

# 控制与决策

Control and Decision

## 基于视觉反馈的毫米级颗粒超声操控研究

吴昊阳, 闵新杰, 吴森

引用本文:

吴昊阳, 闵新杰, 吴森. 基于视觉反馈的毫米级颗粒超声操控研究[J]. *控制与决策*, 2023, 38(10): 2905–2911.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0512>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于策略权重的模糊多属性决策方法

Strategic weight manipulation in fuzzy multiple attribute decision making

控制与决策. 2021, 36(5): 1259–1267 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0542>

#### 带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

#### 基于Frenet坐标系的自动驾驶轨迹规划与优化算法

Trajectory planning and optimization algorithm for automated driving based on Frenet coordinate system

控制与决策. 2021, 36(4): 815–824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0748>

#### 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller

控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

#### 考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

# 基于视觉反馈的毫米级颗粒超声操控研究

吴昊阳<sup>†</sup>, 闵新杰, 吴森

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 声波具有良好的穿透性与较广的波长范围, 能够突破传统光镊、磁镊、微流控技术的操控颗粒尺寸限制, 因此非接触超声操控技术成为研究热点之一. 为克服传统驻波声镊的应用局限性, 深入探讨基于单面全息声镊系统实现的毫米级颗粒轨迹操控技术. 根据 Twin 声阱模型提出求解相应相位矩阵的快速实现算法, 以保证后续轨迹操控的实时性; 根据被控颗粒受力模型及自平衡时长设定轨迹操控策略, 以保证操控的稳定性; 为确保声镊系统驱动信号的同步性, 基于处理器 FPGA 设计相应复用电路; 为提升实际轨迹的准确性, 基于 FPGA 实时视觉测量功能实现闭环反馈. 实验通过所设计的声镊系统成功完成直径 3 mm 聚苯乙烯小球的正方形轨迹移动操控. 结果表明, 所提出系统声场生成和视觉检测计算效率高, 轨迹操控快速同步, 实时可靠, 轨迹形状与目标轨迹一致性好.

**关键词:** 声全息; 声镊; 超声悬浮; 超声操控; Twin 型声阱

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0512

引用格式: 吴昊阳, 闵新杰, 吴森. 基于视觉反馈的毫米级颗粒超声操控研究[J]. 控制与决策, 2023, 38(10): 2905-2911.

## Ultrasonic control of millimeter particles based on visual feedback

WU Hao-yang<sup>†</sup>, MIN Xin-jie, WU Sen

(School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Ultrasound has good penetration and a wide wavelength range, which can break through the size limitation of controlled particles by traditional optical tweezers, magnetic tweezers and microfluidic technology. Therefore, ultrasonic control technology has developed. In order to overcome defects of traditional standing wave acoustic tweezers, we discuss the millimeter particle trajectory control method based on single-axis holographic acoustic tweezers. On account of the Twin trap, a fast implementation algorithm for calculating the corresponding phase matrix is proposed to ensure the real-time performance of trajectory control. Meanwhile, according to the force model and self-balancing time of particles, the trajectory control strategy is set for stability. For ensuring the synchronization of drive signals, corresponding multiplexing circuit is designed based on the processor FPGA. For improving the accuracy of actual trajectory, closed-loop feedback is realized based on the real-time vision measurement function. In the experiment, the square track movement of a PP ball with a diameter of 3 mm is successfully finished. The results show that the proposed system has high computational efficiency in the generation of acoustic field, visual measurement, fast synchronization, real-time reliability of trajectory control, and good consistency between actual and target trajectory.

**Keywords:** acoustical holography; acoustic tweezers; ultrasonic suspension; ultrasonic control; Twin trap

## 0 引言

非接触操控通过在被控物体周围介质中生成指定的场, 利用场中作用力操控目标颗粒. 对比传统接触式操控模式, 非接触操控具有与样品无机械接触的突出优势, 能够更好地适应日益复杂的操控环境.

目前, 针对小尺寸颗粒的主流非接触操控技术包括光镊、磁镊、微流控和声镊. 光镊利用激光光束被

折射产生的梯度力夹持微米级别粒子并精确控制其移动与旋转, 这一技术促进了生命科学、量子计算<sup>[1-3]</sup>等学科的发展. 然而高光强的光束会对被控颗粒造成损伤, 且受限于光波波长, 光镊仅适用于操控微米级小颗粒. 基于磁场梯度力实现的磁镊系统能够进行无损操控, 可以同时操控多个分子目标<sup>[4]</sup>, 能够满足大部分生物分子操控实验的需求, 但磁镊要求被控

收稿日期: 2022-03-30; 录用日期: 2022-06-09.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973233).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: 1433304018@qq.com.

\*本文附带电子附录文件, 可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

颗粒可被极化,且精度受到磁球布朗涨落的限制.微流控技术利用高速微流体的冲击实现受控颗粒在指定位置处的富集<sup>[5]</sup>,但存在操控方向较单一、操控精度不高的缺陷.考虑到声波具有良好的穿透性与较大的波长范围,声镊在大尺寸、不便进行预处理的样品操控中被广泛应用.

声波在传播过程中遇到障碍物时,会与物体发生动量与能量的交换,这种交换在宏观上表现为声波对物体的力的作用,即声辐射力.声镊系统在受控颗粒周围介质的指定区域中构建特定形状的声场后,由于区域中存在声压梯度与介质速度梯度,可实现受控颗粒的定点悬浮及更为复杂的轨迹操控.

传统声镊系统通过驻波实现,由于驻波声场波节处具有较大声压梯度,可使密度较低的样品被捕获于特定位置,因此驻波系统在克服重力实现悬浮方面具有很大优势.由于驻波声镊需要配置一组对立的相对声源面,其生成声场形状较单一,通常采用改变声源频率及幅度<sup>[6]</sup>、调节相对声源面之间距离<sup>[7]</sup>、改变声源相位<sup>[8]</sup>等复杂的波节位置调节方式.因此,驻波声镊系统难以实现快速准确地适应性配置,且无法应用于不能设置反射面的情形.

随着傅里叶声学的发展,仅通过求算声源表面声压分布即可推导得到三维空间中的声场情况<sup>[9]</sup>,驱动单面超声换能器阵列以建造指定形状的全息声场并对其进行定量分析具备可能性.近年来,基于上述原理构建的单面全息声镊方兴未艾,它拥有声镊系统的优势,同时仅需在单面设置声源阵列,无需设置相对声源面,不受应用场景的限制,有利于发展物理学、结晶学、医学等领域中的非接触操控技术<sup>[10-11]</sup>.

Iwamoto等<sup>[12]</sup>首次将多个换能器组成单面阵列并对其产生的声辐射力进行计算及测量.Marzo等<sup>[13]</sup>在研究不同形状的底座对聚焦声场的影响中发现了换能器阵列相位与声场相位的对应关系,并通过BFGS算法生成了特定形状的声场,提出全息声镊理论.Morales等<sup>[14]</sup>提出全息声场中的GS算法,姜兆田<sup>[15]</sup>提出相应遗传算法,有效提升了大数量换能器阵列的相位矩阵计算速度.Lu等<sup>[16]</sup>设计了一种控制亚波长的小孔打开和关闭的机械结构,以单个声源完成复杂阵列调相的功能.

目前,所设计的单面全息声镊系统可以实现在自由空间的指定位置处较稳定地悬浮颗粒的目标,然而受到迭代算法计算效率的限制,对受控颗粒进行轨迹操控的相关研究不多.因此,针对如何保证毫米级受控颗粒轨迹操控的实时性、稳定性、驱动信号的同步

性以及实际轨迹的准确性等问题,本文将设计可用于毫米级颗粒操控的系统,并对被控颗粒的声阱模型、轨迹控制策略、视觉反馈方法等方面进行深入探讨.

## 1 声阱模型与颗粒轨迹控制策略

### 1.1 声阱模型

通过设定换能器阵列相位矩阵能够生成指定形状的全息声场.以阵列表面中心为原点建立笛卡尔坐标系,根据Gor'kov<sup>[17]</sup>对受到远场声场辐射的球形颗粒的运动学分析,采用Gor'kov势能 $U$ 的梯度描述样品处于某一位置时所受声辐射力 $F$ ,并使用复声压 $\mathbf{p}$ 及其空间导数 $(p_x, p_y, p_z)$ 表示该势能,有

$$\begin{aligned} F &= -\nabla U, \\ U &= K_1(|\mathbf{p}|^2) - K_2(|p_x|^2 + |p_y|^2 + |p_z|^2), \\ K_1 &= \frac{1}{4}V\left(\frac{1}{c_0^2\rho_0} - \frac{1}{c_p^2\rho_p}\right), \\ K_2 &= \frac{3}{4}V\left(\frac{\rho_0 - \rho_p}{\omega^2\rho_0(\rho_0 + 2\rho_p)}\right). \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $V$ 为悬浮颗粒体积, $\rho_0$ 为声场所在空间介质密度, $\rho_p$ 为悬浮颗粒密度, $c_0$ 为声场介质中声速, $c_p$ 为颗粒介质中声速, $\omega$ 为声波频率.

阵列中的第 $j$ 个换能器在特定位置的复声压 $\mathbf{p}_j$ 可由固定的指向函数 $M_j$ 表示,即

$$\mathbf{p}_j = e^{i\varphi_j} M_j, \quad M_j = P_0 J_1(kr \sin \theta_j) \frac{1}{d_j} e^{ikd_j}. \quad (2)$$

其中: $\varphi$ 为阵元初始相位, $P_0$ 为换能器固有系数决定的常数项, $J_1$ 为1阶贝塞尔函数, $r$ 为换能器半径, $\theta_j$ 为悬浮位置与第 $j$ 个换能器中轴线的夹角, $d_j$ 为悬浮位置与第 $j$ 个换能器中心的距离, $k$ 为声波波数.

将式(2)代入(1)并结合阵列第一定理,可证实阵列所生成的复合声场复声压分布情况仅与各换能器初始相位 $\varphi_j$ 有关.同时,根据力场中空间散度的定义,设定相位矩阵可设定所生成的声场形状 $\nabla^2 U$ ,有

$$\mathbf{p} = f_1(\varphi_1, \dots, \varphi_n), \quad \nabla^2 U = f_2(\varphi_1, \dots, \varphi_n). \quad (3)$$

赋予各方向的空间散度分量不同权重系数 $\omega_i$ ,  $i \in \{1, 2, 3\}$ ,可得到如下关于散度的表达式,并以此生成不同形状的声阱:

$$f(\nabla^2 U) = \omega_1 U_{xx} + \omega_2 U_{yy} + \omega_3 U_{zz}. \quad (4)$$

为了尽可能缩短样品自平衡时间,同时扩大样品的选取范围,声镊声场形状应设置为相同强度的驱动条件下,在 $Z$ 轴方向与运动方向能产生较大声辐射力的声阱,因此在声场中构建如图1所示的Twin声阱.

Twin阱为式(4)中 $X$ 轴或 $Y$ 轴单个方向权重极大时生成的声阱,运动方向上的声辐射力主要依

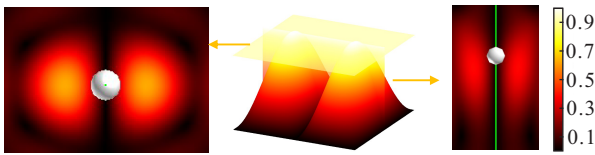


图1 操控方向为X轴的Twin阱

靠声压梯度提供,其余方向的声辐射力由速度梯度提供.图1展示了Twin阱的声压分布情况,中心处Gor'kov势能最低,两侧存在两个间隔略大于受控颗粒直径的声压峰值区域,声辐射力收敛于中心位置.

### 1.2 Twin阱的快速实现算法

为了提升Twin阱对应相位矩阵的计算速度以满足轨迹操控的实时性要求,根据与运动方向相关的特征声阱矩阵提出改进的快速实现算法,并对传统迭代算法对该算法指定范围内的有效性进行验证.目前,根据声压分布情况求算对应相位矩阵的主流方法仍为各种迭代算法,如GS算法<sup>[13-14]</sup>及遗传算法<sup>[15]</sup>.由于迭代计算是一种串行过程,且元素较多的相位矩阵导致计算量较大,至少需要数秒时间完成,不利于实现实时的轨迹操控.为提升相位矩阵的计算速度,将Twin阱对应相位矩阵构成的“声透镜”分解为悬浮位置与声阱形状两个独立“声透镜”.图2展示了运动方向为X轴时快速实现算法求解Twin阱对应相位矩阵的过程.

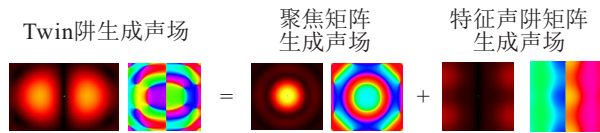


图2 各声透镜生成声场声压及相位分布情况

各声源发出的声束经聚焦矩阵所构成的“聚焦声透镜”完成在指定位置处聚焦的目标,经特征声阱矩阵构成的“形状声透镜”在该位置实现Twin阱形状,如图3所示.

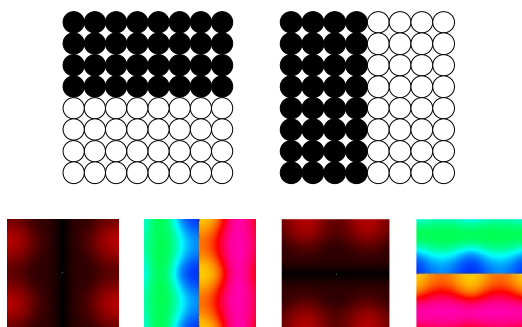


图3 不同运动方向对应特征声阱矩阵及声场仿真

当声阱中心在X轴上移动时,设定特征声阱矩阵为左右对称相差为 $\pi$ 的相位矩阵;当声阱中心在Y轴上移动时,设定特征声阱矩阵为上下对称相差为 $\pi$ 的相位矩阵.由仿真特征矩阵在空间中形成的声场

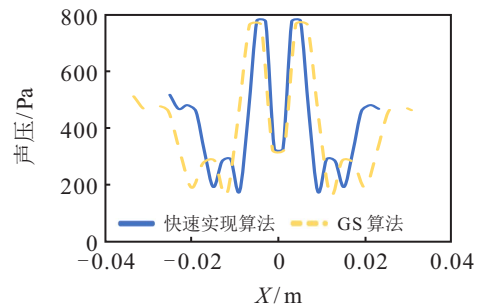
可见,当悬浮位置处于中轴线处时,换能器阵列叠加这一矩阵后产生的声束,通过矩阵构成的“声透镜”能够在中轴线处很好地对称反相,靠近中轴线的声压被中和,使聚焦声束关于中轴线分为两半,两侧分别聚焦以实现Twin阱形状.

聚焦位置矩阵可根据各阵元的声程差得到:选取阵列中换能器的中心位置与设定位置距离最远的一点 $x_{max}$ ,设其相位 $\varphi_0$ 为0;根据各换能器与最远位置的声程差,其余换能器需要相应叠加的相位 $\varphi_i$ 为

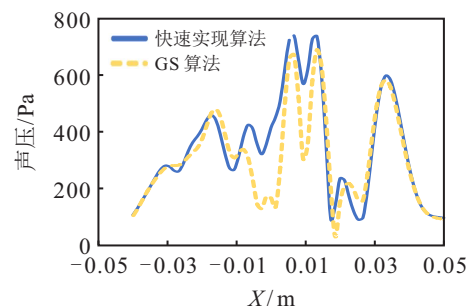
$$\varphi_i = 2\pi[1 - \text{mod}(x_i, \lambda)]. \quad (5)$$

其中: $\Delta x_i$ 为悬浮位置距该阵元距离与 $x_{max}$ 的差值, $\lambda$ 为换能器产生的声束波长, $\text{mod}$ 为取余函数.

综上所述,快速实现算法计算过程仅涉及简单的加法与除法,有利于实时轨迹操控.图4展示了声阱中心设定在典型位置时,通过仿真计算得到的X轴声压分布情况,可以得出如下结论:在一定操控范围内,快速实现算法可以替代迭代计算求解相位矩阵.



(a) (0 cm, 0 cm, 2 cm)



(b) (1 cm, 0 cm, 2 cm)

图4 不同设定位置下生成声场声压X轴分布情况

### 1.3 受控颗粒的轨迹操控策略

综合上述算法,当声阱位置切换后,本文对其中颗粒的受力模型及相应自平衡轨迹进行研究,并提出受控颗粒的轨迹操控策略.

在Twin阱中心处实现静止悬浮后,小幅度调整声阱设定位置,则颗粒所处位置不再与新设定的声阱中心重合,变化的Gor'kov势能会产生相应声辐射力,诱导悬浮颗粒向该位置移动.如图5(a)所示,此时颗粒受到方向由原声阱中心指向新声阱中心的声辐射力,当被加速颗粒由于惯性运动越过新的声阱中心

时,会受到另一侧的声辐射力. 考虑到空气阻尼的存在,最终受控颗粒将会再次处于声阱中心且回归静止状态,完成自平衡过程.

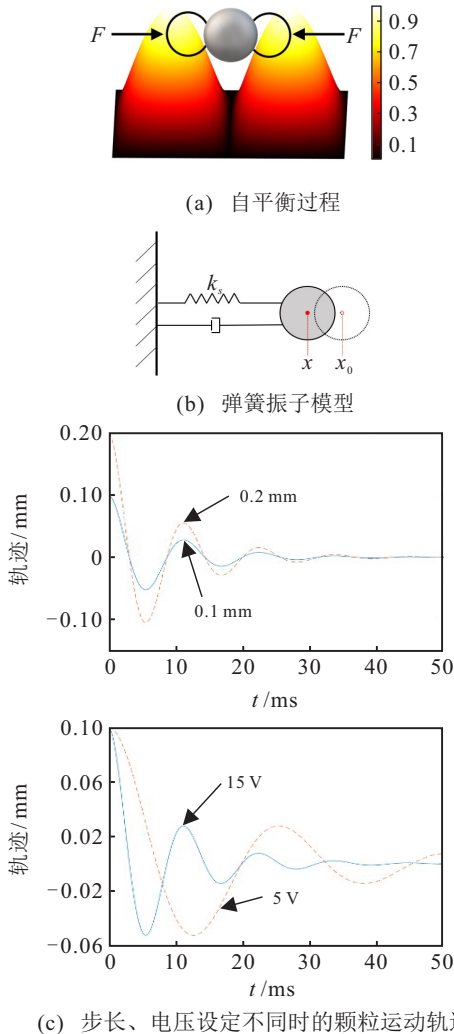


图5 颗粒偏离声阱中心后的受力模型及仿真结果

这种运动模式可以被简化为单自由度的欠阻尼自由振动模型,即图5(b)中带有空气阻尼的弹簧振子模型,弹簧回复力为声辐射力,在极小范围内,声阱周围位置处的声辐射力与其偏移声阱中心的距离成正比,因此弹性系数 $k_s$ 为固定常数,可由声辐射力在运动方向所处轴上的微分得到. 运动方向上自平衡轨迹 $x(t)$ 可表示为

$$x(t) = \frac{1}{\omega_d} \sqrt{(\zeta\omega_n x_0)^2 + (\omega_d x_0)^2} e^{-\zeta\omega_n t} \times \sin \left[ \omega_d t + \tan^{-1} \left( \frac{\omega_d}{\omega_n} \right) \right]. \quad (6)$$

其中: $\omega_n$ 为弹簧振子的理想自振频率, $\zeta$ 为空气阻尼比, $\omega_d$ 为存在阻尼时的自振频率, $x_0$ 为受控颗粒与新声阱中心的偏移量.

图5对不同步长与驱动电压的情况进行仿真后得到以下结论:指定步长越小,即前后声阱位置差距越小,受控颗粒偏离原定声阱中心距离越小,自平衡

过程中轨迹振幅越小;驱动电压幅值越高,受控颗粒自平衡过程中轨迹频率越大,能够以越短的自平衡时间恢复近似静止状态. 因此,仅需满足声阱位置切换时间大于颗粒自平衡时间,即可保证颗粒均于静止状态开始运动,保证操控稳定性.

根据上述模型,可通过连续切换声阱位置这一策略,控制悬浮颗粒按指定轨迹移动. 将目标轨迹依照指定步长 $\alpha$ 进行离散,每次由下式根据原声阱位置 $O_i(x_i, y_i, z_i)$ 设定新声阱位置 $O_{i+1}$ ,直至到达该方向轨迹终点:

$$O_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1}) = O_i + \alpha. \quad (7)$$

## 2 实时操控声镊系统设计

由于声场所在的自由空间中存在不可控的干扰因素,如气流、温度等,受控颗粒实际到达位置与设定位置并不完全一致,仅通过上述开环操控策略不足以在实际空间中实现目标轨迹. 针对这一问题,本文引入视觉反馈方法对轨迹进行闭环控制. 图6展示了具有复用电路设计与视觉反馈方案的声镊系统流程. 用户在上位机中设定轨迹终点后,上位机按照设定步长对轨迹进行离散,并向FPGA发送相应相位矩阵, FPGA对应生成驱动电路所需信号,最终实现样品的悬浮与轨迹操控,到达终点后, FPGA根据所收到的图像数据检测样品实际位置并传回上位机进行反馈.

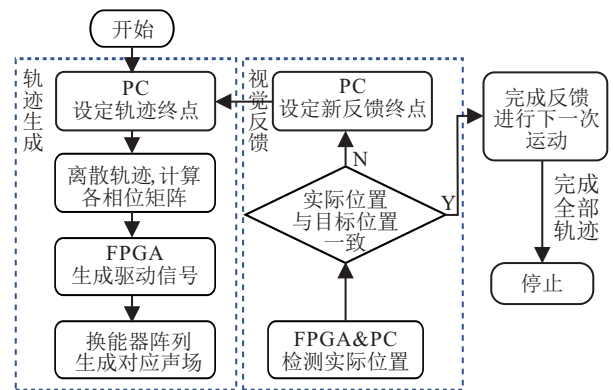


图6 系统流程

### 2.1 保证驱动信号同步性的电路复用设计

本文基于处理器FPGA与8路移位寄存器设计复用的驱动电路方案. 目前,研究者们设计的单面全息声镊系统主要使用FPGA各管脚及功放直接驱动阵列<sup>[13-15]</sup>,各阵元布线长度差异的存在使得驱动信号的同步性无法被保证,从而对各相干声束相位关系引入无法忽略的延迟误差. 如图7所示的方案可以解决这一问题. 所设计声镊系统中,同列中8个阵元被分为一组,移位寄存器将FPGA输出的串行数据转化为该组阵元所要求的同时输出的并行数据,以实现准确控制的目标.

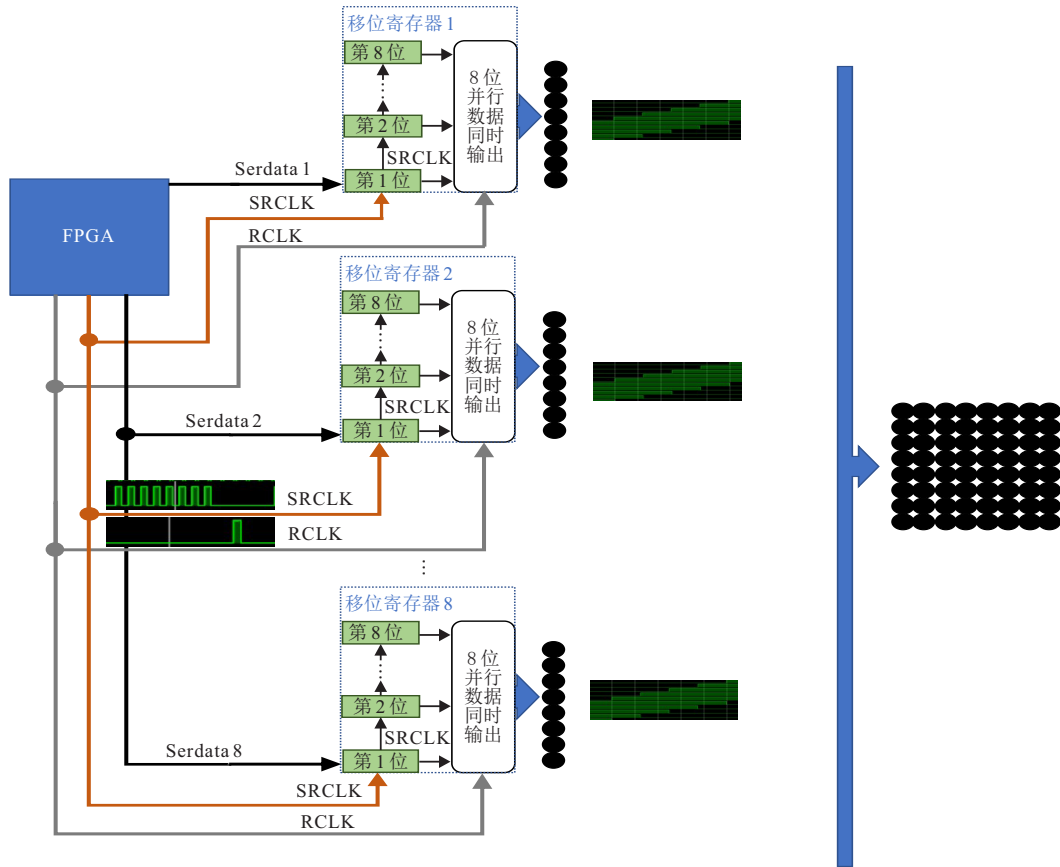


图7 复用电路设计

### 2.2 基于FPGA视觉测量的闭环操控方法

为实现对受控颗粒的空间位置与运动状态的准确测量,加入基于FPGA的视觉测量功能以保证目标检测速度,同时基于这一功能提出反馈方案.

如图8所示,两个摄像头被安置于平面中相互垂直的两个位移台上,分别记录X轴与Y轴的运动情况.摄像头每拍摄完一帧后对颗粒的形心像素坐标位置进行一次平均计算,并将其上传至上位机,上位机结合初始位置像素坐标 $P_0$ (通常为阵列中心)与各方向上的比例系数 $h$ 即可求解实际空间任意一点的坐标.当上位机中设定声阱位置到达轨迹终点,接收到的像素坐标连续数帧几乎保持一致时,判定受控颗粒自平衡完成且处于稳定受控状态,可进行下一段轨迹操控.

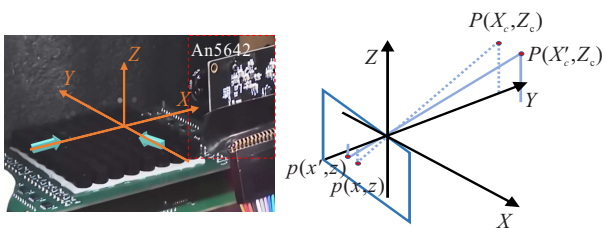


图8 摄像头的空间位置与坐标转换方法(X轴)

图9展示了反馈算法的计算过程.连续调整声阱中心到达设定的轨迹终点A后,测量受控颗粒的实

际空间位置 $A'$ ,将之与理想位置进行对比,计算偏差 $l_0$ 并将声阱位置终点调整为 $A'A$ 方向上距离A为 $l_0$ 的B点,等待颗粒完成该轨迹后再次测量其实际位置 $B'$ .当 $B'$ 仍处于线段 $A'A$ 上时,更新偏差 $l_1$ 并将新的轨迹终点设定 $AB$ 方向上距离B为 $l_1$ 的C;当 $B'$ 越过A时,将新的轨迹终点设定为线段 $AB$ 中点,即设定终点回退 $l_0/2$ ,直至实际位置处于线段 $A'A$ 上时才再次更新偏差.重复这一过程,直至各反馈终点的实际位置与目标位置距离在像素空间中小于一个像素或小于设定步长时,判定反馈完成.

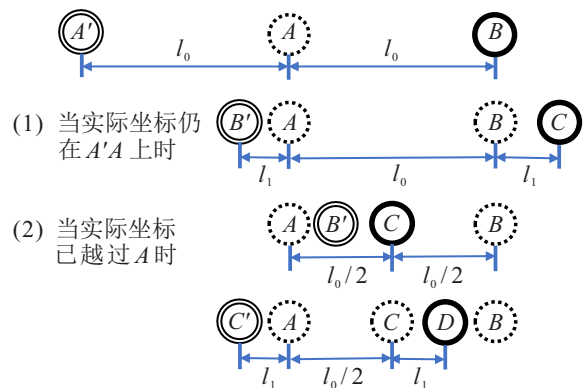


图9 误差补偿方法

当颗粒到达轨迹终点后,上位机PC根据FPGA传回的形心像素坐标求实际空间坐标,并结合上述

算法确定下一次反馈过程的轨迹终点.

### 3 实验结果和分析

#### 3.1 实验环境

换能器阵元选择谐振频率为40 kHz直径为1 cm的MA40S4S型号圆型活塞换能器,其驱动电压要求不高于20 V;FPGA选择ZYNQ-7020,移位寄存器型号为74HC595,功率放大器型号为TC4420COA,直流电源提供18 V的参考电压.受控颗粒为直径3 mm的聚苯乙烯小球(密度为0.91 g/cm<sup>3</sup>).上位机在Marzo提供的开源软件Acoustic Field的基础上,增添了通讯协议、不同运动方向的声阱特征矩阵切换、坐标系转换等模块,如图10和图11所示.

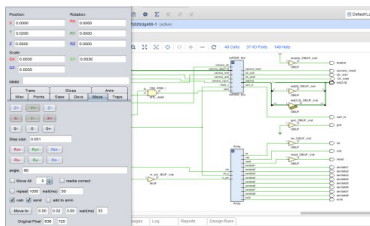


图10 上位机GUI及FPGA程序

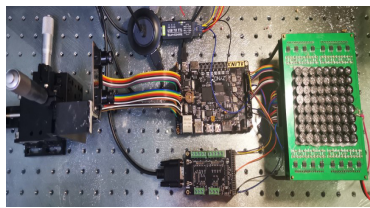


图11 硬件系统构成

#### 3.2 相机标定

由于受控颗粒与自由空间存在较大的色彩差异,测量系统采用FPGA控制的OV5640型号摄像头,以30 fps的1080p视频流模式采集RGB565色彩信号,基于阈值实现的比例系数 $h$ 标定流程如下.

step 1: 使用摄像头拍摄周围环境,确定环境像素RGB总和值最大值.

step 2: 控制颗粒悬浮在初始位置,以最大值为阈值,在图像采集过程中进行滤波,同时进行连通性测试:若连续4个像素RGB总和值大于最大值,则保留最后一个像素点像素位置.

step 3: 完成图像拍摄,对本帧像素位置进行平均得到颗粒形心的初始位置像素坐标 $P_0(x_c, y_c)$ .

step 4: 以 $X$ 轴为例,调节垂直 $X$ 轴方向摄像头所在的位移平台,使其移动指定长度 $X'_c - X_c$ ,得到新的形心像素坐标 $x'_c$ .由下式求算该方向上的空间坐标与像素坐标的比例系数 $h$ :

$$h = \frac{X'_c - X_c}{x'_c - x_c}. \quad (8)$$

实验中测定的比例系数 $h_x$ 、 $h_y$ 分别为0.12、0.11,单位

为mm/pixel.

#### 3.3 轨迹有效范围及实验结果

基于上述对单面全息声镊操控颗粒进行设定轨迹运动的分析,进行实际操控实验以验证操控及反馈过程的实时性和准确性.由于颗粒在 $Z$ 轴方向的移动会导致声束能量迅速变化,容易造成受控颗粒失稳甚至脱离声阱飞出,本文仅研究颗粒在固定高度的平面 $x-y$ 内移动的情况.

设定 $Z$ 轴高度为20 mm时,测定声镊系统开环有效操控范围为 $X$ 轴: -22 mm ~ 20 mm,  $Y$ 轴: -19 mm ~ 21 mm.将目标轨迹设定为对角端点分别为(-10 mm, -10 mm)、(10 mm, 10 mm)的正方形,步长设定为0.01 mm,切换频率为每秒30次以适配摄像头帧率,每进行一次指定步长移动即进行一帧图像拍摄.根据仿真结果,设定驱动电压为18 V,步长为0.1 mm,自平衡时间应 $< 30$  ms.由于快速实现算法是一种非迭代的计算方法,能够在自平衡时间内完成,保证轨迹操控的实时性.开环控制轨迹及相应耗时如图12所示.

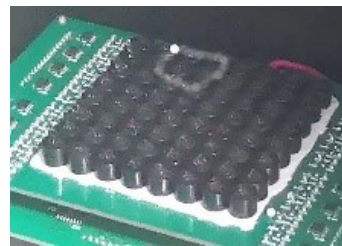


图12 开环运动轨迹(轨迹完成时间为28 s)

闭环控制中,将长距离运动轨迹拆解为多段短距离运动轨迹,并在各轨迹终点位置分别进行视觉反馈,有利于减少累计误差,使实际操控轨迹更符合设定轨迹.实验中,将视觉反馈距离设定在10 mm.图13展示了上述边长为20 mm的正方形轨迹被分解为8段长度为10 mm轨迹的情况.

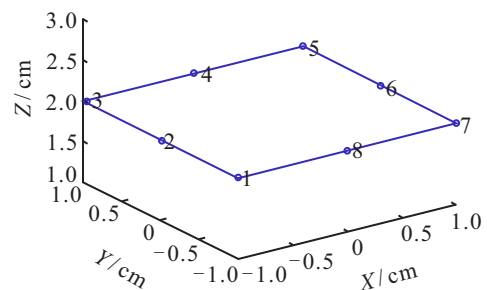


图13 经分段处理的正方形轨迹

图14展示了设定轨迹图13对应的实际轨迹,闭环实验实现长度为8 cm的正方形轨迹仅耗时57 s,较传统迭代方法实现开环控制移动1 mm所需的42 s<sup>[15]</sup>有了较大程度的提升.

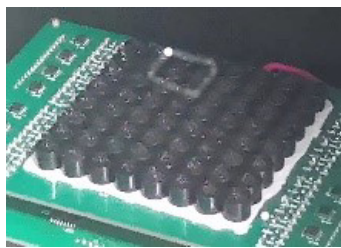


图14 闭环运动轨迹(轨迹完成时间为57s)

反馈过程时长主要取决于受控颗粒的自平衡时间及反馈算法的重复次数,实验中,终点位置处的视觉反馈通常在5s内完成。

实验发现,越靠近阵列中心小球悬浮越稳定,超出有效范围时,将会出现受控颗粒失稳或脱离声阱的情况。增大换能器阵列驱动电压或适当增加阵元个数,可以略微减轻受控颗粒在边缘位置的失稳情况。同时,提升测量精度有利于进一步提升轨迹操控的准确性。

#### 4 结论

本文对采用单面全息声镊系统实现毫米级颗粒的轨迹操控做了相应的理论分析及策略设计,所实现的声镊系统突破了常用非接触操控技术的样品尺寸限制。所提出的Twin阱快速实现算法改进了传统迭代算法的计算效率,结合轨迹操控策略实现了实时、稳定的操控。所设计的硬件系统基于处理器FPGA创新地设计了复用电路,弥补电路布线引入的延迟误差,从而能够保证驱动信号的同步性。同时,首次采用双摄像头实现了视觉闭环反馈,提升了实际轨迹的准确性。

为增加操控有效范围,进一步提升颗粒轨迹的Z轴稳定性,未来工作中可考虑对阵列相关参数进行优化改进。

#### 参考文献(References)

- [1] Bouloumis T D, Nic Chormaic S. From far-field to near-field micro- and nanoparticle optical trapping[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(4): 1375.
- [2] Niffenegger R J, Stuart J, Sorace-Agaskar C, et al. Integrated multi-wavelength control of an ion qubit[J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 538-542.
- [3] Dholakia K, Čižmár T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- [4] 马建兵, 翟永亮, 农大官, 等. 基于片层光照明新型单分子横向磁镊[J]. *物理学报*, 2018, 67(14): 247-254. (Ma J B, Zhai Y L, Nong D G, et al. Single molecule transverse magnetic tweezers based on light sheet illumination[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(14): 247-254.)
- [5] Wang Y, Zhu J C, Chen P, et al. A microfluidic

platform with pneumatically switchable single-cell traps for selective intracellular signals probing[J]. *Talanta*, 2019, 192: 431-438.

- [6] Chen Y C, Ding X Y, Steven Lin S C, et al. Tunable nanowire patterning using standing surface acoustic waves[J]. *ACS Nano*, 2013, 7(4): 3306-3314.
- [7] Bjelobrk N, Foresti D, Dorrestijn M, et al. Contactless transport of acoustically levitated particles[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(16): 161904.
- [8] Koyama D, Nakamura K. Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(5): 1152-1159.
- [9] Williams E, Mann J A. Fourier acoustics: Sound radiation and nearfield acoustical holography[M]. San Diego: Academic Press, 1999: 31-112.
- [10] Baer S, Andrade M A B, Esen C, et al. Analysis of the particle stability in a new designed ultrasonic levitation device[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(10): 105111.
- [11] Ozcelik A, Rufo J, Guo F, et al. Acoustic tweezers for the life sciences[J]. *Nature Methods*, 2018, 15(12): 1021-1028.
- [12] Iwamoto T, Tazono M, Shinoda H. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound[M]. Berlin: Springer, 2008: 504-513.
- [13] Marzo A, Barnes A, Drinkwater B W. TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(8): 085105.
- [14] Morales R, Ezcurdia I, Irisarri J, et al. Generating airborne ultrasonic amplitude patterns using an open hardware phased array[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): 2981.
- [15] 姜兆田. 基于阵列超声微颗粒操控的相位优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (Jiang Z T. Research on phase optimization of array ultrasonic microparticle manipulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)
- [16] Lu X, Twiefel J, Ma Z, et al. Dynamic acoustic levitator based on subwavelength aperture control[J]. *Advanced Science*: Weinheim, Baden-Wurttemberg, Germany, 2021, 8(15): e2100888.
- [17] Gor'kov L P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid[J]. *Physics Dokl*, 1962, 6: 773-775.

#### 作者简介

吴昊阳(1996—), 女, 硕士生, 从事声镊、虚拟力触觉等研究, E-mail: 1433304018@qq.com;

闵新杰(1997—), 男, 硕士生, 从事扫描探针显微技术、声镊等研究, E-mail: minxinjie@tju.edu.cn;

吴森(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 从事扫描探针显微技术等研究, E-mail: senwu@tju.edu.cn.