

# 超音波を用いた非接触型感覚入力モジュールの開発

4年C組 望月 草馬

指導教員 藤野 智美

## 1. 要約

本研究では、超音波フェーズドアレイシステムの構築による超音波振動子(以下、振動子)の制御に取り組んだ。この研究では、単一の振動子による微小な音響放射圧を空間上に焦点化することで、何も無い空間に触覚を作り出す「非接触型感覚入力モジュール」を作ることを目指す。多数の振動子の位相を制御かつ出力するために、集積回路 FPGA(Field Programmable Gate Array)を活用し、クロック周波数 50MHz を振動子の周波数 40KHz に適用するシステムの開発、および振動子の位置に応じた位相差の算出結果を 72 個の振動子に適用したところ、音響放射圧を特定の場所で焦点化することに成功した。

キーワード 超音波、フェーズドアレイ、音響放射圧、FPGA

## 2. 研究の背景と目的

私は、以前から VR や AR、MR に興味を持ち、画像認識システムやアプリケーションの開発に取り組んできた。しかし、これらのシステムは基本的に視覚情報しか伝えることができない。そこで、それらのデバイスに表示される仮想物体に触覚を持たせることでさらに利便性を高めることができるのではないかと考え、研究を開始した。医療で結石などを破碎する手法として超音波が用いられていることから、これを利用し、触覚を刺激しようと考えた。加えて、MR や AR 技術と組み合わせることや障害者の方々の補助インターフェースの開発を目指している。

## 3. 研究内容

### 3. 1 音響放射圧

超音波の進行を物体が遮ると、その物体表面の超音波の進行方向に音響放射圧という力が働き、その利用により、触覚を刺激することができる。音響放射圧は以下の式から求めることができる。

$$P = aE = a \frac{I}{v} = a \frac{p^2}{\rho v^2} \quad (1)$$

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

(1)式より音響放射圧は超音波の音圧によって変化することがわかる。

### 3. 2 フェーズドアレイ

3.1 で述べたように、音響放射圧は超音波の音圧によって変化する。しかし単一の

振動子からの音圧は非常に小さいため、音響放射圧も非常に微弱なものとなってしまふ。そこで、より大きな力を得るために多数の振動子の位相を制御することによって空中に焦点(音響放射圧の集中する点)を作る(図1)。



(図の●の点で強め合う)

図1

この手法により接触状態で任意の場所に音響放射圧を発生させることができる。各振動子の位相は、式(2)で示される波数を算出し、その差を用いて位相差を実現した。

$$w_i = \frac{D_i}{\lambda_i} = \frac{D_i}{vT} = \frac{D_i f}{v} \quad (2)$$

$w$ : 波数       $i$ : 振動子番号  
 $D[m]$ : 振動子から焦点までの距離  
 $\lambda[m]$ : 波長     $v[m/s]$ : 音速  
 $T[s]$ : 周期     $f[Hz]$ : 周波数

(2)式を活用して位相を制御する。

### 3. 3 振動子制御

#### 3. 3. 1 超音波の発振

まず、超音波の発振システムを開発した。安価な理由から、振動子は周波数が40kHzのUT1007-Z325Rを用いた。

##### (1) Arduino Uno の利用

最初に Arduino で、40kHz の矩形波の発振を行い、振動子制御が可能かどうかを調べた。

<方法>

Tone 関数を用いることで周波数 40kHz を指定し、オシロスコープで 40kHz の矩形波が出力されているかを確認した。

<結果>

波形は図2のようになった。ややノイズがあることや、立ち上がりが遅いことがわかる。なお、複数端子での発振も試みたが、系統的に不可能であり、出力端子数が足りないということが課題となった。

<考察>

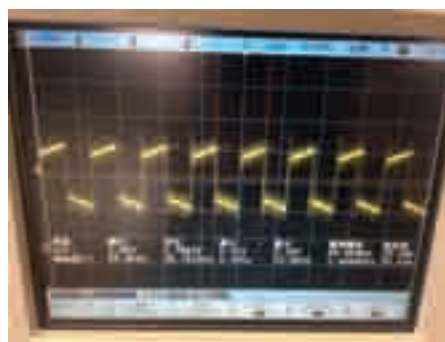


図2

Arduino は超音波の発振時、単一の振動子のみを用いる場合には問題がないが、多数の振動子1つ1つを同時に制御する用途には向かないことがわかった。

##### (2) FPGA の利用

端子数の不足を補うため、FPGA(Field Programmable Gate Array)に注目した。FPGA には2つの利点がある。1つ目は並列処理が得意な点である。Arduino 等のマイコンのように、既存の回路で処理を行うのではなく、回路自体を使用者が選択できるため、多くの処理を同時に処理するような回路も実現可能となる。2つ目は、種類が豊富かつ出力端子数が100以上のものも存在する点である。以上の利点から、

FPGA での超音波の発振を試みた。

<方法>

今回私が用いた FPGA(DE10-NANO)のクロック周波数は 50MHz であるため、振動子の対応周波数である 40KHz に分周させる必要がある。そこで、以下の処理を行い、50MHz を 40KHz に変換した。

- ① FPGA のクロックが立ち上がる度にカウンタ変数を加算していく。
- ② FPGA のクロック周波数(50MHz)の一周期は 20ns、40KHz の一周期は 25000ns。つまりカウンタ変数の値を  $\frac{25000}{20} = 1250$  カウントしたときが 40KHz の一周期となるため、以下のような処理を行う。図 3 はイメージ図である。

カウンタ変数の値 ≤ 625 → 出力 off
625 < カウンタ変数の値 → 出力 on
カウンタ変数の値 > 1250 → 初期化

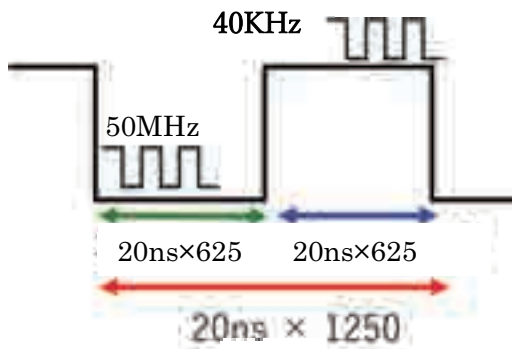


図 3

<結果>

図 4 は FPGA からの出力をオシロスコープで測定したものである。結果から安定して 40KHz 矩形波を出力できていること

がわかる。

<考察>

今回用いた出力端子は一つだが、同様の処理をほかの端子にも同時に行うことができるため、これで、多数の振動子に 40KHz の同位相の矩形波を発振すること



図 4

は達成された。

### 3.3.2 位相制御

次に、40KHz の位相を制御し、FPGA で出力するシステムを考えた。前述したように、今回の研究ではフェーズドアレイを利用する。各出力端子の位相制御をしない場合、図 5 のように振動を弱め合う場合が生じ得るため、集束地点で強め合うように制御する必要がある。

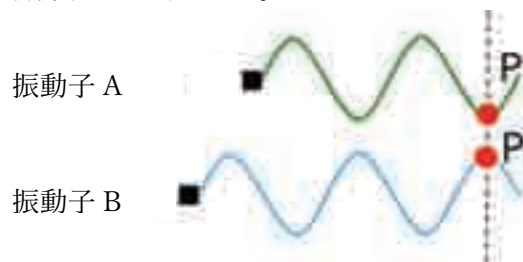


図 5

<方法>

周波数を 40KHz に固定しなければならぬため、発振のタイミングをずらすことによって位相を制御した。以下は振動子 A

と B を発振時に逆位相にする場合の処理方法である。

- ① 40KHz の半周期は  $\frac{25000(ns)}{2}$ 、つまり、12500(ns) である。FPGA のクロック数では、 $\frac{12500(ns)}{20(ns)} = 625$  (クロック) となるため、このクロック数だけ振動子 A の出力に対して振動子 B の出力を遅らせる。
- ② 振動子 B の出力のクロックカウンタ変数を A=0 の場合 B=625 というように代入する。

以上のような処理を行うことで任意の位相差をつけてパルス波を出力することができる。(図 6)

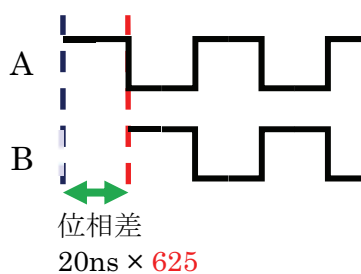


図 6

<結果>

上記の手法を用いて FPGA での位相制御をした結果は以下ようになった(図 7、図 8)。図 7 の波形 a、b はそれぞれ図 6 の出力 A、B の実測値を表しており、位相を逆位相に変換して出力したものである。図 8 の波形 c、d はそれぞれ図 6 の出力 A、B の位相を 1/4 周期ずらしたものに交換し、出力したものを表している。結果より、図 7 はそれぞれが逆位相、図 8 は 1/4 周期ずれて出力されており、位相制御が正確になされていることがわかる。



図 7

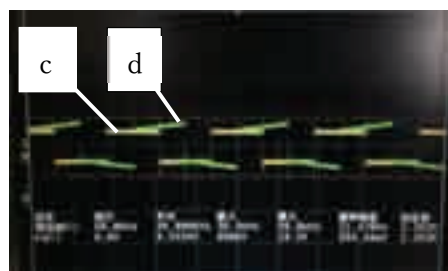


図 8

<考察>

実験で用いた出力端子数は二つだけだが、これをほかの端子にも適用することで多数の振動子の位相制御が可能となる。

### 3. 4 振動子と FPGA の接続

実際に FPGA と振動子を配線した。その後、各振動子の位相差を計算するシミュレータを作成した。そして、FPGA の発振回路に各振動子の遅延時間(クロック数)を適用し、超音波の集束点を作ることができるかを検証した。

#### 3. 4. 1 振動子の配線

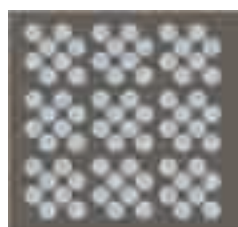
ブレッドボードに 72 個の振動子の配線を行った。この 72 という数字は、今回用いた FPGA の DE10-Nano のユーザー I/O 端子 80 端子(40 端子 × 2)から 3V 電源、5V 電源および GND の端子を除いた数である。実際に配線した様子が図 9 であり、上面から見たものが図 10 である。ブレッ

ドボードはホールの位置が決まっている。そのため、各振動子を少しずつずらし、9つのコロニーを形成させることで配線可能な空間の確保と各振動子の実装密度を高め、図 10 のような配置となった。



72 個の振動子をブレッドボードで配線した様子

図 9



72 個の振動子をシミュレータ上に配置したものを上面から見たもの

図 10

### 3. 4. 2 各振動子の位相差計算

今回使用した振動子は合わせて 72 個ある。今後研究を進めていくうえで振動子の数はより多くなり、全ての振動子の超音波の位相差を求めていくのはより困難である。そこで、ゲーム開発エンジンである Unity を用いて各振動子の位相差を計算し、それを FPGA のクロック数に換算するシミュレータを作成した(図 10)。

<計算フロー>

- ① あらかじめ 3D 空間に配置しておいた集束点座標と全ての振動子の座標を取得。同時に気温の値を考慮し、波長を計算する。
- ② 集束点と各振動子の距離を計算する。
- ③ ②より得られた距離から位相を計算する(3.3.2.を参照)。
- ④ ③より得られた位相から各振動子の遅

延を FPGA のクロック数に換算する。

### 3. 4. 3 FPGA の実装

次に、FPGA の回路設計をした。これまでの実験では最大でも 3 つまでしか出力を同時に行っていなかったため、40KHz の発振および位相制御を行う回路を 72 端子全てに適用した。

<出力フロー>

- ① あらかじめ入力しておいた各振動子の遅延時間を各振動子の発振回路のカウンタ変数へ代入する。
- ② 各端子から 40KHz のパルス波を出力する。

<結果>



図 11 位相制御前

図 12 位相制御

図 11 は全ての振動子が同位相で超音波を出力した時の様子で、図 12 は位相を制御し、超音波マイクロフォンセンサ(以下、センサ)部に超音波の集束点を発生させた際の様子である。オシロスコープはセンサと直列に接続した。オシロスコープの画面から分かるように、センサが同じ位置にあるにも関わらず、同位相での発振と位相調整後の発振では、得られる波形が異なることがわかる。図 11 では位相が異なる波が乱雑に重なり合い、振幅も小さい。そ



れに対して図 12 では波がそろっており、振幅も大きい。

#### 4. 考察

FPGA による多数の振動子への 40KHz の発振回路の構築に成功した。また、位相制御(フェーズドアレイ)による音響放射圧の増幅を実現した。

#### 5. 今後の展望

##### ① 各振動子の発振遅延時間計算の自動化

今回は、自作したシミュレータで計算した値を直接回路に書き込んでいるため、任意の座標へ瞬時に音響放射圧を集中させることができていなかった。実現には外部からの座標を取得し、内部で全てを処理するシステムの構築が必要である。

##### ② 音響放射圧の強化

今回の実験では FPGA の発振出力電圧が低すぎるため触覚などを感じるができなかった。今後、より高い電圧を振動子にかけることによってさらに大きな音響放射圧を得る必要がある。

##### ③ 振動子を実装する専用基盤の作成

今回の研究ではブレッドボードを用いたため、振動子の配置が制限され、配線も複雑した。よって、専用基盤をデザインする必要があると考えている。

#### 6. 参考文献

- [1] 三浦 登, 「改訂 物理基礎」,
- [2] 星 貴之(2014), 「接触作用力を発生する小型超音波集束装置の開発」

(計測自動制御学会論文集 Vol.50, No.7, 543/552(2014)),

[http://star.web.nitech.ac.jp/pdf/2014SICE\\_paper.pdf](http://star.web.nitech.ac.jp/pdf/2014SICE_paper.pdf)

[3] 小林 優, 「FPGA ボードで学ぶ 組み込みシステム開発入門 [Intel FPGA 編]」, 技術評論社

[4] 芹井 滋喜, 「超入門! FPGA スタート・キット DE0 で始める Verilog HDL」, CQ 出版

[5] すすたわり, 「回路図で学べる FPGA 入門 回路図は読める人のための HDL ガイド」, 秀和システム

#### 7. 謝辞

今回の研究を行うにあたり、顧問の藤野先生には多大なご指導を賜りました。また、同研究会の先輩方に多くの助言をいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。