

非接触型触覚情報出力装置の開発

6年B組 望月 草馬
指導教員 藤野 智美

1. 要約

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、剛体との接触を伴うことなく空気中において触焦点化を出力することを目指した。その実現方法として、多数の振動子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、液体や軽量の物体に対して触らずに力を与えることができた。また、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、音響放射圧、FPGA、触覚

2. 研究の背景と目的

私は以前より、Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR)、Mixed Reality (MR) といった XR コンテンツや技術に興味があり、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、XR コンテンツにおいて、仮想物体などに手を伸ばしたとき、物体に触れたかのような感触を得ることができれば、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。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た。また、研究を進めていく過程において、非接触における触覚提示を実現することで感染症対策を通じた次世代の情報提示・操作デバイスを開発したいと考えた。本研究では、「音」が物体を押し力を利用して、非接触で触覚(圧力)を提示するシステムの開発を目指した。

3. 研究内容

3. 1 音の焦点化の実現

「音響放射圧」を「音の焦点化」によって空気中に集束させることで任意の座標に音の高エネルギー場を生成しようと考えた。

3. 1. 1 音響放射圧

音の進行を物体が遮ると、物体が音の進行方向に押されるという現象であり、理論式は以下のように示される。

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

P [Pa]：音響放射圧
 a ：物体によって決定する係数
 p [Pa]：超音波の音圧
 v [m/s]：音速
 ρ [kg/m³]：媒質の密度

3. 1. 2 音の焦点化

単一の振動子から出力される音響放射圧は微弱であるため、各振動子の位相を制御することで任意の座標において音の高エネルギー場を生成しようと考えた(図1)。

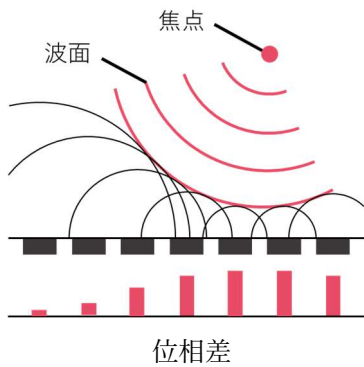


図 1 : 焦点化のイメージ

3. 1. 3 システム概要

以下に位相差計算と制御を組み合わせた自作ソフトウェアと装置の概要を示す(図2)。

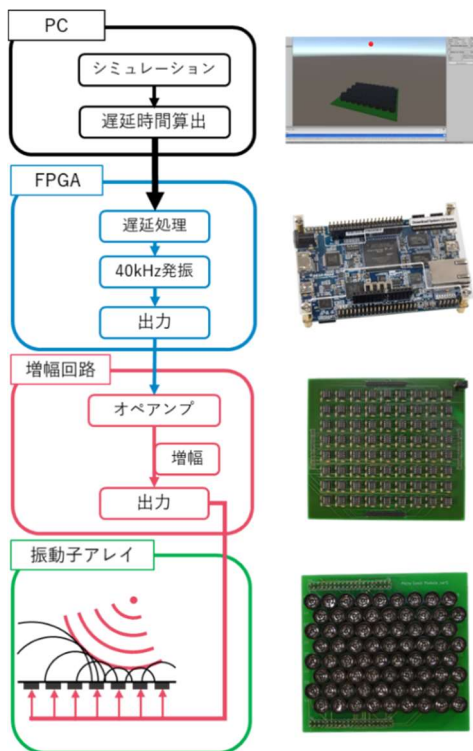


図 2 : システムの概要

3. 1. 4 性能評価実験

作成した装置によって発生する音圧の分布を計測することで性能評価を行った。また、音圧分布は振動子アレイに対して平行面と垂直面の二つを計測した。

<平行面音圧分布>

【方法】

XYレコーダーのペン位置に3Dプリンターでアダプターを作成してマイクロフォンを取り付け、オシロスコープと接続した(図3)。縦横1cmずつマイクロフォンをずらしていき、計231箇所での電圧波形について、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(1386箇所)測定した。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を計測した。

【結果】

結果をわかりやすくグラフにまとめたものが以下である(図3)。

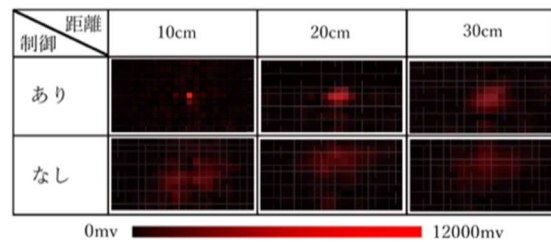


図 3 : 音圧分布

<垂直面音圧分布>

【方法】

測定用のマイクロフォン7個に4cmずつ間をあけて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つのパターンを設定し、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4)。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。実際の実験の様子が図 4 および図 5 である。この検証実験は立命館大学 情報理工学部の西浦教授の協力のもとで行った。

【結果】

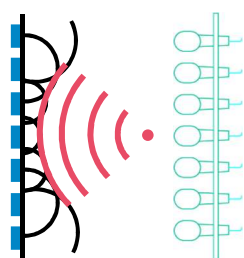


図 4：測定イメージ



図 5：実験風景

結果のグラフを以下に示す(図 6、図 7)。図 6 は増幅回路なしで測定を行ったもの、図 7 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】

いずれの実験も超音波が集束していることを確認することができた。また、垂直平面音圧分布で線状に集束している様子が確認できるが、これは超音波が徐々に集束していくためである。

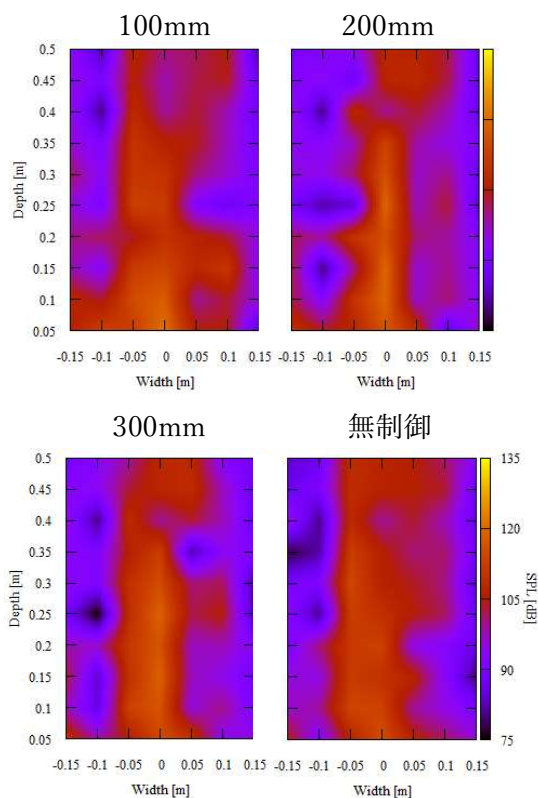


図 6：音圧分布グラフ (増幅器なし)

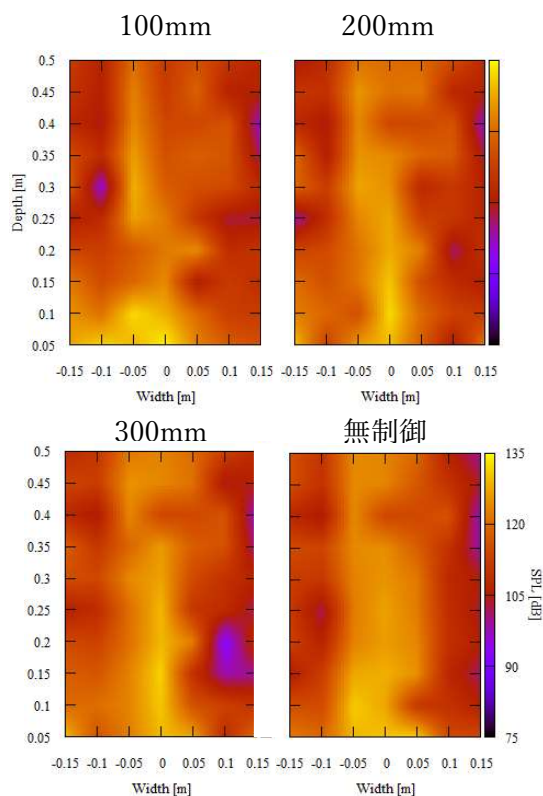


図 7：音圧分布グラフ (増幅器あり)

3. 1. 5 触覚情報出力の実現

人間が感じている「触った感触」というのは、圧力そのものを感知しているのではなく、圧力の変位を読み取っているのではないかという仮説を立てた。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触覚刺激を提示しようと考えた。実際にホログラムコンテンツと組み合わせて触覚提示を行ったものが以下である（図 8、図 9）。なお、手の形状認識には LeapMotion を使い、空中映像表示素子にはパリティミラーを用いた。



図 8：仮想空間

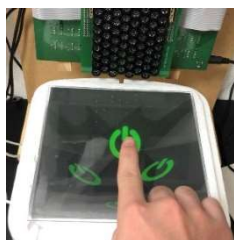


図 9：操作の様子

【結果】

ホログラムに触れた際に触覚を感じた。ただ単にホログラムを制御するよりも操作感があった。また、数時間の使用で出力が大幅に落ちることが分かった。

【考察】

ホログラムとの連携に成功したが、装置の耐久性に難があることが分かった。よって、装置の設計の見直しが必要であると考えた。

3. 2 装置の再設計

作成した装置の各部分を調べたところ、増幅回路が損傷し、著しく出力が低下していたことが分かった。また、以前から装置全体の大きさや、耐久性に問題があったことから、旧来の設計を見直すこととした。

3. 2. 1 増幅回路

これまでの増幅回路にはオペアンプを用いてきた。しかし、オペアンプは主にアナログ信号の増幅を行うものであり、デジタル信号で出力を行う本装置には適さないのではないかと考えた。そこで、増幅回路に H ブリッジ回路を利用することで以前の装置よりも大きさを小さくし、出力を大きくできると考えた。

【方法】

H ブリッジ回路に 40KHz の信号を入力し、その波形をオシロスコープで観察した。H ブリッジ回路には DC モータードライバの L293D を、またインバータには TC74VHCT04AFT を用いた。モータードライバの電源電圧は 20V を印加した。なお、発振器には FPGA 評価ボードの DE0-NANO を用いた（図 10）。

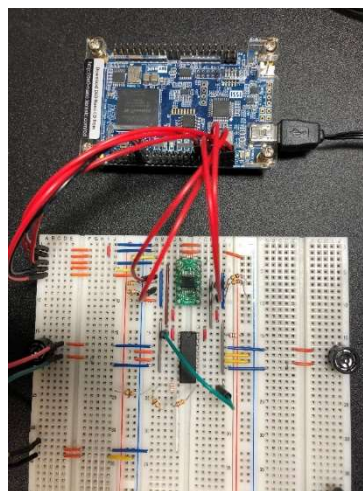


図 10 改善した増幅回路

【結果】

直流電源 20V からピークピーク値 40V の 40KHz 信号を取り出すことができた（図 11）。

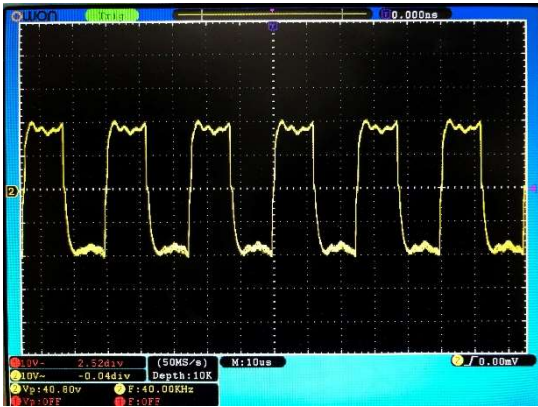


図 11：増幅の改善

3. 2. 2 振動子アレイ

振動子を 72 個から 80 個に増設し、アレイ基板の形状を円にすることで基板空間の拡充を図った (図 12)。

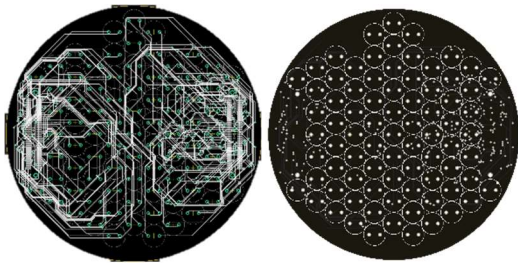


図 12 基盤設計の様子

3. 2. 3 FPGA との通信モジュール

これまでの FPGA との通信は、独自規格のものを開発して利用してきた。しかし、通信の確実性や速度、汎用性に欠けていたため、より一般的に普及している I2C 通信モジュールを FPGA 内に構築した。これにより、I2C 通信をおこなうことができる機器であれば簡単に本装置が動作可能となる可能性が見いだせた。また、Xbee を用いることで FPGA との通信の無線化を実現できた。

3. 2. 4 システム概要

現在開発中の装置のシステム概要は以下の通りである (図 13)。

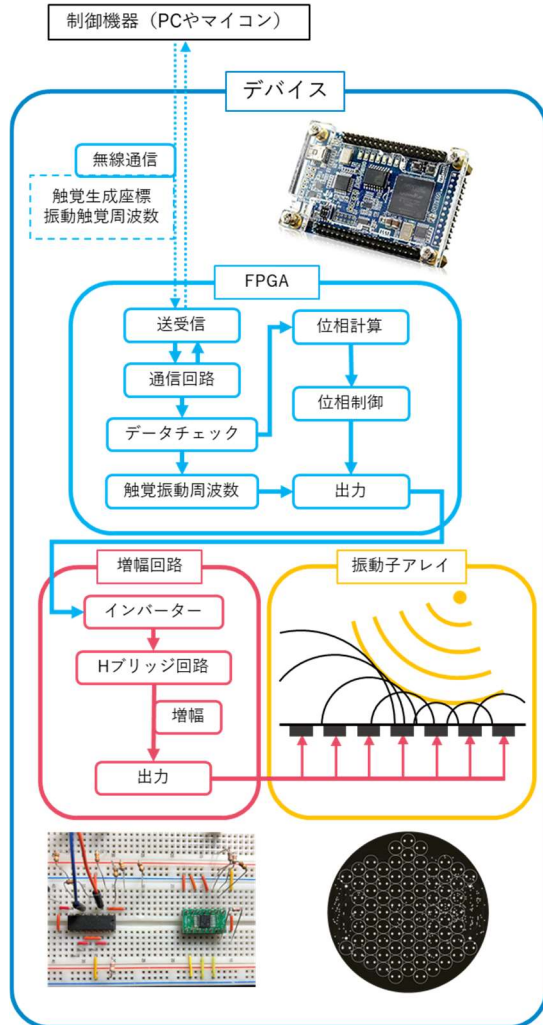


図 13 開発中のシステム概要

4. 結果と考察

本研究から、以下の結果が得られた。

- ・波数差から位相差を算出することで、平面配置のスピーカーでの超音波の集束を可能とするシステム構築が実現できた。
- ・空气中で圧力や触覚提示を実現できた。
- ・ホログラム技術との併用により、ホログラムに触った感触を生み出すことに成功した。

5. 今後の展望

図 13 で示したシステムを作成し、空気中の音圧分布や触覚提示強度について計測を行いたい。また、MR や VR 技術と組み合わせたシステムを構築し、利便性を向上させるだけでなく、昨今の感染症対策で需要が高まりつつある非接触情報提示デバイスの未来の一つの形として完成させていきたい。

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情報理工学部の西浦教授および、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。この場を借りて御礼申し上げます。

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 組み込みシステム開発入門」, 技術評論社
- [3] 佐野元昭 「空中超音波の音響放射圧」, 医用工学部研究論文