

# 人机交互式高精度微纳物体声操控平台

魏莹,芦小龙,赵聪,欧欢,暴金辉

(南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**面向空间生命科学研究中对小体积、高精度微纳物体运动操控实验设备的需求,基于压电作动技术与声流理论,搭建微纳物体运动操控平台,并利用视觉反馈与人机交互技术实现便捷、精准的微纳物体运动控制。利用逆压电效应驱动光刻加工的人工微结构在液体环境中振动,构建局部增强的声流场,使人造微颗粒、细胞等微纳物体沿微结构定向运动。微粒运动过程利用视觉反馈,由计算机实时监控,运输目标和定位精度由用户利用人机交互系统设定。实验结果表明:该平台能够实现5~30  $\mu\text{m}$  聚苯乙烯微球或癌细胞的识别和运动控制,定位误差小于 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ,并可在多物体环境中切换控制目标。

**关键词:**空间生命科学;微纳操控;声流理论;视觉反馈;人机交互

**中图分类号:**TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0020-04

## Precise Acoustic Manipulation Platform for Micro/Nano Objects Based on Human-Machine Interaction

WEI Ying, LU Xiaolong, ZHAO Cong, OU Huan, BAO Jinhui

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To meet the demand for minimized and high-precision micro-nano object motion control equipment in space life science research, this study builds a micro-nano object motion control platform based on piezoelectric actuation technology, and applies visual feedback and human-computer interaction technology to achieve convenient and precise micro-nano object motion control. The platform uses the inverse piezoelectric effect to drive the artificial microstructures to vibrate in the liquid environment and construct the locally enhanced acoustic streaming, guiding the artificial micro-particles, cells, and other micro-nano objects to move along the microstructures in a directional manner. The particle movement process is monitored by the computer in real-time with visual feedback, and the transportation target and positioning accuracy are set by the user using the human-computer interaction system. Experimental results show that the platform can realize the recognition and motion control of 5—30  $\mu\text{m}$  polystyrene microspheres or cancer cells, with positioning error less than  $\pm 2.5 \mu\text{m}$  and the function that the control target can be switched in the multi-object environment.

**Keywords:** space life science; micro-nano manipulation; acoustic streaming; visual feedback; human-machine interaction

## 0 引言

随着航空航天技术的发展和宇宙空间站的建设,空间生命科学研究和宇航员健康检测技术日渐成为科研人员关注的焦点问题<sup>[1-3]</sup>。不同于地面实验室中进行的各种生物化学实验,太空环境中的实验受到微重力、强辐射等实验条件的影响,呈现出了多种与地面环境下不同的实验现象<sup>[4]</sup>。这些空间生命科学研究中出现的奇异现象不仅为人类探索宇宙空间环境对动植物、微生物、生物组织等材料的影响开辟了道路,也在实验设备、实验技术等方面提出了新的挑战<sup>[5-6]</sup>。实验设备的微型化、集成化、智能化为满足有限空间内的多种实验需求,实现细胞、微生物等微小体积材料的实验检测提供了新的思路,不仅为应用于空间环境奠定基础,也为便携式生化检测实验平台和临床快速检测设备的研发开辟了新的方向。

通过调控温度场、磁场、电场、光场、声场、化学梯度、表面

张力等参数,科学家们实现了活细胞、微生物等生物材料以及纳米棒、纳米线、纳米马达、碳纳米管等多种人造纳米材料的驱动,在微型平台上,实现了细胞分选、微纳颗粒装配等多种功能<sup>[7-8]</sup>。其中,微纳物体的超声操控技术不仅具有低能耗、高通量的优点,并且受控运动的物体无需经过磁化、极化等预处理和表面功能化修饰,使得这一方法能够广泛应用于多种材质、尺寸微纳物体的运动控制<sup>[9-10]</sup>。然而,现有的微纳物体声操控系统往往需要使用复杂的控制设备和调试方法,制约了这一系统在实际场景中的应用,尤其是开环的控制方法在操控精度方面存在一定的局限性。

本研究搭建了一种人机交互式微纳物体超声操控平台,利用光刻加工的直线型人工微结构在流体中振动产生局部增强的声流场,操控微纳物体的定向运动。借助视觉反馈监控微纳物体位置,平台能够通过自动位置调整确保较高的定位精度和鲁棒性,并能在多物体环境中对指定微粒进行操控。

## 1 声操控工作原理

用于单个微纳物体精准定向运输的声操控平台如图1所示。主体为石英玻璃基板,其上粘贴的压电陶瓷换能器将超声频率电信号转化为机械振动并激励平台的整体谐振,光刻加工的直线型微操纵器在液体样品中产生局部增强的声流场用以驱动微纳物体的定向运动。用户使用针对此平台设计的视觉反馈控制系统,即可便捷、精准地将随机分散在液体样品中的微纳物体定向运输到直线型微操纵器沿线的任意指定位置。

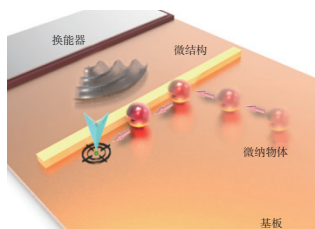


图1 声操控微纳物体运动工作原理

微纳物体运输过程可分为两个步骤,分别对应于微纳物体运动控制平台的两种工作模式。如图2所示,首先,当平台整体在压电陶瓷换能器激励下发生谐振时,基板的面外弯振能够在临近的液体中产生声场,使得随机散落在基板上的微纳物体朝向声压节点位置运动,进而贴附到相近的直线型微操纵器一侧。然后通过调整超声激励频率实现微纳物体运动操控平台的第二种工作模式,光刻加工的直线型微操纵器随着基板的振动局部增强其周围的声流场,产生沿直线型微操纵器的定向声流,定向运输微纳物体。由于在不同频率信号激励下,直线型微操纵器随基板的振动情况不同,能够在其两侧产生相反方向的声流场,进而调控微纳物体的运动方向。在运输过程中,视觉反馈控制系统实时监控微纳物体运输过程,通过调整微纳物体运动方向使其自动靠近目标位置并确保位置误差在容差范围内。

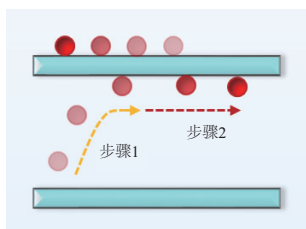


图2 微纳物体定向运输过程

当直线型微操纵器在超声激励下随基板振动时,其周围的液体样品中将会产生局部增强的声流场,驱动微纳物体沿直线型微操纵器定向运动,使得微纳物体能够在声流场中被定向运输<sup>[11-12]</sup>。此时直线型微操纵器的振动无法直接实验测得,但由于微操纵器固定于石英玻璃基板中部且本身体积微小,可以近似地将基板中间点位置在超声激励下的椭圆形振动轨迹视为此处直线型微操纵器的振动轨迹。

直线型微操纵器作椭圆轨迹振动时其周围局部增强的声流场可依据摄动理论和声流场计算方法,采用COMSOL Multiphysics软件仿真计算获得<sup>[13-15]</sup>。为简化模型,仅计算

单个直线型微操纵器及其周围有限区域内的声流场分布。在直线型微操纵器周围绘制范围较大的矩形空间,从软件材料库中选择填充材质为水,添加热黏性声学模块和层流模块进行仿真计算。在热黏性声学模块中添加所有计算域,除直线型微操纵器外的所有边界面设置为无滑移边界条件,直线型微操纵器则依据基板中心点振动轨迹,添加沿 $x,y$ 方向的速度,在频域内求解模型域内的一阶声压分布,而后在层流模块中计算模型域内的二阶速度场。

求解稳态结果可得如图3所示的二阶速度场。在直线型微操纵器两端流速最大,可达 $67.4 \mu\text{m}/\text{s}$ ,并存在微小的漩涡状流场。在直线型微操纵器两侧存在稳定的沿直线分布的流场,且在直线型微结构两侧的流场方向相反,由此可利用沿直线型微操纵器轮廓分布的流场控制贴附在其一侧的微纳物体作定向运动。当超声激励频率切换时,直线型微操纵器随基板振动的运动轨迹改变,可产生相反方向的声流场,操控贴附在直线型微操纵器上的物体反向运动。

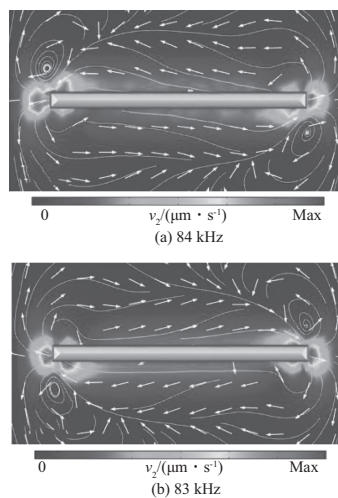


图3 微操纵器振动产生的二阶速度场

这一现象在实验中也得到了验证,如图4所示。在频率为 $84 \text{ kHz}$ 的超声激励下,直径 $5 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯微球绕直线型微操纵器轮廓逆时针运动,在微操纵器两侧的微球朝向相反方向运动;当频率切换为 $83 \text{ kHz}$ 时,微球绕直线型微操纵器轮廓顺时针运动,且位于微操纵器两侧的微球运动方向相反。这种稳定且可逆的微纳物体定向运动现象使得微纳物体的运动能够通过计算机程序实现自动化控制,进而能够实现微纳物体的自动位置调整和沿直线型微操纵器的精准定位。直线型微操纵器固定的位置,有利于对单个微粒开展流程化的多功能电化学检测<sup>[16-17]</sup>。若将直线型微操纵器配置在基板的不同位置,制备为检测电极,并作表面修饰使其具有传感功能,则可用于测试所操纵微粒的不同特性。

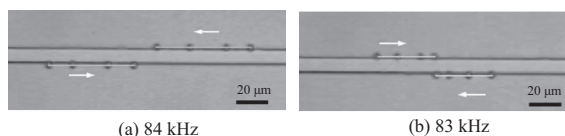


图4  $5 \mu\text{m}$  聚苯乙烯微球的受控定向运动

## 2 控制系统设计

为了实现微纳物体运动过程的视觉反馈,本研究基于现有的用户-微机器人交互系统<sup>[18]</sup>,搭建了如图5所示的实验系统。利用压电陶瓷激发微纳物体声操控平台的整体谐振。驱动压电陶瓷换能器所用的电信号由信号发生器产生,并利用功率放大器放大,计算机控制程序能够调控该信号的频率和电压。在微纳物体受控运动过程中,使用光学显微镜配合 CCD 相机进行图像采集。计算机作为控制程序运行的载体,实现了用户输入信息的采集、微纳物体运动图像采集与处理分析、决策和控制指令输出功能。视觉反馈控制程序调用 CCD 相机连续采集图像,获取微纳物体运动的实时信息,并与用户输入指令比照后做出判断。然后,程序调控信号发生器产生的电信号,调节微纳物体声操控平台的工作状态,进而操控微纳物体的运动。

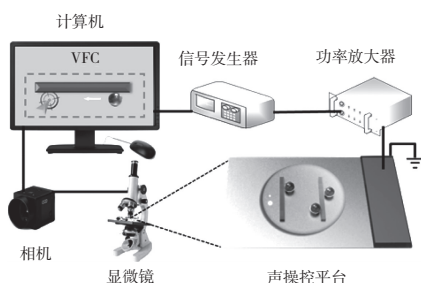


图5 声操控平台设备搭建

微纳物体运动的视觉反馈控制系统采用 LabVIEW 软件编制,主程序包含两个并行的循环结构,一个用于捕获图片并提取信息,另一个利用提取的信息做出判断并控制命令输出。这样的并行循环结构将计算运行速度不同的两个部分拆分后同时进行,二者之间通过队列存取数据进行通信,能够在计算机处理能力有限的情况下,同时保证微纳物体受控运动的连续性和控制精度。运行程序后两个循环同时开始执行,关闭程序时图像采集与处理循环停止捕获图像,两个循环均释放已占用的内存空间。信号发生器控制程序则作为单独的子程序,仅在需要调控输出电信号时调用。

控制模块中,计算机将捕获的原始图像进行处理以获得二值图像,并识别其中所包含的微纳物体,读取微纳物体中心点坐标后与用户选择的运输目标位置进行比较,判断微纳物体运动的朝向以决定应当采取的驱动频率。计算机决策判断并将控制命令发送给信号发生器后,信号发生器产生所需频率的超声激励信号,由功率放大器放大后直接驱动压电陶瓷,使直线型微操纵器振动,将微纳物体定向运输到目标位置。在微纳物体定向运输的整个过程中,实时监控其运动状态,反馈给计算机程序判断是否到达运输目标位置。若微纳物体由于系统响应较慢或外界干扰而越过运输目标位置,且位置误差大于容差,则由系统控制其反向运动,自动调节位置直至最终位置误差小于容差。

微纳物体运动图像处理过程如图6所示,程序开始后首先依据用户设定的接口调用相应的摄像机,连续采集微纳物体实时图像存放到临时存储空间中,并且在人机交互界面上由用户在如图6(a)所示的原始图像上框选分

析区域。从捕获的 RGB 图像中提取单个通道的画面即可获得相应的灰度图像,如图6(b)所示。为了在后续处理中获得较好的识别效果,提取灰度图时选择对比度较大的通道,也可通过调整环境光照、显微镜焦距增大图片对比度,或在程序处理时微调 BCG 值(亮度、对比度、Gamma 值)等参数。灰度图像中大多数像素点灰度分布在 180~230 之间,这些像素点位于图像中的背景区域;微操纵器与微纳物体轮廓处图像颜色更深,像素点灰度值小于 128。在图像识别时,程序将分析区域内每一块连通的白色区域识别为一个物体,因此可依据灰度分布将大于 128 的灰度值替换为 255,相应图像由灰色变为白色;将小于 128 的灰度值替换为 0,相应图像由灰色变为黑色。处理后的图像如图6(c)所示,由此程序可在识别时获取微纳物体的位置信息如图6(d)所示。

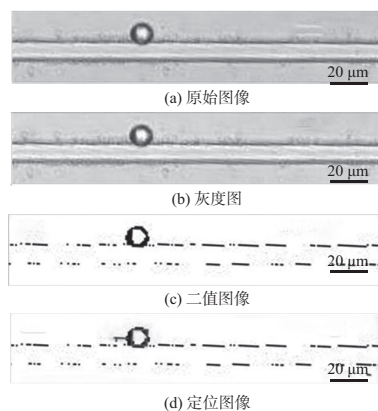


图6 微纳物体运动图像处理

## 3 微纳物体声操控

本文以直径  $5\ \mu\text{m}$  的聚苯乙烯微球为操控对象,探究了多种因素对视觉反馈系统控制的微纳物体定向运输情况的影响。单个聚苯乙烯微球沿直线型微操纵器受控定向运输过程中,用户指定运输目标位置后微纳物体即在计算机系统控制下朝向目标位置匀速运动。当微纳物体由于系统响应不及时、环境扰动等因素越过目标位置且与目标位置间距离大于容差时,系统迅速调整驱动信号,驱动微纳物体反向运动。这种自动位置调节过程将反复几次,直至微纳物体中心点与其目标位置间的距离小于预设的容差。

实验表明,微纳物体运输的最终定位误差与用户设定容差直接相关,在 84 kHz 或 83 kHz 频率超声激励下,微球朝向不同方向运动,其最终位置误差均小于容差值,最小位置误差可达  $\pm 2.5\ \mu\text{m}$ 。并且,实验中驱动电压在 19.6~22.6 V 范围内变化时,微球总能达到预期定位精度,多次实验的可重复性和稳定性较好。

图7、图8所示的实验将微球分别沿直线型微操纵器定向运输 25~45  $\mu\text{m}$ ,结果表明:在两种激励频率下尽管微纳物体朝向不同方向运动,但总能到达指定的目标位置;微球的位置误差均在容差范围内,且最终位置误差与其定向运输距离无显著相关性。由上述结果可知,本研究搭建的微纳物体声操控平台及包含视觉反馈的闭环控制系统能够依据用户需求实现微纳物体的定向运输功能,且精度较高、稳定性较好。

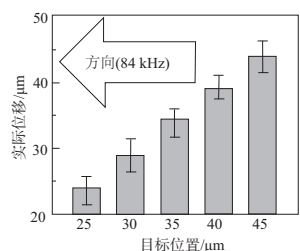


图7 84 kHz 超声激励下微粒运输不同距离的定位精度

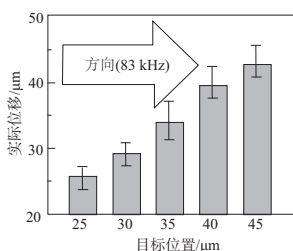


图8 83 kHz 超声激励下微粒运输不同距离的定位精度

与人造微颗粒相似,活细胞也可在此微纳物体声操控平台上受控运动,用户只需要在人机交互界面上划定细胞定向运输的图像分析区域和运输目标位置,即可由控制系统自动以较高精度将细胞运送到指定位置。不同于人造微颗粒,细胞的尺寸一致性较差,在进行运动控制时,尽管不同尺寸的细胞均能在声流场中被驱动,尺寸较小的细胞往往能够表现出更好的操控性能。

当分析区域内存在多个细胞时,定向运输情况如图9所示。实验连续选择了直线型微操纵器沿线的4个不同位置作为运输目标,操控“0”号Hela细胞连续运动到这4个位置。图像识别时,不同尺寸的2个Hela细胞均能够被识别出来,并在图上从上到下分别用“0”和“1”标号。受控运动时两个细胞均在声流场作用下沿直线型微操纵器运动,但仅当“0”号细胞运动到指定位置时超声激励信号才会停止,使两细胞停止运动。实验不仅验证了该微纳物体声操控平台在细胞运动控制中的适用性,也验证了多细胞环境中该微纳操控系统的有效性。包含视觉识别与反馈的控制系统不仅能够对多个细胞进行识别,也便于用户选定其中的特定个体进行控制。

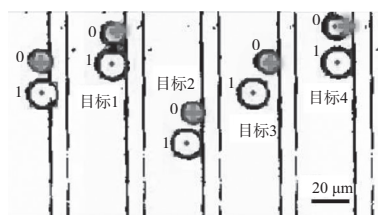


图9 Hela细胞的受控定向运输

## 4 结语

本研究提出了人机交互式高精度微纳物体声操控技术,操控单个或少数几个微纳物体精准定向运输。设计了针对此平台的微纳物体视觉识别与运动控制系统,实现了便捷、精确的微纳物体定向运输。微纳物体声操控平台采用两种不同工作模式操控微纳物体运动。第一种工作模式利用基板谐振时的非均匀变形在其表面滴加的液体中构建非均匀声场,驱动微纳物体朝向声压节点方向运动,并贴附在临近的直线型微操纵器一侧。第二种工作模式利用直线型微操纵器随基板的椭圆轨迹振动,在其两侧产生局部增强的声流场,驱动贴附在直线型微操纵器上的微纳物体沿微操纵器轮廓定向运动,并通过调整激励信号的频率使声流场反向以驱动微纳物体反向运动。基于上述原理,本研究设计了微纳物体的视觉反馈与运动控制系统,利用计算机实时捕获微纳物体运动的图像,经过图像

处理识别物体并提取微纳物体中心点坐标。由用户在图像上选择直线型微操纵器沿线任一点作为运输目标位置,即可由系统操控微纳物体的精确运输,定位精度可达 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 。该平台不仅能够操控聚苯乙烯微球运动,也能够定向运输活细胞。当单个直线型微操纵器同时操控多个微纳物体运动时,由于声流场驱动的特性,多个物体总是同时运动或停止,用户能够在人机交互系统中自由选择特定个体将其运输到目标位置。

## 参考文献:

- [1] 李莹辉,孙野青,郑慧琼,等. 中国空间生命科学40年回顾与展望[J]. 空间科学学报,2021,41(1):46-67.
- [2] 商澎,呼延霆,杨周岐,等. 中国空间生命科学的关键科学问题和发展方向[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(8):796-808.
- [3] 商澎,呼延霆,杨周岐,等. 中国空间站生命科学研究展望[J]. 载人航天,2015,21(1):1-5.
- [4] 袁俊霞,印红,马玲玲,等. 空间微生物实验技术研究进展[J]. 空间科学学报,2021,41(2):286-292.
- [5] 张涛,郑伟波,童广辉,等. 空间生命科学仪器与实验技术[J]. 生命科学仪器,2018,16(3):3-8,22.
- [6] 李晓琼,杨春华,刘心语,等. 空间生命科学载荷技术发展与未来趋势[J]. 生命科学仪器,2019,17(3):3-20.
- [7] XU D D, HU J, PAN X, et al. Enzyme-powered liquid metal nanobots endowed with multiple biomedical functions[J]. ACS Nano, 2021, 15(7):11543-11554.
- [8] LI J X, DE ÁVILA B E F, GAO W, et al. Micro/nanorobots for biomedicine: delivery, surgery, sensing, and detoxification [J]. Science Robotics, 2017, 2(4): eaam6431.
- [9] MCNEILL J M, NAMA N, BRAXTON J M, et al. Wafer-scale fabrication of micro- to nanoscale bubble swimmers and their fast autonomous propulsion by ultrasound [J]. ACS Nano, 2020, 14(6):7520-7528.
- [10] XIE Y L, BACHMAN H, HUANG T J. Acoustofluidic methods in cell analysis [J]. Trends in Analytical Chemistry: TRAC, 2019, 117:280-290.
- [11] CONNACHER W, ZHANG N Q, HUANG A, et al. Micro/nano acoustofluidics: materials, phenomena, design, devices, and applications [J]. Lab on a Chip, 2018, 18(14):1952-1996.
- [12] FRIEND J, YEO L Y. Microscale acoustofluidics: microfluidics driven via acoustics and ultrasonics [J]. Reviews of Modern Physics, 2011, 83(2):647-704.
- [13] MULLER P B, BARNKOB R, JENSEN M J H, et al. A numerical study of microparticle acoustophoresis driven by acoustic radiation forces and streaming-induced drag forces [J]. Lab on a Chip, 2012, 12(22):4617-4627.
- [14] MULLER P B, ROSSI M, MARÍN A G, et al. Ultrasound-induced acoustophoretic motion of microparticles in three dimensions [J]. Physical Review. E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2013, 88(2):023006.
- [15] LEY M W H, BRUUS H. Continuum modeling of hydrodynamic particle-particle interactions in microfluidic high-concentration suspensions [J]. Lab on a Chip, 2016, 16(7):1178-1188.
- [16] HAN C H, JANG J. Integrated microfluidic platform with electrohydrodynamic focusing and a carbon-nanotube-based field-effect transistor immunosensor for continuous, selective, and label-free quantification of bacteria [J]. Lab on a Chip, 2021, 21(1):184-195.
- [17] KHEZRI B, SHENG MOO J G, SONG P, et al. Detecting the complex motion of self-propelled micromotors in microchannels by electrochemistry [J]. RSC Advances, 2016, 102(6):99977-99982.
- [18] LU X L, ZHAO K D, LIU W J, et al. A human microrobot interface based on acoustic manipulation [J]. ACS Nano, 2019, 13(10):11443-11452.

收稿日期:2022-12-07