

## 検証実験 1：音圧の焦点化の測定

①任意の座標における音圧の焦点化  
遅延処理による位相制御システムを実装後、受信波形の振幅を観測し、焦点形成がなされているかを確認した。

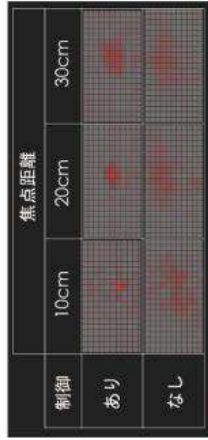


- ・振動子の最密配置により、明確な焦点形成に成功した。
- ・立案した遅延時間を用いた位相制御の有用性が確認された。

### 遅延処理による位相制御に成功

## ②平面領域での音圧分布の測定

振動子アレイ(アレイ)の前面で受信機を一定速度で動かして、超音波の集束分布を測定した。受信機の稼働には、X-Yレコーダー（関数波形記録計）を活用した。



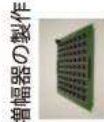
測定位置：アレイから10cm、20cm、30cmの平行面

- ・位相制御ありの場合、アレイから10cmの面で精度よく集束する。
- ・アレイと受信機の距離が離れるほど音圧が分散する。

▶受信機までの距離が離れたことで指向性が低下

### 平面領域での音圧の焦点化に成功

### 物体移動・触覚提示には音圧が不足

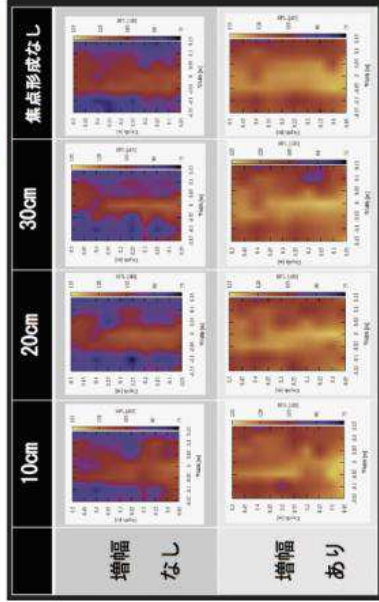
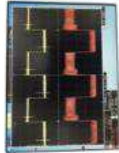


## 検証実験 2：音圧増加の測定

### 垂直面での音圧分布測定

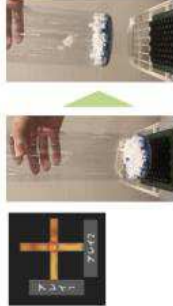
実験協力：立命館大学情報理工学部 西浦 敬雄 教授

増幅器を自作し、72個の全ての振動子の信号増幅を行ったところ、音圧の増幅が確認できた。そこで、7chの広帯域マイクロフォンを用いて電圧値 (V) を計測後、音圧レベル(dB)を算出することで音圧の空間分布を測定した。



位相制御ありの場合、超音波の集束が点ではなく線状に分布する。

▶アレイを複数配置することで、より強い焦点を形成できる。



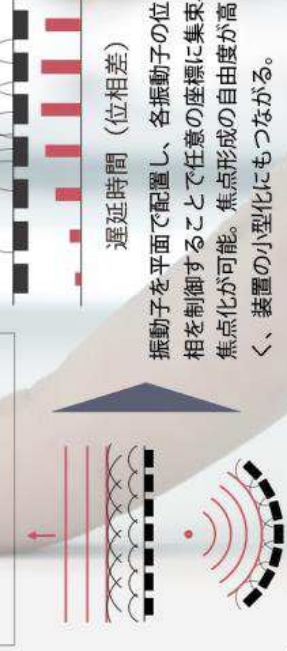
音圧の増幅に成功し、物体の移動や手で体感できるレベルでの触覚提示が実現できた。

私は以前より、VR(Virtual Reality)や AR(Augmented Reality)に興味があり、見えていない仮想物体に手を伸ばしたとき、触れた時の触覚を得たいと思うようになった。既存の製品として、着脱して使用する手袋型のものがあるが、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もつ。そこで、「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)を提示する装置および制御システムの開発を目指す。

## 位相制御①

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

$p$  [Pa]: 音響放射圧  
 $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: 媒質の密度  
 $v$  [m/s]: 音速  
 $a$ : 物体係数



## 位相制御②

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

$W$ : 波数  
 $\lambda$  [m]: 波長  
 $D$  [m]: 焦点と振動子の距離  
 $i$ : 振動子番号

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焦点化するための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、波数差を計算の処理を簡易化した。

$$0.5 \text{ 個} \times 25 \mu\text{s} = 12.5 \mu\text{s}$$

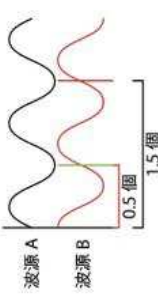
波数差

40kHz 12.5個  
40kHz 12.0個

遅延時間

## 位相計算ソフトの開発

位相差を求めるシミュレータを Unity で作成した。位相制御②のロジック改善  
波数差が 1 以上の数値で算出される場合、位相差の算出に必要な情報は実質小数部分のみである。そこで、シミュレーションでは小数部分を抜き出し、位相差を算出する処理を軽減して実装した。

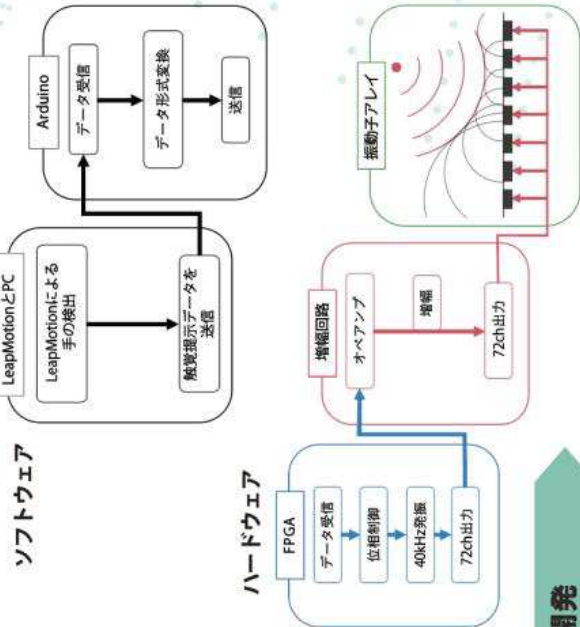


## 超音波を用いた非接触触覚提示装置

奈良女子大学附属中等教育学校 5年 ●●●●●  
指導教諭 ●●●●●



## ▲システム開発の概要



## 増幅回路の開発

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、増幅回路を作成した。動作中にオペアンプが発熱するため、ヒートシンクを用いて冷却を行った。



専用基板

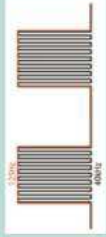
専用基板での最密配置

Arduino

配置密度が低いことによる音圧の分散を避けるために、専用基盤の設計、実装を行い振動子 72 個を最密配置した。また、多数発振を実現するために、FPGA(Field-programmable gate array)を用いた。

## 触覚提示に向けた開発

①手が触覚を感知するための信号処理  
人間の肌の感覚器官は、変化の少ない一定の音響放射圧を提示しても、刺激として感知できない。一定時間ごとに発振器の出力を ON・OFF することで、肌が感知できる周波数の振動を作りだし、振動によって刺激を感知させる。今回の実験では、私がかつとも触覚を感じた125Hzを採用した。(変調周波数の実現)



## ②焦点位置の制御

手をかざす場所が変化したとき、焦点位置が可動であることが必要となる。その際、焦点と各振動子の距離が変動するため、各振動子の初期位相を変更する必要がある。そこで、以下のシステムにより焦点を可動にした。

- ・221個の焦点に対する初期位相をあらかじめFPGAに保存する。
- ・焦点位置が変化したとき、保存した初期位相データを検索し、72ch分の情報をまとめて取り出す。



## 開発したシステム

1. 人が手をかざす位置に、仮想物体としてのホログラムを設定する。
2. 1の位置に手をかざすと、トラッキングセンサ「Leap Motion」が手を感知して、センサとの相対距離を取得する。
3. 2の結果、ホログラムに触れていると判断された場合、FPGAに事前に保存された初期位相データを呼び出す。
4. 変調周波数の焦点を形成する。

## 応用

本装置は振動子アレイの面積が小さいため、焦点形成可能な範囲に限られている。そこで本装置をLMガイドなどのレールに設置し、連携して動作させることで焦点形成範囲をより広げることができる。細かい焦点の位置調節は位相制御で行い、大きな移動を伴う場合はレールでの制御を行う。ことで焦点形成範囲を拡大することができる。



## 考察と今後の課題

- ・本研究により、波数差の考え方から位相制御することで遅延時間を算出し、超音波を任意の点に集束させるシステム開発ができた。
- ・自作のシステムを活用して簡易な圧力提示や物体の移動が実現できた。
- ・課題として、**増幅回路の見直し**が挙げられる。現在のオペアンプでは熱の発生が大きいため、可動のための小型化に限界がある。そこで**FETの活用**を試みる。
- ・また、現状のシステム開発の発展として、以下の研究を予定している。

- ①振動子の数を増やし、音圧の振幅を増加させることに加え、2面のアレイでの焦点形成を目指す。
- ②多数の被験者が**触覚を感じやすい周波数の割り出し**を行う。
- ③超音波で実現できる**段階的な圧力提示**を探索する。
- ④MRやVR画像への触覚提示、ホログラムを使った3Dボタンの制御など、用途に応じた焦点位置の制御を実現する。

・触覚提示に加え、**定常波としての利用**を模索する。

例：非衛生的物体や危険物を空中で操作する

## 参考文献

- ・「改訂 物理」, 東京書籍, 平成31年, P158-165
- ・小林優「改訂2版 FPGAボードで学ぶ 組みみシステム開発入門」技術評論社
- ・西山雄太, 星貴之, 鳥越一平, 「空中超音波触覚ディスプレイに伴う気流の研究」, JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2010