# 超音波を用いた非接触型触覚提示装置の開発

5年A組 望月 草馬 指導教員 藤野 智美

### 1. 要約

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を空気中の一点に焦点化することで、仮想物体に人が触れた際に触覚を再現することを目指した。その実現方法として、多数のスピーカーから発振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、軽量な物体を直接触らないで形を変化させたり、動かすことに成功し、空中映像表示素子と組み合わせることで「触れた感触があるホログラムディスプレイ」を開発することができた。

キーワード 超音波、触覚、音響放射圧、FPGA

## 2. 研究目的

私 は 以 前 よ り VR(Virtual Reality) や AR(Augmented Reality)に興味があり、画像解析 によってユーザーと仮想空間上の位置座標を同期 させる研究や、VR ソフトウェアの開発などを行っ てきた。その過程で、VRやARなどで見えている 仮想物体に手を伸ばしたとき、物体に触れたかの ような感触を得られれば、ユーザーの使用感が高 まり、応用性が広がるのではないかと考えた。同 様の目的を達成する既存の製品として、着脱式の 手袋型のものがある。しかし、この製品は、使用時 に圧迫感を与えたり、複数人での使用が難しいな どの課題を持つ。そこで私は、何も装置などを身 につけることなく、手をかざすだけで触れた感触 を感じられる装置を開発したいと考え、身の回り にありふれている「空気」の活用に着目した。本研 究では、「空気」の振動現象である「音」が物体を 押す力を利用して、非接触で触覚(圧力)を提示する システムの開発を目指す。具体的な手法として、 遅延時間を利用した位相制御によるフェーズドア レイシステムの実現を予定している。また、活用 する音には超音波を選択した。

## 3. 研究手法

## 3. 1 システム構築

## (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「音響放射 圧」が発生し、音の進行方向に物体が押される。こ の現象を利用して、空間上で圧力を提示できると 考えた。得られる音響放射圧は以下の式で表され る。

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

P[Pa]:音響放射圧

a:物体によって決定する係数

 $E[J/m^3]$ :音響エネルギー密度  $I[W/m^2]$ :音響インテンシティ

p[Pa]: 超音波の音圧 <math>v[m/s]: 音速

ρ[kg/m³]: 媒質の密度

関係式より、音響放射圧は音圧に依存しており、 触覚提示を行うには音圧を上げる必要性があるこ とがわかる。また、以下の3つの理由から、本研 究に適した音源として、超音波を選択した。

① 指向性が高い

→意図した方向に音が伝搬し操作しやすい。

② 高周波

→エネルギーが高い。

## ③ 聞こえない

→使用時に騒音などの問題がないため、 ユーザーに音源の存在を認知させない。

#### (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、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。振動子は SPL (Hong Kong) Limited 社製の UT-1007-Z325R(中央周波数 40kHz±1kHz)を用いた。振動子アレイ(以下、アレイ)は自作し、計 72ch を最密構造で配列した(図1)。

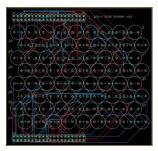




図1:振動子アレイの回路設計図と実物

振動子の発振は intel 社製の FPGA 評価ボード DE10-Nano を用いた(図 2)。図 3 にシステム概要 を示す(図 3)。



図2:DE10-nano

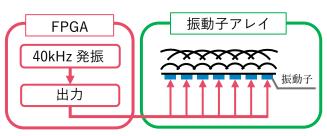


図3:システム

### (3) 検証実験 | 圧力提示

# 【手法】

アレイの正面に付箋をかざし、動きの変化を見て物体への圧力提示が実現できているか検証した。

#### 【結果】

付箋は動かず、一切変化は見られなかった。

## 【考察】

超音波は出力されているにも関わらず、付箋が動かなかった理由として、すべての振動子を同位相で発振したことで波面が平面になってしまい、十分な音響放射圧が得られなかったと考えられる(図 4)。

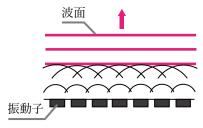
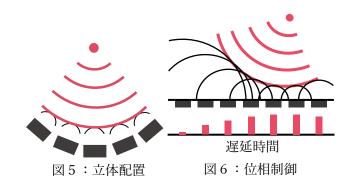


図 4:音の伝搬モデル

## (4)音圧の焦点化

前述したとおり、音を出すだけでは波面が平面となってしまい、音圧が分散することが分かった。高い音圧を限定的な範囲でのみで得るためには、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つの手法を考えた。

## 【手法1】振動子の立体配置



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手法を考えた(図 5)。しかし、 この手法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

手法 1 の問題点を解決するために、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手法を考えた(図6)。この手法は、位相差を生み出すための遅延のつけ方により、任意の座標で焦点化することが可能となるため、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。将来的な展望もふまえ、焦点位置を用途に応じて変更できる手法2を採用した。

### (5)位相差計算

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。

$$w_i = rac{D_i}{\lambda}$$
  $W:$ 波数  $i:$ 振動子番号  $\lambda$   $[m]:$ 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であり、これが位相差となる。

次に、この計算式を導入した遅延計算シミュレーターを Unity を用いて自作した(図 7)。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ため、焦点位置を変更した場合の各振動子の遅延時間の算出が容易にできる。

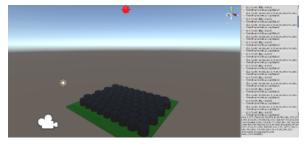


図7:シミュレーション画面

## (6)位相差の制御

上記で求めた位相差を信号処理として実現するために、カウント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、半周期分のクロック数をかさましすることで任意に位相を制御することができる(図 8)。実際に波形の様子をオシロスコープで計測した結果が以下である(図 9)。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。

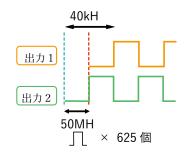


図8:位相制御ロジック

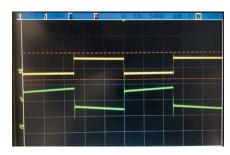


図9:オシロスコープの画面

#### (7)位相制御を適用したシステム概要

以下に位相差計算と制御を組み合わせたフェーズドアレイの処理フローを示す。まず、前述した自作シミュレーターで遅延時間を算出した。その後、FPGA内で遅延時間を元に位相制御を行い、アレイに出力する手法を採用した(図 10)。なお、シミュレーションでは実際にアレイ上に配置されている振動子 72ch 分の遅延データを生成し、FPGAに適用した。

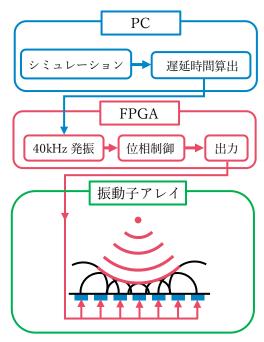


図10:音の焦点化システム

## 3. 2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いるかを検証した。

#### 【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た。

#### 【結果】

焦点で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(図 11)。 焦点位置を別の場所に変更しても同様の結果が得られた。

## 【考察】

アレイが平面であるにもかかわらず任意の点に 音圧を焦点化することができた。構築した遅延時 間による位相制御が正しく機能していることがわ かった。

## (2) 検証実験2 | 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。2 つの手法を用いて音圧分布 を測定し、評価を行った。

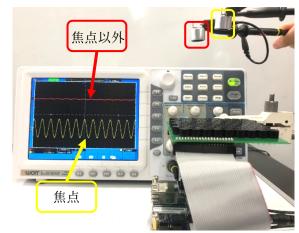


図 11:実験の様子とオシロスコープの画面

## 【手法】

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(図 12)。縦 横 1cm ずつマイクロフォンをずらしていき、合計 231 箇所で電圧波形の絶対値の最大値を計測した。 条件を変えて同様の操作を計 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】



図 12: 実験風景

結果をわかりやすくグラフにまとめたものが以下のものである(図 13)。

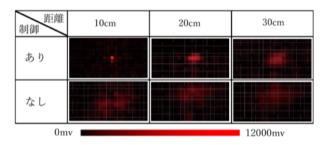


図 13: 音圧分布

## 【考察】

実験結果より、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った。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 とが原因であると考えられる。また、この時点で は触覚は感じられず、付箋の移動もできなかった。 原因として、信号電圧の低さがあると考えた。

## (3)検証実験3 | オペアンプによる信号増幅

検証実験 2 では電圧の不足により物体を押すほどの十分な音圧を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増幅回路(図 14)を自作した。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。一連のシステムの概要を以下に示す(図 15)。



図14: 増幅回路の実物と基板設計図

## 【手法】

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。

## 【結果】

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(図 16)、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ぶ現象が確認できた(図 17)。

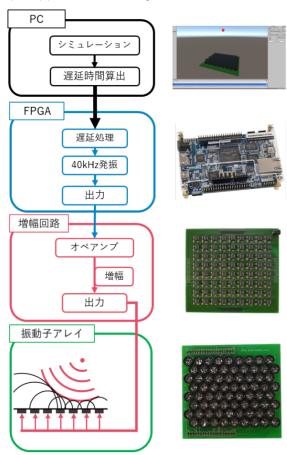


図 15:システムの概要

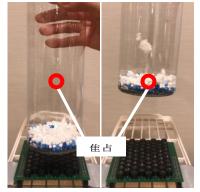


図 16:焦点以外 図 17:焦点

## 【考察】

超音波で軽量物の変形、移動に成功するととも に、任意の位置で圧力を提示することができた。

## (4) 検証4 | 音圧分布の測定

音圧分布を計測し、装置の評価を行った。

# 【手法】

測定用のマイクロフォンを 4cm ずつ間をあけて 7 個並列にならべたものに対向するように本装置 を設置した。焦点距離は100mm,200mm,300mm, 焦点なしの4つパターンを設定し、アレイの中央 に焦点を結ぶものとした。アレイから遠ざかるよ うにして5cm ずつマイクロフォンの位置をずらし、 音圧を測定した(図 18)。マイクロフォンからの信 号はマイクロフォンアンプで増幅後、オーディオ インターフェースで A/D 変換を行い PC 上で 38kHz~42kHz のバンドパスフィルタをかけて音 圧をデータ化した。なお、測定用マイクロフォン はSony ECM-88B、マイクロフォンアンプには Thinknet MA-2016C、オーディオインターフェー スは RME Fireface UFX を使用した。実際の様子 が図19である。この検証実験は立命館大学の西浦 教授の協力のもとで行った。

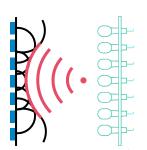




図 18: 測定手法のモデル

図 19: 実験風景

#### 【結果】

結果のグラフを以下に示す(図 20-21)。図 20 は 増幅回路なしで測定を行ったもので、図 21 は増幅 回路ありで測定を行ったものである。グラフの上に記載されている長さはアレイから焦点までの距離(100mm,200mm,300mm)を表しており、無制御は位相制御なしの場合を表している。縦方向の目盛りはアレイからの距離を、色は音響レベルを表している。グラフは gnuplot で作成した。

#### 【考察】

結果より、超音波の集束が点ではなく線状になる様子が確認された。これは、アレイの面積が小

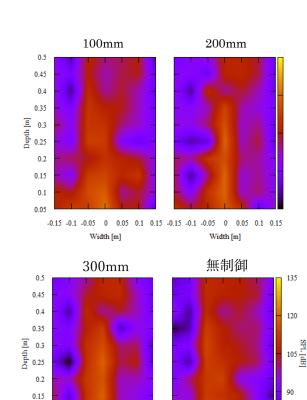


図 20: 増幅器なしでの音圧分布グラフ

-0.15 -0.1 -0.05 0 0.05 0.1 0.15 -0.15 -0.1 -0.05 0 0.05 0.1 0.15

0.1

0.05

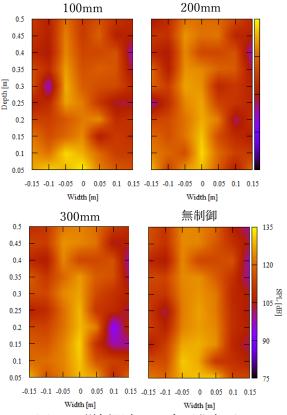


図 21: 増幅器有での音圧分布グラフ

さいため超音波の集束の過程で焦点地点でなくと も焦点と似た状態が形成されることが原因であり、 理論的な予想と合致している。また、焦点位置が 理論値より手前に観測されたが、ハードウェア作 成時の誤差や計算式の簡略化によるものと考える。

# 3.2 触覚の実現

#### (1) 触覚提示

これまでの実験で、物体に対して圧力を提示し、変形・移動を行うことは実現できていたが、触覚の提示に関しては実現できていなかった。これは人間の肌が音響放射圧で常に一定の力で押されているため、通常状態からの変位がわかりにくいということに起因していると考えた。そこで、常に圧力を提示するのではなく超音波を変調させて出力することで周期的に(緩急をつけて)圧力を提示し、振動刺激を与えることで触覚を知覚させることを試みた。

## 【手法】

超音波を変調させて(約 160Hz)出力し、手をかざして触覚を感じるかを自身及び指導教員で検証した。

## 【結果】

焦点で振動刺激を感じた。ピリピリとした感触があった。

#### 【考察】

触覚を再現することはできたが、明確に変調周 波数がどのくらいであれば触覚を感じやすいかな どはわかっていないため、今後検証する必要があ る。

### (2) ホログラムディスプレイとの連携

触覚の提示を行うことができたため、空中映像 表示素子であるパリティミラーを用いて操作時に 触覚を得ることのできるホログラムコンテンツを 作成した。

## 【手法】

LeapMotion というセンサーを用いて手の形状 および位置座標を取得し、現実空間でのホログラムと手の位置座標状態を図 22 のように仮想空間 上に再現した。そこで、ユーザーがホログラムに触れた際に触覚を形成した(図 23)。

### 【結果】

ホログラムに触れた際に触覚を感じた。ただホログラムを制御するよりも操作感があった。





図 22:仮想空間

図 23:操作している様子

## 【考察】

実体のないものに対して触覚を持たせることで より直感的に UI などを操作できるようになった。

## 4. 結果と考察

本研究により、以下のような結果が得られた。

- ・波数差から位相差を算出することで超音波を集束する一連のシステムの構築ができた。
- ・平面配置のスピーカーで位相制御を行うことで、 任意の場所に焦点を形成できた。
- 軽量物であれば移動、変形させることができた。
- ・触覚の提示に成功した。
- ・単一のスピーカーアレイのみでなく複数個のアレイを使用することでより限定的な範囲に超音波を集束させ、より精度を高められる可能性が見いだせた。
- ・増幅回路の冷却装置を作成することでより長時間の装置の稼働が実現できた。
- ・焦点を連続的かつ滑らかに移動させることで、 物体の移動や流速を生み出すことが見いだされた。

# 5. 今後の展望

本研究で開発したシステムの応用例として、以下のような場面での汎用を期待したい。

- ・触覚付きホログラムの開発と目の不自由な方向 け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、工業的場面で触れないものを音で操作する。

本研究では平面のアレイであるにもかかわらず 超音波で非接触に圧力および触覚を提示すること ができたが、実用するには精度や汎用性が不十分 である。今後はソフトウェアやセンサーなどと組 み合わせることで応用方法を探っていきたい。

# 6. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、装置の評価実験にご協力いただいた立命館大学の西浦教授および、研究予算の援助を賜りました THK 株式会社様にこの場を借りて深く御礼申し上げます。また、顧問の藤野智美先生に多大なご指導を賜り、同研究会のメンバーにも多くの助言をいただきました。御礼申し上げます。

### 7. 参考文献

[1]「改訂 物理基礎」,東京書籍,平成30年 [2]小林優 「改訂2版 FPGAボードで学ぶ 組 込みシステム開発入門」,技術評論社