

超音波を集束させる装置とその応用例

星 貴之 (名古屋工業大学)

本稿では、著者が開発した超音波を集束させる装置 (図 1) を紹介する。超音波を集束させる方法や強力超音波特有の現象について数式を示して解説する。また本装置の応用例として、直径数 mm の粒が浮いて動き回るメディアアート作品 *lapillus bug* を紹介する。(CQ 出版社 Interface 2014 年 3 月号掲載・未編集原稿)

1. はじめに

空中を伝搬する超音波は、工学的に様々な応用がなされている。例えばデータの送受信や反射による障害物検知などである。これらは超音波を情報として利用している。一方、強力な超音波を用いて小球や水滴を空中に保持するなど、エネルギーとしての応用も行われている。

筆者は 2008 年から、超音波を集束させる装置の開発と応用に携わっている。数百個の超音波振動子をそれぞれ独立した信号で駆動して焦点を結ぶ (図 2)。駆動信号同士の時間差の調節により、焦点を三次元的に動かすこともできる (図 3)。この焦点における強力な超音波によって様々な興味深い現象を生じさせ、活用することを目指している。研究の初期には、強力超音波が物体を押す現象 (4.1 節) (図 1) を利用して手のひらに非接触で触覚を感じさせていた [1]。これにより空中映像やジェスチャ入力に触覚を付与することが可能となる。現在は触覚以外の応用も探索し、下記のような研究を展開している。

- ・局所励振による静電気分布計測 (産総研)
- ・シャボン膜の反射特性の制御 (東京大)
- ・プリント基板のビアの脱水 (埼玉大)
- ・授粉作業の自動化 (京都大)
- ・微小粒子の非接触浮上搬送 (慶應大)

括弧内は共同研究先である。詳細は割愛するが、音響放射圧、超音波霧化、音響浮揚など以前から知られていた現象を、局所的に生じさせることにより新たな価値が生み出されている。

2. 開発した装置

前述の共同研究を開始するにあたり、サイズがかさばり配線も煩雑であった装置の設計を見直し、運



図 1 超音波で紙片が局所的に押される様子

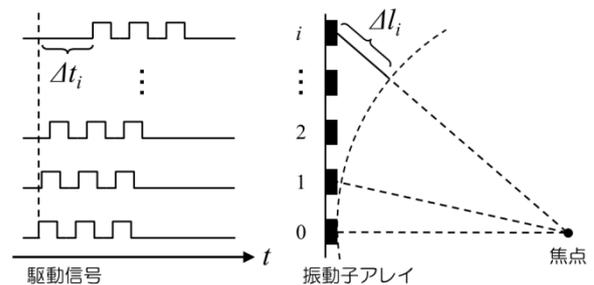


図 2 駆動信号の時間差による焦点の生成

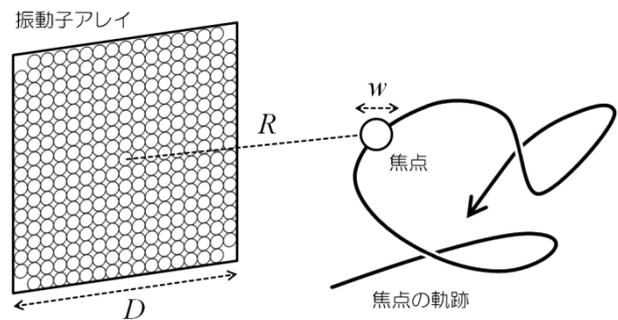


図 3 焦点の三次元移動

搬や設置が容易な小型装置の開発を行った (図 4)。片手で持てるサイズに制御回路を集積し、外部配線を USB と電源のみとした。本装置は超音波焦点を発

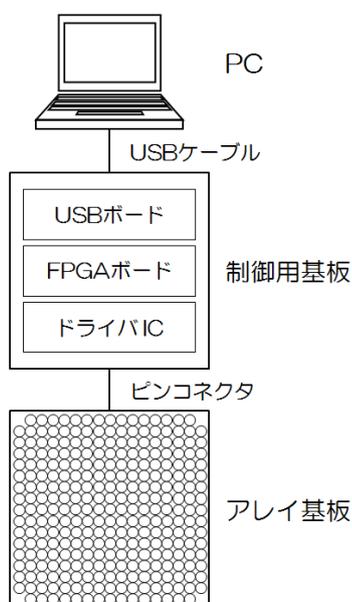


図 4 超音波集束装置の概略

生させ、三次元的に動かすことができる（空間的な制御）。また PWM 変調による超音波強度の調節や、AM 変調による振動の出力が可能である（時間的な制御）。

2.1 ハードウェア

PC から指令を受けて超音波を集束させるためのハードウェア構成要素を以下に示す。

- (1) 超音波振動子
- (2) 外部通信器（USB ボード）
- (3) 信号生成器（FPGA ボード）
- (4) 信号増幅器（ドライバ IC）

本装置では一枚の回路基板（アレイ基板）に(1)を敷き詰め、(2)から(4)をもう一枚の回路基板（制御用基板）に搭載している。これら二枚の基板は同じ寸法（ $19 \times 19 \text{ cm}^2$ ）にしてある（図 4~5）。それぞれの外周部には駆動信号の端子が引き出されており、ピンコネクタを介して接続される。

2.1.1 アレイ基板

アレイ基板では、超音波振動子（T4010B4、日本セラミック株式会社製、共振周波数 40 kHz、直径 1 cm、117 dB SPL @ 30 cm）が搭載されている。17×17 の正方形に並べられ、四隅から 1 個ずつ除いた 285 個の配列である。振動子からは 2 本の端子が出ている。極性がある点に注意して、同じ側の端子にピン

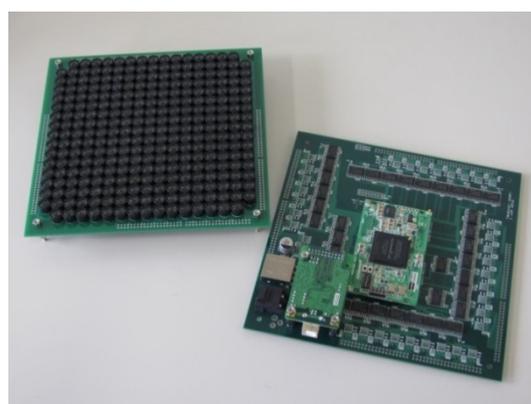


図 5 アレイ基板と制御用基板

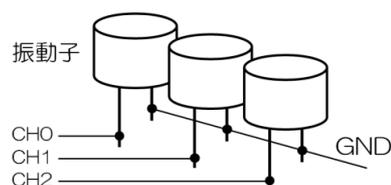


図 6 振動子に接続される信号線

コネクタからの信号線がそれぞれ接続される。もう片方の端子は共通の GND に接続される（図 6）。

2.1.2 アレイ基板

制御用基板では、FPGA ボード（ACM-202-55C8、HuMANDATA 社製）が中央に配置され、そこから放射状に信号線が伸び、ドライバ IC（L293DD、STMicroelectronics 社製）と LPF（駆動信号の DC 成分除去のため）を介してピンコネクタに至る。外部通信器として USB ボード（USB-103、HuMANDATA 社製）も搭載されている。FPGA ボードは 296 本の I/O が引き出されたものであり、そのうち 10 本を USB ボードとの通信、1 本を全ドライバ IC への Enable 信号、285 本を駆動信号に用いることとした（図 7）。ドライバ IC はプッシュプル増幅器を 4 チャンネル集積したものであり、285 チャンネルに対して 72 個必要である。それらを並べるには片面では面積が足りないため 36 個ずつの両面実装とした。DC 成分を除去するためのハイパスフィルタを介して駆動信号を振動子へ送る。振動子の駆動に 24 V 電源を用いる一方で、USB ボードや FPGA ボードは 3.3 V で動作する。そこで 24 V から 3.3 V を生成する DC-DC コンバータを搭載し、装置全体が 24 V 単電源で動作するようにしてある。

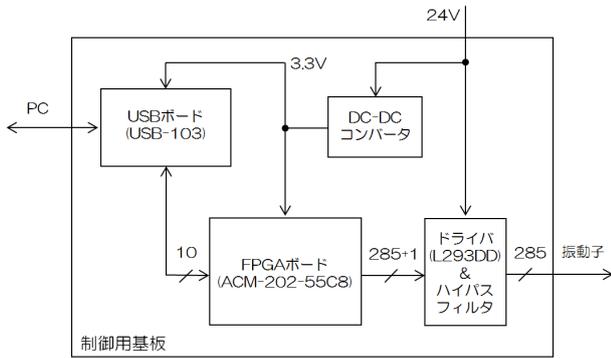


図7 制御用基板のブロック図

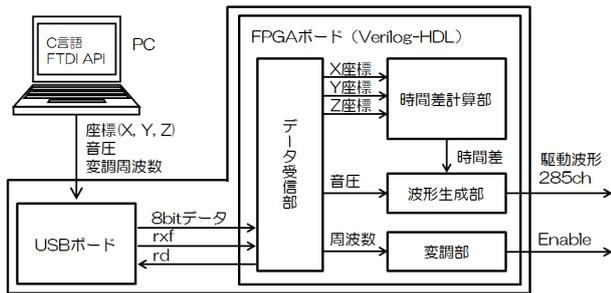


図8 ソフトウェア機能と受け渡されるデータ

2.2 ソフトウェア

前述のハードウェアを用いて超音波を集束させるため、USB ボードとの通信や駆動信号の生成などの処理を Verilog-HDL で記述し、FPGA ボードに書き込んである (図 8)。また超音波出力の ON/OFF や強度、変調周波数などの制御は C 言語で記述して PC から USB を介して行う。

2.2.1 Verilog-HDL

FPGA ボードがすべき処理を以下に示す。

- (1) USB ボードとの通信
- (2) 各振動子の時間差の算出
- (3) 駆動信号の生成

USB ボードは FIFO として働き、PC から受け取ったシリアル信号を 8 bit パラレル信号に変換する。他に 2 本の信号 (RXF、RD) を用いて通信を行う。

PC から USB ボードを介して送られてくるデータは、焦点の X、Y、Z 座標それぞれ 16 bit ずつ、出力強度 10 bit、変調周波数 10 bit である。座標値から各振動子の時間差を算出する。その結果にもとづいて、出力強度に応じた PWM 制御を施した駆動信号 (40 kHz 矩形波) を生成する。また変調周波数にもとづ

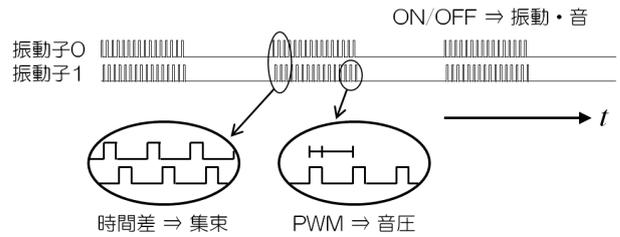


図9 制御に用いる駆動波形のパラメータ

いて超音波を AM 変調するための矩形波を生成する。

FPGA 内における距離の最小単位は超音波の波長の 16 分の 1 に設定した (1 LSB = 8.5 mm / 16 = 0.53125 mm)。すなわち焦点位置は約 0.5 mm 単位で設定することが可能である。また時間差の最小単位も同様である (1 LSB = 25 μ s / 16)。強度は、一周期を 1,248 等分したうちの HIGH と LOW の比率で制御する。AM 変調用の矩形波の Duty 比は 50 % とし、変調周波数は 0 ~ 1,023 Hz を 1 Hz 刻みで指定できるものとしている。

2.2.2 C プログラム

USB ボードには USB 通信 IC (FT245BL、FTDI 社) が搭載されており、FTDI 社が提供している API を用いて PC からアクセスすることができる。浮動小数で指定された座標値を上述のデータ仕様に合わせて整数値に変換したり、出力強度や変調周波数のデータとともに送信したりするプログラムを C 言語で記述している。振動子の立ち上がり時間が 1 ms であることから、データ更新は 1 kHz で行うものとした。

3. 超音波の制御法

それぞれの振動子へ送る駆動波形によって、超音波を集束させる、音圧を変える、物体に振動を与える、などの制御を行うことができる (図 9)。

3.1 集束

本装置は、搭載している 285 個の超音波振動子の時間差を適切に制御し、空中に単一の焦点を結ぶ。また時間差を操作することで焦点の位置を変えることもできる。すなわち離れた場所から空間中の任意の位置に力を発生させることができる。基準となる振動子 0 と振動子 i の時間差 Δt_i [s] は次のように算出される。

$$\Delta t_i = \frac{\Delta l_i}{c_0}$$

ここで c_0 [m/s] は空気中の音速、 Δl_i [m] は振動子 0 から焦点までと振動子 i から焦点までの距離の差である (図 1)。これは「焦点からの距離が遠い振動子ほど早く鳴らす」ことを意味している。

正方形の振動子アレイを用いたとき、焦点面に生じる超音波の音圧分布はほぼ sinc 関数に従うことが理論的に導かれる。アレイの辺と平行な方向のメインローブの幅 (焦点径) w [m] は次式で与えられる。

$$w = 2\lambda \frac{R}{D}$$

ここで、 λ [m] は超音波の波長、 R [m] は焦点距離、 D [m] は正方形アレイの一辺の長さである (図 3)。この焦点径が本手法の空間解像度を与える。上式から、アレイサイズと空間解像度がトレードオフの関係にあることが読み取れる。

3.2 音圧

超音波振動子の駆動には 40 kHz 矩形波を用いる。これは FPGA のデジタル出力をドライバで増幅したものである。この矩形波に PWM をかけることで音響放射圧の強度制御を行う。通常 PWM ではパルス幅と出力が比例するが、本装置では振動子が狭帯域のフィルタとして作用するため、共振周波数である 40 kHz 成分により強度が制御される。PWM 信号 $V(t)$ [V] を次式のように記述する。

$$V(t) = \begin{cases} V_0 & (nT \leq t < nT + W) \\ 0 & (nT + W \leq t < nT + T) \end{cases}$$

ここで W [s] はパルス幅、 T [s] は超音波の周期、 n は整数である。このとき 40 kHz 成分の振幅 a_1 [V] は、 $V(t)$ のフーリエ級数展開の基本周波数の係数である。

$$a_1 = \frac{2}{\pi} V_0 \sin\left(\pi \frac{W}{T}\right)$$

これは Duty 比 50 % ($W = T/2$) で最大値をとる。振動子から放射される超音波は、この電圧振幅に比例する。

3.3 振動

本装置は、指定した周波数で超音波を ON/OFF す

ることで振動刺激を出力する機能を持つ。指定された周波数の矩形波をカウンタにより FPGA 内で生成し、ドライバ IC への Enable 信号として出力する。

これは矩形波という限定された波形ではあるが、AM 変調とみなすことができる。矩形波以外の一般の波形で AM 変調するには、前節で述べた強度制御を用いて振幅をなだらかに変化させる方法が考えられる。

振動刺激を出力すると、その周波数の音が放射される (4.2 節)。本装置の 1 ~ 1,023 Hz という帯域は人間の触知覚をカバーするように設定したものである。一方、可聴域は 20 ~ 20,000 Hz とされている。すなわち皮膚で感じる振動は耳にも聞こえてしまうということであり、利用に際して注意が必要である。

4. 強力超音波

超音波の音圧が高いときに顕著に現れる現象がいくつか知られている。それらを説明する数式には音圧の二乗 (音響エネルギー) が含まれているのが特徴である。本装置は超音波を集束させて強力な超音波を発生させ、これらを利用することができる。ここではそれぞれの現象を数式とともに紹介する。

4.1 音響放射圧

超音波の進行を遮る物体の表面に、それを押す方向の力が生じる現象である [2]。物体表面で超音波が全反射するとき音響放射圧 P [Pa] は以下の式で与えられる。

$$P = \frac{2p^2}{\rho_0 c_0^2}$$

ここで p [Pa] は超音波の音圧 (実効値)、 ρ_0 [kg/m³] は空気の密度である。本装置は最大で 16 mN の力を発生することが確認されている。これは一円玉一個半にかかる重力と同程度である。

4.2 自己復調

超音波から可聴音が生じる現象であり、超指向性スピーカ (パラメトリックスピーカ) の基礎原理である [3]。AM 変調や FM 変調などで超音波 p [Pa] の波形が変化するとき、二次波 p_s [Pa] が放射される。

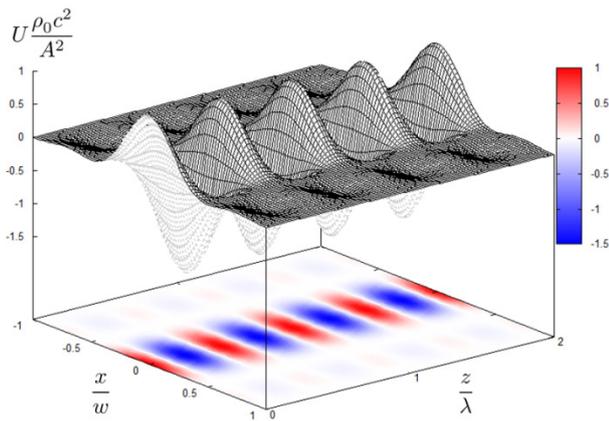


図 10 定在波ビームのポテンシャル分布

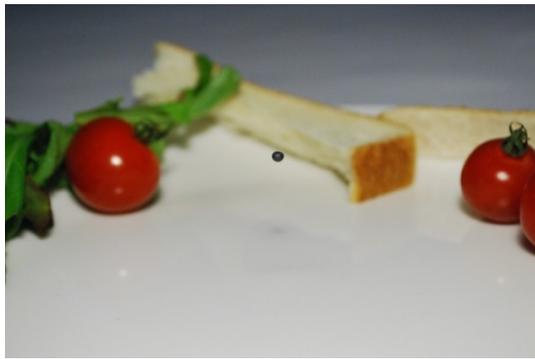


図 11 lapillus bug

二次波 p_s の波動方程式は以下の式で与えられる。

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) p_s = - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p^2$$

ここで β は非線形パラメータである。右辺は駆動力を表し、音圧 p の二乗の二階微分に比例している。すなわち、超音波が変動するとき、その空間自体が音源としてふるまう。

4.3 音響浮揚

波長よりも小さな物体が空中に保持される現象である。よくある状況として微小粒子の密度が空気よりも十分大きく、圧縮率が空気よりも十分小さいことを仮定すると、体積 V [m^3] の微小粒子が定在波ビームの中で受ける力 \mathbf{F} [N] は次式で与えられる[4]。

$$\mathbf{F} = -V \nabla U$$

$$U = -\frac{3}{2} \langle K_a \rangle + \langle P_a \rangle$$

U [J/m^3] は力学的ポテンシャルを表し、微小粒子はこの値が低い方へ引き寄せられる。 K_a [J/m^3] は音場の

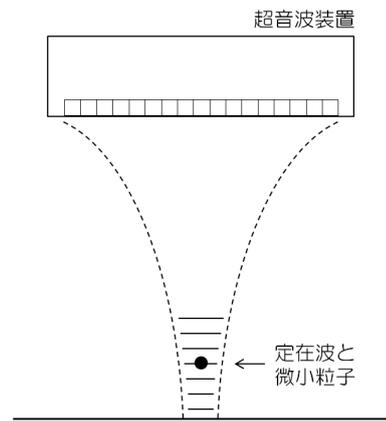


図 12 lapillus bug のセットアップ

運動エネルギー密度、 P_a [J/m^3] は音場のポテンシャルエネルギー密度である。 $\langle \cdot \rangle$ は時間平均を表す。断面が sinc 関数となるような定在波ビームのポテンシャル分布を図 10 に示す。ビームに沿って半波長ごとに極小値が現れており、ここに微小粒子がトラップされる。またビームの中心軸上のポテンシャルが外側よりも低いため、粒子はビームから飛び出さずトラップされたままとなる。

5. 微小粒子の非接触浮上搬送

本装置の応用例として、メディアアート作品 lapillus bug を紹介する。これは慶應大学・寛研究室との共同研究の成果である[5]。

5.1 lapillus bug

皿の上に粒がひとつ浮いており (図 11)、近くに野菜が置かれると近付いてその周囲を旋回したり、レーザーポインタの誘導に従って飛んだりする。また移動しないときでも静止しているわけではなく、小刻みな運動を繰り返す。これらの動きをコバエに見立てた作品である。無機物の動きに「生き物らしさ」を覚えるところが興味深い。本作品の動画は <http://vimeo.com/81077976> にて公開されている。

5.2 セットアップ

音響浮揚 (4.3 節) により粒子、水滴、虫などを捕捉する研究がこれまでに行われている。それらの先行研究では、ボルト締めランジュバン型振動子と反射板、あるいは振動子同士を対向させて定在波を発

生させており、周波数あるいは位相の変化により節の位置を制御して粒子を移動させていた。

本装置で床面付近に焦点を結ぶと、入射波と反射波が重なり合い、局在した強力超音波の定在波が発生する。これにより粒子を直径数 mm の微小粒子を床面から数 mm～数 cm 浮上した状態で保持する(図 12)。そのまま焦点位置を平行移動させることで粒子を搬送することができる。

参考文献

- [1] 星貴之: 空中超音波を利用した非接触触覚提示法, 超音波 TECHNO, vol. 23, no. 3, 5-6 月号, pp. 8-12, 2011.
- [2] 長谷川高陽: ランジュバン放射圧に関する統一理論, 日本音響学会誌, vol. 52, no.3, pp. 187-194, 1996.
- [3] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo, and S. Sasabe: The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 73, pp. 1532-1536, 1983.
- [4] 竹内正男: 微小物体の超音波マイクロマニピュレーション, 日本音響学会誌, vol. 52, no. 3, pp. 203-209, 1996.
- [5] 河野通就, 星貴之, 笈康明: lapillus bug: 音響浮揚による粒子の空中移動制御とインタラクション, エンタテインメントコンピューティング 2013 論文集, pp. 41-46, 2013.