

# 少数のスピーカと波面合成法を用いた 三次元音場再生システムの性能評価\*

直江宗紀，木村敏幸 (NICT/東京農工大)，山肩洋子，勝本道哲 (NICT)

## 1 はじめに

波面合成法は Huygens の原理に基づき制御領域の波面を聴取領域で忠実に合成する三次元音場再生技術である。この技術によって聴取者はヘッドホンのような音響デバイスを装着せずに立体音場を体験することができる。

これまでの三次元音場再生システムは、境界平面上の音圧を制御し波面を合成するシステム<sup>[1]</sup>であったが、この場合、平面上の音場しか制御できないため、上下方向に関する音場が制御出来なかった。

一方、スピーカアレイを三次元空間上に多数配置し、三次元の音場を制御するシステム<sup>[2]</sup>も提案されているが、この場合だとシステムを構築するコストも高く、また、スピーカが聴取者の視線に入ってしまうので、スクリーン等と組み合わせた視聴覚システムを構築するのが困難になる。

そこで、本研究では、スピーカが聴取者の視線に入らない場合でも三次元音場が再生できるようにするために、Fig. 1 の右側に示すようなスピーカの数 8 個の立方体型スピーカアレイと波面合成法を用いた三次元音場再生システムを提案する。また、提案したシステムでも十分な性能が十分出ているかどうか定位実験によって評価する。

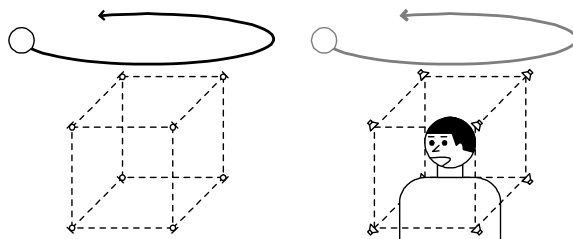


Fig. 1 Arrays of proposed 3D sound field reproduction system (Left: microphone array, Right: loudspeaker array)

## 2 実験

### 2.1 スピーカアレイ

提案したスピーカアレイシステムの性能評価実験を行うため、システムに用いるスピーカを作成した。Fig. 2 に示すようにスピーカボックスを設計し、スピーカユニットをマウントすることによって Fig. 3 に示すようなスピーカを作成した。作成したスピーカを Fig. 4 に示すようにスピーカアレイのための 8 個のスピーカを 1 辺 0.4 m の立方体の頂点位置に配置するのに加えて、定位実験のために 17 個の統制条件用スピーカを半径 1 m の円上に配置した。実際に配置したシステムの状態を Fig. 5 に示す。但し、Fig. 5 中のスタンドの先に取り付けられた白いボックスは Fig. 3 に示したスピーカである。

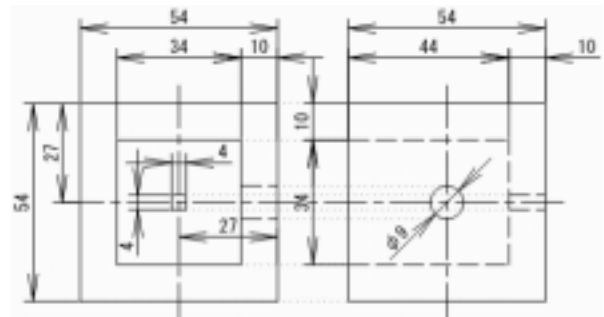


Fig. 2 Design of loudspeaker box



Fig. 3 Image of the manufactured loudspeaker

\* Performance Evaluation of 3D Sound Field Reproduction System Using a Few Loudspeakers and Wave Field Synthesis, by Munenori Naoe, Toshiyuki Kimura (NICT/TUAT), Yoko Yamakata, and Michiaki Katsumoto (NICT)

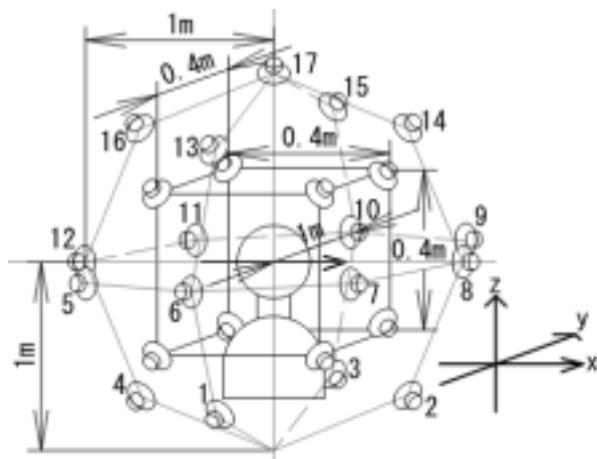


Fig. 4 Position of a listener and loudspeakers

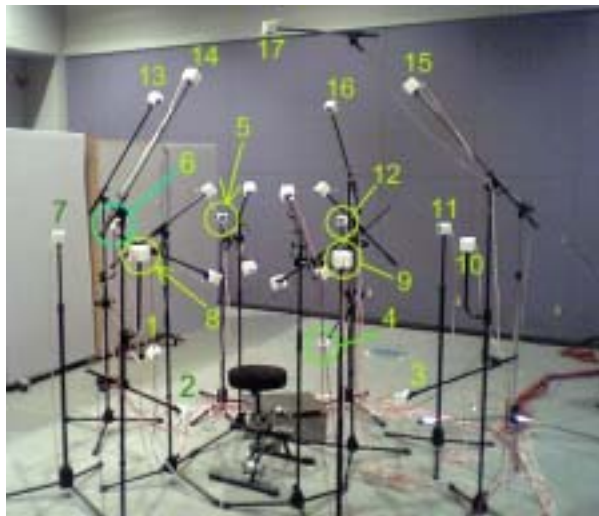


Fig. 5 Setup of the loudspeaker array and loudspeakers for control condition

## 2.2 実験環境

実験は残響時間 180 ms、暗騒音レベル 23 dB(A)の部屋で行った。また、聴取位置における音圧レベルは 60 dB(A)で統一した。

## 2.3 実験手順

被験者は聴力会話域正常な 6 名の男性及び 1 名の女性である。実験の流れ図を Fig. 6 に示す。本実験では、音源として白色雑音と音声の 2 種類を用いた。2 種類の音源ごとに 3 条件(統制条件、音像距離 1 m、音像距離 3 m)及び 17 方向ごとの刺激を計 51 種類用意した。そして、練習試行においては 17(方向)×2(統制条件、音像距離 1 m)×1(繰り返し)=34 回の試行を、本試行においては 17(方向)×3(統制条件、音像距離 1 m、音像距離 3 m)×3(繰り返し)=153 回の試行をランダム化し、順に被験者に提示した。被験者には音源ごとに練習試行を 34 回行った後、本試行を 153 回行った。その際、51 回ごとに休憩を設けた。また、

音源の順序は聴取者ごとにランダム化した。

## Subjective Assessment

Session 1		Session 2	
Order...Randomized (White Noise or Speech)			
Session			
Practice (34 trials)	Main (153 trials)		
	(51)	(51)	(51)
Trial (Procedure)			
Stimulus (4 s)		Answer (5 s)	

Fig. 6 Flow chart of subjective assessment

被験者には、Fig. 7 に示すような知覚方向と番号の割り当て図を見せ、知覚した方向を割り当てた番号で答えてもらった。また、音を聞いている際には頭を自由に動かしてもらった。

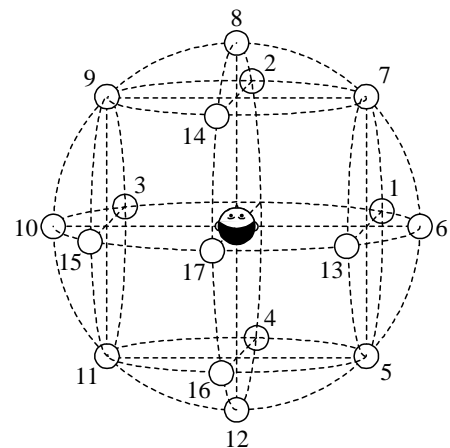


Fig.7 Relation between perceived directions and direction numbers

## 2.4 実験結果及び考察

統制条件、音像距離 1 m 及び音像距離 3 m の各条件における各方向の正答率及び全方向の平均正答率を Tables 1, 2 に示す。

Tables 1,2 から、本実験において構築したシステムの定位性能は、全体的に約 8 割の正答率を持つと見ることが出来る。また、方向別の正答率を見た場合、6, 8, 10, 12, 17 の方向以外では音像距離 1 m 及び 3 m における正答率は統制条件とほぼ同じである。ゆえに、これらの方向に関してシステムは良い定位性能を示していることが分かる。

正答率が低い方向に対してさらに細かく分析するために、正答率の低い 5 方向(6, 8, 10, 12, 17)における音源ごとの回答率を Tables 3,

4 に示す。但し、10%より大きい回答率は赤色で示してある。

Table 1 Accuracy rates of each condition in white noise

Direction number	Control condition	1 m distance	3 m distance
1	100	81	76
2	95	100	95
3	100	81	86
4	95	76	90
5	100	100	100
6	100	43	52
7	100	100	100
8	100	33	43
9	100	100	100
10	100	52	43
11	100	100	95
12	100	48	33
13	100	90	90
14	95	100	100
15	100	76	86
16	86	71	71
17	100	38	33
Average	98	76	76

Unit: [%]

Table 2 Accuracy rates of each condition in speech

Direction number	Control condition	1 m distance	3 m distance
1	100	86	81
2	86	76	86
3	100	100	100
4	90	81	71
5	95	95	95
6	100	43	57
7	100	100	90
8	100	67	62
9	100	76	90
10	100	57	52
11	100	90	90
12	95	76	33
13	100	76	81
14	100	95	95
15	95	71	71
16	86	67	52
17	90	48	52
Average	96	77	74

Unit: [%]

多くは7や13であった。その中でも13に誤答する率が高かった。他の番号を誤答する率が7,13以外にほとんど無いため、このシステムでは6から出ている音がやや上方向や前方向に定位が偏っていると考えられる。

提示方向が8(被験者正面)の時、14を誤答する率が極めて高い。このことから、8の方向を提示した時、やや上方向に定位が偏っているのではないかと考えられる。

提示方向が10(被験者の左側)の時、3と誤答する率が高い。このことから、10の方向を提示した時、やや下方向に定位が偏っているのではないかと考えられる。

提示方向が12(被験者後方)の時、音声音源の音像距離1mの場合を除き、16や17と誤答する率が高い。また、音像距離が3mでは、4と誤答する率も高くなっている。このことから、音像の定位がやや上方向に偏っていたり、音像が上下方向にぼやけていたりするのではないかと考えられる。

提示方向が17(被験者真上)の時、14と誤答する率が極めて高い。このことから、定位が前方に非常に偏っていると考えられる。

以上のことから、これら5方向の回答率が低い原因について、いずれの方向も4個のスピーカを同時に鳴らしている方向であることから、ファントム音源による音像の定位の偏りや音像のぼけが発生しているためではないかと考えられる。

### 3 まとめ

本研究では、8個のスピーカを用いたシステムを提案し、定位実験による評価を行った。音像定位の性能としては、8割という結果が得られ、17方向のうち12方向については非常に良い性能が得られた。今後は、残り5方向について定位性能の改善と主観実験によってその性能を評価していく予定である。

提示方向が6(被験者の右側)の時、誤答の

参考文献

[1] A. J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel, "Acoustic control by wave field synthesis," Journal of Acoustical Society of America, Vol.93, No.5, pp.2764-2778, May 1993

[2] 伊勢史郎, 豊田政弘, 榎本成悟, 中村哲, "深いコミュニケーションを可能とする空間創造の試み - プロジェクトの基本方針 - ", 日本音響学会研究発表会講演文集, No. 2-1-20, pp. 585-586 March 2007

Table 3 Answer rates of five directions in white noise

Direction number	6		8		10		12		17	
	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance
1	0	10	0	0	0	5	0	0	0	0
2	0	0	5	5	5	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	29	48	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	10	24	0	0
5	5	0	0	0	0	0	0	5	0	0
6	43	52	0	0	0	0	0	0	0	0
7	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	33	43	0	0	0	0	5	5
9	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	52	43	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	48	33	0	5
13	38	24	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	62	52	0	0	0	0	52	52
15	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	14	24	5	5
17	0	0	0	0	0	0	24	14	38	33

Unit: [%]

Table 4 Answer rates of five directions in speech

Direction number	6		8		10		12		17	
	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance	1 m distance	3 m distance
1	10	5	0	0	0	0	0	0	0	5
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	5	10	0	0	33	38	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	5	19	0	0
5	10	5	0	0	0	0	5	0	0	0
6	43	57	0	0	0	0	0	0	0	0
7	19	10	0	0	0	0	0	0	5	0
8	0	0	67	62	0	0	0	0	10	19
9	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0
10	0	0	0	0	57	52	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0
12	0	0	0	0	0	0	76	33	0	0
13	10	14	0	0	0	0	0	5	0	0
14	5	0	24	29	0	0	0	0	29	19
15	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	14	14	10	5
17	0	0	10	10	0	0	0	24	48	52

Unit: [%]