

超音波で物体を動かす
～非接触型圧力提示システムの開発～
奈良女子大学附属中等教育学校 望月 草馬

抄録

超音波が持つ高い周波数は、医療・産業分野における活用が注目されている。本研究では、超音波の音響放射圧（以下、圧力）を空気中の一点に焦点化して物体を動かすことを目的とし、多数のスピーカーから発信される超音波を同位相で重ね合せ、圧力を提示するシステムを開発した。成果として、軽量の物体を直接接触らないで形を変化させたり動かすことに成功した。

1. 研究の背景と目的

物体に直接接触せずに圧力を与えて動かすことができれば、衛生管理が必要な物体を汚さずに操作したり、離れた場所から直接接触されない物体を高速操作できる。そこで、超音波を空気中の一点において同位相で重ね合わせる位相制御（フェーズドアレイ）により非接触で物体を動かす圧力提示システムの開発を目指した。

2. 研究方法

(1) 音響放射圧による圧力の提示

音の進行を物体が遮ると、物体表面に音の進行方向に「音響放射圧」が発生し、物体が押される。この関係式より、音響放射圧は音圧に依存していることがわかる。よって、触覚提示を行うには音圧を上げる必要がある。また、指向性の高さ、高周波、聞こえないという3つの特徴から超音波の活用を選択した。

$$P = aE = a \frac{I}{v} = a \frac{p^2}{\rho v^2}$$

$P[\text{Pa}]$: 音響放射圧	$p[\text{Pa}]$: 超音波の音圧
a : 物体によって決定する係数	$v[\text{m/s}]$: 音速
$E[\text{J/m}^3]$: 音響エネルギー密度	$\rho[\text{kg/m}^3]$: 媒質の密度
$I[\text{W/m}^2]$: 音響インテンシティ	

(2) FPGA と振動子アレイによる発振

単一の超音波振動子（以下、振動子）では音圧が微弱であるため、音圧を増幅するために振動子を多数配置することによって音圧の増幅を試みた。振動子の発振は intel 社製の FPGA 評価ボード DE10-Nano を用いた。作成した超音波発振装置および FPGA を図 1 に示す。



図 1 : 作成した超音波発信器と FPGA

(3) 位相制御による音圧の焦点化

最初の実験で、図 1 の発信器からそのまま発振を行いオシロスコープで合成波の波形を確認したところ、焦点化されていないことがわかった。音を出すだけでは波面が平面となってしまう、音圧が分散することが分かった。そのため、高い音圧を限定的な範囲でのみで得るために

音を集束させて焦点化する必要がある。音圧を焦点化する手法として、以下の2つを考えた。

<手法1> 振動子の立体配置

図2のように振動子を球面上に配置することで空間上の一点で音の焦点を形成する。しかしこれでは焦点が固定されてしまい、任意の座標で焦点化することができない。また、立体に配置するため装置が大型になるという課題が生じる。

<手法2> 位相制御

図3のように振動子を平面に配列し、それぞれの振動子に位相差をつけることで空間上に焦点を形成する。位相差を生み出すための遅延のつけ方で任意の座標で焦点化することが可能で非常に自由度が高い。また、振動子を平面に配置するため装置の小型化が可能となる。

自身のシステムの活用手法として、ユーザーの手の位置を追尾して焦点位置を変化させることを目指している。そのような将来的な展望もふまえて、焦点位置を用途に応じて変更できる手法2を採用した。



図2:立体配置による位相制御

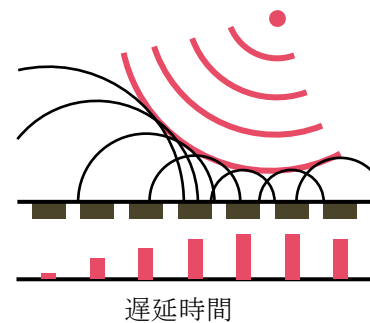


図3:平面配置による位相制御

(4) 位相差の算出

任意の座標に超音波を焦点化するために、焦点座標と各振動子間の距離差に応じて位相差を計算する手法を考えた。各振動子と焦点との間にある波数差から位相差を求めることで計算の処理を簡易化した。各振動子の波数は以下の式で表される。

$$w_i = \frac{D_i}{\lambda}$$

w : 波数 i : 振動子番
 λ [m] : 波長 D [m] : 焦点と振動子の距離

求めた波数の小数部分が波数差、つまり位相差となる。

図4のように、Unityを用いてこの計算式による遅延計算シミュレーターを自作し、焦点座標の入力のみで多数の振動子の遅延が自動算出されるシステムを構築した。

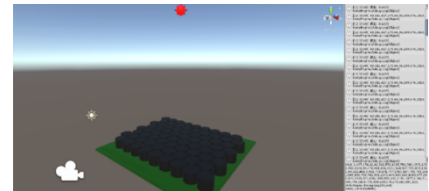


図4:シミュレーション画面

(5) 位相制御

上記で求めた位相差を信号処理として実現するために、カウンタ変数の初期値を変更することで初期位相を変化させた。例えば1/2周期の位相差を持った二つの矩形波を出力する場合、図5のように半周期分のクロック数をかさませることで任意に位相を制御することができる。実際に波形の様子をオシロスコープで計測した結果が図5であり、目的の位相制御が達成できていることがわかる。なお、今回作成した位相制御システムは20nsの分解能を持つ。



図5:位相制御

3. 検証実験と装置の改良

(1) 検証実験 1 焦点化の検証

位相差を波数差として扱うシステム開発により、意図した場所に超音波の焦点化ができてきているのかを検証した。

【手法】

超音波マイクロフォン（中央周波数 40kHz）をオシロスコープに接続し、超音波の焦点位置とそれ以外の位置の波形の振幅を比較して焦点化ができていないか確認を行った。

【結果】

図 6 のように、焦点においては振幅が増大したが、焦点以外の地点では振幅が計測できないほど小さくなった。その他の位置に焦点を形成しても同様の結果が得られた。

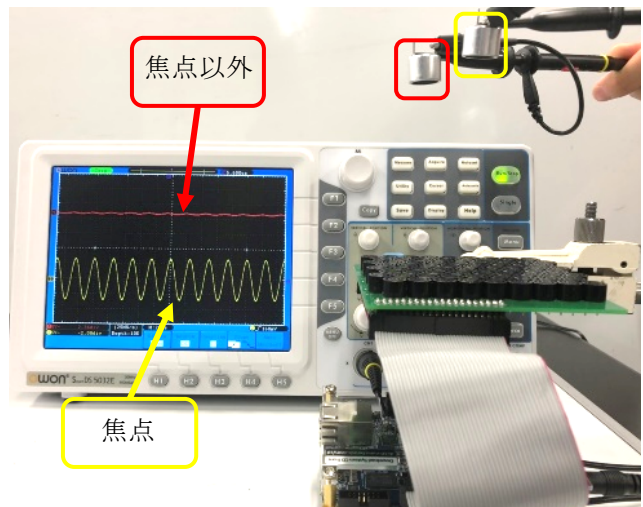


図 6: 実験の様子とオシロスコープの画面

(2) 検証実験 1 音圧分布の測定

音圧の平面分布を測定し、焦点付近の音圧分布について測定した。二つの手法を用いて音圧分布を測定し、評価を行った。

【手法】

図 7 のように XY レコーダーのペン位置にマイクロフォンを取り付け、オシロスコープと接続する。縦横 1cm ずつマイクロフォンをずらしていき、合計 231 箇所まで電圧波形の絶対値の最大値を計測した。同様の操作を条件を変えて計 6 回行った。計測の条件はアレイとマイクロフォンの距離と焦点化位置が 10cm, 20cm, 30cm の場合を計測し、いずれも位相制御ありとなしの両方のデータを計測した。

【結果】

結果をグラフにまとめたものが図 8 であり、位相制御を行うことで超音波が焦点化されていることがわかる。

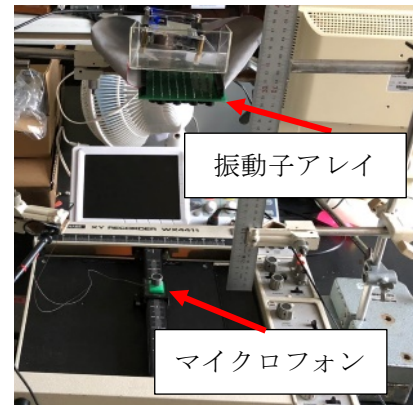
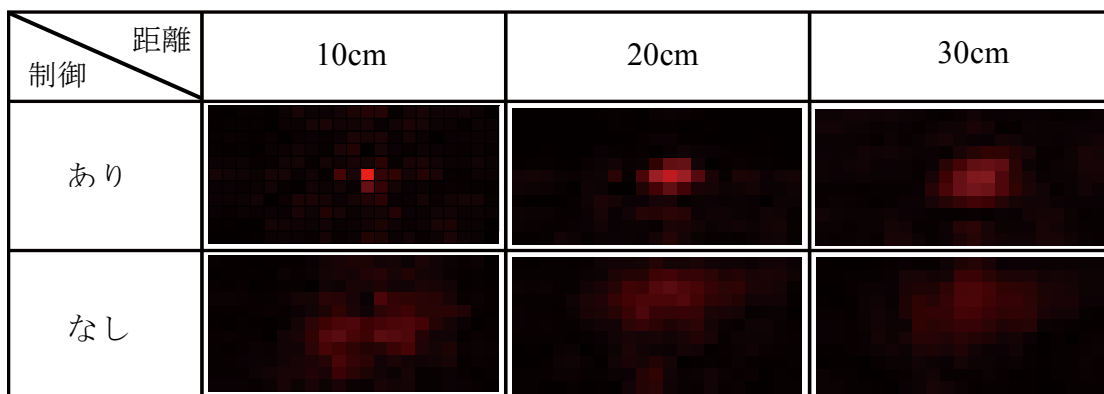


図 7: 実験風景



0mv 12000m

図 8: 超音波の音圧分布

アレイから 10cm の距離で最も精度よく超音波が集束しており、距離が離れるほど焦点の輪郭がぼやけている。これは距離に応じて超音波の指向性が低下することが原因だと考えられる。また、この時点では触覚を感じることはできなかった。付箋の移動も見られなかった。これは信号の電圧が低かったためであると考えた。

(3) 検証実験 3 オペアンプによる信号増幅

検証実験 2 では電圧が足りなかったために物体を押すほどの十分な音圧を焦点位置で得ることができなかった。解決手法として、アレイのチャンネル数に合わせた 72 個のオペアンプを使用した図 9 のような増幅回路を自作した。これはアレイのチャンネル数と同数である 72ch の信号をそれぞれ増幅するため、計 72 個のオペアンプを使用した。その後、一連のシステムを図 10 のように変更した。

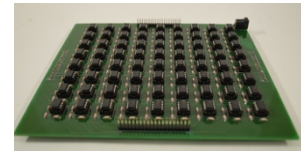


図 9: オペアンプ

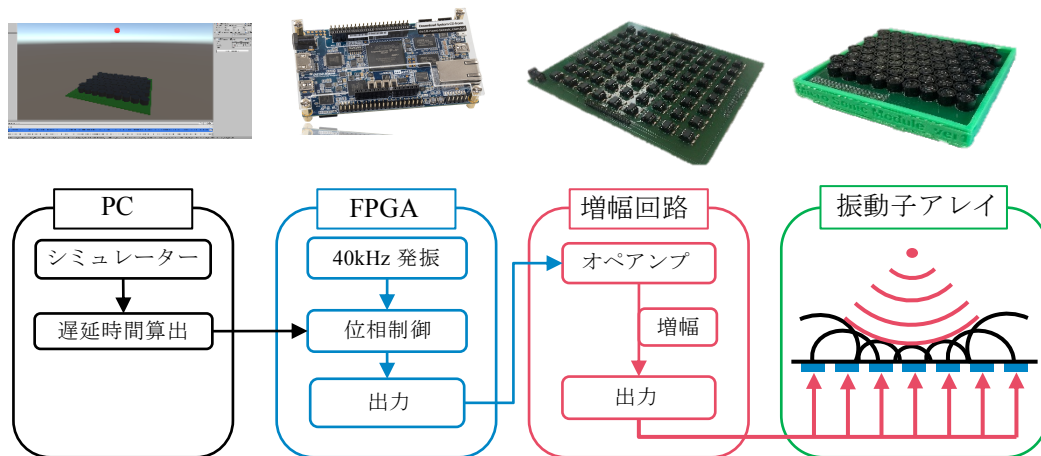


図 10: システム概要

4. 得られた現象と将来的な展望

透明な上下がメッシュになっている筒の中に発泡スチロールビーズを入れ、アレイの上にかざした時の様子を観察した。図 11 のように、焦点位置以外では発泡スチロールビーズに変化は見られなかったが、筒の底面を焦点位置に置くと発泡スチロールビーズが激しく吹き飛ばす現象が確認できた。同様に、超音波を変調（約 160Hz）させて出力し、手をかざすと、触覚を感じられた。

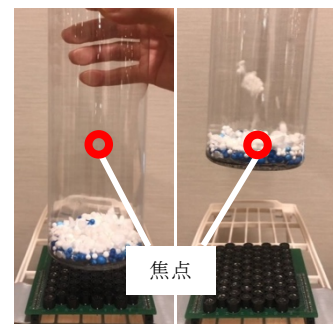


図 11: 実験の様子

【活用アイデアの具現化とその応用】

・触覚付きホログラムの開発と目の不自由な方向への補助インターフェース

→Kinect や Leap Motion など、手の位置情報を取得できるセンサーと併用することで、手をかざした部分に触覚として投影したり、MR やパリティミラーなどのホログラム技術を組み合わせることで利便性を向上する。

・非接触での微粒子の操作

→超音波の焦点化による物体の移動と定常波を作り出すことによる物体の固定を行い、触らずに植物の受粉を行うことや、工業などで触れないものを音で操作する。

5. 参考文献

- ・「改訂 物理」東京書籍