

Manipulação Acústica com Matriz Ultrassônica

Acoustic Manipulation with Ultrasonic Phased Array

Victor Henrique Salvi e Leandro José Cassol

Resumo—Ondas acústicas exercem forças em obstáculos em seu caminho, que podem ser controladas para direcionar as forças e manipular objetos. Neste artigo apresenta-se um dispositivo sem peças móveis capaz de manipular dinamicamente partículas sobre um plano utilizando apenas uma matriz de transdutores ultrassônicos e um refletor. Por meio do controle eletrônico de fase em cada elemento, aliado ao funcionamento não ressonante, é possível gerar lentes virtuais que focam as ondas mecânicas em uma posição arbitrária, formando uma onda estacionária localizada que fixa a partícula na localização escolhida. O projeto prioriza a utilização de componentes acessíveis e valida a configuração matriz-refletor. Evidencia-se o fenômeno físico que possibilita levitação, os princípios do controle de fase e considerações importantes na escolha dos componentes. As capacidades e limitações são avaliadas experimentalmente em relação à exatidão do posicionamento espacial, velocidade máxima de deslocamento e tamanho do espaço de trabalho.

Palavras-Chave—Acústica, levitação acústica, manipulação acústica, manipulação sem contato, matriz de transdutores, matriz faseada, ultrassom.

Abstract—Acoustic waves exert forces on obstacles in their path, which can be controlled to direct the forces and manipulate objects without contact. This article presents a device with no moving parts capable of dynamically manipulating particles on a plane using only an ultrasonic phased array and a reflector. Combining electronic phase control and non-resonant operation, it is possible to generate virtual lenses that focus the mechanical waves in an arbitrary position, creating a localized stationary wave that traps the particle in the chosen location. The project prioritizes the use of accessible components and validates the matrix-reflector configuration. The physical phenomenon that allows levitation, the principles of electronic phase control and important considerations in the choice of components are highlighted. Capabilities and limitations are evaluated experimentally in relation to the accuracy of spatial positioning, maximum travel speed and size of workspace.

Keywords—Acoustic levitation, acoustic manipulation, acoustics, contactless handling, phased array, transducer array, ultrasonic.

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia da Computação da Universidade La Salle Canoas como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia da Computação.

Victor Henrique Salvi é acadêmico de Engenharia de Computação na Universidade La Salle, Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail: victorsvi@gmail.com).

Leandro José Cassol é orientador, Mestre, docente do curso de Engenharia de Computação na Universidade La Salle, Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail: leandro.cassol@unilasalle.edu.br).

Este artigo possui material suplementar disponibilizado pelo autor, em https://drive.google.com/drive/folders/1flaj-krr_vxY0ZgB1_JMHjJBXfj4I3k4?usp=sharing.

I. INTRODUÇÃO

MANIPULAÇÃO com contato físico pode implicar em diversas dificuldades, como danos em transporte de objetos frágeis [1], contaminação de amostras [2], dificuldades com adesão superficial de micro objetos [3] e danos por compressão em micro montagem [4]. A Manipulação sem contato é uma alternativa para superar tais dificuldades. Em uma comparação entre oito métodos aplicados a alvos cuja dimensão é na ordem de milímetros ou menor [5], a manipulação acústica foi considerada mais promissora, porque exige poucos requisitos quanto ao tamanho e formato do objeto e características do material e do meio, além de ter baixa complexidade e apresentar boa capacidade de manipulação. Essa conclusão é ratificada em [2].

O método mais comum de manipulação acústica utiliza ondas estacionárias cujas diferenças de pressão atraem partículas menores que metade do comprimento de onda para os nós, podendo ter forma de operação ressonante ou não ressonante [6]. A primeira produz maiores forças, mas exige que o sistema seja ajustado para manter a frequência ressonante do transdutor, sendo sensível a temperatura, ao tamanho do objeto levitado e a distância entre emissor-refletor [7]. A segunda, por outro lado, se destaca por ser mais flexível quanto à fabricação e por oferecer mais liberdade na geração de campos dinâmicos [8]. Neste artigo, o modo não ressonante é destacado devido à sua flexibilidade. Existem também métodos que utilizam apenas a interferência entre várias ondas sem gerar ondas estacionárias [9], porém sua complexidade é maior.

Quanto à configuração dos elementos acústicos, utiliza-se fontes de radiação com foco fixo, ou seja, a localização da onda estacionária é constante, na qual a manipulação ocorre por meio da alteração da frequência de operação e por consequência o comprimento de onda e da localização dos nós [10] ou pela alteração da fase relativa entre múltiplas fontes sobrepostas [11]. Trabalhos mais recentes utilizam matriz de transdutores com controle de fase, cuja potência acústica é dividida entre pequenos elementos. Elas são mais flexíveis porque possibilitam manipulação pela alteração da localização da onda estacionária [12] e apresentam grande aplicabilidade [13], [14]. Devido à flexibilidade, maior tolerância na fabricação e melhor disponibilidade dos transdutores, optou-se pela configuração de matriz de transdutores.

Este trabalho propõe a manipulação acústica utilizando uma matriz de transdutores com controle individual de fase no modo não ressonante, possibilitando a geração de lentes virtuais que focam as ondas em uma posição arbitrária. Associada a um refletor paralelo, uma onda estacionária se forma no ponto focal pela superposição da onda emitida e refletida. Enquanto diversos estudos utilizam matrizes opostas com manipulação em três dimensões, decidiu-se validar o conjunto matriz-refletor para manipulação em duas dimensões pois: 1) A inserção e remoção das amostras são mais simples; 2) O refletor pode ser algo relevante para a aplicação, como uma placa de circuitos para posicionamento dos componentes; 3) O sistema com refletor apresenta grande estabilidade lateral.

Na seção Metodologia são descritos o princípio de funcionamento, considerações da escolha dos componentes, arquitetura do programa e procedimento de calibração. Na seção Resultados, a capacidade do dispositivo é avaliada experimentalmente é apresentada, seguida da comparação com trabalhos relacionados e limitações na seção Discussão. Por fim, a Conclusão encerra o artigo e apresenta trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

A. Força Gerada por uma Onda Estacionária

Considerando uma partícula esférica compressível em um fluido ideal cujo raio é muito menor que o comprimento de onda, Gor'Kov [15] descreveu uma solução analítica para a força agindo nessa esfera em um campo acústico, desconsiderando efeitos de reflexão onda-objeto. Essa solução determina que a força \vec{F} depende do potencial da força acústica U .

$$\vec{F} = -\nabla U \quad (1)$$

O potencial depende do raio da esfera R , da densidade do meio ρ e da velocidade do som no meio c e é definido por:

$$U = 2\pi R^3 \rho \left[\frac{p_{in}^2}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{|\vec{v}_{in}|^2}{2} f_2 \right] \quad (2)$$

Os termos p_{in} e \vec{v}_{in} são respectivamente a pressão e velocidade de primeira ordem geradas pela onda. Os fatores f_1 e f_2 estão relacionados com as propriedades da esfera e do meio, em que ρ_0 e c_0 representam a densidade e velocidade do som da esfera, respectivamente.

$$f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_0^2 \rho_0} \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{2(\rho_0 - \rho)}{2\rho_0 + \rho} \quad (4)$$

Considerando que o meio é o ar e que a densidade do objeto é muito maior que a densidade do meio, simplifica-se a equação executando a aproximação $f_1 = f_2 = 1$ [16], tornando o potencial proporcional a R^3 . Como a força gravitacional é proporcional à massa da esfera, pode-se concluir que a densidade do objeto é um fator limitante para levitação em um campo acústico com intensidade constante. Outra conclusão é que tanto o potencial

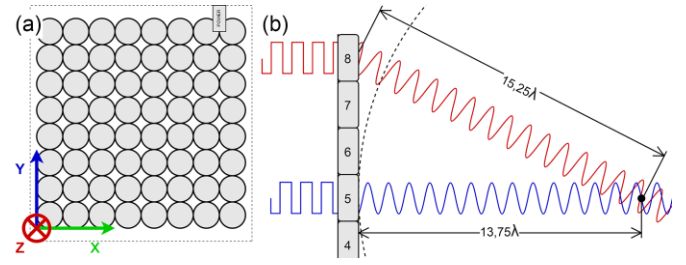


Fig. 1. (a) Definição do sistema de coordenadas com vista superior. A manipulação ocorre em valores positivos em z . (b) Ilustração do método de controle da fase. O oitavo transdutor tem uma distância equivalente a $15,25\lambda$, portanto a fase de seu sinal é atrasada em $3/4 \pi$ rad para chegar com fase zero no ponto focal. Da mesma forma, o quinto é atrasado em $1/4 \pi$ rad.

quanto a força gravitacional são proporcionais a R^3 , logo o raio não é um fator limitante para a levitação, mantendo a densidade constante e respeitando a relação entre raio e comprimento de onda [16].

B. Controle da Fase

A principal vantagem da matriz de transdutores é a capacidade de gerar interferência construtiva ou destrutiva em determinadas regiões do campo acústico, ajustando a fase de cada transdutor individualmente ou em grupos. Essa técnica é muito utilizada em equipamentos médicos e já foi aplicada para gerar elementos acústicos holográficos [9], *displays* tácteis [14] e alto-falantes direcionais [17]. O controle da fase, deste trabalho, tem o objetivo de gerar um ponto focal, sendo semelhante a [12].

O dispositivo possui um sistema de coordenadas cartesiano cuja origem é o canto frontal esquerdo, na superfície do transdutor, ilustrado na Fig. 1 (a). Cada elemento da matriz tem uma posição conhecida e constante \vec{p}_n entre a origem e o centro do transdutor. Para focar em uma coordenada (x, y, z) , calcula-se a posição do foco \vec{f} e em seguida a distância \vec{d}_n entre cada transdutor e o foco:

$$\vec{d}_n = \vec{f} - \vec{p}_n \quad (5)$$

A partir do resultado de (5) e do comprimento de onda λ , calcula-se a variação de fase $\Delta\theta_n$ ocorrida no percurso em domínio $[0, 2\pi]$:

$$\Delta\theta_n = 2\pi \cdot ((d_n/\lambda) \bmod 1) \quad (6)$$

Por fim, cada elemento terá um atraso de fase de tal forma que não ocorra variação de fase no percurso. A fase de cada transdutor θ_n é obtida por:

$$\theta_n = 2\pi - \Delta\theta_n \quad (7)$$

C. Elementos Acústicos

O sistema desenvolvido é composto por dois elementos acústicos, uma matriz de transdutores e um refletor. A geometria escolhida posiciona a matriz na horizontal, acima do refletor, que é a superfície sobre a qual a manipulação irá ocorrer. O refletor deve ser plano para que a gravidade não influencie o movimento e pode ser constituído de qualquer material não acusticamente absorvente. No experimento realizado, utilizou-se uma mesa de madeira (MDF).

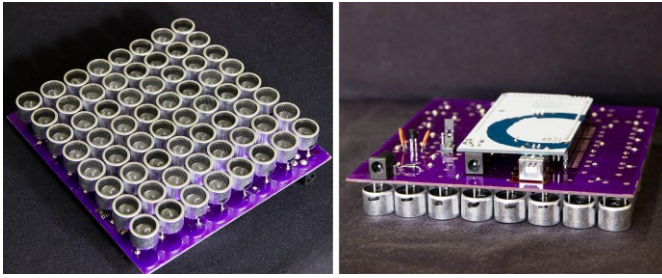


Fig. 2. Matriz de transdutores desenvolvida. As dimensões da placa de circuito são 140 x 150 mm.

Uma matriz côncava atinge uma força sobre o objeto 50% maior se comparada com uma plana [18]. Entretanto, o campo de trabalho paralelo à matriz é diminuído porque a força exercida é reduzida significativamente à medida que o foco se afasta do centro. Com objetivo de maximizar o campo de trabalho e uniformizar a força exercida na partícula, adotou-se a geometria plana. A matriz, apresentada na Fig. 2, é composta por 64 transdutores divididos um arranjo 8 x 8, separados entre si por 1 mm. A largura do arranjo é de 135 mm.

Para escolha dos transdutores, existem dois fatores importantes: 1) A frequência de operação irá limitar o tamanho do objeto, que se restringe à metade do comprimento de onda. Além disso, uma frequência maior irá exigir um controlador mais rápido; 2) A intensidade sonora irá afetar a densidade máxima do objeto. Quanto maior a intensidade, maior será a densidade máxima. Os transdutores utilizados foram do modelo TCT40-16T-2, com frequência de 40 kHz, 16 mm de diâmetro, intensidade sonora de 120 dB a 30 cm de distância excitado com 10 V_{RMS} e ângulo do feixe de 50° (-6 dB).

D. Componentes Eletrônicos

Para gerar os sinais aos transdutores, é comum utilizar FPGA, devido ao elevado número de pinos de E/S e paralelismo [14], [17], [13]. Sistemas baseados em microcontroladores, como o Ultraiño [19], também demonstram grande capacidade [20], [21].

Priorizando o custo, facilidade de uso e disponibilidade de venda, selecionou-se o Arduino Mega para controlar os canais da matriz. Como ele possui mais de 64 pinos de E/S, não é necessário utilizar multiplexadores. Entretanto, trabalhando a 16 MHz, a resolução de fase máxima é limitada.

A onda quadrada de cada canal é amplificada por um *driver* MOSFET com configuração *push-pull* e pode atingir até 18 V_{pp}.

E. Programa

A arquitetura do programa foi dividida em quatro partes integradas: 1) Atualização das saídas; 2) Cálculo de foco; 3) Cálculo de trajetória; 4) Programa principal.

Calcula-se a fase de cada canal para focar em uma coordenada, codificando o formato da onda do canal em um inteiro de 8 bits, assim como [19], ilustrado na Fig. 3. Esses formatos são convertidos para um *buffer* em que são armazenados os estados das portas em cada pedaço do período.

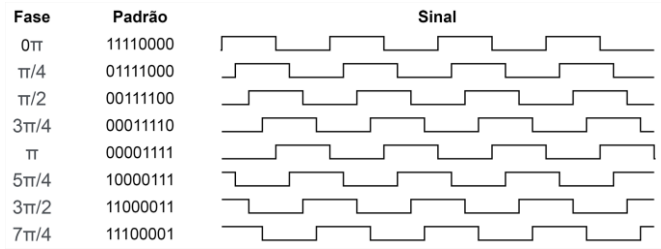


Fig. 3. Codificação dos sinais possíveis com resolução de fase de $\pi/4$ rad e potência em 100%. A variação de intensidade é efetuada variando o tempo do sinal em nível alto (largura do pulso).

1) Atualização das saídas

Parte responsável por ler o *buffer* e atualizar o estado das portas. Ela foi implementada em linguagem *assembly* porque a sincronia do sinal é baseada na quantidade de instruções executadas (ciclos do processador). Com o relógio a 16 MHz, este código executa uma repetição em exatamente 50 ciclos para permitir atualizar as saídas a 320 kHz, dividindo o período do sinal de 40 kHz em 8 pedaços (resolução de fase).

2) Cálculo de foco

Responsável por calcular os atrasos de fase para alcançar um objetivo, aplicando uma compensação de fase (discutida no tópico Calibração). Foram desenvolvidos um modo que foca no infinito (todos os elementos com fase zero) e um modo que foca em uma coordenada arbitrária no espaço. Ela pode ser estendida para gerar outros tipos de campos acústicos.

3) Cálculo de trajetória

Efetua o cálculo de uma trajetória, com resolução espacial definida de 1 mm. Cada passo da trajetória tem o foco calculado e armazenado no *buffer*, que suporta até 85 passos. Foi elaborado o deslocamento retilíneo com velocidade constante, mas outros tipos de trajetória podem ser adicionados.

4) Programa principal

A matriz é controlada por meio de comandos em texto enviados por comunicação serial. O programa principal efetua o controle do estado de operação do dispositivo e interpreta os comandos recebidos. Três modos de operação são suportados: 1) foco no infinito; 2) foco instantâneo em uma coordenada; 3) mover o foco para uma coordenada. Também é possível especificar a intensidade do sinal (de 0 a 100%, com resolução de 25%) e a velocidade de deslocamento.

F. Calibração

O controle da fase de cada elemento é o aspecto de maior importância em uma matriz de transdutores. Para viabilizar o uso de transdutores com tolerâncias brandas, o sistema suporta uma compensação de fase. Emitindo um sinal sincronizado em todos os elementos da matriz, mediu-se a diferença de fase entre o sinal de controle e o sinal detectado por um transdutor conectado a um osciloscópio, para cada elemento da matriz. Os dados coletados foram informados no programa.

O mapeamento entre pino do microcontrolador e localização do transdutor na matriz é parametrizável no programa para permitir maior flexibilidade no projeto da placa de circuito impresso.

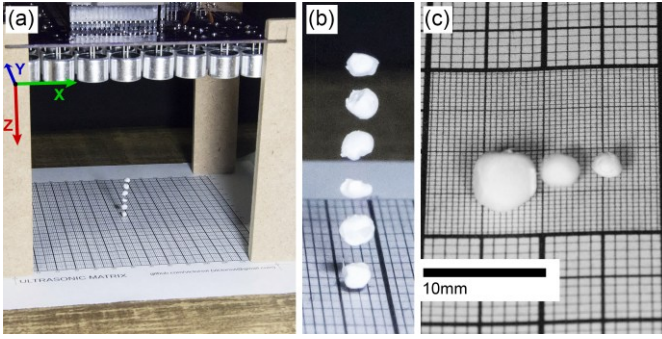


Fig. 4. (a) Levitando 6 esferas de poliestireno expandido com foco no centro da área de trabalho. (b) Imagem da levitação ampliada. (c) Diâmetro das partículas testadas, da esquerda para direita: 5,5 mm, 3,5 mm, 2,5 mm.

III. RESULTADOS

O dispositivo desenvolvido foi capaz de gerar 64 sinais independentes de 40 kHz com resolução de $\pi/4$ rad, possibilitando a levitação e translação de partículas. Os experimentos foram conduzidos excitando os transdutores com uma tensão de 15 V_{pp}, consumindo uma corrente de cerca de 250 mA, equivalente a 3,75 W de potência. A matriz foi posicionada com o topo dos transdutores a 10 cm acima do refletor, como evidente na Fig. 4 (a).

A. Partícula

Foram levitadas partículas de poliestireno expandido, com densidade de aproximadamente 30 kg/m³, como mostrado na Fig. 4 (c). Partículas de 3,5 mm e 2,5 mm, cujo diâmetro é menor que $\lambda/2$ (8,6 mm no ar a 20 °C), foram levitadas próximas ao refletor e puderam ser transladadas, seguindo a posição especificada no plano. Já partículas cujo diâmetro é maior não puderam ser levitadas, mas uma com diâmetro de 5,5 mm foi transladada com velocidade e precisão significativamente reduzidas.

B. Área de Trabalho

O comprimento do lado da matriz quadrada, medido entre as laterais externas dos transdutores, é de 135 mm. A amplitude é ligeiramente reduzida à medida que o foco se afasta do centro, implicando em: 1) Em distâncias menores que 10 mm da borda externa, a partícula apresentou perda de estabilidade, ficando mais suscetível a oscilações; 2) Em distâncias menores que 5 mm da borda, ocorreu perda de exatidão espacial, a partícula foi eventualmente ejetada e não foi mais possível movê-la em direção ao centro; 3) Fora da área delimitada pelos transdutores, a partícula foi ejetada. Todos os outros experimentos foram efetuados com mais de 10 mm de distância das bordas, definindo uma área de trabalho de 115 x 115 mm.

C. Força

Dois experimentos foram realizados para estimar a força lateral. Em uma situação em que o ponto focal é estático, afastou-se uma esfera de 3,5 mm de diâmetro de sua posição de equilíbrio em 10 mm com uma pinça, aparente na Fig. 5 (a). Observando que a restauração para a posição de equilíbrio

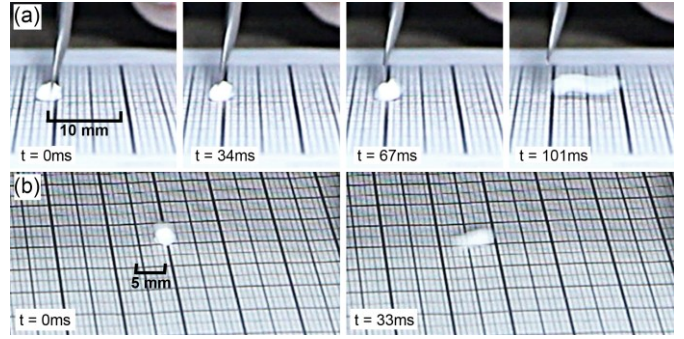


Fig. 5. (a) Aceleração da esfera após ser afastada em 10 mm à esquerda da posição de equilíbrio. (b) Aceleração a partir do repouso em um deslocamento para a esquerda.

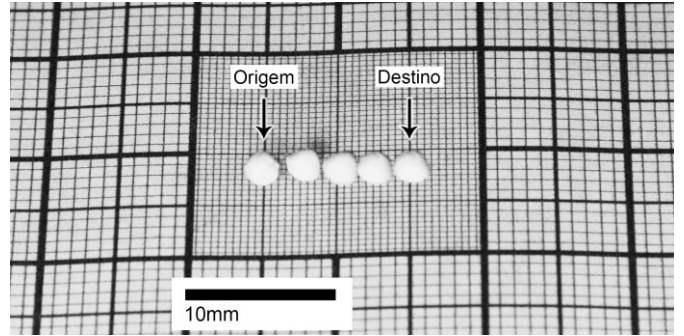


Fig. 6. Superposição de imagens de um deslocamento de 10 mm com destaque à exatidão do posicionamento espacial de uma esfera de 2,5 mm de diâmetro sobre uma régua de resolução 0,5 mm. O erro na posição de origem e destino é menor que 0,5 mm.

demorou 0,101 s e considerando aceleração constante, estimou-se a aceleração em 1,96 m/s² e a força em 1,3 nN.

Na outra situação, em que o ponto focal é dinâmico, movimentou-se a mesma esfera para a esquerda pelo deslocamento do ponto focal, demonstrado na Fig. 5 (b). A partir do repouso, ela deslocou-se 5 mm em 0,033 s. Considerando aceleração constante, estimou-se a aceleração em 9,18 m/s² e a força em 6,2 nN. Note que o valor apresentado não é a força máxima e é uma estimativa, pois na prática a força irá depender da distância ao ponto focal.

Também se testou a distância máxima do foco que faz uma partícula em repouso no refletor ser atraída, que foi de 14 mm.

D. Exatidão

A exatidão no posicionamento espacial foi medida utilizando um papel com uma régua impressa com resolução de 0,5 mm. Com uma esfera de 2,5 mm de diâmetro, a oscilação lateral máxima em um período de observação de 10 s foi menor do que a resolução da medição.

O erro de posicionamento após deslocamento foi medido utilizando a mesma técnica, apresentando erro de posicionamento espacial menor que a resolução da medição, 0,5 mm. A Fig. 6 exibe um deslocamento de 10 mm, cuja origem e destino no eixo horizontal estão destacados.

E. Velocidade

As medidas de velocidade foram obtidas utilizando uma câmera para medição do tempo de deslocamento. Velocidades médias de até 15 cm/s foram desenvolvidas com taxa de sucesso de 100%. A máxima registrada foi de 19 cm/s, em um

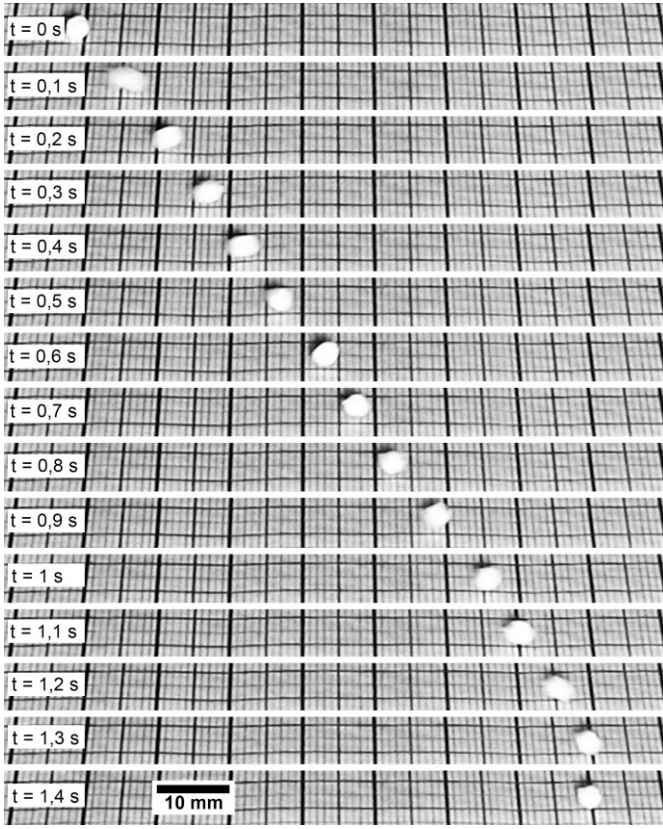


Fig. 7. Deslocamento de uma esfera de 3,5 mm de diâmetro da coordenada (30,50) para (100,50) a 5,5 cm/s.

movimento de 70 mm, entretanto algumas vezes a partícula não acompanhou o movimento do foco. Velocidades maiores que 20 cm/s não conseguiram aplicar a aceleração adequada para vencer a inércia da partícula. A Fig. 7 apresenta um deslocamento de 70 mm com velocidade média de 5,5 cm/s.

F. Efeitos Secundários

O ponto focal tem amplitude máxima no campo acústico. Entretanto, existe amplitude significativa em outras posições, que pode ser problemático em algumas aplicações. Com a matriz desligada, algumas partículas foram posicionadas na linha $y = 70$, como mostrado na Fig. 8 (a). Ao ativar a matriz com o foco em (70, 20), houve pouco distúrbio nas partículas da linha, Fig. 8 (b). Entretanto, ao movimentar o foco para (70, 100), a maioria das partículas foram deslocadas, como mostrado na Fig. 8 (c).

IV. DISCUSSÃO

Foi possível utilizar o sistema para levitação estática e para manipulação em duas dimensões, sobre o plano do refletor. A manipulação perpendicular ao refletor, no eixo z , não foi alcançada. Como foi possível empilhar partículas no modo estático, conforme a Fig. 4 (b), existiram nós com amplitude suficiente para levitação, porém uma limitação do programa pausa o sinal por alguns microssegundos ao reposicionar o foco entre os passos da trajetória, o que pode ter sido a causa dessa incapacidade.

A velocidade máxima confiável alcançada foi de 15 cm/s, que é superior aos 3,6 cm/s em [21]. Entretanto, ela é inferior

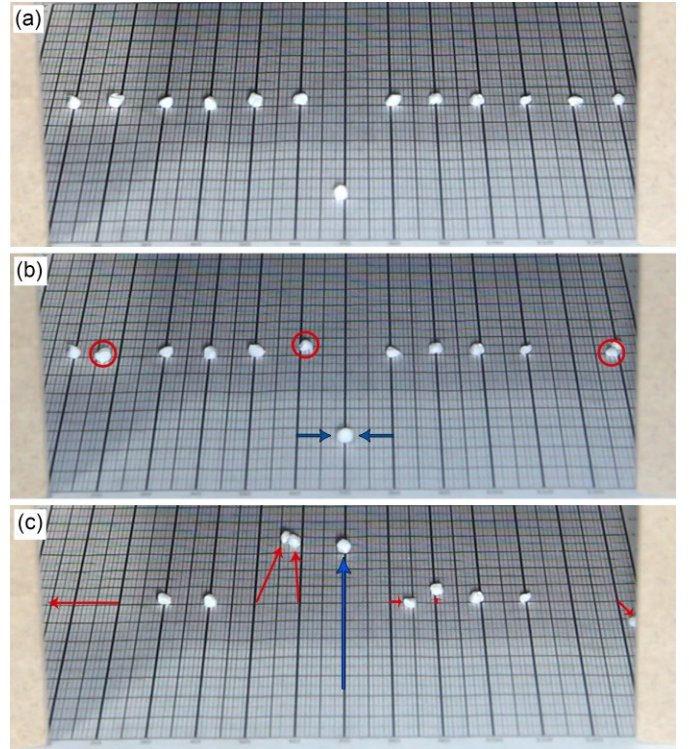


Fig. 8. (a) Posição inicial das partículas com a matriz desligada. (b) Três partículas foram afetadas ao ativar a matriz com foco estático no local indicado pelas flechas horizontais. (c) Várias partículas afetadas ao movimentar o foco no sentido indicado pela flecha vertical.

aos 29 cm/s executados em [9], o que pode ser justificado pela utilização de matrizes opostas, atingindo maior amplitude da onda. Outra possível causa para o menor desempenho é que neste trabalho a menor distância entre passos foi limitada em 1 mm, oferecendo uma atualização de posição abrupta, mais suscetível a oscilações.

A análise do erro de posicionamento espacial foi limitada pelo método de medição, definido como menor que 0,5 mm. Mesmo assim, ele é similar a outros trabalhos [9], [22], [20]. Para aplicações em que se deseja levar a partícula até um ponto então largá-la, deve-se considerar que ela pode se movimentar lateralmente durante a queda após desativar o campo acústico.

Por mais que a resolução de fase foi a menor utilizada para manipulação de partículas com matriz ultrassônica até o momento, apenas $\pi/4$ rad, o sistema se mostrou capaz de atingir resultados comparáveis. Outros sistemas com resoluções mais altas, como $\pi/25$ rad [9] e $\pi/10$ rad [21], apresentam maior fidelidade da trajetória. A baixa resolução também reduziu a estabilidade da levitação, causando pequenas oscilações na amostra.

V. CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido permitiu levar e manipular partículas dinamicamente sobre um plano utilizando controle eletrônico de fase, sem peças móveis. A capacidade de manipulação da configuração matriz-refletor foi validada, apresentando capacidade similar ao método de matrizes opostas, mas limitada a duas dimensões. A utilização de

componentes acessíveis foi priorizada e demonstrou-se sua aplicabilidade e limitação, visando viabilizar a difusão da tecnologia.

Este conceito poderia ser utilizado em aplicações ainda não exploradas. Utilizando maior potência acústica, seria possível combinar a manipulação acústica com solda laser para posicionar pequenos componentes em placas de circuitos ao mesmo tempo em que eles são soldados. A placa de circuitos faria o papel do refletor.

As possíveis aplicações não se restringem apenas ao ambiente macroscópico. Reduzindo o tamanho dos transdutores e aumentando sua frequência, o conceito pode ser utilizado em aplicações *lab-on-a-chip* para manipular amostras microscópicas com grande flexibilidade.

O manipulador pode ser aperfeiçoado permitindo outras trajetórias além de retilínea, múltiplos pontos focais independentes, maior resolução espacial e calibração de amplitude. Também seria possível atingir velocidades mais elevadas utilizando movimento com aceleração constante.

REFERÊNCIAS

- [1] V. Guelpa, G. J. Laurent, B. Dahroug e N. Le Fort-Piat, "Modular contact-free conveyors for handling planar fragile objects," *IEEE Trans. Robotics*, vol. 33, no. 1, pp. 92-101, Fev. 2017, 10.1109/TRO.2016.2623340.
- [2] S. Santesson, S. Nilsson, "Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis," *Anal Bioanal Chem*, vol. 378, pp. 1704-1709, Fev. 2004, 10.1007/s00216-003-2403-2.
- [3] S. Suhaimi e E. Avci, "A micro-tweezers system for cell isolation task," in *IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (SII)*, Honolulu, HI, USA, 2020, pp. 1354-1359, 10.1109/SII46433.2020.9025955.
- [4] Q. Xu, "Precision position/force interaction control of a piezoelectric multimorph microgripper for microassembly," *IEEE Trans. Automation Science and Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 503-514, Jul. 2013, 10.1109/TASE.2013.2239288.
- [5] V. Vandaele, P. Lambert e A. Delchambre. "Non-contact handling in microassembly: Acoustical levitation," *Precision Engineering*, vol. 29, no. 4, pp. 491-505, Out. 2005, 10.1016/j.precisioneng.2005.03.003.
- [6] A. Marzo, "Standing Waves for Acoustic Levitation," in *Acoustic Levitation: From Physics to Applications*. Singapore, Springer, 2020, pp. 11-26.
- [7] M. A. B. Andrade, F. Buiocchi e J. C. Adamowski, "Finite element analysis and optimization of a single-axis acoustic levitator," in *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 2, pp. 469-479, Fev. 2010, 10.1109/TUFFC.2010.1427.
- [8] B. W. Drinkwater, "Dynamic-field devices for the ultrasonic manipulation of microparticles," *Lab Chip*, vol. 16, no. 13, pp. 2360-2375, Mai. 2016, 10.1039/C6LC00502K.
- [9] A. Marzo, S. A. Seah, B. W. Drinkwater, D. R. Sahoo, B. Long e S. Subramanian. "Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects," *Nat. Commun.*, vol. 6, no. 1, p. 8661, Out. 2015, 10.1038/ncomms9661.
- [10] T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome e T. Fukuda, "Micromanipulation using a focused ultrasonic standing wave field," *Electronics. Commun. Japan*, vol. 83, no. 1, pp. 53-60, Jan. 2000.
- [11] T. Kozuka, T. Tuziuti, H. Mitome, F. Arai e T. Fukuda, "Three-dimensional acoustic micromanipulation using four ultrasonic transducers," in *Proc. Inti Sympi MHS2000*, Nagoya, Japan, 2000, pp. 201-206, 10.1109/MHS.2000.903313.
- [12] T. Hoshi, Y. Ochiai e J. Rekimoto, "Three-dimensional noncontact manipulation by opposite ultrasonic phased arrays," *Japanese Journal App. Physics*, vol. 53, no. 7S, Jun. 2014, 10.7567/JJAP.53.07KE07.
- [13] Y. Ochiai, T. Hoshi e J. Rekimoto, "Pixie Dust: Graphics generated by levitated and animated objects in computational acoustic-potential field," *ACM Trans. Graph*, vol. 33, no. 4, Jul. 2014, 10.1145/2601097.2601118.
- [14] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto e H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, Jul.-Set. 2010, 10.1109/TOH.2010.4.
- [15] L. P. Gor'Kov, "On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid," *Soviet Physics Doklady*, vol. 6, no. 9, pp 773-775, Mar. 1962.
- [16] M.A.B. Andrade, N. Pérez e J.C. Adamowski, "Review of progress in acoustic levitation," *Braz J Phys*, vol. 48, no. 2, pp. 190-213, Abr. 2018, 10.1007/s13538-017-0552-6.
- [17] H. Akahori, H. Furuhashi e M. Shimizu, "Direction control of a parametric speaker," in *IEEE Int. Ultrasonics Symp.*, Chicago, IL, USA, 2014, pp. 2470-2473, 10.1109/ULTSYM.2014.0616.
- [18] A. Marzo, A. Barnes e B. W. Drinkwater, "TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator," *Rev. Scientific Instruments*, vol. 88, no. 8, p. 085105, Ago. 2017, 10.1063/1.4989995.
- [19] A. Marzo, T. Corkett e B. W. Drinkwater, "Ultraino: An open phased-array system for narrowband airborne ultrasound transmission," in *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 1, pp. 102-111, Jan. 2018, 10.1109/TUFFC.2017.2769399.
- [20] M. Prisbrey e B. Raeymaekers, "Ultrasound noncontact particle manipulation of three-dimensional dynamic user-specified patterns of particles in air," *Phys. Rev. Applied*, vol. 10, no. 3, p. 034066, Set. 2018, 10.1103/PhysRevApplied.10.034066.
- [21] T. Omirou, A. Marzo, S. A. Seah e S. Subramanian, "LeviPath: Modular acoustic levitation for 3d path visualisations," in *Proc. 33rd Annual ACM Conf. Human Factors in Computing Systems*, Seoul, Korea, 2015, pp. 309-312, 10.1145/2702123.2702333.
- [22] T. Fushimi, A. Marzo, T. L. Hill e B. W. Drinkwater, "Trajectory optimization of levitated particles in mid-air ultrasonic standing wave levitators," in *IEEE Int. Ultrasonics Symp. (IUS)*, Kobe, Japan, 2018, pp. 1-9, 10.1109/ULTSYM.2018.8580093.