

MEMSマイクアレイを用いたNullビームフォーマー用  
データ収集システムの構築\*

○及川琉斗, 柳田裕隆 (山形大学大学院)

## 1 はじめに

近年, 経費削減や生産性向上の期待による働き方改革により, 遠隔会議を導入する企業が増加している。この遠隔会議システムの問題点として, 機械は全音声をマイクで拾ってしまうため, 話者が複数いたとき発言者の声のみを伝えられないことや, 音が混入して不明瞭な音声になることが挙げられる。

これらの解決策として, 特定方向の感度をゼロにする Null ビームフォーマーの特性を応用してノイズキャンセリングを利用することで, 発言者以外の信号を打ち消すことが可能なことを示した<sup>[1]</sup>。しかし, 従来の研究における狭い範囲に指向性の Null を作る方法では, 雑音の位置推定に誤差がある場合や雑音源が移動した場合に効果が低下することが予想される。

先行研究のシミュレーションから, 話者は会議での発言中に移動することが殆ど無いことを踏まえ, 広い範囲に指向性の Null を持ち, 目標音源の方向で指定された範囲に指向性を持った Wide Null ビームフォーマーが有効である結果が得られた<sup>[2-1]</sup>。本研究では, 実際に実機を製作するに伴うシステム設計・開発と動作確認を行う。

## 2 システムの概要

## 2.1 Wide Null ビームフォーマー数学モデル

受信素子数  $M$  個, 視野分割数  $L$  個として, アレイに対して直角方向を  $0^\circ$  とし, 両方向に  $\theta_L$  の分割をする。レシーバアレイとして  $M$  個の受信素子を位置  $x_{R1}, x_{R2}, \dots, x_{RM}$  に配置し, アレイから十分離れた位置  $x_1, x_2, \dots, x_L$  に音源を配置したときの Wide Null ビームフォーミングについて説明する。Fig.1 は, 本研究で提案された, Wide Null ビームフォーマー

の数学モデルの配置図を表している。

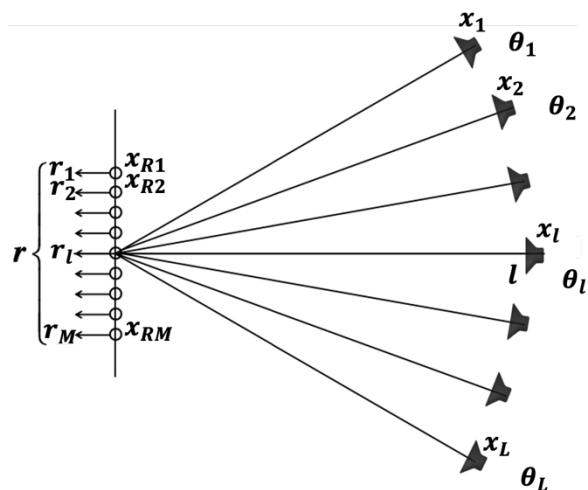


Fig. 1 モデルの配置図

位置  $l$  にある音源が, 周波数  $f$  での複素振幅が  $U(f)$  で表される音響波を放射するとき, 受信波の複素振幅を並べた列ベクトル  $r_l$  は,

$$r_l = U(f)h_l \quad (1)$$

と表すことができる。このとき  $h_l$  は, 位置  $l$  に対するアレイのマニフォールドベクトルであり, (2)式で表すことができる。

$$h_l = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f \frac{|x_l - x_{R1}|}{c}} \\ e^{-j2\pi f \frac{|x_l - x_{R2}|}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j2\pi f \frac{|x_l - x_{RM}|}{c}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

固有空間展開を用いて目的とする  $l$  にビームを向け, それ以外の範囲に Wide Null を作るための重みベクトルを作る方法を挙げる。

Wide Null を作る視野分割範囲を  $1 \leq l \leq L$  とする。この範囲に対応するマニフォールドベクトル  $h_l$  を並べた伝達行列  $H_{NB}$  は, (3)式となる。

$$H_{NB} = [h_1, h_2, \dots, h_L] \quad (3)$$

\*Data acquisition for Null Beamformers using MEMS Microphone Arrays construction, by ○OIKAWA, Ryutô and YANAGIDA, Hirota (Yamagata Univ).

次に、音源に対応する  $k$  個の固有ベクトルを求めるために、相関行列  $R_{NB}$  を計算すると、(4)式となる。

$$R_{NB} = H_{NB}H_{NB}^* \quad (4)$$

この  $M$  行  $M$  列相関行列を固有値分析して、

非負の固有値： $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M$

固有ベクトル： $e_1, e_2, \dots, e_M$

が得られる。固有値は降順になっているものとし、固有ベクトル  $e_1, e_2, \dots, e_M$  は正規直行系を構成する。

$$e_i^* e_j = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

また、固有ベクトル  $e_1, e_2, \dots, e_M$  は、周波数領域での信号やマニフォールドベクトルを展開する”基本の信号”となる(数学では”基底ベクトル”とよぶ)。よって、ある信号を列ベクトル  $r$  で表すと、

$$r = a_1 e_1 + a_2 e_2 + \dots + a_M e_M \quad (6)$$

と展開できる。また、式の展開係数は、

$$a_n = e_n^* r \quad (7)$$

と計算でき、信号  $r$  に含まれる  $k$  番目の基底ベクトルに対応する成分ベクトルは、

$$a_k r = (e_k^* r) e_k = e_k e_k^* r \quad (8)$$

と表す。 $M$  個の固有ベクトルから  $K$  個のベクトル  $e_{s1}, e_{s2}, \dots, e_{sK}$  を選んだ成分のみで信号  $\tilde{r}$  を構成すると、(9)式で表せる。

$$\tilde{r} = \left( \sum_{n=1}^k e_n e_n^* \right) r \quad (9)$$

固有値は多くの場合、Fig.2のような分布となり、 $i$  は受信素子のインデックスを示す。

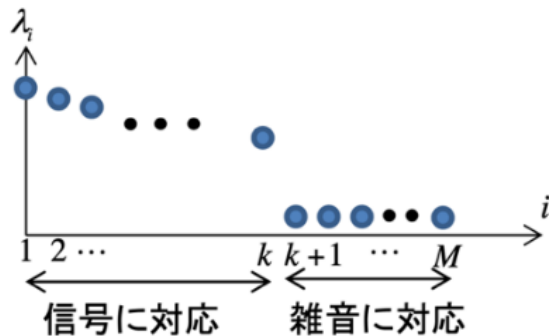


Fig. 2 固有値の分布

## 2.2 Wide Null ビームフォーマーの計算

周波数  $f$  での Wide Null ビームフォーマーは、目的方向  $l$  へのビームフォーマーの重みベクトルを受信データベクトルに対応させることで求められる。

まず、節 2.1 の (11)式を用いて重みベクトルを求めると、(11)式になる。

$$S^*_{NB} = h^*_l \left( I - \sum_{n=1}^K e_n e_n^* \right) (I: \text{単位行列}) \quad (10)$$

これにより、周波数  $f$  での Wide Null ビームフォーマーを求める式は、(11)式で表される。

$$R(f) = S^*_{NB} r \quad (11)$$

## 2.3 性能・シミュレーション

Wide Null ビームフォーマーのノイズキャンセリングを、シミュレーションにより検討する。評価項目は、指向特性における目標方向の利得であり、従来の Null を用いたビームフォーミングを適用した場合との性能に差があるか調べる。

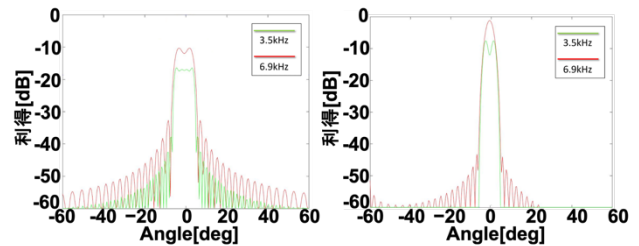


Fig. 3 (左)：適用前 (右)：適用後

Fig.3 に、受信素子数 96 個で構成されたアレイを用いた場合の指向特性を示す。横軸を角度、縦軸を利得とし、周波数 3.5 kHz, 6.9 kHz のときの指向特性である。Wide Null ビームフォーマーを適用することで、従来の Null を用いた(左)図における 3.5 kHz, 6.9 kHz のサイドローブを、(右)図で -40 dB 以下に抑えられた。

この結果以外に、周波数領域 0.3 kHz~7 kHz, アレイ寸法 1 m, 2 m, 4 m, 素子数 32 個, 96 個, 256 個, 受信素子が等間隔配置やランダム配置にした場合のシミュレーションをそれぞれ行い、その範囲内で行った全てのシミュレーションにおいて、良好な結果が得られた<sup>[2-2]</sup>。

### 3 実測データの収集システム

#### 3.1 システムの構成

シミュレーションにより、Wide Null ビームフォーマーを用いたノイズキャンセリングが有効であると確認されたため、実際に実機を製作し、システム構築および動作確認を行う。検討するシステム構成を Fig.4 に示す。

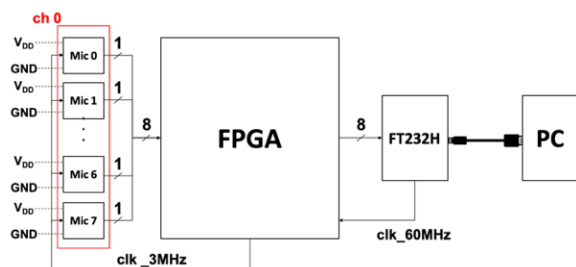


Fig. 4 システムの構成

マイクは、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)マイクを使用する。このマイクは、3 MHz クロックで動作する  $\Delta \Sigma$  変調器が内蔵されており、出力信号は 1 bit のデジタル信号である。Fig.4 で、MEMS マイクを 8 個並べて配置し、0 番目のマイクを Mic0 のように 7 番目の Mic7 まで番号指定している。これらの 8 bit の信号データを、FPGA 基板の入出力信号ピンに接続する。このとき、合計 8 つのピンを使用する。本研究では、8 個のマイクをまとめてチャンネル[ch]と定義している。

また、データ転送用 USB インタフェースとして、FT232H を使用する。これは、8 bit 単位でデータを転送するため、本研究の定義上 1 チャンネル単位で転送しており、データ転送レートは最大 40[Mbyte/s]である。FT232H の 60 MHz クロックを FPGA 基板に同期させ、マイク用のクロックは 3 MHz に分周させる。

#### 3.2 MEMS マイクのステレオ対応機能利用

Fig.4 で説明したチャンネル数を拡張するため、MEMS マイクの最大拡張個数を、FT232H の転送レートから考える。MEMS マイクのサンプリング周波数は 3 MHz、マイクを 8 個ずつ 1 チャンネルの 1 byte(8 bit)として分割転送すると、最大で 36 [Mbyte/s]となる。

FT232H のデータ転送レートが 40[Mbyte/s]であることを考えると、MEMS マイクは最大で 96 個(12 チャンネル)接続可能である。しかし、使用する FPGA の入出力ピン数の接続可

能数が 64 個であることを考えると、最大限の 96 個まで接続することができない。そこで、現在使用している FPGA に MEMS マイクを 96 個まで接続するために、MEMS マイクのステレオ対応機能を利用する。これは、マイクに備えられた L/R 入力端子を利用して FPGA の入出力ピン 1 つに対し、接続可能なマイクの個数を 2 倍にする。Fig.5 のように、偶数番目の L/R に電源、奇数番目の L/R にグラウンドを接続し、隣同士のマイクをペアにする。

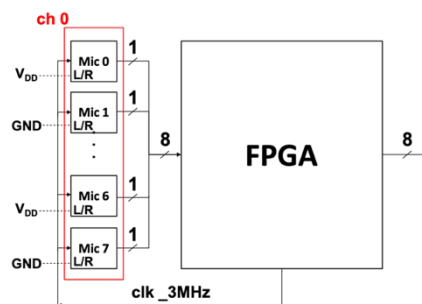


Fig. 5 ステレオ対応機能の構成

Fig.6 で原理を説明する。Mic0・Mic1 をペアにし、FPGA 入出力ピン memsin[0][0]のデータが出力されるまでのタイミングチャートを示す。Mic0 の L/R に電源を接続時、3 MHz クロックの立ち上がりでデータ P0 が有効化され、立ち下がりでハイインピーダンスとなる(電子的に接続がない状態)。Mic1 の L/R にグラウンドを接続時、クロックの立ち下がりでデータ N0 が有効化され、立ち上がりでハイインピーダンスとなる。MEMS マイクの規格上、クロックのエッジから 20 ns の遅延が発生し、その後データが有効化される。また、クロックのエッジから 15 ns の遅延が発生し、その後ハイインピーダンスになる。この遅延時間により、2 つのデータ P0、N0 は干渉せず、交互に有効化される。

これを利用して、2 個のペアマイク信号を FPGA 入出力ピン 1 つに接続し、1 チャンネルあたり 4 つのピンを使用する。

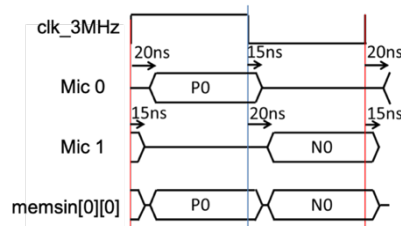


Fig. 6 マイクデータのタイミングチャート

### 3.3 回路シミュレーション

Fig.7 に ch0 のデータのシミュレーション, Fig.8 に FPGA 入出力ピン memsin の 12 チャンネル信号のタイミングチャートを示す。

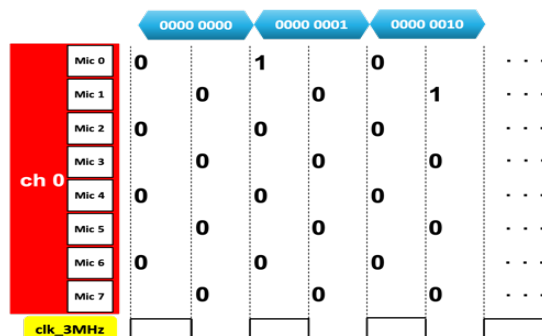


Fig. 7 ch0 のシミュレーション結果

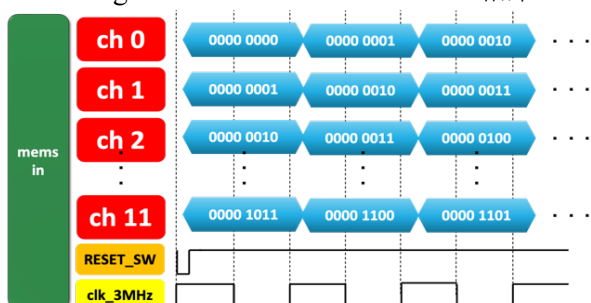


Fig. 8 12 チャンネルのタイミングチャート

Fig.7 おいて, L/R 入力端子の接続により, 偶数番目のマイクはクロックの立ち上がり, 奇数番目のマイクはクロックの立ち下がりに応じてデータが有効になり, ch0 の 8 bit のデータが 1 ずつ増加しながら出力される。

Fig.8 の入出力信号 memsin において, リセットが入力されると各チャンネルの入力データが初期化される。その後, 3 MHz クロックの立ち上がり同期して各チャンネルのデータが 1 ずつ増加していることが分かる。

これにより, シミュレーションで正確にデータが出力されていることが確認できる。

### 3.4 実機での動作確認

本実測では, 試験的に MEMS マイクを 4 つ (Mic0~Mic3) 用意し, スピーカとマイクの距離を 5 cm と近接させた状態で固定する。スピーカからは, 振幅-30 dB, 1000 Hz の正弦波を発生させる。転送されたデータを, PC 上で波形変換する。Mic0 の波形と周波数スペクトルの動作結果を, それぞれ Fig.9, Fig.10 に示す。

Fig.9 は横軸を観測時間, 縦軸を復元値とする。復元波形から分かるように, 理想的な正

弦波の表現には至らなかった。これは, 内部のマイクデータ欠落による転送エラーが起きているため, 乱れた波形が生成されることが考えられる。周波数スペクトルは, 横軸を周波数, 縦軸をパワーとしており, Fig.10 のように, 使用したスピーカから出力した 1kHz ではなく, 1.3 kHz~1.6kHz の範囲でパワーを持つ結果となっている。

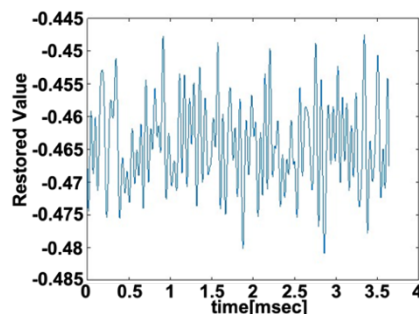


Fig. 9 Mic0 データの波形変換結果

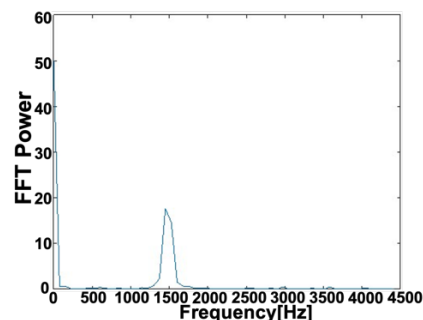


Fig. 10 周波数スペクトル

## 4 おわりに

本研究では, 先行研究とシミュレーション結果から, 実機製作に向けてデータ収集システムの開発を行った。MEMS マイク, FPGA, FT232H を用いた回路を設計し, シミュレーション及び実機で波の復元動作を確認できた。

今後の課題として, シミュレーション上では正常に動作しているが, 実機で波形が乱れる問題の原因の追求と解決が挙げられる。

### 参考文献

- [1] 小池裕太郎, 通過選択性を持たせたノイズキャンセリングシステムの検討, 山形大学大学院 修士論文, 2014.
- [2] 五十嵐黎, 方向性ノイズキャンセリングシステムにおける Wide Null を用いたビームフォーマー設計, 山形大学工学部 卒業論文, 2018.