。

对生成的银电极可通过原子力显微镜 (AFM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 进行表征,得到银电极的表面形貌并测量电极高度。在外加电压为 $100\text{kHz}/10\text{Vpp}$ 、沉积时间为 5s 时,沉积的银电极高度为 300nm 。由于光诱导电化学沉积金属微电极是原位还原、结晶和沉积的过程,所以可观察到微电极还具有良好的物理连接性。

光诱导电化学沉积技术本身是一种高效、灵活的微电极加工方法,并且可以通过调节参数控制产生银电极的高度和图形精细程度。通过本研究为其加上触控操作方式,利用热点识别并捕获虚拟电极使得操作者更加便捷、直观、准确地触控银电极的大小、形状及位置,为微纳米器件的研制提供了新的技术途径。

6 结 论

本文创新性提出了触控式 ODEP 操作方法,介绍了触控式 ODEP 原理及具体实现过程。开展了 C# 模块化设计方法研究(主要包括 CCD 图像的获取、透明窗体上绘图并投影、触控移动图形三个模块),将传统 ODEP 系统中结构光投影模块和视觉反馈监控模整合在同一个界面上,构建了集图形投影、视觉反馈、触控操作一体化的触控式 ODEP 系统。在此基础上,利用触控式 ODEP 系统成功实现了对二氧化硅微粒的触控捕获、运输,对不同生物细胞的免标记提纯与分离,对微结构的快速装配,以及在硝酸银溶液中沉积加工银电极。实验验证了触控式 ODEP 操控方法的有效性。该方法提高了 ODEP 操作的直观性和效率,为 ODEP 微纳操作提供了一种新的操作方式。

参考文献

- [1] Chiou P Y, Ohta A T, Wu M C. Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images[J]. *Nature*, 2005, 436(7049):370-372
- [2] Hoeb M, Radler J O, Klein S, et al. Light-induced dielectrophoretic manipulation of DNA [J]. *Biophysical Journal*, 2007, 93(3):1032-1038
- [3] 王淑娥,曲艳丽,董再励,等. 基于光诱导介电泳的微粒自动化操作实验研究[J]. *微纳电子技术*, 2011, 48(2):132-137
- [4] Chou W P, Wang H M, Chang J H, et al. The utilization of optically-induced-dielectrophoresis (ODEP)-based virtual cell filters in a microfluidic system for continuous isolation and purification of circulating tumour cells (CTCs) based on their size characteristics[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 241:245-254
- [5] Chiu T K, Chou W P, Huang S B, et al. Application of optically-induced-dielectrophoresis in microfluidic system for purification of circulating tumour cells for gene expression analysis-Cancer cell line model [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32851
- [6] Hwang H, Choi Y J, Choi W, et al. Interactive manipulation of blood cells using a lens-integrated liquid crystal display based optoelectronic tweezers system[J]. *Electrophoresis*, 2008, 29(6):1203-1212
- [7] Liu N, Liang W F, Liu L Q, et al. Extracellular-controlled breast cancer cell formation and growth using non-UV patterned hydrogels via optically-induced electrokinetics[J]. *Lab Chip*, 2014, 14(7):1367 - 1376
- [8] Cetin B, Kang Y, Wu Z, et al. Continuous particle separation by size via AC-dielectrophoresis using a lab-on-a-chip device with 3-D electrodes [J]. *Electrophoresis*, 2009, 30(5):766-772
- [9] Lapizco-Encinas B H, Rito-Palomares M. Dielectrophoresis for the manipulation of nanobioparticles [J]. *Electrophoresis*, 2007, 28(24):4521-4538
- [10] Gascoyne P, Vykoukal J. Particle separation by dielectrophoresis[J]. *Electrophoresis*, 2002, 23(13):1973-1983
- [11] Lee M W, Lin Y H, Lee G B. Manipulation and patterning of carbon nanotubes utilizing optically induced dielectrophoretic forces [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2010, 8(5):609-617
- [12] Marx G, Pethig R, Rousselet J. The dielectrophoretic levitation of latex beads, with reference to field-flow fractionation [J]. *Applied Physics*, 1997, 30(17):2470-2477
- [13] Rosenthal A, Voldman J. Dielectrophoretic traps for single-particle patterning [J]. *Biophysical Journal*, 2005, 88(3):2193-2205
- [14] 朱树存,易红,倪中华. 实时可重构的共面型光诱导介电泳微操纵平台 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(6):1143-1148
- [15] 倪中华,易红,朱树存,等. 基于光诱导介电泳的微纳米生物粒子操纵平台关键技术 [J]. *中国科学 (E 辑)*, 2009, 39(10):1635-1642
- [16] Liang W F, Zhao Y L, Liu L Q, et al. Rapid and label-free separation of Burkitt's lymphoma c-ells from red blood cells by optically-induced electrokinetics [J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(6):e90827

Study on touch operation control of optically-induced dielectrophoresis

Liu Tianbo^{*}, Dai Yongqing^{*}, Yuan Shuai^{*}, Dong Ting^{**}, Jiao Niandong^{***}

(^{*} School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168)

(^{**} Technology Electronics Industry Standardization Institute, The Ministry of Industry and Information, Beijing 100007)

(^{***} State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation,
Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract

The optically-induced dielectrophoresis (ODEP)——a recently developed microscale manipulating technology is investigated, and it is pointed that the existing ODEP operation's problem is the separation of operation interface from observation interface, which leads to the result that the operations in the two interfaces are not synchronous, thus the ODEP operation's visualization and efficiency will be affected. Aiming at this problem, this study proposes a touch operation control method for ODEP, and designs an integrated touch operation interface consisting of the structure light projection module, video monitoring module and motion control module. Under the same touch interface, operators can not only observe the samples, but also operate the sample synchronously by touch operation. This method can greatly improve the visualization and efficiency of ODEP operation, and provide a new operation mode for micro/nano ODEP manipulation.

Key words: optically-induced dielectrophoresis(ODEP), touch operation, Net Framework platform, micro/nano manipulation