

個人用音場再生システム用収録システムの構築及び性能検証*

○羽生史, 木村敏幸 (東北学院大学)

1 はじめに

木村研究室では、遠隔操作への応用を目的とした立体音場の再生技術として8個の超指向性マイクロホンを使用した個人用音場再生技術[1]を提案している。個人用音場再生システムは Fig. 1 に示すように、立方体の頂点の位置に配置した8個の超指向性マイクロホンで収録した音を、聴取者の頭部の周りに指向性マイクロホンと同じ形で配置した8個のスピーカで直接再生することで、制御領域内の三次元音場を聴取領域内に再現する技術である。

これまで実際に構築したマイクロホンアレイの収録性能の検証を行っていたが[2], この時使用したショットガンマイクロホン (AZDEN SGM-10)では安定した電力供給が出来なかった。そのため本研究ではファンタム電源を用いた別のショットガンマイクロホン (AZDEN SGM-1000)でマイクロホンアレイを構築し、その三次元音場の収録性能を検証する。

2 収録位置の同定

マイクロホンアレイを構築する前に、ショットガンマイクロホンの収録位置を同定した。同定方法は先行研究[3]に従った。

収録位置同定におけるピンマイクロホン (オーディオテクニカ AT9903), ショットガンマイクロホン及びスピーカ (オーム電機

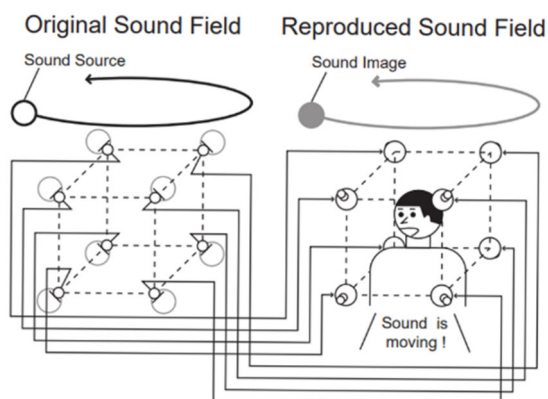


Fig. 1 個人用音場再生システムの構成

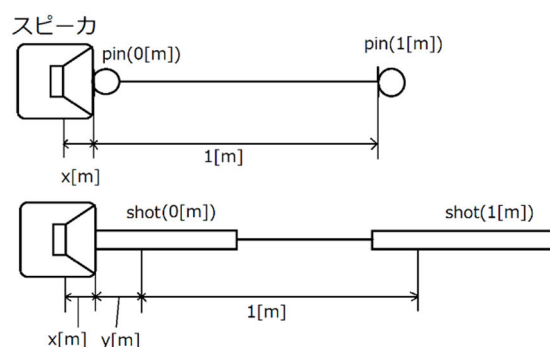


Fig. 2 収録位置の同定におけるマイクロホン及びスピーカ配置

ASP-204-N-K)の配置を Fig. 2 に、インパルス応答測定から算出した遅延時間を Table 1 に示す。

Table 1 より, 2つのピンマイクロホン間の距離と遅延時間差は1 m 及び2.875 ms であるため, 音速は

$$\frac{1[\text{m}]}{2.875[\text{ms}]} = 347.83[\text{m/s}]$$

となる。従って, スピーカの発音位置 x は, スピーカ表面より

$$x = 0.104[\text{ms}] \times 347.83[\text{m/s}] = 3.6174[\text{cm}]$$

奥行きとなる。この値は使用したスピーカの奥行き長(6 cm)に収まっている。

一方, 2つのショットガンマイクロホン間の距離と遅延時間差は1 m 及び3 ms であるため, 音速は

$$\frac{1[\text{m}]}{3.000[\text{ms}]} = 333.33[\text{m/s}]$$

となり, 収録位置 y は

$$\begin{aligned} y &= 0.521[\text{ms}] \times 333.33[\text{m/s}] - x \\ &= 17.3665[\text{cm}] - 3.6174[\text{cm}] \\ &= 13.7491 \approx 13.7[\text{cm}] \end{aligned}$$

Table 1 インパルス応答の遅延時間

| | 遅延時間[ms] |
|------------|----------|
| pin(0[m]) | 0.104 |
| pin(1[m]) | 2.979 |
| shot(0[m]) | 0.521 |
| shot(1[m]) | 3.521 |

*Construction and Performance Evaluation of Recording System for Personal 3D Sound Field Reproduction, by HANYU, Fumi and KIMURA, Toshiyuki (Tohoku Gakuin university).

となる。よって、ショットガンマイクロホンの收音位置は、先端より 13.7 cm である。この値はショットガンマイクロホンの全長(31 cm)に収まっている。

3 マイクロホンアレイの構築

構築したマイクロホンアレイを Fig. 3 に示す。1 辺が 0.4 m の立方体形の制御領域の頂点位置に 8 本のショットガンマイクロホン (AZDEN SGM-1000) の先端から 13.7cm の地点を配置する。その際、マイクロホンの指向特性は制御領域の外側に向けている。



Fig. 3 構築したマイクロホンアレイ

4 マイクロホンアレイの性能検証

4.1 インパルス応答の測定

Fig. 4 に示すように 3 ヲ所にスピーカ (オーム電機 ASP-204-N-K) を配置し、スピーカから各マイクロホンまでのインパルス応答を測定した。その際、音速を算出するため、2 本のピンマイクロホン (オーディオテクニカ AT9903) も配置した。測定は研究室で行い、暗騒音は 64.8 dB(A 特性)、音源から 1 m 地点での音圧レベルは 80.1 dB(A 特性)であった。

4.2 測定結果

頂点先の測定結果を Table 2 に示す。1 ch と 7 ch のショットガンマイクロホンの先に配置した 2 つのピンマイクロホン間の実測距離 D_1 は 1.02 m であり、音が届く時間差 T_1 は Table 2 より 3.00 ms であった。よって音速は D_1/T_1 より 340.0 m/s となった。

辺先の測定結果を Table 3 に示す。2 つのピンマイクロホン間の実測距離 D_2 は 0.59 m であり、音が届く時間差 T_2 は Table 3 より 1.792

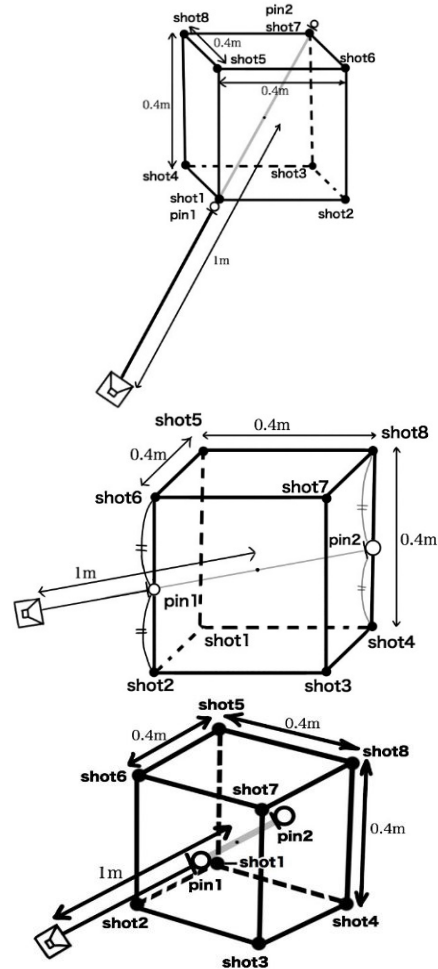


Fig. 4 スピーカ及びマイクロホンの配置 (上：頂点先，中：辺先，下：面先)

ms であった。よって音速は D_2/T_2 より 329.2 m/s となった。

面先の測定結果を Table 4 に示す。2 つのピンマイクロホン間の実測距離 D_3 は 0.40 m であり、音が届く時間差 T_3 は Table 4 より 1.25 ms であった。よって音速は D_3/T_3 より 320.0 m/s となった。

マイクロホンに対するスピーカの入射角度が 90 度を超える場合、振幅の理論値は $-\infty$ dB とした。Tables 2-4 より、使用したショットガンマイクロホンの指向特性が完全ではないため、入射角度が 90 度を越えても音を収録し、理論値とは大きく数字が増える結果となったが、 $-\infty$ dB 以外の理論値を示すマイクロホンアレイの実測値はアレイ内のマイクロホン間で同じ傾向であった。一方、遅延時間に関しても理論値との差は出たが、理論値と同様に実測値も遅延時間が短いほど音が大きくなる傾向となった。よって収録した音をスピーカ

アレイで再生した場合、先行音効果によってこのシステムの定位性能が保持されることが期待される。

Table 2 インパルス応答の測定結果(頂点先)

| | 振幅[dB] | | 遅延時間[ms] | |
|-------|--------|--------|----------|-------|
| | 理論値 | 実測値 | 理論値 | 実測値 |
| shot1 | 38.563 | 83.488 | 1.922 | 2.729 |
| shot2 | 22.749 | -∞ | 2.773 | 3.813 |
| shot3 | 20.521 | -∞ | 3.418 | 4.354 |
| shot4 | 26.070 | -∞ | 2.773 | 3.792 |
| shot5 | 20.278 | -∞ | 2.773 | 3.792 |
| shot6 | 17.643 | -∞ | 3.418 | 4.354 |
| shot7 | 16.172 | -∞ | 3.960 | 5.771 |
| shot8 | 17.142 | -∞ | 3.418 | 4.292 |
| pin1 | - | - | 1.438 | - |
| pin2 | - | - | 4.438 | - |

Table 3 インパルス応答の測定結果(辺先)

| | 振幅[dB] | | 遅延時間[ms] | |
|-------|--------|--------|----------|-------|
| | 理論値 | 実測値 | 理論値 | 実測値 |
| shot1 | 23.783 | -∞ | 3.215 | 3.896 |
| shot2 | 29.626 | 52.700 | 2.262 | 3.125 |
| shot3 | 22.010 | -∞ | 3.215 | 4.292 |
| shot4 | 14.182 | -∞ | 3.944 | 4.625 |
| shot5 | 20.906 | -∞ | 3.215 | 3.917 |
| shot6 | 31.323 | 52.700 | 2.262 | 3.125 |
| shot7 | 21.524 | -∞ | 3.215 | 4.292 |
| shot8 | 13.478 | -∞ | 3.944 | 5.271 |
| pin1 | - | - | 3.792 | - |
| pin2 | - | - | 2.000 | - |

Table 4 インパルス応答の測定結果(面先)

| | 振幅[dB] | | 遅延時間[ms] | |
|-------|--------|--------|----------|-------|
| | 理論値 | 実測値 | 理論値 | 実測値 |
| shot1 | 21.070 | -∞ | 3.853 | 4.854 |
| shot2 | 26.360 | 22.400 | 2.652 | 3.479 |
| shot3 | 25.629 | 22.400 | 2.652 | 3.375 |
| shot4 | 22.215 | -∞ | 3.853 | 4.813 |
| shot5 | 19.243 | -∞ | 3.853 | 4.875 |
| shot6 | 25.332 | 22.400 | 2.652 | 3.479 |
| shot7 | 27.291 | 22.400 | 2.652 | 3.417 |
| shot8 | 19.584 | -∞ | 3.853 | 4.833 |
| pin1 | - | - | 3.500 | - |
| pin2 | - | - | 2.250 | - |

5 音響インテンシティによる評価

5.1 音響インテンシティの算出

再現音場側の聴取者の頭部中心における音源の到来方向を評価するため、前章で測定し

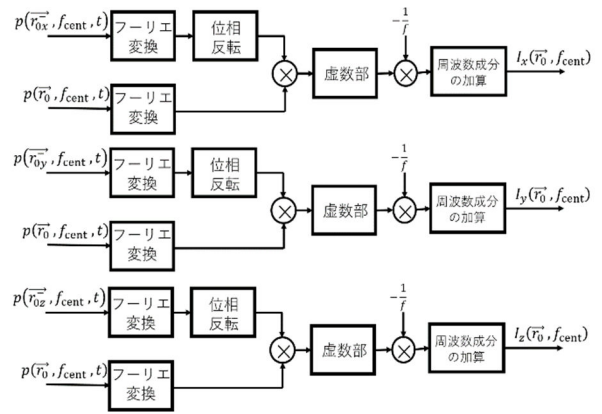


Fig. 5 音響インテンシティ算出のブロック図

た音源からショットガンマイクロホンまでのインパルス応答をもとに音響インテンシティを算出した。

音響インテンシティ $\vec{I}(\vec{r}_0, f_{cent})$ は Fig. 5 に示すような音源信号 $s(t)$ をオクターブバンドノイズ(中心周波数 f_{cent}) としたクロススペクトル法[4]により算出した。ただし、 $I_x(\vec{r}_0, f_{cent})$, $I_y(\vec{r}_0, f_{cent})$, $I_z(\vec{r}_0, f_{cent})$ は音響インテンシティベクトルの x, y, z 成分を表し、 $p(\vec{r}_0, f_{cent}, t)$,

$p(\vec{r}_{0x}, f_{cent}, t)$, $p(\vec{r}_{0y}, f_{cent}, t)$, $p(\vec{r}_{0z}, f_{cent}, t)$ は 4

点 \vec{r}_0 , \vec{r}_{0x} , \vec{r}_{0y} , \vec{r}_{0z} における瞬時音圧である。

4 点の位置ベクトルは以下のように設定した。

$$\begin{aligned} \vec{r}_0 &= (0, 0, 0)^T \\ \vec{r}_{0x} &= \vec{r}_0 - (\Delta, 0, 0)^T \\ \vec{r}_{0y} &= \vec{r}_0 - (0, \Delta, 0)^T \\ \vec{r}_{0z} &= \vec{r}_0 - (0, 0, \Delta)^T \end{aligned}$$

ここで $\Delta = 0.001$ [m] である。

$p(\vec{r}_0, f_{cent}, t)$ は以下のように表される。

$$\begin{aligned} p(\vec{r}_0, f_{cent}, t) &= \sum_{i=1}^8 x_i(t) * g_i(t) * s(t) \\ &= \sum_{i=1}^8 \frac{1}{|\vec{r}_i - \vec{r}_0|} g_i \left(t - \frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_0|}{c} \right) * s(t) \end{aligned}$$

ただし、 $g_i(t)$ は音源から i 番目のマイクロホンまでのインパルス応答、 $x_i(t)$ は i 番目のスピーカから聴取者の頭部中心までのインパルス応答、 $*$ は畳み込み演算、 \vec{r}_i と \vec{r}_0 は i 番目のマイクロホンと聴取者の頭部中心の位置ベクトル、 c は音速を表す。

音響インテンシティの算出に使用したパラ

メータ条件を Table 5 に示す。

Table 5 音響インテンシティ算出におけるパラメータ

| | |
|------------------------|----------------------------|
| 中心周波数(f_{cent}) | 1000 Hz |
| 音源の最低周波数(f_{low}) | $f_{cent} \div \sqrt{2}$ |
| 音源の最高周波数(f_{high}) | $f_{cent} \times \sqrt{2}$ |
| 音速(c) | 340 m/s |

5.2 算出結果

算出した音響インテンシティを Figs. 6-8 に示す。ただし、ベクトルの長さは1に正規化しており、赤い線が理論値、黒い線が今回算出した音響インテンシティのベクトルである。頂点先、辺先、面先の理論値はそれぞれ

$$(x, y, z) = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}}\right)$$

$$(x, y, z) = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0\right)$$

$$(x, y, z) = (-1, 0, 0)$$

である。

面先、辺先において z 軸方向に誤差が見られているが、これはマイクロホンアレイの構築の際のマイクロホンの角度や、スピーカ設置の際のスピーカの角度を目測で設置したためだと思われる。また、音源からマイクロホンまでのインパルス応答に測定したものをを用いてインテンシティの算出を行ったが、このインパルス応答内には反射波が含まれているために誤差が出たのではないかとと思われる。

6 おわりに

本研究では個人用音場再生システムのための収録システムとして收音位置を同定したショットガンマイクロホンを用いてマイクロホンアレイを構築した。構築したマイクロホンアレイの収録性能を評価するために、音源からショットガンマイクロホンまでのインパルス応答を測定し、収録したインパルス応答を基に聴取者の頭部中心における音響インテンシティを算出した。その結果、算出した音響インテンシティベクトルの方向が理論値とほぼ等しかったため、構築した収録システムの定位性能は保持されるという結論に至った。

今後は、さらに観測点を増やして、マイクロホンアレイの収録性能を検証していく必要がある。

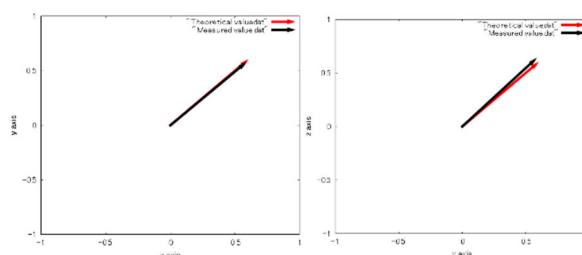


Fig. 6 頂点先における音響インテンシティ (左: X-Y 図, 右: X-Z 図)

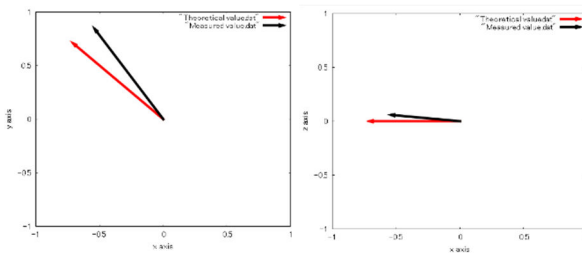


Fig. 7 辺先における音響インテンシティ (左: X-Y 図, 右: X-Z 図)

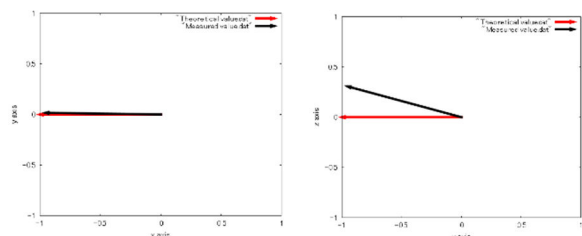


Fig. 8 面先における音響インテンシティ (左: X-Y 図, 右: X-Z 図)

参考文献

- [1] 木村敏幸, “8 個の超指向性マイクロホンを用いた波面合成技術のコンセプトに基づいた個人用コンパクト三次元音場再生システム,” 信学論(A), Vol. J97-A, No. 4, pp. 284-294 (2014).
- [2] 羽生史, 木村敏幸, “マイクロホンアレイによる個人用音場の収録性能の検証,” 平成 31 年東北地区若手研究者研究発表会講演資料, No. YS-17-P28, pp. 137-138 (2019).
- [3] 木村敏幸, 萩野広佑, “超指向性マイクロホンの收音位置同定手法,” 信学技報, No. EA2017-27, pp. 1-4 (2017).
- [4] T. Kimura et al., “Three-dimensional Radiated Sound Field Display System Using Directional Loudspeakers and Wave Field Synthesis”, Acoust. Sci. & Tech., Vol. 33, No. 1, pp. 11-20 (2012).