

立命館大学審査博士論文

多面体パラメトリックスピーカを用いた
高音質な3次元音場再生の研究

(Reproduction of Three Dimensional Sound Field
with High Sound Quality
by Polyhedron Parametric Loudspeaker)

2016年3月

March 2016

立命館大学大学院情報理工学研究科

情報理工学専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Information Science and Engineering

Graduate School of Information Science and Engineering

Ritsumeikan University

生藤 大典

IKEFUJI Daisuke

研究指導教員: 西浦 敬信 教授

Supervisor: Professor NISHIURA Takanobu

本論文は立命館大学 大学院情報理工学研究科に
博士(工学) 授与の要件として提出した博士論文である。

提出者氏名： 生藤 大典
審査委員： 主査 西浦 敬信 教授
副査 山下 洋一 教授
副査 平林 晃 教授

多面体パラメトリックスピーカを用いた 高音質な3次元音場再生の研究

生藤 大典

内容梗概

近年、映像技術の発展に伴い視覚的に高い臨場感を得られるシステムが注目されており、危機的状況のシミュレーションやアミューズメントなどへの応用が期待されている。またここ数年では、更なる高臨場感を得るために、視覚情報に聴覚情報を統合したシステムが提案されている。このようなシステムにおける音再生には3次元音場再生技術が必要不可欠であり、視覚情報だけでは得ることのできない周囲の様子などを、まるでその場にいるかのように利用者に提供できる。従来の3次元音場再生技術として、5.1ch サラウンドシステムのように複数のスピーカを利用する手法や、ヘッドホンまたはイヤホンを利用する手法などが一般的である。しかしながら、複数のスピーカを利用する手法で高音質な音場を構築するには、数多くのスピーカを必要とするため、配置および制御点における物理的制約が生じる上に、各スピーカからの出力信号を高精度に制御しなければならない。また、ヘッドホンを使用する手法では、音の定位方向や距離感などが利用者の頭部形状に大きく依存するため、予め利用者の頭部形状に基づく伝達関数である頭部伝達関数を計測する必要があり、専用の大規模な装置と長時間の計測時間を要する。

そこで本論文では、このような問題を解決する3次元音場再生技術として、パラメトリックスピーカを利用する音像プラネタリウム方式に着目する。音像プラネタリウム方式はパラメトリックスピーカの超指向性を積極的に利用しており、直接音と壁面からの反射音を用いて音像を構築することで、あらゆる方向からの到来音を表現することができる。また、壁面反射を利用するため、スピーカの設置が困難な高所にも容易に音像を構築可能であり、従来手法で生じる物理的制約を大幅に緩和

できる。しかしながら、音像プラネタリウム方式にはパラメトリックスピーカの音質劣化に加え、移動音像の表現が困難であるという問題がある。パラメトリックスピーカは超音波で目的の音響信号を振幅変調した振幅変調波を出力することで高い指向性を形成しており、放射された振幅変調波が空気の非線形性で元の可聴音に復調する現象を利用する。そのため、一般的なスピーカと比較して、低域の再生音圧が低く、また高調波ひずみと呼ばれる雑音成分が混入する。加えて、パラメトリックスピーカは空気中での復調現象を利用するため、パラメトリックスピーカを高音圧、高音質で利用するには、復調に必要な距離を推定することが重要である。しかし、復調による可聴音の音圧レベルは周波数ごとに異なるため、音質を重視した復調距離の推定は困難であった。そこで本論文では、パラメトリックスピーカの音質を改善するために、新たな変調方式となる重み付き両側波帯変調方式を提案するとともに、利用環境ごとに復調に必要な距離を推定できる復調評価指標を策定する。また、パラメトリックスピーカで構築した音像は放射方向を物理的に制御しない限り1箇所固定されるため、音像プラネタリウム方式では受聴者に移動音を提示できないという欠点がある。なお、モータを用いて放射方向を機械的に制御する方法も考えられるが、筐体自体の大型化、モータ駆動時の騒音などが2次的な問題となる。そこで本論文では、音像プラネタリウム方式における移動音像構築のために、パラメトリックスピーカ自体を動かさずに放射音を制御する手法として、曲面または球形に超音波素子を配置した曲面型および多面体パラメトリックスピーカを開発し、壁面上を移動する音像の構築手法を提案する。

それぞれの提案手法に対して、その有効性を評価する実験を行ったところ、パラメトリックスピーカの音質改善を達成できたとともに、受聴者に自然な移動感を与える移動音像を構築可能であることを確認した。

キーワード

3次元音場再生, パラメトリックスピーカ, 音像プラネタリウム, 変調, 復調, 音像, 移動音像

Reproduction of Three Dimensional Sound Field with High Sound Quality by Polyhedron Parametric Loudspeaker

IKEFUJI Daisuke

Abstract

Recently, technologies for reproducing a 3-D sound field are required for providing highly realistic sensations in simulation of crisis situation, amusement attraction, and so on. Various methods have been conventionally proposed for achieving 3-D sound field. For example, multiple channel surround systems and binaural reproduction systems with the head-related transfer function (HRTF) have been conventionally proposed for this purpose. These techniques can easily provide the audible realistic sensation for user. However, multiple channel surround systems often take up a lot of space due to the arrangement of multiple loudspeakers. Moreover, systems with HRTF require the correct HRTF by specific equipment and longer measurement time.

For overcoming these problems, a system have been previously proposed for reproducing 3-D sound fields with multiple parametric loudspeakers. This system is called as acoustic planetarium. The parametric loudspeaker, which uses an ultrasound wave, can transmit acoustic sound to a particular area, referred to as an audio spot. Furthermore, it can design sound images on walls, ceilings, and floors by reflecting an emitted sound. Therefore, previous system can easily present incoming sound from various directions to users. However, it has a lower sound quality than that of systems with general electrodynamic loudspeakers. In addition, it is difficult to provide a moving sound image because emission direction of the parametric

loudspeaker stays constant. The parametric loudspeaker emits an intense amplitude modulated (AM) wave designed by modulating the amplitude of the ultrasound with an audible sound. The emitted intense AM wave with the parametric loudspeaker is demodulated into the audible sound by the nonlinear interaction in the air. The parametric loudspeaker can reproduce a sound with lower quality by this principle. In this paper, we therefore propose the new modulation method for improving the sound quality. Furthermore, we propose a criterion for measuring a demodulation level for estimating the suitable demodulation distance. In addition, we also develop curved-type and polyhedron parametric loudspeakers for steering the emission direction without moving the emitter. The developed parametric loudspeakers are formed by arranging ultrasonic transducers on a curved and spherical surface. It can steer the emission direction by switching ultrasonic transducers. We carried out evaluation experiments to confirm the effectiveness of the proposed methods. The results demonstrated that the proposed modulation method could improve sound quality of parametric loudspeakers, and estimate the suitable demodulation distance. Moreover, we confirmed that the moving sound image could be designed by developed curved-type and polyhedron parametric loudspeakers.

Keywords:

Three dimensional sound field, Parametric loudspeaker, Acoustic planetarium, Modulation, Demodulation, Sound image, Moving sound image

目次

第1章 序論	1
1.1. 研究の背景と目的	1
1.2. 本論文の構成	3
第2章 3次元音場再生技術の基礎	4
2.1. はじめに	4
2.2. 従来の3次元音場再生技術	4
2.2.1 トランスオーラル方式を用いた音場再生	5
2.2.2 バイノーラル方式	7
2.3. 音像プラネタリウム方式	8
2.3.1 パラメトリックスピーカの原理	9
2.3.2 変調方式	11
2.3.3 従来の音像プラネタリウム方式における移動音構築手法	13
2.3.4 遅延付加による放射方向の制御	15
2.3.5 音像プラネタリウム方式の問題点	16
第3章 パラメトリックスピーカの音質改善	17
3.1. はじめに	17
3.2. 重み付き両側波帯変調方式の提案	17
3.2.1 DSB, SSB 変調方式を用いた際の周波数特性の計測	18
3.2.2 重み係数の導出法	19
3.2.3 パラメトリックスピーカの音質改善に関する客観評価実験の条件	23

3.2.4	パラメトリックスピーカの音質改善に関する客観評価実験の結果	26
3.2.5	パラメトリックスピーカの音質改善に関する主観評価実験の条件	29
3.2.6	パラメトリックスピーカの音質改善に関する主観評価実験の結果	30
3.2.7	パラメトリックスピーカの音質改善に関する評価実験結果の考察	30
3.3.	パラメトリックスピーカの復調評価指標の策定	32
3.3.1	従来の復調評価手法	32
3.3.2	スペクトル包絡の変化を調査するための予備実験	33
3.3.3	スペクトル包絡の相互相関を用いた復調評価指標 DUA-CC _n	38
3.3.4	パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する客観評価実験の条件	41
3.3.5	パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する客観評価実験の結果	41
3.3.6	パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する主観評価実験の条件	42
3.3.7	パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する主観評価実験の結果	43
3.3.8	パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する評価実験結果の考察	45
第4章	曲面型・多面体パラメトリックスピーカによる移動音像の構築手法の提案	48
4.1.	はじめに	48
4.2.	曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音像の構築手法の提案	48
4.2.1	曲面型パラメトリックスピーカの試作	49
4.2.2	基板本数ごとの放射特性の計測	51
4.2.3	入力信号の制御手法	52

4.2.4	曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像構築の予備実験	56
4.2.5	壁面反射を利用した移動音像の構築	60
4.3.	曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像構築の評価実験	62
4.3.1	客観評価実験の条件	62
4.3.2	客観評価実験の結果	63
4.3.3	主観評価実験の実験条件	64
4.3.4	主観評価実験の結果	65
4.3.5	評価実験結果の考察	66
4.4.	多面体パラメトリックスピーカによる移動音像の構築手法の提案	67
4.4.1	多面体パラメトリックスピーカの試作	67
4.4.2	両耳間音圧差の時間変化に基づく移動音像の制御	68
4.5.	多面体パラメトリックスピーカによる移動音像構築の評価実験	72
4.5.1	主観評価実験の条件	72
4.5.2	主観評価実験の結果	73
4.5.3	主観評価実験結果の考察	74
第5章	結論	79
5.1.	本博士論文のまとめ	79
5.2.	今後の課題	80
	謝辞	82
	参考文献	83
	研究業績	91

目 次

2.1	ランスオーラル方式における目的音場と再生環境のイメージ	6
2.2	ダミーヘッドの写真	8
2.3	音像プラネタリウムによる音場再生のイメージ	9
2.4	パラメトリックスピーカによる音響信号の再生の流れ図	10
2.5	DSB 変調方式の模式図	12
2.6	SSB 変調方式の模式図	13
2.7	複数音像の音圧比制御による移動音像構築手法のイメージ	15
2.8	遅延制御によるパラメトリックスピーカの放射方向制御のイメージ	16
3.1	提案手法における側波帯制御の流れ	18
3.2	DSB, LSB, USB 変調方式を用いてホワイトノイズを再生した際の 対数パワースペクトル	21
3.3	ホワイトノイズをキャリア波 40 kHz で振幅変調した振幅変調波の周 波数特性	21
3.4	用いる側波帯を決定した振幅変調波の周波数特性	22
3.5	設計した重み付き帯域制限フィルタのパワースペクトル	22
3.6	機材の配置図	25
3.7	実験環境の写真	25
3.8	各方式でホワイトノイズを再生した際の対数パワースペクトル	27
3.9	2 kHz における目的音と倍音との音圧レベル差	28
3.10	5 kHz における目的音と倍音との音圧レベル差	28
3.11	音声による主観評価実験の結果	30
3.12	楽曲による主観評価実験の結果	31

3.13	放射された振幅変調波と復調される可聴音の音圧および従来法における十分な復調距離の関係	33
3.14	各実験室におけるマイクロホンとパラメトリックスピーカの配置 . . .	36
3.15	パラメトリックスピーカから 10, 50, 100, 200, 300 cm 離れた各実験室における再生音のスペクトル包絡	37
3.16	再生音のスペクトル包絡を用いる提案指標における復調度算出の流れ図	38
3.17	各再生音場における $CC_{original}$ (目的音) による距離ごとの復調度 . . .	42
3.18	各再生音場における CC_n (遠方の再生音) による距離ごとの復調度 (防音室: CC_{300} , 研究室: CC_{500} , 会議室: CC_{600})	43
3.19	防音室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係	45
3.20	研究室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係	46
3.21	会議室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係	47
4.1	曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像構築のイメージ . .	49
4.2	直線状基板の見取り図と写真	50
4.3	試作した曲面型パラメトリックスピーカ	51
4.4	曲面型パラメトリックスピーカにおける制御範囲のイメージ図	52
4.5	放射特性の計測実験における機材の配置図	53
4.6	各放射口幅における放射特性	54
4.7	曲面型パラメトリックスピーカによる各制御方法を用いた際の放射方向制御のイメージ	55
4.8	予備実験の機材配置図	56
4.9	各制御法における ILD の時間変化	59
4.10	各制御法における移動感	60
4.11	鏡像法を用いた曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像の構築のイメージ	61
4.12	客観評価実験の機材配置図	62
4.13	受聴位置ごと壁面反射を利用した際の移動音像の ILD の時間変化 . .	64
4.14	受聴位置ごと壁面反射を利用した際の移動音像の移動感	66
4.15	作製した基板と多面体パラメトリックスピーカ	68

4.16	多面体パラメトリックスピーカによる移動音像構築のイメージ図 . . .	70
4.17	原音場におけるダミーヘッドと移動音源 (スピーカ) の配置	73
4.18	再生音場におけるダミーヘッドと多面体パラメトリックスピーカの配置	74
4.19	受聴位置 1 における移動音の再現性能	75
4.20	受聴位置 2 における移動音の再現性能	76
4.21	原音場と再生音場の受聴位置 1 における移動音の移動感	77
4.22	原音場と再生音場の受聴位置 2 における移動音の移動感	77
4.23	受聴位置 1 におけるホワイトノイズを再生した際の実環境と再現環境 における ILD の時間変化	78

表 目 次

3.1	予備実験の実験条件	19
3.2	客観評価実験の実験条件	23
3.3	各方式における低域 (0.5~2 kHz) および再生帯域 (0.5~10 kHz) の平均音圧レベルと誤差平均	26
3.4	主観評価実験の実験条件	29
3.5	予備実験の条件	34
3.6	客観評価実験の条件	40
3.7	主観評価実験の条件	44
4.1	予備実験の条件	57
4.2	音像の移動感評価の評価尺度	58
4.3	客観評価実験の条件	63
4.4	主観評価実験の条件	65
4.5	主観評価実験の条件	72

第1章 序論

1.1. 研究の背景と目的

近年の映像技術の発展に伴い、バーチャルリアリティ技術や3Dテレビなどに代表されるような視覚的に高い臨場感を得られる製品が普及しており、車や飛行機の運転、災害現場での救出訓練をシミュレートできるシステムの研究が活発にされている [1, 2, 3, 4]. そして、ここ数年ではより高い臨場感を得るために、視覚情報だけでなく聴覚情報を併用したシステムの需要が高まっており、様々な3次元音場再生技術が提案されている [5, 6, 7, 8, 9]. これらの技術を利用することで、視覚情報だけでは得ることのできない利用者の側面、後方の様子をより知覚し易くなる. 例えば、車のドライブシミュレータでは後方からの他車の接近を聴覚情報を頼りに把握することが可能となる.

一般的にこれらの技術を実現するには、複数のスピーカ、またはヘッドホンを用いて受聴者が両耳で知覚する信号を高精度に制御する必要がある [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. 複数のスピーカを利用する手法は、例えば2chの前方スピーカによるトランスオーラル方式 [10, 19, 20] や5.1chサラウンド方式 [12] のように、複数のスピーカを再生環境の周囲に配置することで多方向からの音の到来と空間的な広がりを再現することが可能となる. また、ヘッドホンを利用する手法はバイノーラル方式と呼ばれ、再現音場において人の頭部形状を模したダミーヘッドを用いて音を収録し、収録信号をヘッドホンから再生することで、まるで再現音場にいるかのような音場を知覚できる [15, 16, 21]. しかしながら、複数のスピーカを利用する手法で高品質な音場を構築するには、数多くのスピーカを必要とするため、配置における物理的制約が生じる上に、各スピーカからの出力信号を高精度に制御しなければならない. また、ヘッドホンを使用する手法では、音の定位方向や距離感などが利用者の頭部形状に大きく依存するため [21, 22, 23], 予め利用者の頭部形状に基づく

伝達関数である頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function; HRTF)[15, 21] を計測する必要があり、専用の大規模な装置と長時間の計測時間を要する。

このような問題を解決する3次元音場再生技術として、近年、パラメトリックスピーカ [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33] を利用する「音像プラネタリウム方式」 [34, 35, 36, 37, 38] が提案されている。音像プラネタリウム方式はパラメトリックスピーカの超指向性を積極的に利用しており、直接音と壁面からの反射音を用いて音像を壁面上に構築することで、あらゆる方向からの到来音を表現することができる。また、壁面反射を利用するため、スピーカの設置が困難な高所にも容易に音像を構築可能であり、従来手法で生じる物理的制約を大幅に緩和できる。さらに音像プラネタリウム方式には、指向性が鋭いパラメトリックスピーカを利用するため、拡散音波の発生量に起因する残響感のある音場を構築することが困難であったが、一般的なスピーカを併用することで高い音像定位性能を維持したまま、高残響感を提示する手法も提案されている [37]。

しかしながら、音像プラネタリウム方式にはパラメトリックスピーカの音質劣化の問題がある。パラメトリックスピーカは超音波で目的の音響信号を振幅変調した振幅変調波を出力することで高い指向性を形成しており、大音圧で放射された振幅変調波は空気の非線形性によって可聴音に復調する [39, 40, 41, 32, 43]。パラメトリックスピーカの音質劣化はこの空気の非線形性を利用する再生方式に依るもので、主に低域の音圧低下と高調波ひずみの発生が問題となる。パラメトリックスピーカの音質を改善する手法としては、入力信号となる振幅変調波を生成する変調方式 [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54] を改良する手法が一般的であり、従来の音質改善手法の多くは変調方式に着目した手法が数多く提案されているが、十分な低域強調と高調波ひずみ低減を両立する手法は確立されていない。加えて、パラメトリックスピーカから放射された振幅変調波は空気中を伝搬しながら可聴音に復調するため、パラメトリックスピーカ近傍では十分な音質と音圧レベルを得られない。そのため、パラメトリックスピーカを利用する際には、復調に必要な距離を推定することが重要であるが、周波数ごとに復調の傾向が異なるために、広帯域の信号における復調距離の推定は困難であった。本論文ではこれらの問題に対して、パラメトリックスピーカの音質を改善する新たな変調方式を提案するとともに、利用環境

ごとに復調に必要な距離を推定できる復調評価指標を策定する。

次に、音像プラネタリウム方式において、パラメトリックスピーカで構築した音像は壁面上の任意の位置に固定されているため、受聴者に移動音を提示できないという欠点がある。ここで、移動音の構築に関しては、パラメトリックスピーカ自体をモータを用いて機械的に制御する方法も考えられるが、システムが大規模になる上に、モータ駆動時の騒音が2次的な問題となる。この課題を解決する従来手法として、複数のパラメトリックスピーカで構築した複数音像の振幅比を制御することで移動感を提示する手法 [38] や入力信号を遅延制御することでビーム方向を正面方向以外に制御する手法 [55, 56, 57, 58] などが提案されている。しかし、これらの従来手法では連続的な放射方向の制御が困難な上に、スピーカと受聴者の位置が固定されるといった問題がある。そこで本論文では、音像プラネタリウム方式における移動音像構築のために、パラメトリックスピーカ自体の動かすことなく放射方向を制御し、滑らかな移動感を得られる手法を検討する。具体的には、パラメトリックスピーカを構成する超音波素子を曲面状または球面状に配置したパラメトリックスピーカを開発し、スピーカ自体を動かすことなく放射方向を制御する手法を提案する。受聴位置に依らず移動感を提示できる制御方法を提案する。

1.2. 本論文の構成

本論文の構成を以下に述べる。本論文は5つの章から構成される。2章では、3次元音場再生を実現するための従来手法とパラメトリックスピーカを応用した3次元音場再生方式の原理と問題点について述べる。3章では、パラメトリックスピーカの音質改善のための、振幅変調波を生成する変調方式と復調を評価する指標策定について述べる。4章では、音像プラネタリウム方式における壁面上を移動する音像を構築するために、パラメトリックスピーカの放射面を改良した曲面型および多面体パラメトリックスピーカを用いた壁面移動音像の構築手法について述べる。最後に、5章で本論文の結論と今後の課題について述べる。

第2章 3次元音場再生技術の基礎

2.1. はじめに

3次元音場再生技術とは、再生環境内に音の到来方向や距離感を知覚できる音場を構築する技術を指す。この技術を応用すれば、マイクロホンで計測した別空間の音場を再生環境にそのまま再現できるため、コンサートホールや洞窟などの音場を一般的な室内に作りこむことが可能となる。この技術を実現する従来手法として、複数のスピーカ、またはヘッドホンからの出力信号を制御することで、様々な音場を受聴者に提供する手法が提案されている。本章では、これらの音場構築を実現する3次元音場再生技術の従来手法について述べる。まず2.2節では、従来手法として複数のダイナミックスピーカを用いた手法とヘッドホンを用いた手法およびそれらの問題点について述べる。2.3節では、2.2節で述べた従来手法の問題点を改善する3次元音場再生手法として、パラメトリックスピーカを利用した音像プラネタリウム方式、およびパラメトリックスピーカの原理や音像プラネタリウムの問題点などについて述べる。

2.2. 従来の3次元音場再生技術

従来の3次元音場再生を実現する手法として、大きく分けて2種類の方法が提案されている。1つは複数のダイナミックスピーカを用いた手法で、2chのスピーカを利用するトランスオーラル方式[10, 19, 20]や、5.1chサラウンド再生方式[12]のように利用者の周囲にスピーカを配置するサラウンド再生方式である。これらの従来手法は各スピーカからの出力信号を受聴点で所望の信号となるよう制御することで目的の音場を提供する。もう1つはヘッドホンを用いたバイノーラル方式で、原

音場内でダミーヘッド等を用いてステレオ収録した信号をヘッドホン再生することで、利用者に原音場を提示する。これらの従来手法は主に、原音場における音源からの直接音や間接音などを再生環境に高精度に模擬することで、原音場の音像や残響感を忠実に再現する。音像とは、空間内にある音源の方向や距離感を知覚できる音のイメージを表し、音像の定位性能が高いほど音源方向、音源までの距離感を明確に知覚できる。これらの代表的な手法として、次節ではトランスオーラルシステム、および頭部伝達関数を用いたヘッドホン再生について述べる。

2.2.1 トランスオーラル方式を用いた音場再生

複数のダイナミックスピーカを用いた手法として、2台のスピーカを利用したトランスオーラル方式 [5, 7, 10] が提案されている。トランスオーラル方式は図 2.1 で表した再生環境のように受聴者前方の左右にスピーカを配置し、受聴者両耳の位置において目的の音響信号が再現されるよう出力信号を制御する手法である。ここで図 2.1 における、各スピーカへの入力信号を $x_l(\omega)$, $x_r(\omega)$ とすると、受聴者の左耳、右耳での受音信号 $\tilde{y}_l(\omega)$, $\tilde{y}_r(\omega)$ は次のように表される。

$$\tilde{\mathbf{y}}(\omega) = \mathbf{G}(\omega)\mathbf{x}(\omega), \quad (2.1)$$

$$\mathbf{x}(\omega) = \begin{bmatrix} x_l(\omega) \\ x_r(\omega) \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(\omega) = \begin{bmatrix} \tilde{y}_l(\omega) \\ \tilde{y}_r(\omega) \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{G}(\omega) = \begin{bmatrix} g_{ll}(\omega) & g_{lr}(\omega) \\ g_{rl}(\omega) & g_{rr}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

ω は周波数を、 $\mathbf{G}(\omega)$ は各スピーカから両耳までの伝達関数を表し、 $g_{ll}(\omega)$ と $g_{lr}(\omega)$ は図 2.1 におけるスピーカ L から左耳、右耳までの伝達関数を、 $g_{rl}(\omega)$ と $g_{rr}(\omega)$ はスピーカ R から左耳、右耳までの伝達関数を示す。なお、 $g_{lr}(\omega)$ と $g_{rl}(\omega)$ はトランスオーラル方式におけるクロストークの伝達系を表す。トランスオーラル方式で目的の音場を再現するには、受音信号となる $\tilde{\mathbf{y}}(\omega)$ が目的の音場内での受音信号と等し

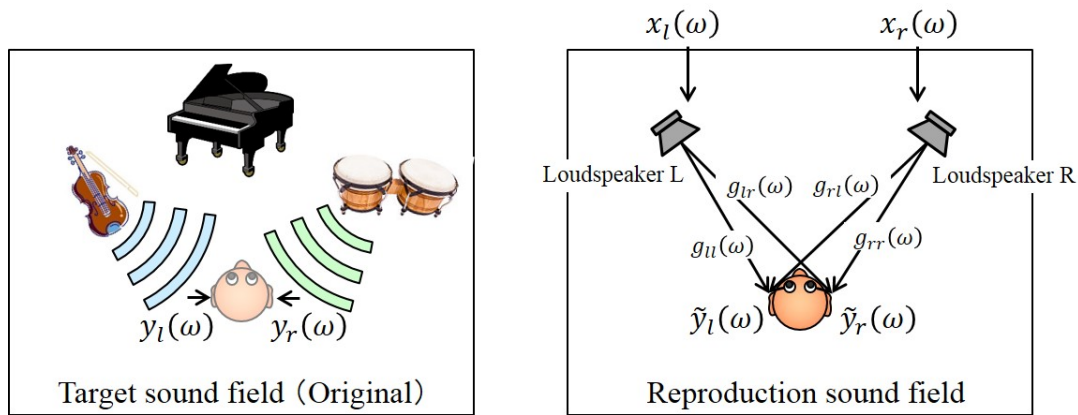


図 2.1 ランスオーラル方式における目的音場と再生環境のイメージ

くなるように出力信号を制御する必要がある．一般的に，目的音場を再現するための出力信号の制御にはフィルタ処理が利用されており，目的音場における両耳での受信信号を $y_l(\omega)$, $y_r(\omega)$ ，フィルタを $\mathbf{H}(\omega)$ とすると，再生環境で目的の音場を再現するためには，フィルタ $\mathbf{H}(\omega)$ は以下の式を満たす必要がある．

$$\mathbf{y}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\tilde{\mathbf{y}}(\omega), \quad (2.5)$$

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{bmatrix} h_{11}(\omega) & h_{12}(\omega) \\ h_{21}(\omega) & h_{22}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

式 (2.5) は式 (2.1) より，

$$\mathbf{y}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{G}(\omega)\mathbf{x}(\omega), \quad (2.7)$$

と表すことができる．従って，ランスオーラル方式において目的の音場を受聴者の両耳に再現するには，

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{G}^{-1}(\omega), \quad (2.8)$$

を満たすフィルタ $\mathbf{H}(\omega)$ を設計する必要がある．本節では前方 2ch のスピーカによる音場再現手法について述べたが，MINT 法 (Multi-input/output INverse Theorem: 多入出力系逆フィルタ) を利用することで，スピーカ数 -1 の受聴点を制御することが可能である．また，基本的にはスピーカ数を増やすほど受聴位置でより高精度に

目的の音場を再現でき [6, 11, 13, 14], 5.1 ch サラウンド方式 [12] のように受聴者の周囲にスピーカを設置するサラウンド再生方式では, 後方も含めた多方向において音像定位を実現することが可能である. しかしながら, スピーカ数を増加するとその分システムが大規模になり, フィルタの計算時間も長くなる. またスピーカ配置における物理的制約も大きくなるという問題点がある.

2.2.2 バイノーラル方式

2.2.1 節で述べたトランスオーラル方式は受聴点付近の音響信号を空間上に高精度に模擬することで, 高い臨場感を得ることのできる手法である. この手法に対して, バイノーラル方式 [8, 16] はヘッドホンやイヤホンなどを用いて直接両耳での受音信号を再現する方式である. バイノーラル方式を実現する主な手法として, 受聴者の両耳に音波の伝搬を阻害しないようマイクロホンを設置し, 直接目的の音場で収録を行い, 収録音をそのまま出力信号として再生する方法がある. しかしながら, この方法は利用者自身が目的音場に赴く必要があるため, シミュレーションやアトラクションへの応用に不向きである. そのため, 人間の頭部, または上半身を模した人形の耳に, マイクロホンを埋め込んだ図 2.2 のようなダミーヘッドを利用する方法 [14, 22] が一般的であるが, 受聴者とダミーヘッドの頭部形状の違いに起因する音の変化により, 十分な効果を得られない問題がある [21, 23]. そこで近年では, 受聴者の頭部や肩などによる反射, 回折の特性を数式的に表した頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function; HRTF) [15, 21] による再現精度の向上手法が提案されている. 実際に受聴者の HRTF を予め測定しておき, ダミーヘッドで収録した音に畳み込むことで高い音像定位性能や臨場感を実現できる. しかしながら, HRTF は音の到来方向に依存して大きく変化するため, あらゆる方向からの音の到来に備えて計測する必要がある. また, 正確に計測するためには大規模な設備が必要であると同時に, 長時間の計測時間を必要とするため, 容易に計測できないという問題がある. 加えて, ヘッドホン再生による頭部への圧迫感なども問題点として挙げられる.

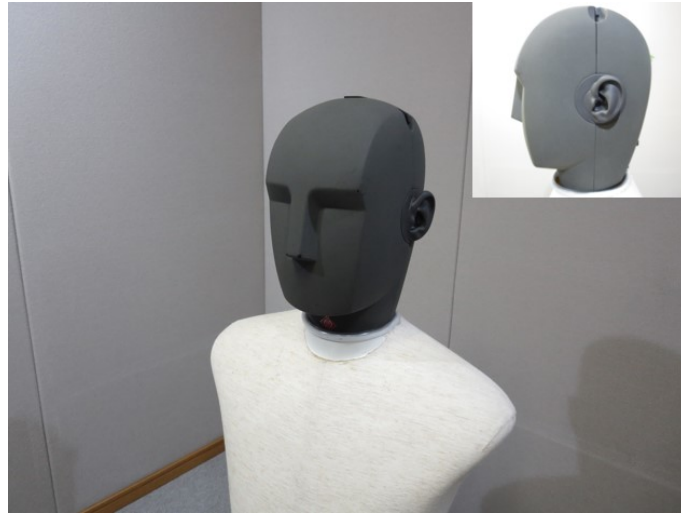


図 2.2 ダミーヘッドの写真

2.3. 音像プラネタリウム方式

従来の3次元音場再生方式はスピーカ配置における物理的制約や大規模な設備が必要であるという問題があった。これらの課題に対し、鋭い指向性を有するパラメトリックスピーカ [24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33] を利用した音像プラネタリウム方式 [34, 35, 36, 37, 38] が提案されている。音像プラネタリウム方式による3次元音場再生のイメージを図 2.3 に示す。音像プラネタリウム方式は超指向性を有するパラメトリックスピーカを複数個利用することで、壁面や天井に複数の音像を構築し、様々な方向からの音の到来を表現できる。また、反射音を利用するためスピーカを設置することのできない箇所にも容易に音像を構築することができる上に、複数のスピーカを1箇所を集約することも可能である。さらに、ヘッドホンを使用する必要もないため、あらゆる人が容易に3次元音場を体験することができる。本節ではまず、音像プラネタリウムに必要なパラメトリックスピーカの原理について述べる。次に、パラメトリックスピーカの入力信号となる変調波を生成する方式について述べる。その後、パラメトリックスピーカを用いた移動音構築の従来手法について述べ、最後に、現時点における音像プラネタリウム方式の問題点について

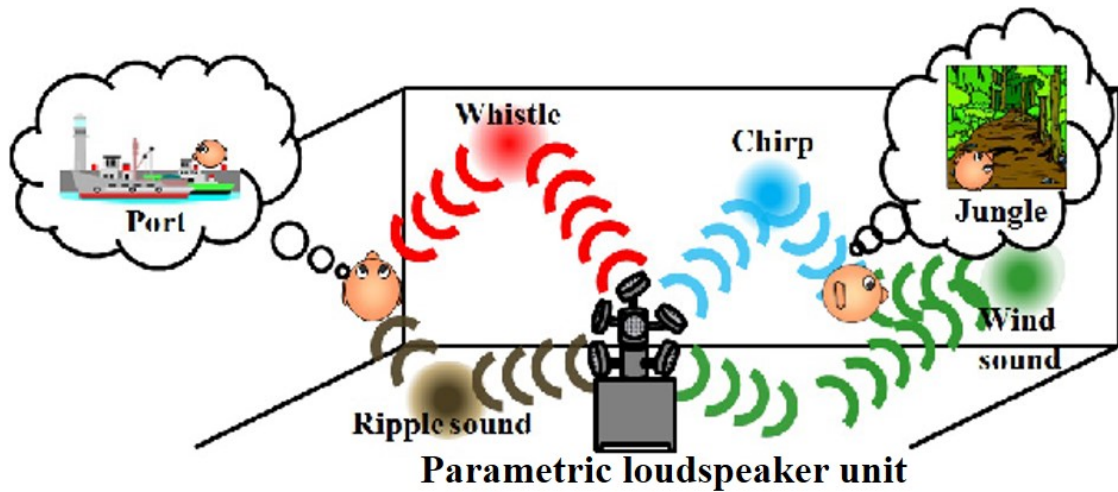


図 2.3 音像プラネタリウムによる音場再生のイメージ

て述べる。

2.3.1 パラメトリックスピーカの原理

パラメトリックスピーカは超音波の直進性を利用することで鋭い指向性を有し、単体でオーディオスポット [25, 27, 29, 28] を構築できる。そのため、美術館や駅の改札などの音声アナウンスに利用される。パラメトリックスピーカは、再生すべき音響信号をキャリア波となる超音波で振幅変調した振幅変調波を、音源位置周辺において 100~120 dB を超える大音圧レベルで放射する。放射された振幅変調波は、空気の非線形性により歪むことで変調前の音響信号に自己復調する [31, 32, 39, 40]。ここで搬送波の周波数を F 、時間を t とし、搬送波の最大振幅を V_{cm} とすると、搬送波 $V_C(t)$ は次式のように表せる。

$$V_C(t) = V_{cm} \cos(2\pi Ft). \quad (2.9)$$

また、再生する音響信号の最大振幅を $V_{sm} (\leq 1)$ 、周波数を f とすると、音響信号 $V_S(t)$ は次式で表される。

$$V_S(t) = V_{sm} \cos(2\pi ft). \quad (2.10)$$

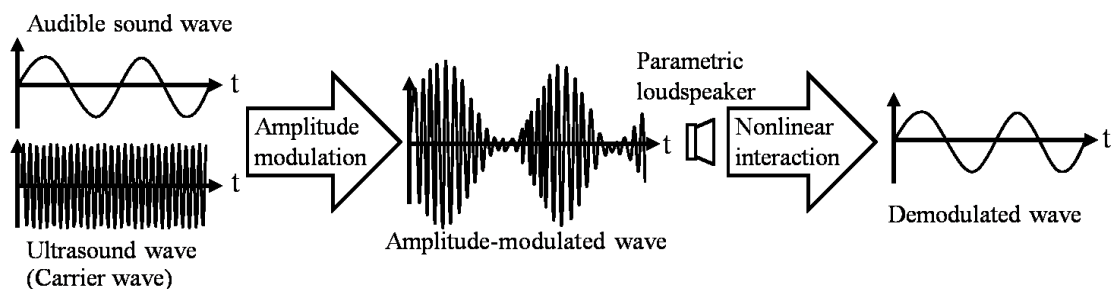


図 2.4 パラメトリックスピーカによる音響信号の再生の流れ図

そして、 $V_S(t)$ で $V_C(t)$ を振幅変調した振幅変調波 $V_A(t)$ は変調度を $m(\leq 1)$ とすると次式で表される。

$$V_A(t) = (1 + mV_S(t))V_C(t), \quad (2.11)$$

$$m = \frac{V_{sm}}{V_{cm}}. \quad (2.12)$$

なお、 $m > 1$ とすると過変調となる。この振幅変調波は三角関数の加法定理を用いると次式で表される。

$$\begin{aligned} V_A(t) &= (1 + mV_S(t))V_C(t), \\ &= \{1 + m \cos(2\pi ft)\} \cos(2\pi Ft), \\ &= \cos(2\pi Ft) + m \cos(2\pi ft) \cos(2\pi Ft), \\ &= \cos(2\pi Ft) + \frac{m}{2} \cos(2\pi(F + f)t) + \frac{m}{2} \cos(2\pi(F - f)t), \end{aligned} \quad (2.13)$$

式 (2.13) より振幅変調波は搬送波の周波数 F に加え、側波帯と呼ばれる搬送波と音響信号との和の周波数 $F + f$ と差の周波数 $F - f$ を有することが確認できる。この振幅変調波を生成する変調方式には、大きく分類して両側波帯変調方式と単側波帯変調方式が提案されており、それぞれ側波帯の利用方法が異なる。なお、具体的な変調方式の説明については次節で述べる。振幅変調波はパラメトリックスピーカから 1 次波として大音圧で放射され、放射された振幅変調波は空気非線形性により歪むことで 2 次波として変調前の音響信号へ自己復調する。図 2.4 に振幅変調波の生成から自己復調までの流れを示す。再生音となる 2 次波は、この側波帯と搬送波

との差音であり，Merklinger は自己復調した音響信号の音圧レベル p を，式 (2.14) のような簡易式で導出している [40].

$$p = \frac{Sp_0}{4\omega\pi c_0 d} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} \left[E(t') \tan^{-1} \left\{ \frac{\beta\omega p_0 E(t')}{4\alpha\rho_0 c_0^3} \right\} \right], \quad (2.14)$$

ここで， S はパラメトリックスピーカの開口面積， d はスピーカからの距離， c_0 は音速， ρ_0 は空気の密度， α は1次波の吸収係数， β は空気の非線形係数である．また p_0 は振幅変調波の音源音圧レベル， t' は遅延時間 $t' = t - d/c_0$ ， $E(t')$ は振幅変調波の包絡関数である．一般的に，パラメトリックスピーカは $p_0 \gg 4\alpha\rho_0 c_0^3/\beta\omega$ を満たすような大音圧レベルで利用され，その場合 p は $E(t')$ の最大振幅を1とすると，

$$p \propto \frac{p_0}{d} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} |E(t')|, \quad (2.15)$$

$$E(t') = \cos(\omega t'/2), \quad (2.16)$$

となる．ここで $\frac{\partial^2}{\partial t'^2} |E(t')|$ は包絡関数の2階時間微分を表す．式 (2.15)，(2.16) より，パラメトリックスピーカの再生音の音圧は距離と目的音の周波数に依存しており，理論上，復調される可聴音のパワーは周波数の2乗に比例する．従って，パラメトリックスピーカの再生音は低域ほど復調されにくいという問題がある．また，高調波ひずみと呼ばれる雑音成分の発生による音質劣化の問題もある．高調波ひずみは主に両側波帯間の相互作用によって発生し，目的音の倍音成分として現れる．

2.3.2 変調方式

パラメトリックスピーカで可聴音を再生するためには，目的の音響信号をキャリア波となる超音波で変調した変調波を放射する必要がある．この変調波を生成する方法として，大きく振幅変調方式 [28] と周波数変調方式 [54] が提案されているが，周波数変調方式は目的音となる側波帯成分以外も同時に生成されるため，音質が大幅に低下する．そのため，パラメトリックスピーカの利用においては振幅変調を用いることが一般的である．振幅変調方式には両側波帯を利用する両側波帯 (Double Side-Band:DSB) 変調方式 [28, 44] と単側波帯 (Single Side-Band:SSB) 変調

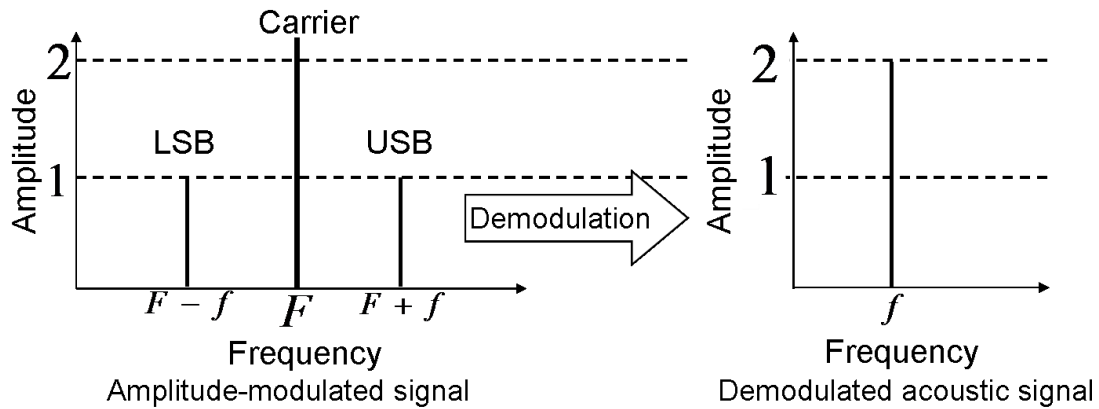


図 2.5 DSB 変調方式の模式図

方式 [49, 51, 52, 53] が提案されている．図 2.5 に DSB 変調方式を用いた際の振幅変調波と復調される音響信号の模式図を示す．DSB 変調方式は図 2.5 から確認できるように，キャリア波と LSB および USB との差音の和となるため復調される音響信号の音圧が大きい．しかし，高調波歪みが発生するため，目的とする音響信号のみの再生が困難である．高調波歪みとは，振幅変調波が復調される際に発生する 3 次波以上の成分である．2 次波の 2 倍の周波数が 3 次波であり，3 倍の周波数が 4 次波，4 倍の周波数が 5 次波として続けて発生する．高調波歪みは両側波帯の相互作用により発生し，パラメトリックスピーカの音質劣化の原因になる．このような問題に対し，両側波帯を利用し，かつ倍音の発生量を低減する変調方式として，式 (2.17) に示す包絡変調方式 [44, 47] がある．

$$V_A(t) = \sqrt{(e(t) + mV_S(t))}V_C(t). \quad (2.17)$$

$e(t)$ は再生すべき音響信号の包絡関数であり， $p_0 \ll 4\alpha\rho_0c_0^3/\beta\omega$ を満たすような小音圧レベルの場合， $e(t)$ は聴覚上無視できるほど低い周波数の信号になるため，理論上では無歪みの目的音を再生可能である．しかしながら，平方根をとるためパラメトリックスピーカの超音波素子自体の再生可能な周波数帯域の拡大が必要である上に，再生される差音の音圧レベルも小さい．低域の音圧低下に対しては，低域再生には両側波帯を，高域再生には単側波帯を用いる非対称振幅変調方式 [49] が提案されており，低域強調および復調の際に混入する雑音を低減できる．しかしながら，

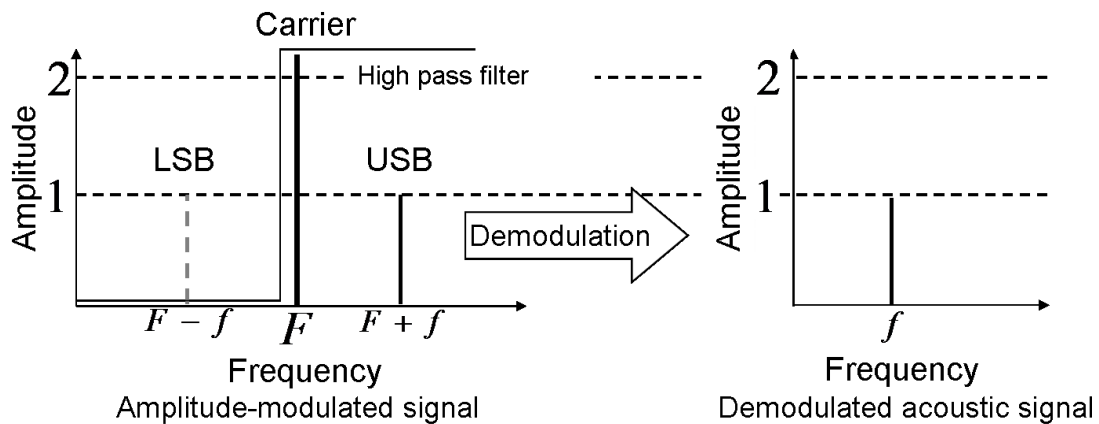


図 2.6 SSB 変調方式の模式図

全帯域で同様の単側波帯を利用するため、電気音響変換効率の悪い単側波帯を利用する帯域があり、高域の音圧レベルが大きく減少する可能性がある。

両側波帯を用いる変調方式として DSB 変調方式が存在する一方、LSB または USB のどちらかの単側波帯を用いる変調方式として SSB (SSB: Single Side Band) 変調方式が提案されている。図 2.6 に SSB 変調方式を用いた際の振幅変調波と復調される音響信号の模式図を示す。特に、LSB を用いる変調方式を LSB 変調方式、USB を用いる変調方式を USB 変調方式という。通常は振幅変調波にキャリア波の周波数付近をカットオフ周波数としたローパスフィルタやハイパスフィルタなどを用いることで、単側波帯を実現する。高調波歪みは両側波帯の相互作用により発生するため、単側波帯のみを用いる SSB 変調方式により、高調波歪みの発生を低減できる。実際に、3 次波において 15 dB、4 次波において 20 dB の低減が愛甲らにより報告 [48] されている。しかし、高調波歪みの低減が可能である一方、図 2.6 から確認できるように単側波帯を用いるため、電気音響変換効率においては DSB 変調方式に劣るという問題点がある。

2.3.3 従来の音像プラネタリウム方式における移動音構築手法

従来の音像プラネタリウム方式では、構築される音像は 1ヶ所に固定されるため、移動音の表現が困難であった。この問題に対し、伊藤らはパラメトリックスピーカ

で複数個所に構築した同音源の複数音像の振幅比を制御することで、各音像の構築点間を移動する移動音像を生成する手法を提案している [38]。人間は音波を知覚した際に、主に両耳間における音圧差 (Inter-aural level difference:ILD) または位相差 (Inter-aural time difference:ITD) を基に音像の方向を把握する [67, 68, 69]。そして、知覚した音像の音圧差、位相差が連続的に変化するとき音像の移動を知覚する。この手法は受聴者に対して、異なる方向に定位する音像を同時に構築し、それらの振幅比を制御することで受聴者が知覚する ILD を連続的に変化させる。なお、各音像間の補間には振幅パンニング [14] の原理を利用する。例として、図 2.7 に示すような 3 点間を移動する音像の振幅は以下の補間式で表される。

$$S_A = \sqrt{\frac{PA'}{AA'}}, \quad (2.18)$$

$$S_B = \sqrt{\frac{PB'}{BB'}}, \quad (2.19)$$

$$S_C = \sqrt{\frac{PC'}{CC'}}, \quad (2.20)$$

S_A , S_B , S_C は各音像を構築するパラメトリックスピーカの出力信号の増幅率を表しており、それぞれが式 (2.18)~(2.20) を満たすとき、受聴者は図 2.7 における点 P の位置に音像を知覚する。そして、所望の音像の移動に合わせて S_A , S_B , S_C を連続的に制御することで、構築点間を連続的に移動する音像を構築する。この手法は出力信号の増幅率を制御するだけで移動音を表現できるため、比較的容易に実現できる手法であるが、複数のパラメトリックスピーカを要する上に、受聴位置が固定されるという問題がある。また、パラメトリックスピーカで構築した音像間の距離が長くなると、音像間の中心付近は音像定位性能が大幅に低下する問題がある。従って、パラメトリックスピーカの放射方向を制御することで、音像の構築位置自体を制御する手法が必要となる。次節では、パラメトリックスピーカを構成する超音波素子への入力信号に対して、遅延制御を行うことで音波の放射方向を直接制御する従来手法について述べる。

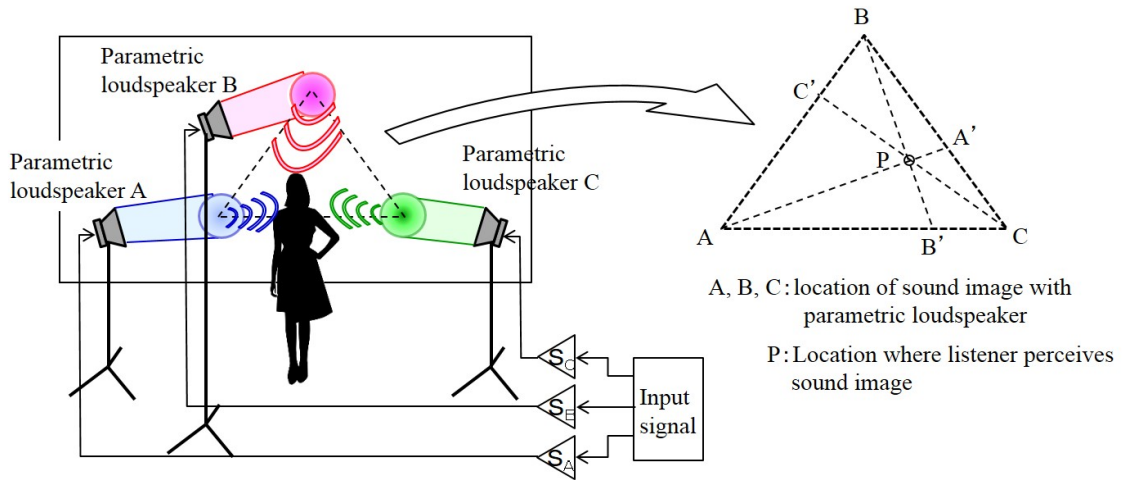


図 2.7 複数音像の音圧比制御による移動音像構築手法のイメージ

2.3.4 遅延付加による放射方向の制御

パラメトリックスピーカは平面状に配置されている超音波素子から振幅変調波を同位相で出力することで、正面方向に高い指向性を実現する。この原理に着目し、近年では各超音波素子への入力信号に対して、一定時間ずつの遅延を与えることで、それぞれの素子から放射される振幅変調波の同相化される方向を制御する手法 [55, 56, 57, 58] が提案されている。遅延付加による放射方向制御のイメージを図 2.8 に示す。遅延付加を利用して目的方向に音像を構築するためには、入力信号に対して目的方向で振幅変調波が同位相となる必要がある。ここで、目的方向を θ 、超音波素子間を d 、音速を c とすると、隣り合う超音波素子間の入力信号の遅延時間 τ は次のように表せる。

$$\tau = \frac{d \sin(\theta)}{c}. \quad (2.21)$$

従って、 i 番目の超音波素子への入力信号に付加する遅延時間 τ_i は

$$\tau_i = (i - 1)\tau. \quad (2.22)$$

で表される。この遅延時間 τ_i を図 2.8 に示すように、順次隣り合う超音波素子への入力信号に付加することで目的方向 θ に放射方向を制御することが可能となる。しかしながら、予め遅延時間 τ を算出し、入力信号に付加するこの手法では、連続的

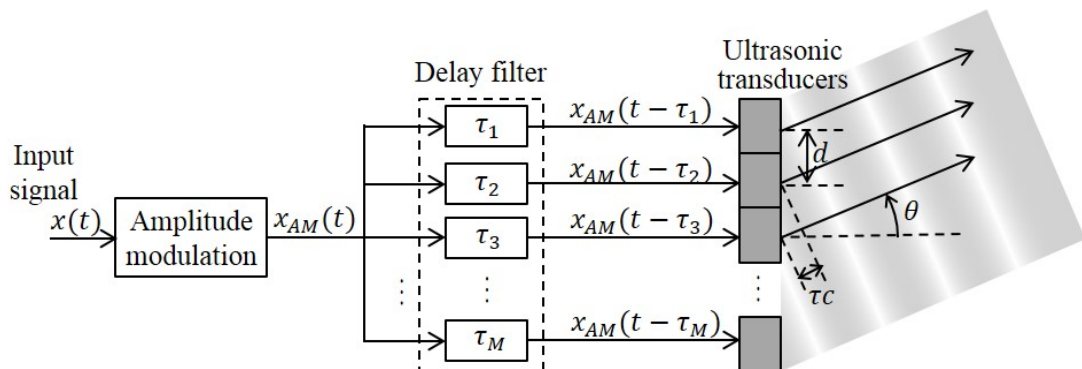


図 2.8 遅延制御によるパラメトリックスピーカの放射方向制御のイメージ

な遅延時間の制御が不可能であるため、連続的な放射方向の制御が困難となる。また、空間エイリアシングの影響により、目的の方向以外にも音響ビームが発生する問題 [55] もある。

2.3.5 音像プラネタリウム方式の問題点

音像プラネタリウム方式は光のプラネタリウムの原理のように、複数のパラメトリックスピーカを集約したユニットから放射される音を壁面、床、天井に反射させ、利用者に対して壁面反射型オーディオスポットを構築することで高い音像定位性能を発揮する。しかしながら、音像プラネタリウム方式には前節で述べたようにパラメトリックスピーカ自体の音質劣化による音像の音質低下の問題がある。加えて、壁面に構築した音像は1箇所固定されるため、移動音の構築および受聴者の移動に追従した音像提示が困難となる。なお、前節で述べたように、パラメトリックスピーカ自体を動かさずに音像の構築位置を制御する手法も提案されているが、複数器のパラメトリックスピーカが必要な上に受聴位置が限定される問題もある。そこで本論文では、パラメトリックスピーカを利用する3次元音場再生方式を用いて様々な音場を高音質に構築するために、パラメトリックスピーカ単体の音質改善手法の提案、およびパラメトリックスピーカ自体を動かすことなく音像の構築箇所を制御する手法を提案する。

第3章 パラメトリックスピーカの音質改善

3.1. はじめに

2章で述べたとおり，スピーカ配置の物理的制約を解消しながら高い音像定位性能を実現する3次元音場再生方式として，パラメトリックスピーカを利用する音像プラネタリウム方式は極めて有効な再生方式である．しかしながら，パラメトリックスピーカ自体の音質劣化により構築した3次元音場の品質低下が問題となる．そこで本章では，パラメトリックスピーカの音質改善手法を提案する．ここで，パラメトリックスピーカの再生音は空気中で復調しながら目的の音響信号に復元されるため，スピーカ近傍では小音圧，低音質となる．従って，上記で述べた音質改善に加え，放射された振幅変調波が復調するために必要な距離を推定する指標も併せて提案する．

3.2. 重み付き両側波帯変調方式の提案

両側波帯を用いるDSB変調方式では高調波歪みが発生する．一方，単側波帯を用いるSSB変調方式ではDSB変調方式と比較して変換効率が劣り，再生音圧が低下する．ここで，両側波帯を用いると再生される音響信号の音圧が大きく，単側波帯を用いると高調波歪みの発生を低減できるという利点に着目すると，再生の困難な低域には両側波帯を用い，十分音圧の得られる高域には単側波帯を用いることで，低域強調および高調波歪みの低減が可能であると考えられる．そこで本論文ではまず，DSBおよびLSB，USB変調方式を用いた際の周波数特性を計測し，その計測結果を基に周波数ごとに用いる側波帯を決定する．ここで，用いる側波帯を帯域ごと

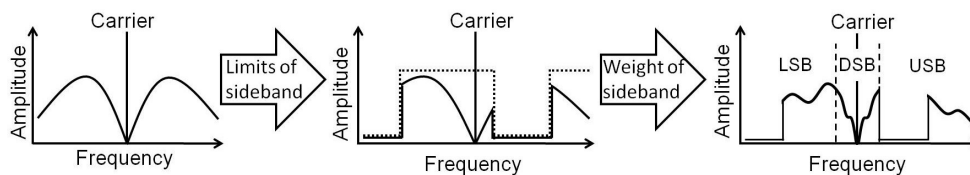


図 3.1 提案手法における側波帯制御の流れ

に決定するだけでは、帯域ごとに各変調方式を用いた際の音響信号が再生されるため、十分に低域強調されない、または過度に低域強調されるなどの問題が考えられる。そのため、周波数ごとに用いる側波帯を決定するだけでなく、用いる側波帯を周波数ごとに制御する必要がある。従って本論文では、側波帯を周波数ごとに重み付けすることで、低域には両側波帯を、高域には単側波帯を用い、さらに用いる側波帯を周波数ごとに制御する変調方式を提案する。図 3.1 に提案手法の主な流れを示す。本論文では、図 3.1 に示すように、両側波帯を制限し、利用する側波帯の周波数ごとの振幅の重みを制御する。

3.2.1 DSB, SSB 変調方式を用いた際の周波数特性の計測

提案手法の実現のために、DSB および LSB, USB 変調方式の周波数特性を比較し、周波数ごとに用いる側波帯を決定する必要がある。そこで本論文では、予備実験として、それぞれの変調方式を用いてホワイトノイズを再生した際の対数パワースペクトルを比較することで、再生帯域ごとに利用する側波帯を制限する。なお、ホワイトノイズは全周波数において均一なパワーを有する信号であり、再生することでスピーカの周波数特性を計測することが可能である。実験条件を表 3.1 に示す。また実験結果として、図 3.2 に DSB および LSB, USB 変調方式を用いて再生したホワイトノイズの対数パワースペクトルを示す。図 3.2 から、0~2 kHz では LSB, USB 変調方式共に音圧が小さいことが確認できる。従って、0~2 kHz 付近は低域強調のため両側波帯を利用する。またおよそ 8 kHz 付近で LSB, USB 変調方式の音圧の大小関係が入れ替わるので、変換効率向上のため、8 kHz 付近までは LSB, 8 kHz 以

表 3.1 予備実験の実験条件

Parametric loudspeaker	mitsubishi, MSP-50E
Cone loudspeaker	DIATONE, DS-7
Loudspeaker amplifier	VICTOR, PS-A2002
Microphone	HOSIDEN, KUC-1333
Microphone amplifier	AUDIO-TECHNICA, AT-MA2
A/D, D/A converter	ROLAND, UA-101
Sampling frequency	192 kHz
Quantization	16 bit
Carrier frequency	40 kHz
Sound source	White noise (2 sec)
Temperature / Humidity	25 °C / 46 %
Background noise	$L_A = 36.0$ dB
Distance between microphone and loudspeaker	1.5 m

上は USB を利用する。ここで用いる側波帯の帯域を決定するだけでは、十分な低域強調が成されない、または過度に低域強調される等の問題が考えられる。そのため、帯域ごとに用いる側波帯を決定するだけでなく、用いる側波帯の周波数ごとの振幅を制御する必要があると考えられる。用いる側波帯の周波数ごとの振幅は、DSB 変調方式を用いて再生したホワイトノイズのパワースペクトルを基に決定する。また、側波帯の制御は周波数ごとに重み付けした帯域制限フィルタを用いる。重み付けする際の重み係数の導出法については次節で述べる。

3.2.2 重み係数の導出法

両側波帯に重み付けする際の重み係数は LSB と USB でそれぞれ異なる。まず、LSB, USB 変調方式を用いて再生したホワイトノイズのパワースペクトルを基に、

前節のように帯域ごとに用いる側波帯を決定する．例として，キャリア波 40 kHz をホワイトノイズで振幅変調した振幅変調波の対数パワースペクトルを図 3.3 に，図 3.2 の結果を基に用いる側波帯成分のみを残した振幅変調波の対数パワースペクトルを図 3.4 に示す．また DSB 変調方式を用いた際の周波数特性を基に，用いる側波帯を周波数ごとに制御する．DSB 変調方式を用いて再生したホワイトノイズの周波数ごとの振幅を $X(f)$ ，最も振幅の小さい周波数の振幅を X_{min} とすると，キャリア波より低域に掛ける重み係数 $W_L(f)$ ，および高域に掛ける重み係数 $W_U(f)$ は次式のように決まる．なお，重み付けする周波数 f の範囲は，人の可聴周波数がおおよそ 0～20 kHz であることから $0 \text{ Hz} < f < 20 \text{ kHz}$ とした．

$$W_L(F - f) = \begin{cases} \frac{X_{min}}{X(f)} & \text{if } 0 < f < 20 \text{ kHz or } W_L(f) > W_U(f), \\ 0 & \text{if otherwise,} \end{cases}$$

$$W_U(F + f) = \begin{cases} \frac{X_{min}}{X(f)} & \text{if } 0 < f < 20 \text{ kHz or } W_L(f) < W_U(f), \\ 0 & \text{if otherwise,} \end{cases}$$

ここで重み係数の周波数の値を $F - f$ ， $F + f$ とするのは，振幅変調波のキャリア波 F と両側波帯との差音が，復調された音響信号の周波数 f に相当するためである．この重み付けを施した帯域制限フィルタを用いて振幅変調波の側波帯を制御する．図 3.5 に予備実験における計測結果図を基に設計した重み付き帯域制限フィルタの対数パワースペクトルを示す．

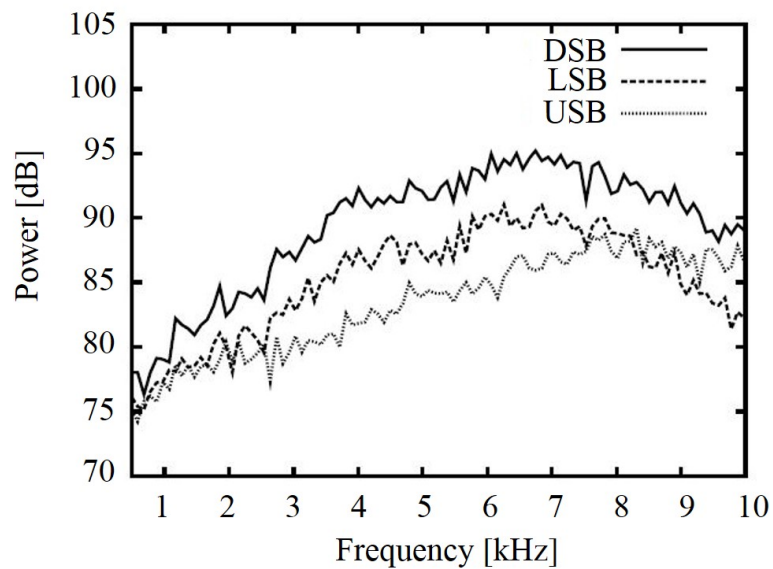


図 3.2 DSB, LSB, USB 変調方式を用いてホワイトノイズを再生した際の対数パワースペクトル

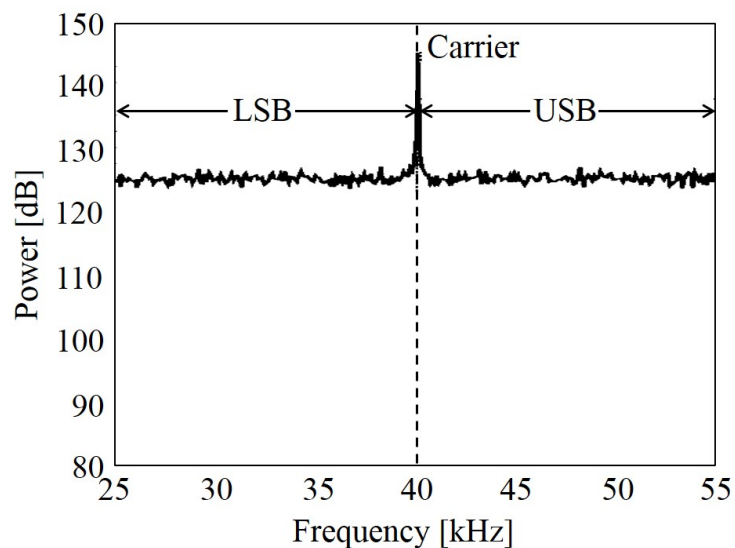


図 3.3 ホワイトノイズをキャリア波 40 kHz で振幅変調した振幅変調波の周波数特性

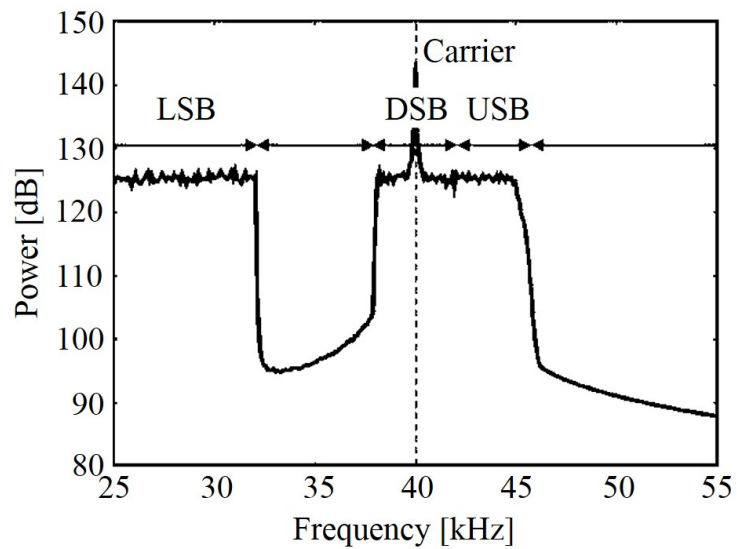


図 3.4 用いる側波帯を決定した振幅変調波の周波数特性

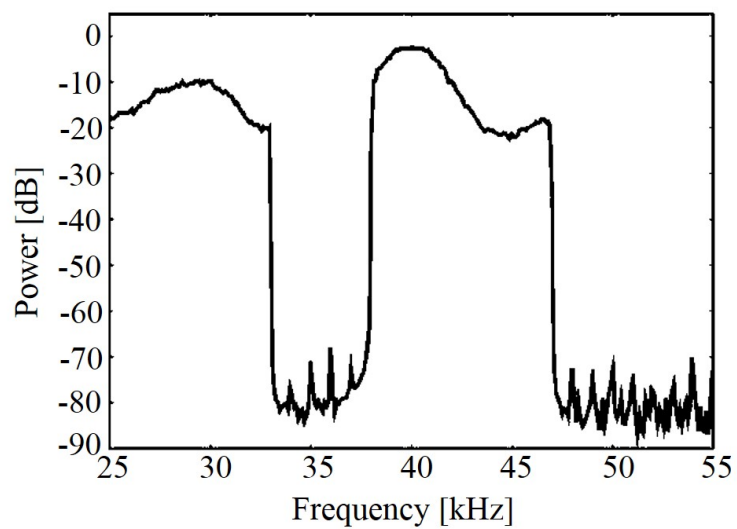


図 3.5 設計した重み付き帯域制限フィルタのパワースペクトル

表 3.2 客観評価実験の実験条件

Parametric loudspeaker	MITSUBISHI, MSP-50E
Cone loudspeaker	DIATONE, DS-7
Loudspeaker amplifier	VICTOR, PS-A2002
Microphone	HOSIDEN, KUC-1333
Microphone amplifier	AUDIO-TECHNICA, AT-MA2
A/D, D/A converter	ROLAND, UA-101
Sampling frequency	192 kHz
Quantization	16 bit
Sound source (experiment 1)	White noise (2 sec)
Sound source (experiment 2)	Sine wave (2, 5 kHz)
Temperature / Humidity	25 °C / 46 %
Background noise	$L_A = 32.2$ dB
Distance between microphone and loudspeaker	1.5 m

3.2.3 パラメトリックスピーカの音質改善に関する客観評価実験の条件

提案する変調方式の有効性を確認するために、客観・主観評価実験を行う。客観評価実験では、提案法が低域強調および再生される音響信号の制御に有効であることを確認する。主観評価実験では、提案法が低域強調および再生される音響信号の音質向上に有効であることを確認する。客観および主観評価実験共に、一般的なスピーカ、DSB, LSB, USB 変調方式を用いたパラメトリックスピーカと提案する変調方式を利用したパラメトリックスピーカの品質を比較する。提案法における側波帯の制御には、図 3.5 の帯域制限フィルタを用いた。

まず客観評価実験では、提案法が低域強調および再生される音響信号の周波数特性の制御、また高調波ひずみの低減に有効であることを確認する。低域強調および

再生される音響信号の周波数特性の制御に関する評価方法として、全帯域に均一なエネルギーを有するホワイトノイズを再生した際のパワースペクトルを比較することで、提案法の有効性を評価する。本実験では、予備実験よりパラメトリックスピーカで再生が困難であった 0.5~2 kHz を低域とし、0.5~10 kHz を再生帯域として評価を行い、各方式で再生したホワイトノイズのパワースペクトルを比較するとともに、低域および再生帯域の平均音圧レベルと誤差平均を比較する。なお、平均音圧レベル P_{ave} と、 P_{err} は以下の式 (3.1), (3.2) で求められる。

$$P_{ave} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} P(f) df, \quad (3.1)$$

$$P_{err} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} |P(f) - P_{ave}| df. \quad (3.2)$$

ここで、 f_1 , f_2 は積分範囲の最小および最大周波数の値、 $P(f)$ は周波数 f における音圧レベルである。

高調波ひずみの低減に関する評価では、各方式を用いて単一周波数を再生した際の、2倍音と3倍音の音圧レベルを目的音の音圧レベルと比較することで評価する。なお、提案法における両側波帯の帯域制限が倍音成分の低減に有効であることを示すため、2 kHz 以上の帯域で評価する。本論文では低域に近接する 2 kHz と、各方式において高音圧レベルでの再生が可能な 5 kHz を目的音として評価する。それぞれの実験では、実環境での有効性を確認するために、オフィス環境を模した部屋で実施した。実験条件を表 3.2 に、実験機材の配置図を図 3.6 に、実験環境の写真を図 3.7 に示す。

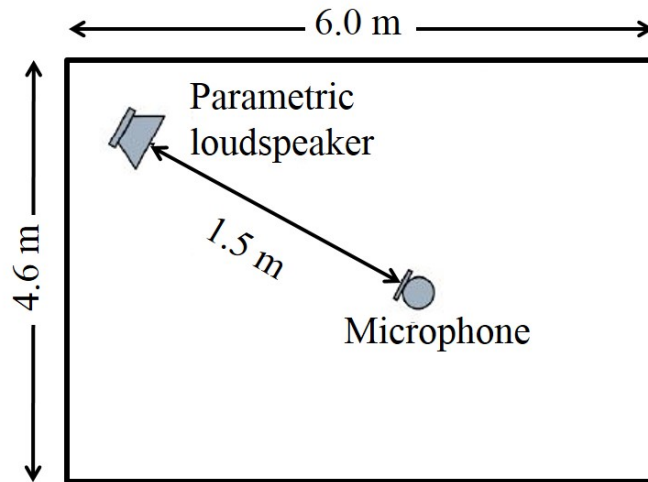


図 3.6 機材の配置図

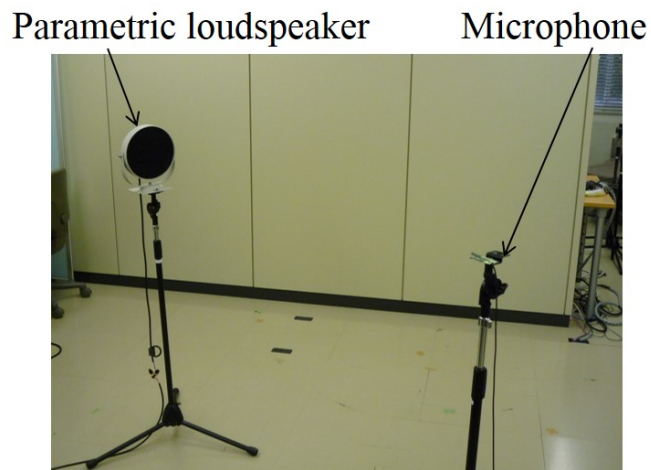


図 3.7 実験環境の写真

表 3.3 各方式における低域 (0.5~2 kHz) および再生帯域 (0.5~10 kHz) の平均音圧レベルと誤差平均

		0.5~2 kHz		0.5~10 kHz	
		SPL average [dB]	Average error [dB]	SPL average [dB]	Average error [dB]
The signal without loudspeaker		85.3	0.8	85.2	0.8
The signal with cone loudspeaker		78.4	3.6	79.1	2.5
The signal with parametric loudspeaker by	DSB	79.9	2.5	88.7	5.4
	LSB	77.3	2.1	84.6	4.7
	USB	77.0	1.7	82.9	4.2
	Proposed method	84.6	0.8	84.2	2.0

3.2.4 パラメトリックスピーカの音質改善に関する客観評価実験の結果

客観評価実験の結果として図 3.8 にコーンスピーカ、提案法および DSB, LSB, USB 変調方式で再生したホワイトノイズのパワースペクトルを、表 3.3 に各方式を用いた際の低域および通常帯域の平均音圧レベルと誤差平均を示す。また、図 3.9, 3.10 に 2 kHz, 5 kHz における倍音成分の低減量を示す。図 3.8 より、従来の変調方式と比べて提案法を用いた方が、低域の音圧が大きく再生帯域の対数パワースペクトルが均一であり、表 3.3 から、提案法により、低域強調が実現可能であることを確認できる。また誤差平均は最大で 2.59 dB 小さいことから、提案法のほうがホワイトノイズを忠実に再生できることが確認できる。従って、提案する変調方式は低域強調およびパラメトリックスピーカの音質向上に有効である。倍音成分においては、図 3.9, 3.10 から、提案法が DSB 変調方式より倍音を低減できることが確認でき、目的音 5 kHz の 2 倍音においては 15.4 dB, 3 倍音においては 18.9 dB の低減が見られた。従って、倍音の低減においても提案法が有効な変調方式であることが確認できる。しかしながら、低域 1 kHz 以下の強調および 10 kHz 以上の周波数特性の制御が不十分である。これらの原因として、予備実験と本実験を実施した際の、周囲の環境の変化が原因であると考えられる。特にパラメトリックスピーカは空気非線形性を利用することから、湿度や気温等の周囲の環境に大きく影響される可能

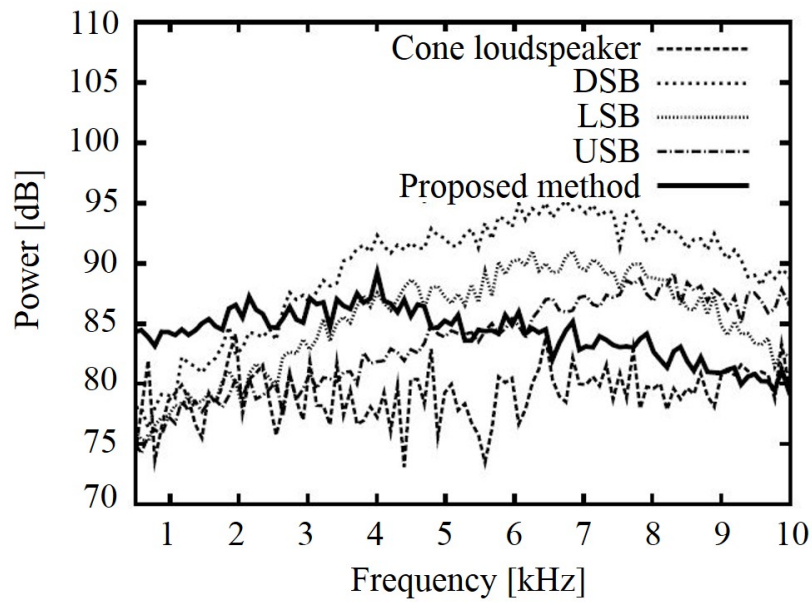


図 3.8 各方式でホワイトノイズを再生した際の対数パワースペクトル

性が考えられる。今後は周囲の環境が再生音に及ぼす影響を調査し、それに対する改善法を検討する必要がある。

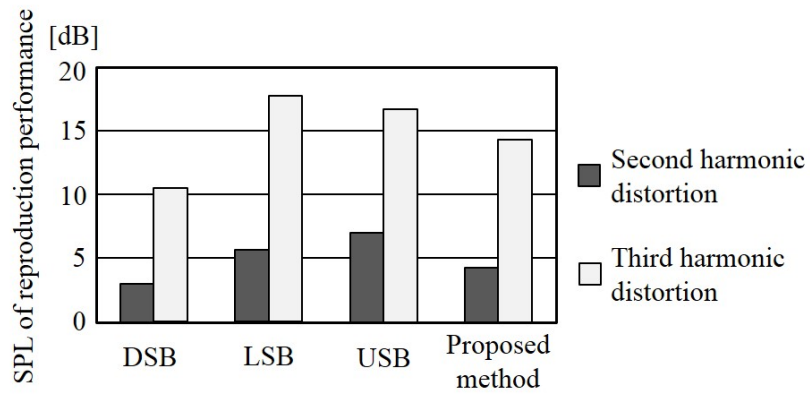


図 3.9 2 kHz における目的音と倍音との音圧レベル差

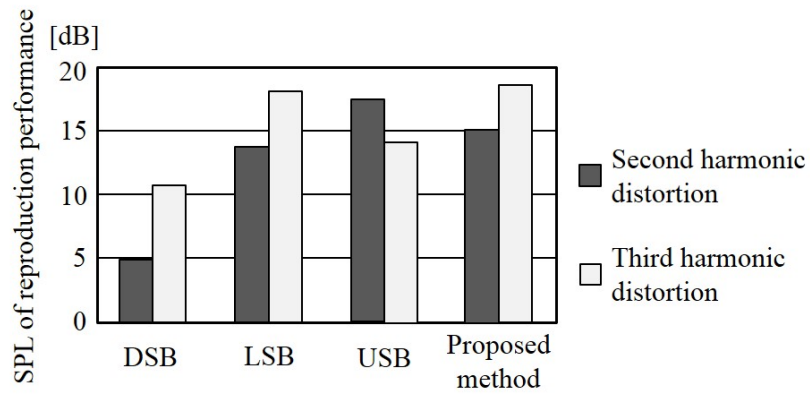


図 3.10 5 kHz における目的音と倍音との音圧レベル差

表 3.4 主観評価実験の実験条件

Place	Soundproof room
Headphone	SONY, MDR-CD900ST
Number of subject	10 persons
Sound source	Voice, music
Evaluation method	MOS (Mean Opinion Score)

3.2.5 パラメトリックスピーカの音質改善に関する主観評価実験の条件

主観評価実験では、提案法の低域強調に伴うパラメトリックスピーカの音質向上を確認する。客観評価実験同様に、コーンスピーカと各変調方式を用いたパラメトリックスピーカによる再生音をそれぞれ比較して評価する。評価項目は低域の音の大きさ、低域の音質、可聴域の音質とする。実験条件を表 3.4 に示す。音源には男性音声 (ATR 音素バランス単語 [59]) と楽曲 (クラシック楽曲) を利用し、各変調方式による再生音を評価音とした。評価指標には MOS(Mean Opinion Score)[60] による 5 段階評価を用い、各評価音を原音と比較して評価させた。各評価音と原音は 0~10kHz に帯域制限し、ヘッドホンを用いて騒音レベル $L_A = 70$ dB で再生した。なお、各評価音と原音はランダムな順番で再生し、各項目の評価ごとにそれぞれ 2 回評価させた。それぞれ音の大きさにおいては原音と比較して、5:十分再生できている、4:概ね再生できている、3:再生できている、2:あまり再生できていない、1:まったく再生できていない、音質においては原音と比較して、5:とても良い、4:良い、3:変わらない、2:悪い、1:とても悪い、として評価させた。

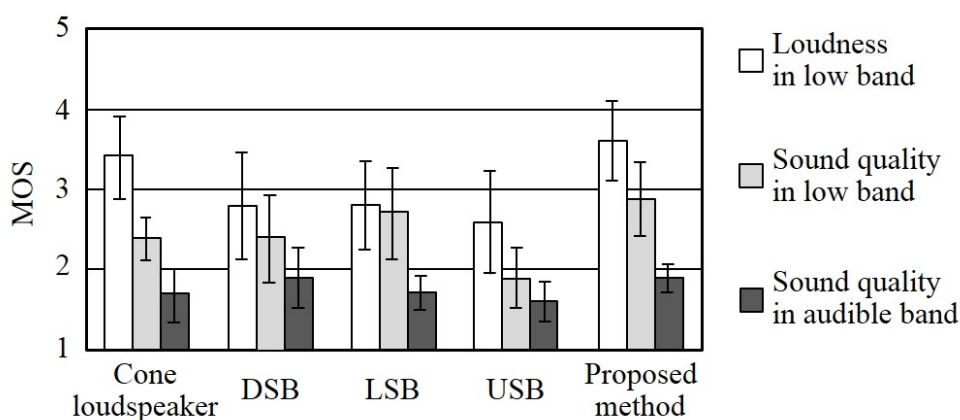


図 3.11 音声による主観評価実験の結果

3.2.6 パラメトリックスピーカの音質改善に関する主観評価実験の結果

主観評価実験の結果として，図 3.11 に音声を用いた際の結果を，図 3.12 に楽曲を用いた際の結果を示す．なお，横軸はコーンスピーカおよび各方式を示し，縦軸は MOS 値を表す．またグラフ内の棒グラフは被験者 10 名の評価の平均値，エラーバーは分散値を示す．図 3.11, 3.12 より，提案法がコーンスピーカの音質と同等の音質を実現することが確認できる．特に再生音の低域における音の大きさや音質は，従来法と比較して明確な向上が確認でき，提案法による低域強調に伴う音質向上が確認できる．

3.2.7 パラメトリックスピーカの音質改善に関する評価実験結果の考察

客観評価実験より，パラメトリックスピーカの周波数特性の制御に提案法が有効であることを確認した．特に表 3.3 から，低域においては原音を忠実に再現しており，通常低域においても従来法よりも高品質な原音再現が確認できた．これは，側波帯における周波数ごとの振幅の重みを制御した効果であると考えられ，提案法の

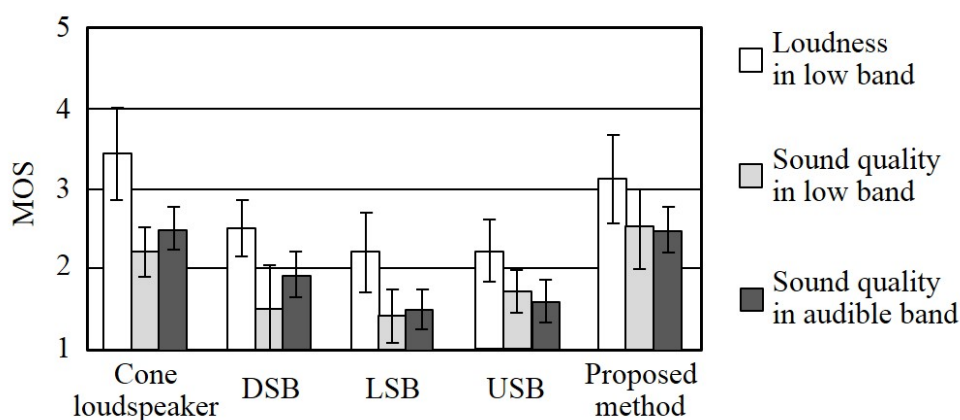


図 3.12 楽曲による主観評価実験の結果

重みの制御の有効性を示す。また倍音成分においては、提案法同様に両側波帯を用いる DSB 変調方式と比較して最大 10.2 dB の低減が確認できた。これは、高域の再生に単側波帯を利用したためであると考えられる。しかしながら、提案法では低域に比べ高域の音圧レベルが減少する。これは高域の再生に単側波帯を利用することが原因であると考えられる。また、低域に比べ通常帯域の誤差平均が増加することから、高域の制御が不十分であると考えられる。なお、倍音成分の評価において、提案法では 5 kHz の再生には LSB を利用するため、図 3.10 の LSB 変調方式と提案法の低減量は理論的には等しくなるが、実験結果では僅かながら誤差があることが分かる。これは、提案法において側波帯の周波数ごとの重みを制御したことが原因であると考えられる。主観評価実験では、低域の音の大きさと音質の向上を確認でき、提案法を用いることで一般的なスピーカと同等の音質を得られることが示された。しかしながら、再生帯域の音質においては明確な向上が確認できない。これは客観評価実験の結果から確認した高域の音圧レベルの低下が原因であると考えられる。なお、全体的に低い評価であるが、これは 5 段階評価において評価値 3 を基準として原音と各方式を比較したためであると考えられる。今後は低域強調と倍音成分の低減を達成すると同時に、高域の音圧レベルおよび音質が低下しない重みの制御方法などを検討する必要がある。

3.3. パラメトリックスピーカの復調評価指標の策定

パラメトリックスピーカから大音圧で放射された振幅変調波は空気の非線形性により歪むことで変調前の音響信号に自己復調する。本論文では、変調前の音響信号を目的音、復調された可聴音を再生音と定義する。パラメトリックスピーカの再生音は振幅変調波のキャリアと側波帯の差音であり、空気中において復調されることで目的音を再現する。従って、目的音を忠実に再現するには、放射された振幅変調波が空気中で十分に復調される距離を推定する必要がある。従来、復調に必要とされる距離は復調音の音圧レベルを用いて計測していた。しかしながら、復調音は周波数ごとに音圧レベルの増加傾向が異なるため、音圧レベルに基づく評価のみでは復調音の目的音に対する再現性を十分に評価することは困難である。

そこで、本論文ではこれまで検討されていないパラメトリックスピーカの距離ごとの周波数特性の変化を調査し、調査結果に基づいたパラメトリックスピーカの復調度測定のための評価指標を策定する。そして、策定指標から十分に復調される距離の推定を試み、主観的な音質との関係について評価を実施する。

3.3.1 従来の復調評価手法

パラメトリックスピーカから大音圧で放射された振幅変調波は、空気の非線形性により歪むことで可聴音に復調される。また、再生音の音圧や周波数特性は空気中での復調度に依存するため、パラメトリックスピーカで目的音を高精度に再生するには振幅変調波が十分復調される必要がある。これまでは再生音の音圧レベルが復調に依存することから、十分復調するために必要な距離を可聴音の音圧レベルから求めていた。実測した例として、パラメトリックスピーカから再生される超音波(振幅変調波)と再生音(復調波)の音圧レベルおよび十分復調とされる距離を図3.13に示す。図3.13から確認できるように、パラメトリックスピーカ近傍において再生音は復調することで音圧レベルが増加し、ピークを迎えた後に距離減衰する特徴を有する。ここで、再生音の距離ごとの音圧レベルを $p(d)$ とすると、最も復調される距

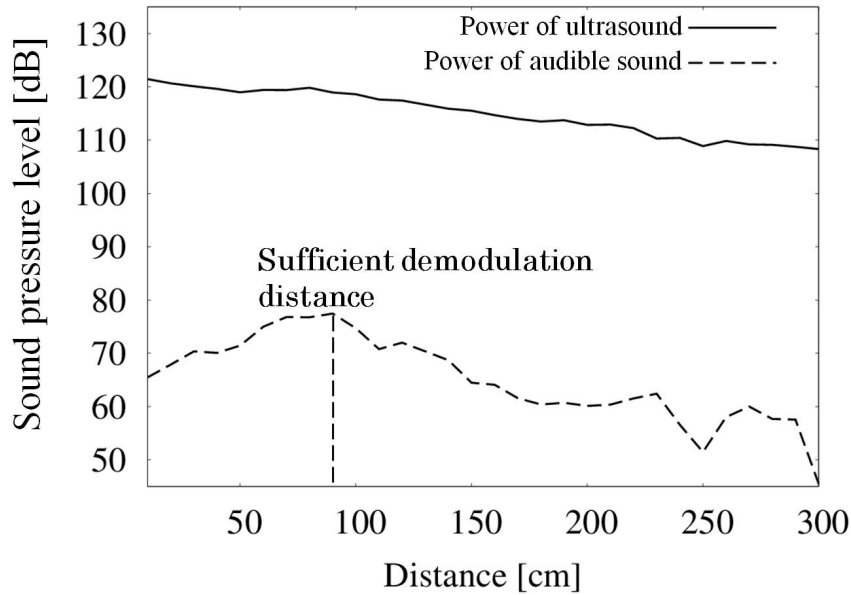


図 3.13 放射された振幅変調波と復調される可聴音の音圧および従来法における十分な復調距離の関係

距離 D_{suf} は次式のように表すことができる。

$$D_{\text{suf}} = \underset{d}{\operatorname{argmax}} p(d). \quad (3.3)$$

音圧レベルが最大となる距離は復調評価の目安とはなるが、音質や周波数特性などが評価されていない点から復調評価指標としては不十分である。とくに、従来法により求めた距離より遠方または近傍の再生音が目的音の周波数特性を再現する可能性も考えられる。従って、音圧レベル以外の要素を用いた復調評価指標が必要となる。

3.3.2 スペクトル包絡の変化を調査するための予備実験

従来の復調評価として音圧レベルに基づく方法が挙げられるが、復調音の音質、周波数特性を無視している点に着目すると十分に復調を評価できる指標とは言えない。そこで本論文では、パラメトリックスピーカの音質に着目した復調評価指標を提案

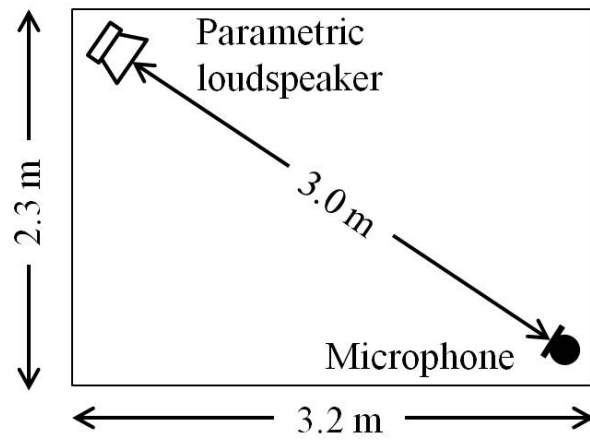
表 3.5 予備実験の条件

Parametric loudspeaker	mitsubishi, MSP-50E
Power amplifier	VICTOR, PS-A2002
Microphone	SENNHEISER, MKH8020
Microphone amplifier	AUDIO-TECHNICA, AT-MA2
A/D, D/A converter	ROLAND, OCTA-CAPTURE
Sampling frequency	192 kHz
Quantization	16 bit
Career frequency	40 kHz
Ambient noise	$L_A=18.5$ dB (Soundproof room) $L_A=32.3$ dB (Laboratory) $L_A=35.5$ dB (Conference room)
Evaluation distance	10, 50, 100, 200, 300 cm
Sound source	TSP (2 sec)
Reverberation time (T_{60})	140 msec (Soundproof room) 400 [msec] (Laboratory) 650 msec (Conference room)

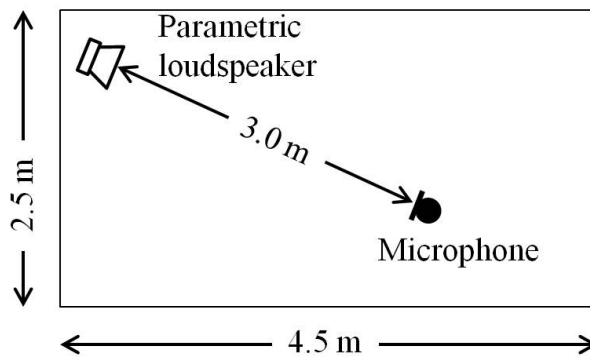
する。なお、人間の聴感的な音質がスペクトルの形状に大きく左右されることから、本論文では復調音のスペクトル形状を利用する。また、復調音のスペクトル形状の中でも音の音色を広帯域において評価できるスペクトル包絡 [61] に着目する。まず、パラメトリックスピーカからの再生音のスペクトル包絡が距離および再生音場でどのように変化するかを調査するために予備実験を行う。予備実験では、パラメトリックスピーカから受聴点までの距離の変化により再生音のスペクトル包絡がどのように変化するかを調査する。加えて再生音場の違いによるスペクトル包絡の違いも調査する。本論文では、異なる再生音場として部屋の広さ、残響時間 [62, 63] が異なる防音室、研究室、会議室を用いた。また、評価音源には全帯域のスペクトル包絡

の変化を確認するため TSP 信号 [64] を利用し、収録した再生音の可聴帯域をケプストラム分析した後にその低次のみを切り出しフーリエ変換することでスペクトル包絡を算出した。実験条件を表 3.5 に、各実験室における機材の配置を図 3.14(a)~(c) に示す。

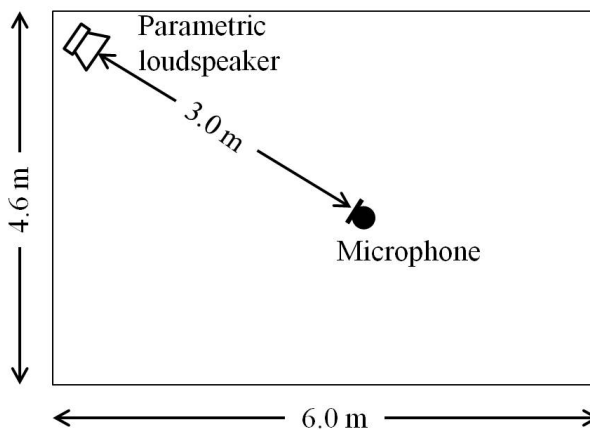
予備実験の結果を図 3.15(a)~(c) に示す。図 3.15(a)~(c) は各再生音場における 10, 50, 100, 200, 300 cm 離れた点の再生音のスペクトル包絡を示しており、横軸は周波数を、縦軸は音圧レベルを表す。図 3.15(a)~(c) から、再生音場ごとに再生音のスペクトル包絡が異なることに加え、2.3.1 節で述べたような、復調音の周波数ごとの音圧が周波数に比例するという理論通りのスペクトル包絡ではないことが確認できる。また、予備実験の結果から、再生音場に関わらずパラメトリックスピーカ近傍では再生音のスペクトル包絡が距離に依存して大きく変化することが確認できる。一方で、遠方における再生音のスペクトル包絡は距離が離れても概ね変化しないことが分かる。さらに、パラメトリックスピーカの再生音の出力が大きい 2 kHz 以上においては、目的音とした TSP 信号のフラットな周波数特性に類似することも確認できる。これは、近距離では放射された振幅変調波の音圧が大きく空気の非線形性の影響を強く受ける一方、遠距離では、振幅変調波が距離を伝搬しながら復調したことで、復調そのものが飽和状態となったためであると考えられる。これらの結果から、このパラメトリックスピーカから放射された振幅変調波はある程度遠方で十分復調されると考えられる。とくに 2 kHz 以上の高域に関しては、遠方であるほど変化が小さくなる傾向が顕著に表れており、高域ほど振幅変調波が減衰しても復調されやすいというパラメトリックスピーカの特徴を表した結果であると考えられる。また、この実験結果より復調された遠方の再生音の方が周波数特性が均一であることが分かる。加えて、予備実験結果から再生音場ごとに再生音のスペクトル包絡が異なることを確認したが、これは利用する音場における室内音響伝達特性が異なるためであると考えられる。従って、目的音のスペクトル包絡をどの程度再現できているかを評価するだけでなく、再生音場ごとの再生音に対する影響も反映できる復調評価指標を提案する



(a) 防音室

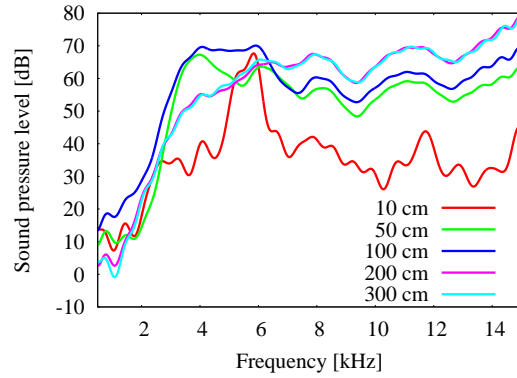


(b) 研究室

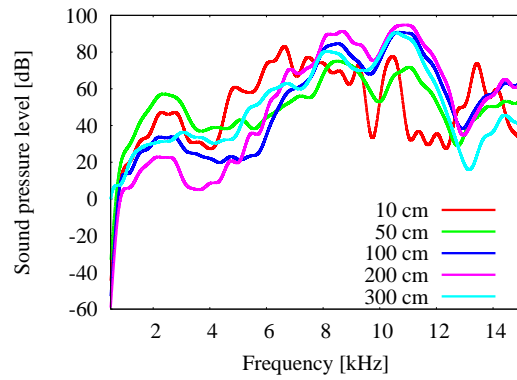


(c) 会議室

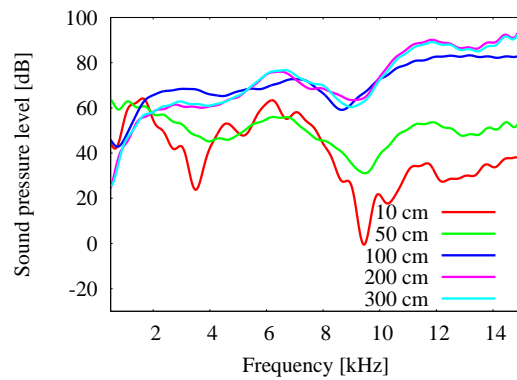
図 3.14 各実験室におけるマイクロホンとパラメトリックスピーカの配置



(a) 防音室



(b) 研究室



(c) 会議室

図 3.15 パラメトリックスピーカから 10, 50, 100, 200, 300 cm 離れた各実験室における再生音のスペクトル包絡

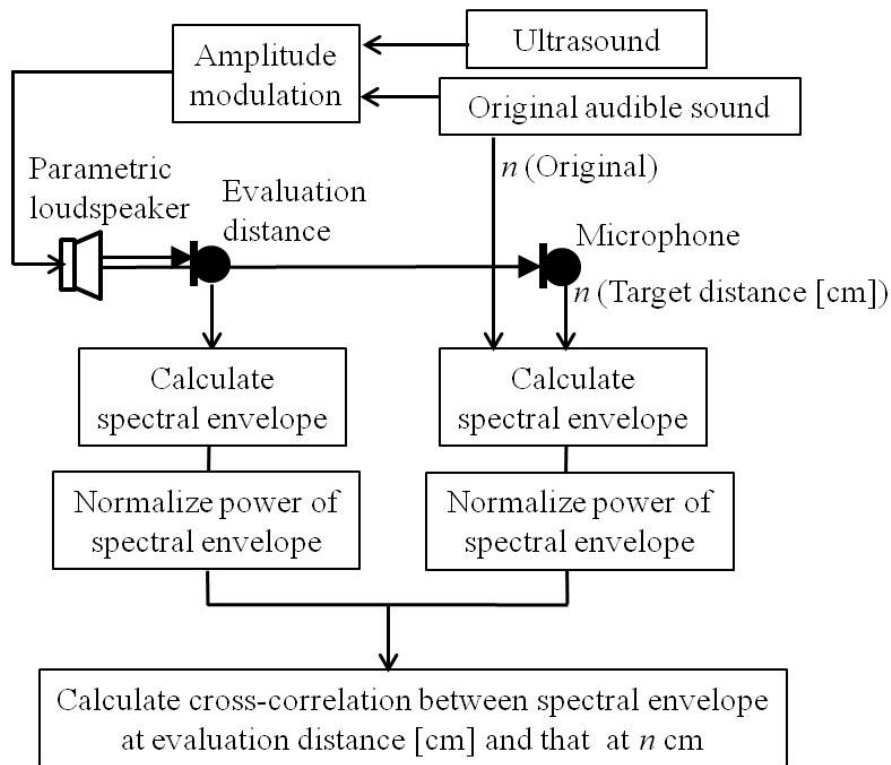


図 3.16 再生音のスペクトル包絡を用いる提案指標における復調算出の流れ図

3.3.3 スペクトル包絡の相互相関を用いた復調評価指標 $DUA-CC_n$

パラメトリックスピーカの再生音は復調するほど目的音のスペクトル包絡を再現する。そこで、距離ごとの再生音が目的音のスペクトル包絡をどの程度再現できているか、すなわち、目的音と再生音のスペクトル包絡上における類似度を評価する復調評価指標を提案する。ここで、2つの信号の類似度を評価する手法として、2つの信号の相関を用いる手法 [65] と、誤差を用いる手法 [65, 66] が挙げられる。誤差を用いる手法としては2乗誤差やKL ダイバージェンス (Kullback-Leibler divergence) [65] などが挙げられるが、目的音をどの程度再現できているかを表すことに重視すると、誤差量を利用する手法は再現度合いの表現が困難となる。一方、相関を用いる手法は相関値が0であれば無相関、1であれば同一信号とみなすことができ、相関値をそのまま再現度合いとして利用することが可能である。そこで本論文では、放射された振

幅変調波が距離を伝搬しながら目的音の信号に復元されていく現象を復調と定義していることから、音源位置から距離が離れるほど増加する傾向となる相関値を利用した復調評価指標を提案する。具体的には、目的音のスペクトル包絡と各距離の再生音のスペクトル包絡の相互相関を利用する復調評価指標 DUA-CC_n (Demodulation criterion from Ultrasound to Audible sound with Cross-Correlation between spectral envelope of audible sound at n cm distance and that at evaluation distance) を提案し、パラメトリックスピーカの距離ごとの再生音が目的音をどの程度再現できているかを評価する。なお、測定信号には TSP 信号を利用し、予備実験同様の手法でスペクトル包絡を算出する。ここで目的音のスペクトル包絡を真値として利用した場合、超音波素子の周波数特性と利用環境ごとの室内音響伝達特性の影響を十分に反映することが困難である。従って、パラメトリックスピーカから遠方の再生音を真値とする利用環境の影響を包含した復調評価も必要である。そこで本論文では、目的音やパラメトリックスピーカから遠方の再生音のスペクトル包絡との相互相関を利用する復調評価指標を策定する。また、再生音の音圧レベルに依存せずスペクトル包絡の形状だけで復調を評価するため、相関値は各スペクトル包絡をパワーで正規化した上で算出する。従って、策定指標は真値となる再生音のスペクトル包絡の形状と、評価対象となる再生音のスペクトル包絡の形状の相互相関の値 CC_n で表される。本論文では CC_n は式 (3.4) で算出する。

$$CC_n = \frac{R(d)}{\sigma(X_n)\sigma(Y(d))}, \quad (3.4)$$

$$R(d) = \sum_f (X_n(f) - \bar{X}_n)(Y(f, d) - \bar{Y}(d)), \quad (3.5)$$

$$\sigma(X_n) = \sqrt{\sum_f (X_n(f) - \bar{X})^2}, \quad (3.6)$$

$$\sigma(Y(d)) = \sqrt{\sum_f (Y(f, d) - \bar{Y}(d))^2}. \quad (3.7)$$

$X(f)$ は真値とする目的音または遠方における再生音のスペクトル包絡を、 $Y(f, d)$ は復調を評価する距離 d ごとの再生音のスペクトル包絡を表す。また \bar{X} , $\bar{Y}(d)$ は $X(f)$, $Y(f, d)$ の評価帯域におけるパワーの平均値である。 $R(d)$ は $X(f)$ と $Y(f, d)$ の

表 3.6 客観評価実験の条件

Sampling frequency	192 kHz
Quantization	16 bit
Career frequency	40 kHz
Ambient noise	$L_A=18.5$ dB (Soundproof room) $L_A=32.3$ dB (Laboratory) $L_A=35.5$ dB (Conference room)
Evaluation distance	10~300 cm (Soundproof room) 10~500 cm (Laboratory) 10~600 cm (Conference room)
Sound source	TSP (2 sec)
Evaluation sub-band	0.5~15 kHz
Reverberation time (T_{60})	140 msec (Soundproof room) 400 msec (Laboratory) 650 msec (Conference room)

類似度を表し，評価帯域における $X(f)$, $Y(f, d)$ の平均値と標準偏差 $\sigma(X)$, $\sigma(Y(d))$ を用いることでパワーによる正規化を行う．なお， n は策定指標の相関値算出において真値として利用する $X(f)$ の音源位置を示しており，目的音 (原音) を真値とする場合は *original*，再生音場における遠方の再生音を真値とする場合はその距離 n cm を表記するものとする．例えば，目的音を真値とする場合は $CC_{original}$ ，パラメトリックスピーカから 100 cm 離れた点の再生音を真値とする場合は CC_{100} と明記する．図 3.16 に策定する復調評価指標による復調度算出の流れを示す．

3.3.4 パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する客観評価実験の条件

策定した復調評価指標の有効性を確認するために客観および主観評価実験を行う。客観評価実験では、策定指標による距離ごとの復調度を評価しその増加または減少の傾向を調査することで、策定指標の有効性を確認する。主観評価実験では、パラメトリックスピーカの距離ごとの音質を評価することで、策定指標による復調度と主観的な音質の関係を調査する。その後、実験結果に対して考察を述べた上で、最も復調される距離を推定する。まず、策定指標 DUA-CC_n の有効性を確認するための客観評価実験を実施する。パラメトリックスピーカから放射された振幅変調波は遠方の再生音ほど復調するため、距離が増加するほど策定指標による復調度も増加すると考えられる。従って、距離の増加に伴う復調度の増加が策定指標の有効性を示す上で理想的な特徴である。なお、目的音のスペクトル包絡との相互相関を利用する CC_{original} と、パラメトリックスピーカから n cm 離れた再生音のスペクトル包絡との相互相関を利用する CC_n を用いて策定指標の有効性を評価する。使用機材および配置は表 3.5、図 3.14(a)~(c) に示す予備実験と同様の条件で実施した。客観評価実験の実験条件を表 3.6 に示す。また、防音室、研究室、会議室において CC_n の真値となる遠方の再生音にはそれぞれ 300, 500, 600 cm における再生音を利用した。評価にはパラメトリックスピーカの再生可能な帯域である 0.5~15 kHz を用いた。

3.3.5 パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する客観評価実験の結果

客観評価実験の結果を図 3.17, 3.18 に示す。図 3.17, 3.18 はそれぞれ目的音または遠方の再生音を利用した際の距離ごとの復調度の推移を示す。それぞれ横軸はパラメトリックスピーカからの距離を示し、図 3.17 の縦軸は CC_{original} による復調度を、図 3.18 の縦軸は CC_n による復調度を示す。図 3.17, 3.18 より、距離の増加に伴う増加傾向が見られたことから、策定した復調評価指標は復調度を評価する指標として有効であることを確認できる。また、図 3.17 より、会議室、研究室、防音室の順で最大復調度が大きくなることを確認した。さらに、図 3.18 より、真値とする再

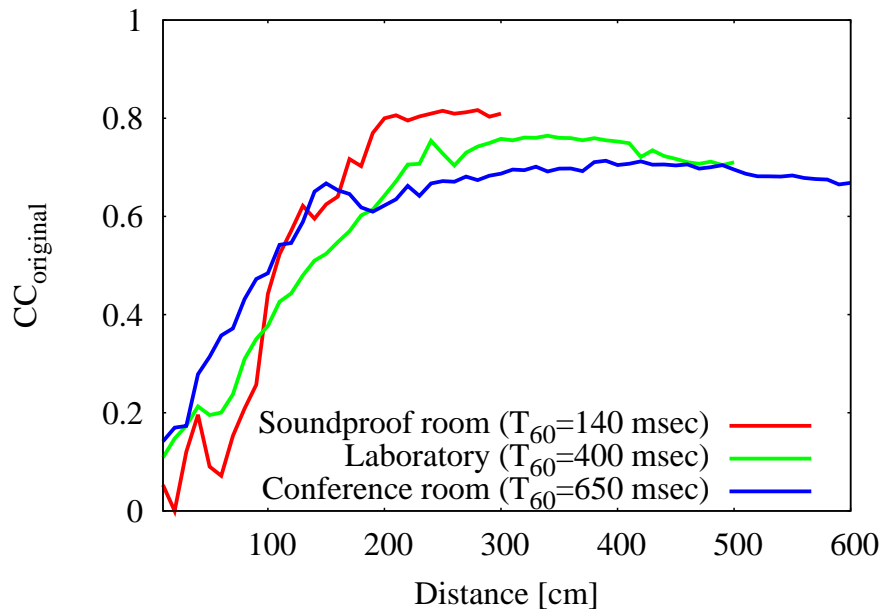


図 3.17 各再生音場における $CC_{original}$ (目的音) による距離ごとの復調度

生音がより遠方であるにもかかわらず，会議室の方が短い距離で急峻に相関値が増加することを確認した。

3.3.6 パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する主観評価実験の条件

次に，パラメトリックスピーカの音質と復調の関係を策定指標から調査するために主観評価実験を実施する．策定指標が再生音の音質を評価するスペクトル包絡を利用することから，主観的な音質も復調と同様に距離に依存すると考えられる．主観評価実験の実験条件を表 3.7 に示す．被験者は評価音となる各距離における再生音の音質を，原音と比較した際の 5 段階 (原音と比較して 5:同程度，4:やや悪い，3:悪い，2:とても悪い，1:非常に悪い) で評価する．また，評価音には音声と楽曲を使用し，ヘッドホンを用いてランダムに提示した．なお，それぞれの評価音は原音，無

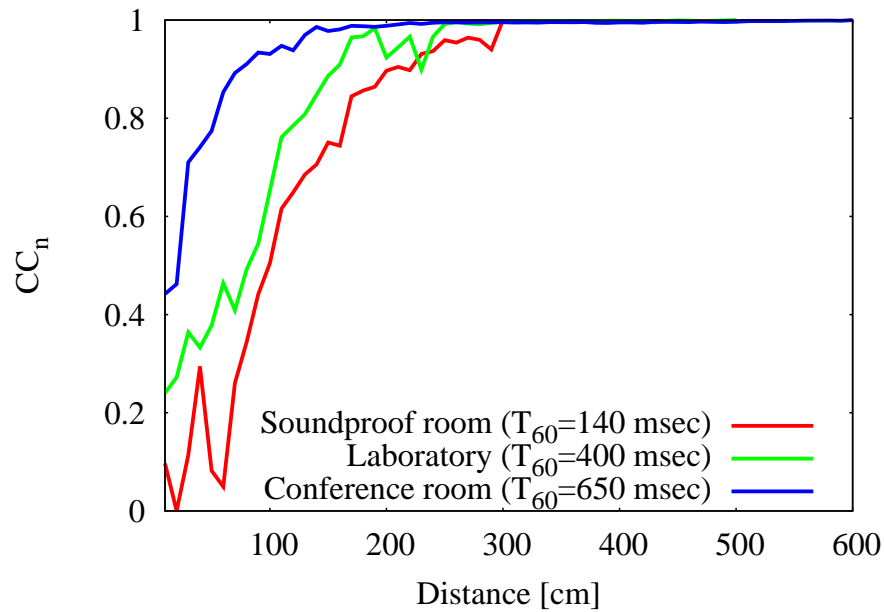


図 3.18 各再生音場における CC_n (遠方の再生音) による距離ごとの復調度 (防音室: CC_{300} , 研究室: CC_{500} , 会議室: CC_{600})

音 (2 sec.), 評価音の順で提示した。

3.3.7 パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する主観評価実験の結果

主観評価実験の結果を図 3.19~3.21 に示す。それぞれの図の横軸はパラメトリックスピーカからの距離を示す。また、左の縦軸は図 3.19~3.21 における各棒グラフで表される音質評価の値を示し、右の縦軸は各再生音場における $CC_{original}$ による復調度を示す。なお、それぞれの音質の評価値は音声、楽曲の音質の 5 段階評価における平均値である。まず、図 3.19 より、パラメトリックスピーカの距離ごとの音質は概ね復調度と同様の傾向で増加することが確認できた。これは、策定指標が再生音のスペクトル包絡すなわち音質に着目した復調評価であるためと考えられる。ま

表 3.7 主観評価実験の条件

Sampling frequency	192 kHz
Quantization	16 bit
Career frequency	40 kHz
Ambient noise	$L_A=18.5$ dB (Soundproof room) $L_A=32.3$ dB (Laboratory) $L_A=35.5$ dB (Conference room)
Evaluation distance (every 50 cm)	10~300 cm (Soundproof room) 10~500 cm (Laboratory) 10~600 cm (Conference room)
Sound source	Female voice, Male voice and Music
Reverberation time (T_{60})	140 msec (Soundproof room) 400 msec (Laboratory) 650 msec (Conference room)
Number of subjects	6 persons

た，図 3.20, 3.21 より，300 cm までは防音室同様に距離ごとの音質が復調度とともに増加することが確認できた．従って，策定指標を利用することで，パラメトリックスピーカの復調だけでなく再生音場における音質の評価，または推定も可能であると考えられる．しかしながら，各実験室において復調度の増加が見られなくなる距離からは主観的音質が大きく低下しており，策定指標による復調度と異なる傾向となることを確認した．この原因の考察については次節で述べる．

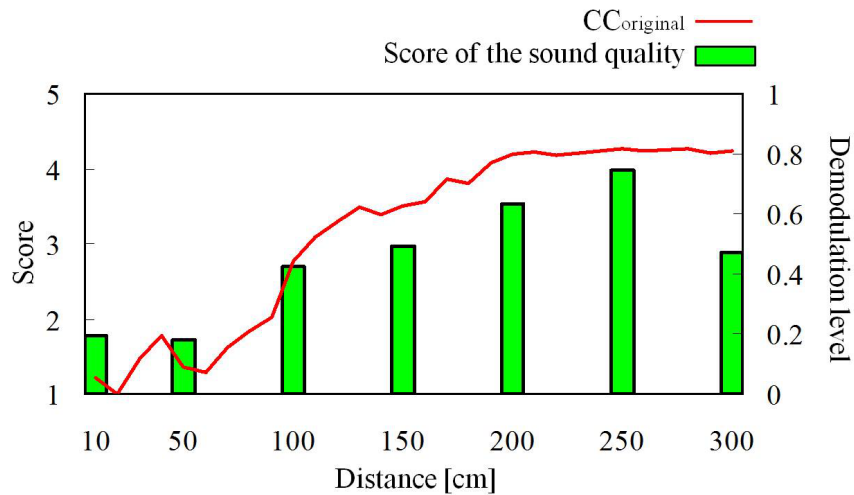


図 3.19 防音室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係

3.3.8 パラメトリックスピーカの復調評価指標に関する評価実験結果の考察

客観評価実験より、パラメトリックスピーカからの距離が増加するに伴い、策定した復調評価指標による復調度が増加することを確認した。これは策定指標において、距離が離れるほど復調されるというパラメトリックスピーカの復調を表した理想的な特徴である。特に、目的音と遠方の再生音を利用する両評価法において共に増加傾向を示したことから、パラメトリックスピーカから遠方の再生音を利用する復調評価指標の有効性も確認できた。ここで、図 3.17 の研究室、会議室の結果では遠方において復調度の低下が確認できるが、復調された可聴音のパワーの距離減衰に加え、周囲の雑音が混入したことが主な原因である。従って、音質に関しても、音圧レベル同様に利用環境によって最適な距離があると考えられる。なお、実験結果の図 3.17, 3.18 から残響時間の長い再生音場の方が短い距離で急峻に復調度が増加していることが分かる。これは残響時間の長い再生音場の方がより反射波の影響を強く受けるためと考えられる。また、図 3.17 において各再生音場における復調度の入れ替わりが確認できるが、これは各再生音場における暗騒音レベルと残響時間の違いが原因であり、音圧が低下する遠距離において暗騒音レベルが大きく、残

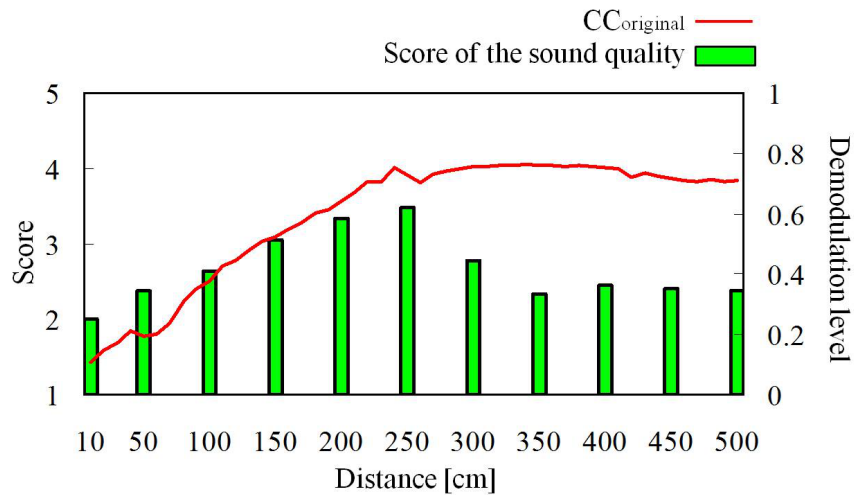


図 3.20 研究室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係

響が多くなる再生音場の方が目的音との相関値が上昇しなかったと考えられる。

また、主観評価実験では再生音場に関わらず、復調度が増加する距離においては主観的な音質も同様に向上することを確認できた。これは策定指標が再生音の音質を評価できるスペクトル包絡を利用しているためであると考えられる。しかしながら、研究室や会議室において復調度の増加傾向が見られなくなる遠方では音質が大幅に低下しており、策定指標による復調度と異なる傾向を示した。この原因として、パラメトリックスピーカの再生音が距離減衰により暗騒音に埋もれたことが原因であると考えられる。また、原音と比較する際に、原音には含まれていない残響の混入も主観的音質を低下させる大きな要因であると考えられる。

ここで、客観評価実験における各実験室の CC_n による復調度 0.9 を十分復調と定義した場合、TSP 信号のように全周波数において均一なパワーを有する音響信号が目的音ならば、会議室ではおよそ 80 cm、研究室では 150 cm、防音室なら 200 cm の距離が必要であることを確認できた。今後はパラメトリックスピーカの利用距離を推定するために、策定指標 DUA- CC_n において十分復調と定義できる値を明確にする必要がある。

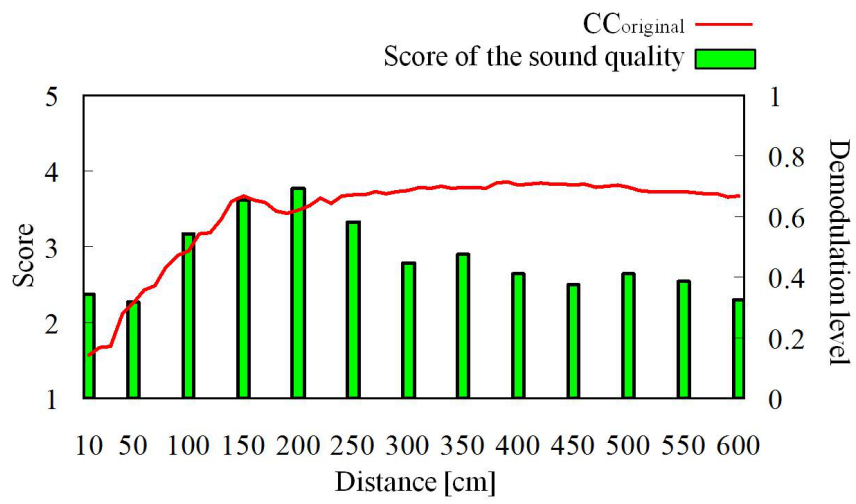


図 3.21 会議室における距離ごとの復調度と主観的音質の関係

第4章 曲面型・多面体パラメトリックスピーカによる移動音像の構築手法の提案

4.1. はじめに

音像プラネタリウム方式には、2.3.5節で述べたようにパラメトリックスピーカ自体の音質劣化以外に、パラメトリックスピーカの放射方向を動的に制御できないために、移動音像の構築が困難であるという問題がある。この問題に対し、モータを用いて放射方向を制御することで連続的に壁面上を移動する音像を構築する方法が挙げられるが、モータ自体の駆動騒音、システムの大規模化、消費電力の増加などの観点から実用的ではない。また、従来のパラメトリックスピーカを利用した移動音の提示手法では物理的制約が増大するという問題があった。したがって、パラメトリックスピーカ本体を動かすことなく放射方向を制御する新たな手法が必要である。そこで本章では、壁面上を移動する音像を構築するために、超音波素子を曲面上または多面体の全面に配置した曲面型および多面体パラメトリックスピーカによる移動音像の構築手法について述べ、評価実験を実施する。

4.2. 曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音像の構築手法の提案

従来の移動音像の構築手法では、物理的制約や遅延量の連続制御が必要という問題があった。これはパラメトリックスピーカを構成する超音波素子が平面状に配置

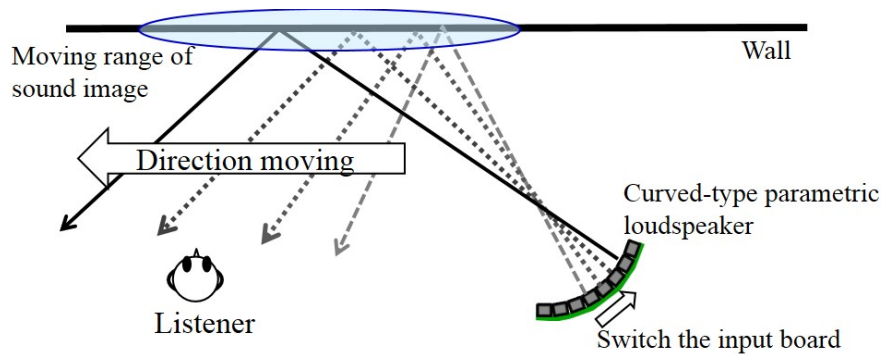


図 4.1 曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像構築のイメージ

されているためであり，鋭い指向性を形成できる一方，広範囲の制御が困難となる．そこで本論文では，この超音波素子の配列を曲面上に並び換え，選択的に音響信号を出力する素子を切り替えることで，容易に放射方向を制御できる曲面型パラメトリックスピーカを開発する．また，人は音を知覚する際，主に両耳間における音圧差または位相差を手掛かりに音像の位置を把握し，その音圧差または位相差が連続的に変化するとき，音源または音像の移動を知覚する [67, 68, 69]．そこで本論文では，開発した曲面型パラメトリックスピーカを構成する超音波素子を隣接する順に切り替えながら音響信号を入力することで，図 4.1 のように壁面上を移動する音像を構築する．まず本節では，曲面型パラメトリックスピーカを試作し，鋭い指向性および滑らかな移動感を得られる制御方法を予備実験で検討した後に，壁面を移動する音像の構築手法について述べる．

4.2.1 曲面型パラメトリックスピーカの試作

本論文では，提案手法による移動音像構築のために，実際に曲面形状に超音波素子が配列されたパラメトリックスピーカを試作した．試作した曲面型パラメトリックスピーカは超音波素子が並列接続された直線状基板を曲面形状となるよう複数本合わせることで構成される．試作した曲面型パラメトリックスピーカにおける直線状基板を図 4.2 に，曲面型パラメトリックスピーカを図 4.3 に示す．図 4.2, 4.3 にお

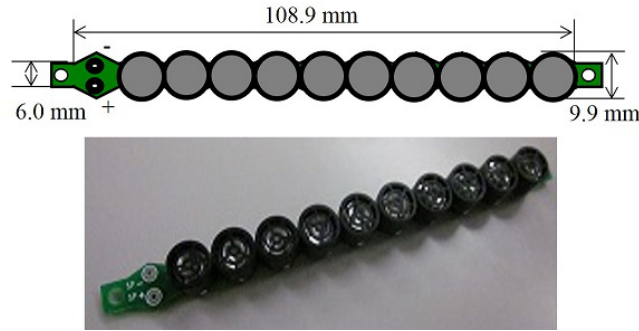


図 4.2 直線状基板の見取り図と写真

ける超音波素子には SPL (Hong Kong) Limited 製 UT1007-Z325R を使用した。この超音波素子は、共振周波数が 40 kHz、直径が 9.9 mm である。本論文では、この直線状基板を曲率半径が 10 cm となるよう、15 列凹面状に配置した曲面型パラメトリックスピーカを試作した。これらの基板に対して音響信号を入力する基板を隣接する順に切り替えることで、水平方向の移動音像を表現する。なお、凸面状に超音波素子を配置した場合、各超音波素子の間隔が広くなり出力された音響信号の波面が重ならなくなるため、鋭い指向性を形成できない可能性がある。したがって本論文では、それぞれの基板がより密に配置される凹面状を採用し、各基板への入力に対して制御を行うことで、音像の構築位置を制御できるシステムを提案する。ここで、試作した曲面型パラメトリックスピーカの曲率半径を r 、弧の長さを l とすると、図 4.4 における放射方向を制御できる範囲 θ_{str} およびスピーカの中心から距離 d 離れた位置における受聴可能範囲 D_{str} は次式のように表される。

$$\theta_{str} = \frac{180l}{r\pi}, \quad (4.1)$$

$$D_{str} = 2(d - r)\tan\left(\frac{\theta_{str}}{2}\right). \quad (4.2)$$

したがって式 (4.1), (4.2) より、曲面型パラメトリックスピーカで音像を構築できる範囲は曲面型パラメトリックスピーカの曲率半径はこの長さ、そしてスピーカまでの距離に依存することが分かる。例として、本論文で試作した曲面型パラメトリックスピーカの場合、制御範囲 θ_{str} は約 45.3 度となり、2 m 離れた位置における受聴

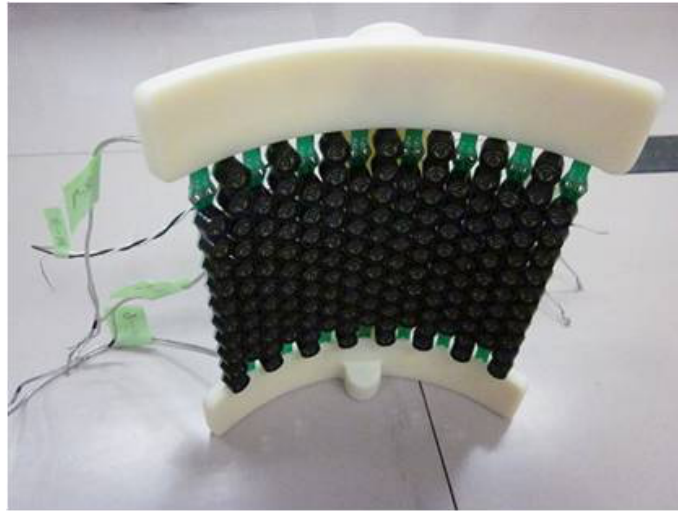


図 4.3 試作した曲面型パラメトリックスピーカ

可能範囲 D_{str} は約 160 cm となる．ここで，音像を構築する際に音波を放射する直線状基板の本数が少ない場合，音圧が低下するだけでなく鋭い指向性が形成できず，上記で求めた制御範囲と大きく異なる放射特性となる可能性が考えられる．そこで予備実験として，直線状の基板を 1 本～3 本同時に利用した際の放射特性を計測し，移動音像を構築するうえで同時に利用すべき基板の本数を求める．

4.2.2 基板本数ごとの放射特性の計測

パラメトリックスピーカを用いて高い音像定位を与えるためには，鋭い指向性が必要不可欠であり，移動音像を知覚させる上でも重要な要素である．パラメトリックスピーカは超音波を利用する点に加え，各超音波素子から同位相の音響信号を出力することで超指向性を形成する．そこで本節では，移動音像を構築する前に試作した曲面型パラメトリックスピーカで鋭い指向性を得ることのできる基板本数を調査する．具体的には直線状の基板を 1 本～3 本同時に利用した際の放射特性を計測し，移動音像を構築する上で鋭い指向性を形成できる基板本数を求める．なお，各本数における放射口の幅はそれぞれ約 9.9, 18.8, 27.7 mm となる．それぞれの放射特性は，ホワイトノイズを再生した際の図 4.5 に示す 35 点における可聴帯域 (0.5～10

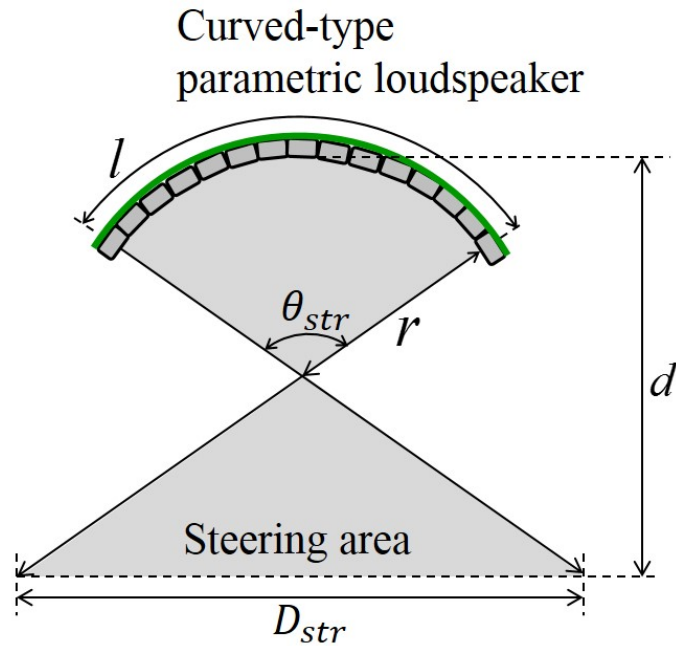


図 4.4 曲面型パラメトリックスピーカにおける制御範囲のイメージ図

kHz) の音圧レベルを計測することで算出する。また、計測は反射音や暗騒音などの影響を無視するために防音室で行う。予備実験の結果を図 4.6 に示す。図 4.6(c) より、放射口幅 27.7 mm の時、すなわち直線状基板を 3 本同時に使用することで鋭い指向性を形成することを確認できる。従って以降の制御方法の検討および評価実験においては、3 本の基板を同時に使用する。

4.2.3 入力信号の制御手法

人に音源または音像の移動を把握させるには、受聴者が知覚する音響信号の ILD を連続的に時間制御しなければならない。そこで本論文では、前章で述べた曲面型パラメトリックスピーカに対して、使用する基板を隣接する順に切り替えることで受聴者の ILD を制御する手法を提案する。図 4.7(a) に曲面型パラメトリックスピーカによる放射方向制御のイメージ図を示す。図 4.7(a) に示すように、利用する超音

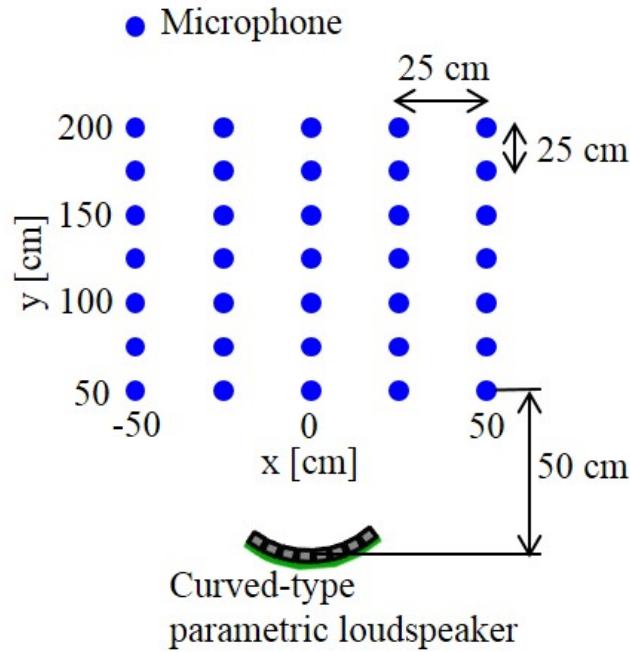
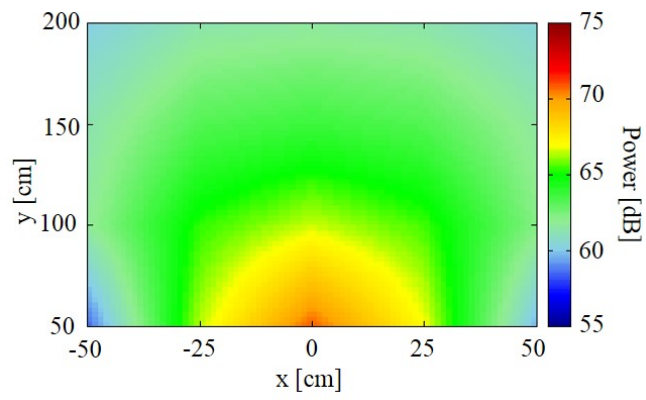


図 4.5 放射特性の計測実験における機材の配置図

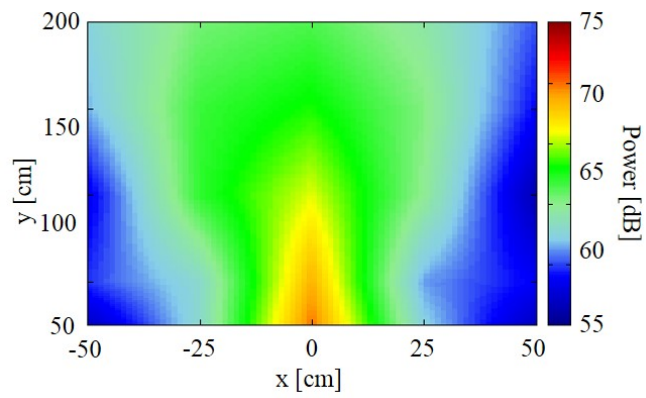
波素子を切り替えることで，平面型パラメトリックスピーカの放射方向を連続的に稼働させた場合と同様の効果を期待できる．ここで，目的信号を $s(t)$ ，目的信号の時間長を T ，曲面型パラメトリックスピーカを構成する基板の本数を M ，音像を構築する際に同時に使用する基板本数を N とすると，図 4.7(a) における時刻ごとの使用基板群への入力信号 $x_k(t)$ は次式のように表すことができる．

$$x_k(t) = \begin{cases} s(t) & \text{if } \frac{(k-1)T}{M-N+1} \leq t \leq \frac{kT}{M-N+1} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.3)$$

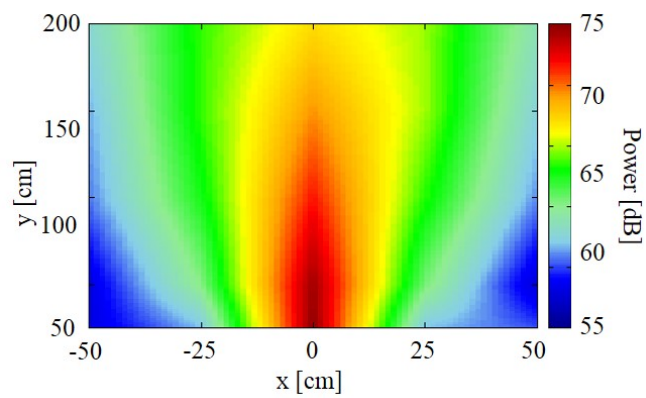
なお本論文では，前節の予備実験より隣接する 3 本の基板を 1 組として利用し，それぞれの基板に配置した超音波素子から振幅変調波を放射する．ここで，上記の制御方法では使用する基板を切り替えた際に変化が小さく十分な移動感を得られない，または，音圧変化が急峻になり滑らかな移動感を得られないことが考えられる．そこで予備実験として，使用する基板を切り替える際に図 4.7(b) に示すように 1 本分



(a) 放射口幅 9.9 mm

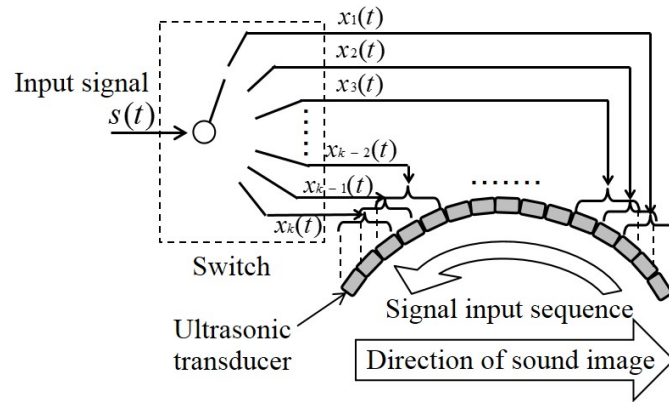


(b) 放射口幅 18.8 mm

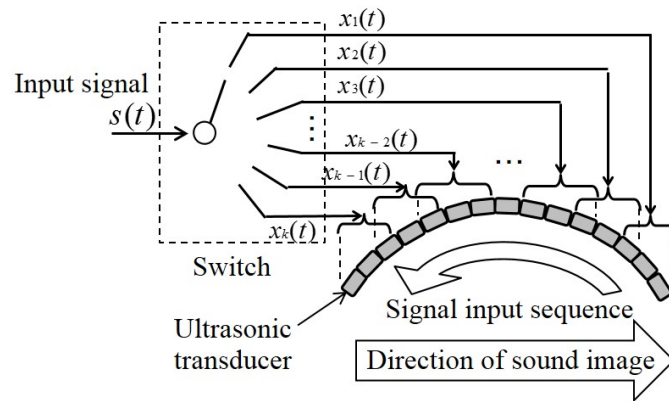


(c) 放射口幅 27.7 mm

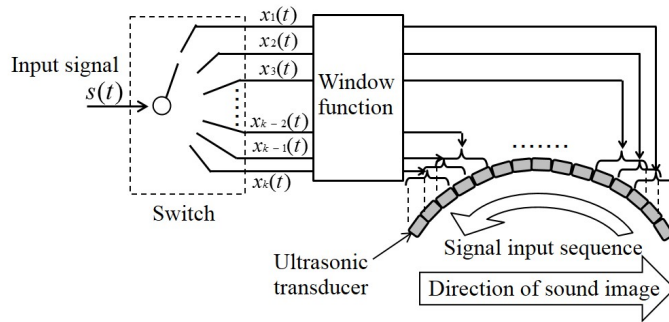
図 4.6 各放射口幅における放射特性



(a) 隣接順に切り替える制御



(b) 1本分間隔を空けた制御



(c) 入力信号の振幅を調整する制御

図 4.7 曲面型パラメトリックスピーカによる各制御方法を用いた際の放射方向制御のイメージ

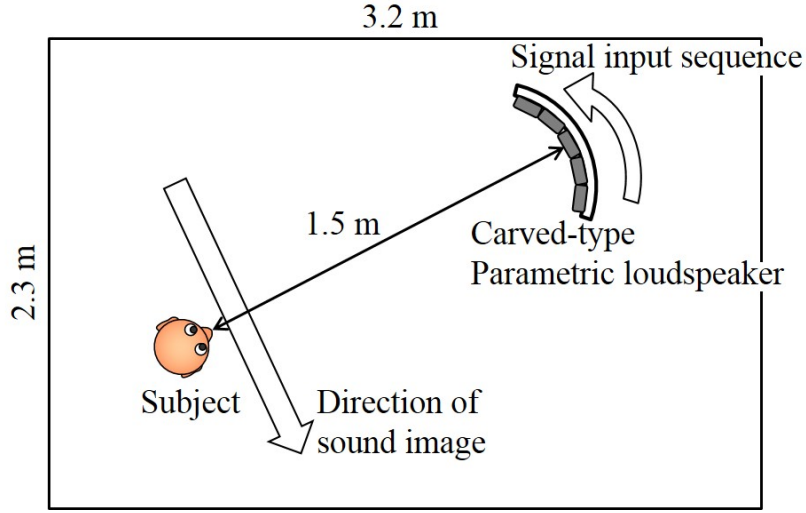


図 4.8 予備実験の機材配置図

間隔を設け放射方向を大きく動かす制御方法と，図 4.7(c) のように入力信号の振幅を制御して基板を切り換えた際の音圧レベルの斑を緩和する制御方法を検討する．図 4.7(c) における入力信号 $x_k(t)$ は次式で表される．なお，本論文では振幅の調整に次式の高窓を利用した．

$$x_k(t) = \begin{cases} s(t)w(t - \frac{(k-1)T}{M-N+2}) & \text{if } \frac{(k-1)T}{M-N+2} \leq t \leq \frac{(k+1)T}{M-N+2} \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$w(t) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi \frac{t(M-N+2)}{2T}). \quad (4.5)$$

4.2.4 曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像構築の予備実験

本節では，予備実験として，前節で述べた 3 つの制御手法を用いた際の ILD の時間変化および主観的な移動感を評価する．本予備実験で ILD の変化が連続的かつ主観的な移動感が高い制御手法を壁面反射音像に応用することで，壁面上を滑らかに

表 4.1 予備実験の条件

Dummy head	SENNHEISER, NEUMANN KU100
Microphone amplifier	Audio-technica, AT-MA2
Loudspeaker amplifier	YAMAHA, IPA8200
A/D, D/A converter	RME, FIREFACE UFX
Place	Soundproof room
Ambient noise	$L_A = 18.8$ dB
Sampling frequency	96 kHz
Quantization	16 bit
Sound source	White noise, voice (5 sec)
Number of subjects	6 persons

移動する音像を構築できると考えられる。予備実験における機材の配置図と基板の切り替え方向を図 4.8 に、実験条件を表 4.1 に示す。予備実験では、図 4.8 に示すように曲面型パラメトリックスピーカから 1.5 離れた位置にダミーヘッドを設置し、前節で提案した各制御手法を用いた際の両耳における受音信号を計測する。音源には 5 秒のホワイトノイズと音声信号を使用する。ILD の算出にはホワイトノイズを再生した際の実験信号を受音信号として利用し、収録音の 0.5~10 kHz, 0.2 秒間の平均音圧を用いて各時刻における ILD を算出する。ここで、時間を t 、左耳での受音信号を $y_l(t)$ 、右耳での受音信号を $y_r(t)$ とすると、ILD の時間変化を表す $ILD(t)$ は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 ILD(t) &= 20 (\log_{10}(|y_l(t)|) - \log_{10}(|y_r(t)|)) \\
 &= 20 \log_{10} \left(\frac{|y_l(t)|}{|y_r(t)|} \right). \tag{4.6}
 \end{aligned}$$

なお、式 (4.6) で表されるように、本論文では左耳での受音信号を基準として ILD を算出する。本予備実験では図 4.8 に示すように、受聴者の左から右へ移動するように放射方向を制御している。そのため、放射音が左耳へ接近するにつれて ILD は

表 4.2 音像の移動感評価の評価尺度

5	滑らかに移動している
4	やや違和感はあるが移動している
3	違和感があるが移動している
2	あまり移動していない
1	移動していない

増加し、正面を通過するとともに減少した後に、0に収束する傾向が理想的な結果となる。また、主観的な移動感の評価に関しては、ダミーヘッドで収録したホワイトノイズおよび音声信号をヘッドホンで被験者に再生することで評価する。加えて、音像の移動を知覚できていることを確認するために、正面方向に音像を固定した場合の収録音についても移動感の評価する。移動感の評価には表 4.2 に示す MOS による 5 段階評価を利用する。

予備実験の結果を図 4.9, 4.10 に示す。図 4.9 は各制御法におけるホワイトノイズを再生した際の ILD の時間変化を、図 4.10 は図 4.9 に示す ILD の時間変化を知覚した際のホワイトノイズと音声信号の移動感を表す。図 4.9 の線種は基板を隣接順に制御した場合、1 本分間隔を空けて制御した場合、窓関数による振幅制御を用いた場合の結果を表す。本論文では式 (4.6) に示すように左耳での受信信号を基準として ILD を算出するため、値が増加するほど音像がダミーヘッドの左耳付近に接近していることを表す。図 4.10 の棒グラフは固定音像および各制御法を用いて構築した移動音像に対して被験者が回答した 5 段階評価の平均値を表す。なお、エラーバーはそれらの標準偏差を表す。縦軸の値が大きいほど聴感上において構築した音像が連続的に移動をしていると知覚したことを表し、値が低いほど音像の移動感に違和感を覚えた、または移動を知覚できないことを表す。図 4.9 より、ILD が増加した後、大きく減少してから 0 に収束したことから、概ねすべての制御方法で左から右への移動音を表現できていることが確認できる。特に、入力信号に窓関数を掛ける制御方法は、他の制御方法と比較して最も連続的な時間変化を達成していることから、滑らかな移動感を与える制御方法として最適であると考えられる。また、図 4.10 の

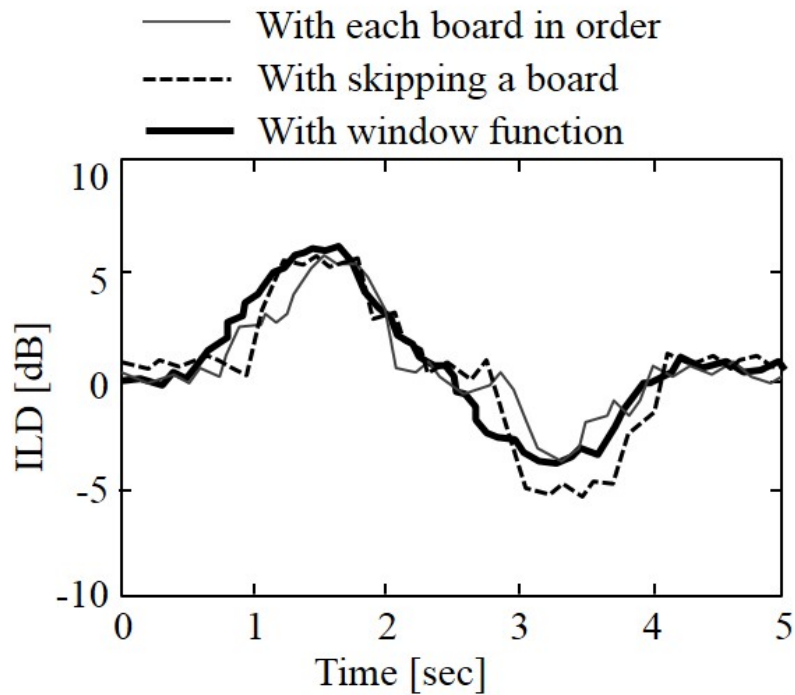


図 4.9 各制御法における ILD の時間変化

結果に着目すると、ホワイトノイズ、音声信号共に、固定音像に対しては移動感を得られない一方、提案手法で構築した移動音像に対しては移動感を知覚できることが確認できる。特に、振幅を制御することで高い移動感を得られることが確認でき、標準偏差の値が小さいことから安定して移動感を提供できる制御方法であると言える。従って、曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像の構築には、入力信号の振幅値を制御する手法が最も有効である。これらの結果より、以降の壁面反射を利用した移動音像の構築、実験では、隣接する3本の基板を同時に使用すると共に、入力信号の振幅を制御する手法を用いる。

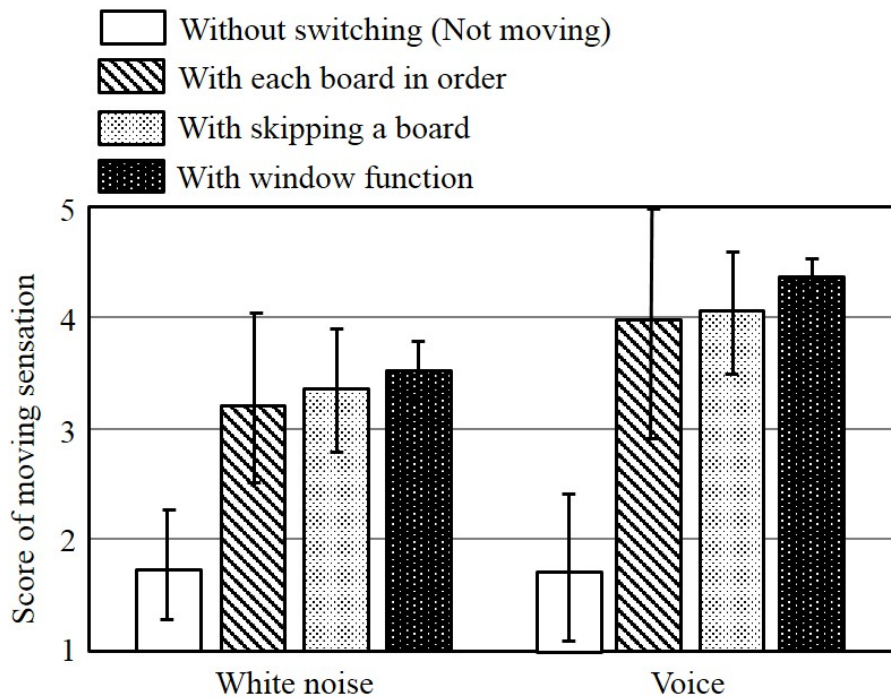


図 4.10 各制御法における移動感

4.2.5 壁面反射を利用した移動音像の構築

パラメトリックスピーカを用いた音像の提示には壁面反射の利用が最も有効である。そこで本論文では、曲面型パラメトリックスピーカを用いた壁面移動音像の構築手法を提案する。なお、前述の予備実験の結果より、曲面型パラメトリックスピーカの各基板の制御方法においては、鋭い指向性を形成するために隣接する3本の基板を同時に使用する。また、高い移動感を提示するために、窓関数を利用した入力信号の振幅制御を併用する。本提案法において、壁面上に構築される音像は図4.11に示すように、壁を境界として表現される曲面型パラメトリックスピーカの鏡像からの直接音として表すことができる。つまり、受聴者が知覚する移動感は図4.11における鏡像からの直接音を制御する場合と同等となる。なお、音像が構築される壁

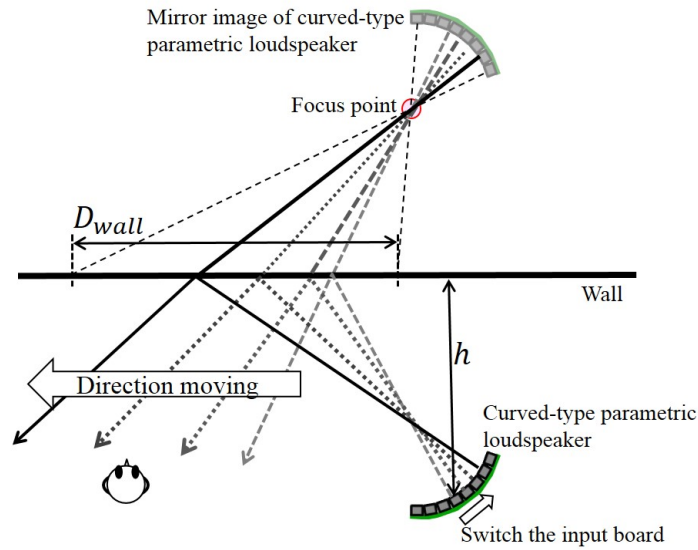


図 4.11 鏡像法を用いた曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像の構築のイメージ

面の範囲 D_{wall} は壁面とスピーカの距離を h とすると次式のように表される。

$$D_{wall} = (h - r \cos(\theta_{dir})) \tan\left(\theta_{dir} + \frac{\theta_{str}}{2}\right). \quad (4.7)$$

θ_{dir} は曲面型パラメトリックスピーカの正面方向と壁面に対する垂線が成す角度である。したがって、壁面上に構築される音像の移動範囲は曲率半径 r と壁面までの距離 h 、および設置角度 θ_{dir} に依存する。また、音像の移動速度 v は反射波を鏡像からの直接音とみなすと次式で表される。

$$v = \frac{D_{wall}}{T}. \quad (4.8)$$

よって、本提案手法で構築する移動音像の移動速度は目的信号の時間長 T で制御できる。

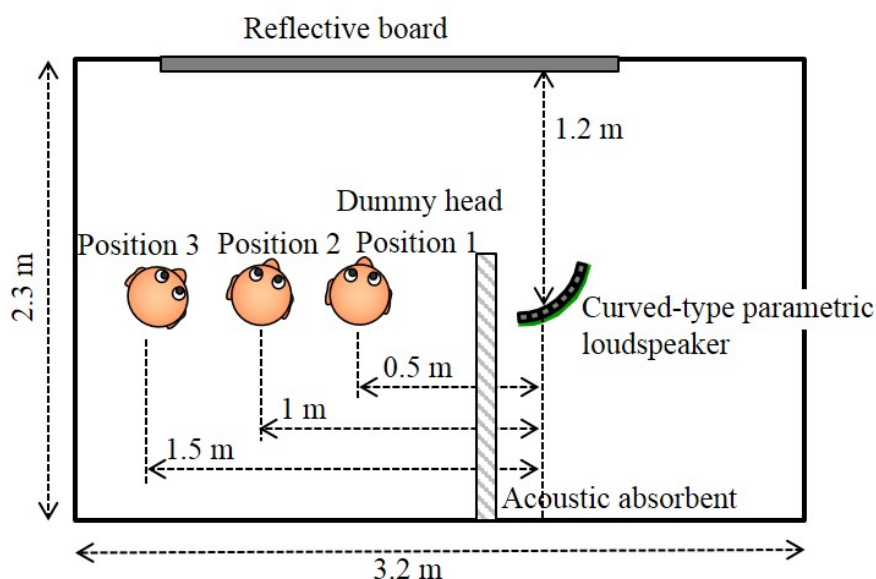


図 4.12 客観評価実験の機材配置図

4.3. 曲面型パラメトリックスピーカによる壁面移動音像構築の評価実験

曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像構築手法の有効性を確認するため、客観および主観評価実験を行う。

4.3.1 客観評価実験の条件

客観評価実験では、提案手法で構築した壁面上を移動する音像を受聴した際のILDの時間変化を計測する。実験条件を表4.3に、実験機材の配置を図4.12に示す。実験は防音室内で実施し、反射音像を構築する箇所にはアクリルの反射板を設置する。また、曲面型パラメトリックスピーカからの直接音が収録されないように、ダミーヘッドとスピーカの間には吸音材を設置する。壁面と曲面型パラメトリックスピーカの距離は1.2 mとし、壁面上を約2 m移動する音像を構築する。なお、受聴位置の

表 4.3 客観評価実験の条件

Dummy head	SENNHEISER, NEUMANN KU100
Microphone amplifier	Audio-technica, AT-MA2
Loudspeaker amplifier	YAMAHA, IPA8200
A/D, D/A converter	RME, FIREFACE UFX
Place	Soundproof room
Ambient noise	$L_A = 19.1$ dB
Sampling frequency	96 kHz
Quantization	16 bit
Carrier frequency	40 kHz
Sound source	White noise (5 sec)

違い移動感に及ぼす影響を調査するために、図 4.12 に示すように 3ヶ所の評価位置において計測，評価を行う。放射器には本論文で試作した半径 10 cm の円弧上に超音波素子を配置した曲面型パラメトリックスピーカを使用する。音源には 5 秒のホワイトノイズを使用し，ダミーヘッドによる収録音の 0.5~10 kHz, 0.2 秒間の平均音圧を用いて各時刻における ILD を算出する。制御方法に関しては，予備実験の結果より，3 本の基板を 1 組で使用し，最も移動感が高かった振幅制御を加える制御方法を利用する。

4.3.2 客観評価実験の結果

客観評価実験の結果を図 4.13 に示す。図 4.13 の横軸は時間を，縦軸は ILD の値を，線種は各評価位置での結果を表す。本実験では，図 4.12 において，壁面上を右から左へ移動する音像を構築している。そのため，音像の構築位置がダミーヘッドの正面に接近するにつれて ILD は減少し，正面を通過するとともに増加し，その後音像が離れるにつれて 0 に収束する傾向が理想的となる。図 4.13 より，評価位置 2 では概ね理想的な ILD の時間変化を実現できており，提案手法を利用することで壁

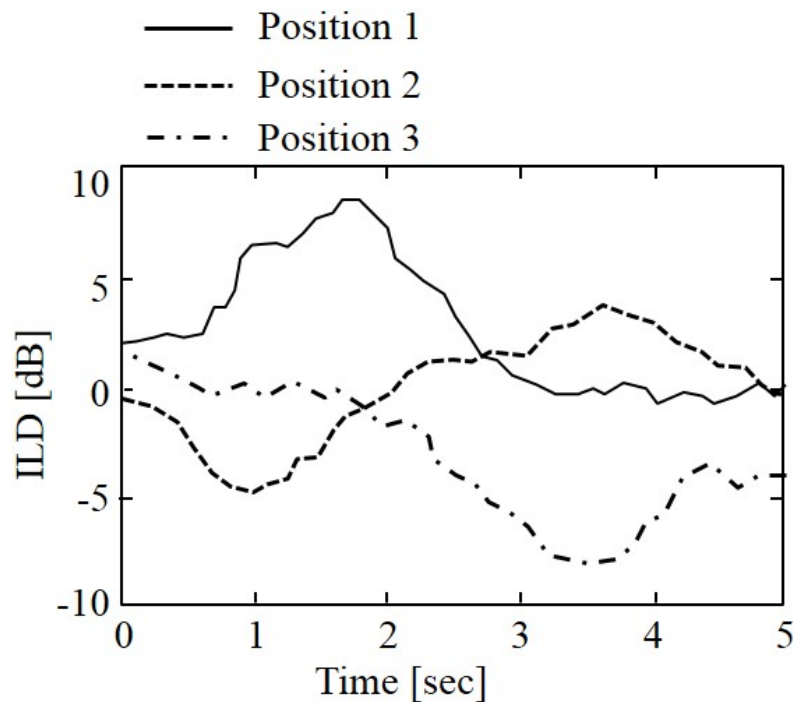


図 4.13 受聴位置ごと壁面反射を利用した際の移動音像の ILD の時間変化

面上を移動する音像を構築できることが確認できる。しかしながら，評価位置 1 では逆の傾向となり，評価位置 3 では正面から左方向への移動を提示できなかった。したがって，曲面型パラメトリックスピーカを利用することで，連続的な ILD の変化を与えることはできるものの，得られる移動感は受聴位置に大きく依存することが分かる。なお，この原因に関しては主観評価実験の結果と併せて 4.3.5 節で述べる。

4.3.3 主観評価実験の実験条件

主観評価実験では，提案する曲面型パラメトリックスピーカで構築した音像の移動感に関して評価する。具体的には，構築した音像が聴感上どの程度連続的に移動しているかを評価する。主観評価実験の条件を表 4.4 に示す。本論文では，客観評価実験で得られた ILD の時間変化と主観的な移動感の関係を調査するために，ダミー

表 4.4 主観評価実験の条件

Headphone	SONY, MDR-CD900ST
Sampling frequency	96 kHz
Quantization	16 bit
Sound source	White noise, voice (5 sec)
Number of subjects	10 persons

ヘッドを用いて収録した収録音を両耳における受聴音としてヘッドホン再生で被験者に提示する。なお、音源にはホワイトノイズに加え、約5秒間の音声信号も使用し、移動感が音源に依存するかについても調査する。移動感の評価は予備実験同様に表4.2に示すMOSの5段階評価を利用する。

4.3.4 主観評価実験の結果

主観評価実験の結果を図4.14に示す。図4.14の横軸は評価音源を、縦軸は移動感を表しており、各グラフは図4.12における3ヶ所の受聴位置において被験者が回答した移動感の平均値を、エラーバーは標準偏差を表す。縦軸の値が大きいほど聴感上において構築した音像が連続的に移動をしていると知覚したことを表し、値が低いほど音像の移動感に違和感を覚えた、または移動を知覚できないことを表す。図4.14より、受聴位置2においてはホワイトノイズ、音声共に移動感を得られることを確認できる。特に音声信号を利用した場合、高い移動感を得られることが分かる。一方、受聴位置1, 3においては評価音源に関わらず移動感が低く、自然な移動感を提示できなかった。したがって、曲面型パラメトリックスピーカを利用することで、スピーカ自体を動かすことなく壁面所を移動する音像を構築できるが、高い移動感を得られる受聴位置が限定されることが確認できる。

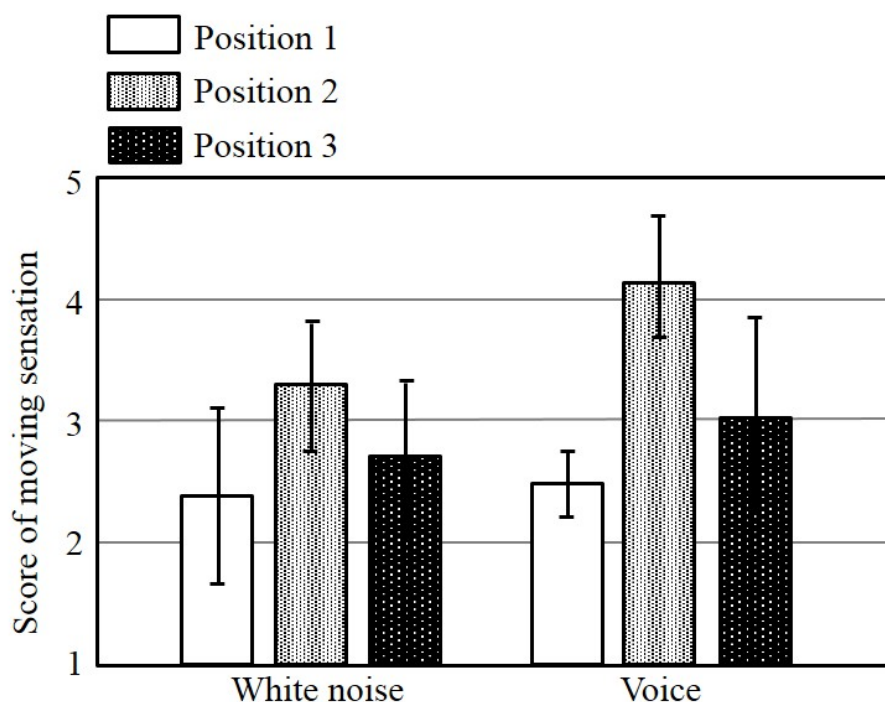


図 4.14 受聴位置ごと壁面反射を利用した際の移動音像の移動感

4.3.5 評価実験結果の考察

客観評価実験の結果より，曲面型パラメトリックスピーカを利用することで，受聴者が知覚するILDを時間制御できることを確認した．とくに曲面型パラメトリックスピーカの鏡像の正面に位置する評価位置2では，ILDの時間変化の傾向が右から左への理想的な傾向を表しており，パラメトリックスピーカを用いて意図した移動音を表現する上で，提案手法が有効であることが分かる．また，主観評価実験の結果からも，評価位置2においては高い移動感を知覚できており，理想的なILDの時間変化を実現することで自然な移動感を受聴者に与えることができることが示された．しかしながら，評価位置によってはILDの変化の傾向が大きく異なる点がある．まず評価位置1におけるILDの時間変化に着目すると，曲面型パラメトリックスピーカの位置に近い分，短時間で音像が正面を横切る傾向が確認できるが，マイ

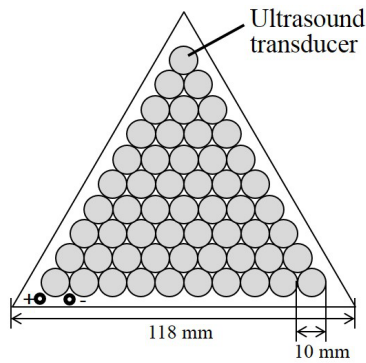
ナスの値を通過していないことから、右からの接近を表現できていない。一方、評価位置3では評価位置1と反対の傾向となることが確認できる。これは評価位置によって、移動音像を正確に捉えることのできる範囲が式(4.2), (4.7)で導いた範囲より狭いことを示しており、曲面型パラメトリックスピーカの鏡像の正面から離れるほど壁面に構築される音像の幅の変化量が増大するためであると考えられる。図4.14からも、知覚する音像の大きさが変化するほど移動感にも悪影響を及ぼすことが分かる。なお、ホワイトノイズより音声信号を用いた方が高い移動感を得られることが確認できるが、これは音声の方が日常的に動きのある音源のため、被験者が聴感上移動を知覚しやすかったためであると考えられる。これらの結果より、今後は制御方向ごとに構築される音像の大きさを補正する手法、受聴者の位置に関係なく目的の移動音像を広範囲に提供できる制御方法を検討する必要がある。

4.4. 多面体パラメトリックスピーカによる移動音像の構築手法の提案

4.2節では、曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音の構築手法を提案し、その有効性を確認した。しかしながら、移動音像を知覚できる範囲が小さく、音像の移動範囲も狭かった。また、実環境における移動音を再現するには、移動速度や移動時間などを考慮して使用する超音波素子をより複雑に制御する必要があるため、実環境の再現に向けた利用が困難となる。そこで本論文では、全方向に対して音響ビームを放射できる球状の形を模した多面体パラメトリックスピーカを試作し、2.3.4節で利用されていた振幅パンニングの原理を応用することで、受聴者の位置に合わせて広範囲を移動する音源を再現する手法を提案する。

4.4.1 多面体パラメトリックスピーカの試作

本論文では、超音波素子を複数個配置した平面状基板を、球形に組み合わせることで構成される正20面体パラメトリックスピーカを用いた移動音像の構築を試みる。なお本論文では、この正20面体パラメトリックスピーカを多面体パラメトリッ



(a) 基板の設計図



(b) 多面体 (正 20 面体) パラメトリック
スピーカの写真

図 4.15 作製した基板と多面体パラメトリックスピーカ

クスピーカと呼称する。作製した平面状基板と、それらを複数枚組み合わせて作製した多面体パラメトリックスピーカを図 4.15 に示す。製作した多面体パラメトリックスピーカは、20 枚の平面状基板を組み合わせた正 20 面体であり、各平面状基板はそれぞれ 55 個の超音波素子で構成される。これらの基板に対して、異なる信号を入力することで複数箇所と同時に異なる音像を同時に構築することも可能となる。

4.4.2 両耳間音圧差の時間変化に基づく移動音像の制御

人は ILD の時間変化を手掛かりにその音源または音像の移動を知覚する。そこで本論文では、前節で述べた多面体パラメトリックスピーカを用いて室内の複数個所に音像を構築し、それらの音像の振幅レベルを時間制御することで受聴者が知覚する ILD を時間制御する手法を提案する。ここで、原音場で収録した両耳の受信信号を再生音場で再現する場合、スピーカと両耳までの室内伝達関数 $G_l(t)$, $G_r(t)$ の逆特性を有するフィルタ $H_l(t)$, $H_r(t)$ を利用する手法が一般的である。しかしながら、

パラメトリックスピーカの再生信号は高調波ひずみなどの非線形成分を大きく有しており、高精度なフィルタを設計することが困難である。また、壁面反射が利用できる空間、すなわち残響空間での再現となるため、左耳用の信号が右耳に混入するクロストークの問題も大きくなる。そこで本論文では、図 4.16 に示すように、多面体パラメトリックスピーカの 2 枚の基板から同一信号を放射することで受聴者の左右に 2 音像を構築する。そして、それぞれの音像の振幅レベルを時間制御することで受聴者が知覚する ILD を制御をする。さらに、実際の移動音を受聴した際の ILD の時間変化を基に音像の振幅レベルを制御するところで、再生音場において原音場と同様の移動感を有する移動音像構築手法も併せて提案する。まず、時間を t 、移動音源が存在する原音場において受聴者が左耳で受音する信号を $y_l(t)$ 、右耳で受音する信号を $y_r(t)$ とすると、受聴者が知覚する両耳間音圧差 $ILD(t)$ は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} ILD(t) &= 20 (\log_{10}(|y_l(t)|) - \log_{10}(|y_r(t)|)) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{|y_l(t)|}{|y_r(t)|} \right). \end{aligned} \quad (4.9)$$

次に、図 4.16 のように多面体パラメトリックスピーカを用いて受聴者の左側と右側に音像を構築した場合の受聴者左耳の受音信号を $\tilde{y}_l(t)$ 、右耳の受音信号を $\tilde{y}_r(t)$ とすると、再生音場内の受聴者が知覚する $\widetilde{ILD}(t)$ は次式のように表すことができる。

$$\widetilde{ILD}(t) = 20 \log_{10} \left(\frac{|\tilde{y}_l(t)|}{|\tilde{y}_r(t)|} \right), \quad (4.10)$$

そして、 $ILD(t)$ と $\widetilde{ILD}(t)$ が等しくなる時、すなわち、両耳における受音信号の振幅レベルの比が原音場の振幅レベル比と等しくなる時、再生音場の受聴者に原音場における移動音の移動感を提示できると考えられる。具体的には、原音場で観測した $y_l(t)$ と $y_r(t)$ を基に振幅制御関数 $k_l(t)$ 、 $k_r(t)$ を生成し、受聴者左側の音像を構築するための入力信号に $k_l(t)$ 、右側の音像を構築するための入力信号に $k_r(t)$ を掛けることで $ILD(t) = \widetilde{ILD}(t)$ を実現する。ここで、提案手法において、受聴者左側の音像のみを再生する場合、多面体パラメトリックスピーカへの入力信号を $x(t)$ と

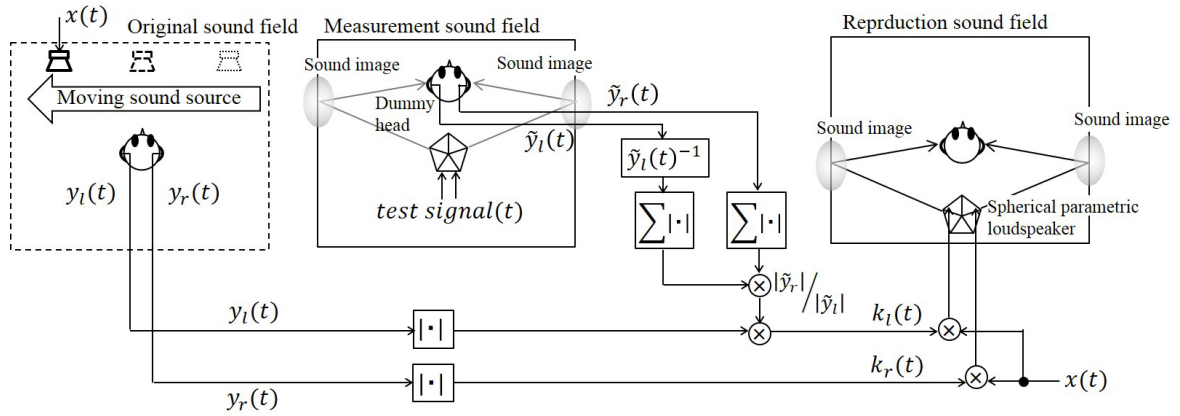


図 4.16 多面体パラメトリックスピーカによる移動音像構築のイメージ図

すると、受聴者が左耳で受音する信号 $\tilde{y}_l(t)$ と右耳で受音する信号 $\tilde{y}_r(t)$ は次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_l(t) &= (k_l(t)x(t)) * g_l(t) \\ \tilde{y}_r(t) &= (k_r(t)x(t)) * g_r(t) \end{aligned} \right\}. \quad (4.11)$$

$g_l(t)$, $g_r(t)$ は図 4.16 における、多面体パラメトリックスピーカからの信号が壁面反射の経路を通り受聴者の左耳、または右耳まで到達する際の室内伝達関数を、 $*$ は畳み込み演算を示す。これらの伝達関数は受音点における信号の減衰、遅延、周波数特性を決定付ける重要な要素であるが、本稿では受聴者が知覚する ILD、すなわち信号の振幅レベルの制御を目的とすることから多面体パラメトリックスピーカから出力される信号の減衰量のみで両耳における受音信号を表す。よって、多面体パラメトリックスピーカへの入力信号が出力されてから受聴者の左耳、右耳に到達するまでの減衰係数を $\alpha_l (0 < \alpha_l < 1)$, $\alpha_r (0 < \alpha_r < 1)$ とすると、式 (4.11) は次式のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_l(t) &\approx \alpha_l k_l(t)x(t) \\ \tilde{y}_r(t) &\approx \alpha_r k_r(t)x(t) \end{aligned} \right\}. \quad (4.12)$$

同様に受聴者右側の音像のみを再生した場合、受聴者が左耳で受音する信号を $\tilde{y}_l(t)$ 、右耳で受音する信号を $\tilde{y}_r(t)$ 、多面体パラメトリックスピーカからの出力信号が左耳、

右耳に到達するまでの減衰係数を β_l, β_r とすると,

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_l(t) &\approx \beta_l k_r(t)x(t) \\ \tilde{y}_r(t) &\approx \beta_r k_r(t)x(t) \end{aligned} \right\}. \quad (4.13)$$

となる. そして, 式 (4.12), (4.13) より, 多面体パラメトリックスピーカの異なる基板から左右の音像を同時に再生した際の両耳における受信信号は

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_l(t) &\approx \alpha_l k_l(t)x(t) + \beta_l k_r(t)x(t) \\ \tilde{y}_r(t) &\approx \alpha_r k_l(t)x(t) + \beta_r k_r(t)x(t) \end{aligned} \right\}. \quad (4.14)$$

で表される. ここで, 受聴者と2音像を構築する両側の壁面までの距離が等しい場合を想定すると, $\alpha_l = \beta_r$, $\alpha_r = \beta_l$ が成り立つ. また, α_r を α_l の定数倍で表すことができ, その定数を n とすると $\alpha_r = \alpha_l n$ ($0 < n < 1$) となり, 式 (4.10) より, $\widetilde{ILD}(t)$ は次式のように表される.

$$\begin{aligned} \widetilde{ILD}(t) &\approx 20 \log_{10} \left(\frac{|\alpha_l k_l(t)x(t) + \beta_l k_r(t)x(t)|}{|\alpha_r k_l(t)x(t) + \beta_r k_r(t)x(t)|} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{|\alpha_l k_l(t)x(t) + \alpha_l n k_r(t)x(t)|}{|\alpha_l n k_l(t)x(t) + \alpha_l k_r(t)x(t)|} \right) \\ &= 20 \log_{10} \left(\frac{|k_l(t) + n k_r(t)|}{|n k_l(t) + k_r(t)|} \right). \end{aligned} \quad (4.15)$$

式 (4.15) における n は受聴者の両耳間におけるクロストーク成分の強さを表しており, n が小さい時,

$$\widetilde{ILD}(t) \approx 20(\log_{10}(|k_l(t)|) - \log_{10}(|k_r(t)|)), \quad (4.16)$$

が成り立つ. 従って, $ILD(t) = \widetilde{ILD}(t)$ を満たす振幅制御関数はそれぞれ $|k_l(t)| = |y_l(t)|$, $|k_r(t)| = |y_r(t)|$ ととなる. なお, 受聴者と2音像を構築する両側の壁面までの距離が異なる場合は $\alpha_l = \beta_r$, $\alpha_r = \beta_l$ が成り立たない, そのため, 図 4.16 に示すように両耳間における振幅レベル比を予め計測し, $k_l(t)$ または $k_r(t)$ に掛けることで補正する. 本論文では図 4.16 に示すように左側の信号に補正を掛けて $ILD(t) = \widetilde{ILD}(t)$ を実現する. また, 図 4.16 における *test signal(t)* にはホワイトノイズを使用する.

表 4.5 主観評価実験の条件

Dummy head	NEUMANN, KU 100
Headphone	SONY, MDR-CD900ST
Sampling frequency	96 kHz
Quantization	16 bit
Subject number	10 persons

4.5. 多面体パラメトリックスピーカによる移動音像構築の評価実験

多面体パラメトリックスピーカによる移動音像構築の有効性を確認するため、主観評価実験を行う。

4.5.1 主観評価実験の条件

本実験では、図 4.17 に示す原音場における移動音を基準音、図 4.18 に示す再生音場内で多面体パラメトリックスピーカにより再現した移動音像を評価音として、それぞれの移動感を比較することで提案手法の有効性を評価する。なお、基準音と評価音の収録にはダミーヘッドを使用し、基準音、評価音ともにヘッドホンを用いて被験者に提示する。主観評価実験の条件を表 4.5 に示す。また、原音場における機材の配置等を図 4.17 に示す。本論文では、図 4.17 に示すように、受聴者と両壁面までの距離が等しい場合 (受聴位置 1) と、異なる場合 (受聴位置 2) において評価を行い、双方で得られる移動感を提案法により再現できるかを確認する。再生音場における機材の配置を図 4.18 に示す。評価音源にはホワイトノイズ、音声、正弦波 (2 kHz)、ヘリコプターの飛行音を使用する。原音場における移動音源は、実際に評価音源を再生中のスピーカを手を持ち移動することで実現する。また、移動音を受聴することで移動感が向上することを確認するために、移動していない音源として、原音場においてダミーヘッド正面に固定した音源に対しても移動感を評価する。それぞれ

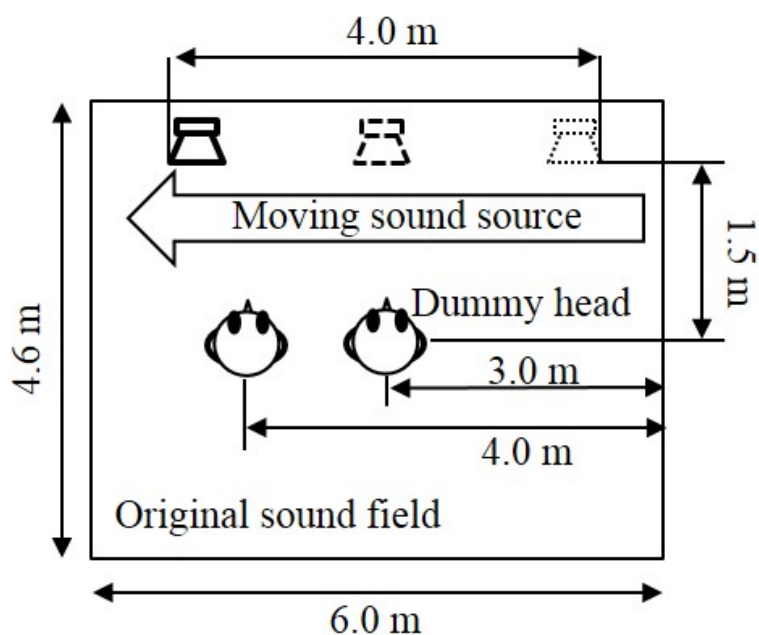


図 4.17 原音場におけるダミーヘッドと移動音源(スピーカ)の配置

の評価音源の移動時間はおよそ5秒, 移動距離は4 mである. そして, 基準音の移動感に対して評価音がどの程度再現できているかを5段階(5: 十分再現されている, 1: まったく再現されていない)で評価する. また, 評価音源によっては基準音そのものに対して移動感を得られないことも考えられるので, 各評価音源ごとに基準音と評価音それぞれ独立した移動感の評価も実施する. 移動感の評価には前章の主観評価実験で利用した MOS に基づく表 4.2 による5段階評価を用いる.

4.5.2 主観評価実験の結果

主観評価実験の結果を図 4.19~4.22 に示す. 図 4.19, 4.20 は, 横軸が評価音源の種類, 縦軸が移動音の再現性における評価値を表す. 各棒グラフは被験者10名の平均値, エラーバーは標準偏差を示し, 値が大きいほど再生音場において, 原音場の移動音を再現できていることを表す. 図 4.21, 4.22 は, 横軸が評価音源の種類, 縦軸が各基準音と評価音それぞれの移動感を表す. そして値が大きいほど, 滑らかな

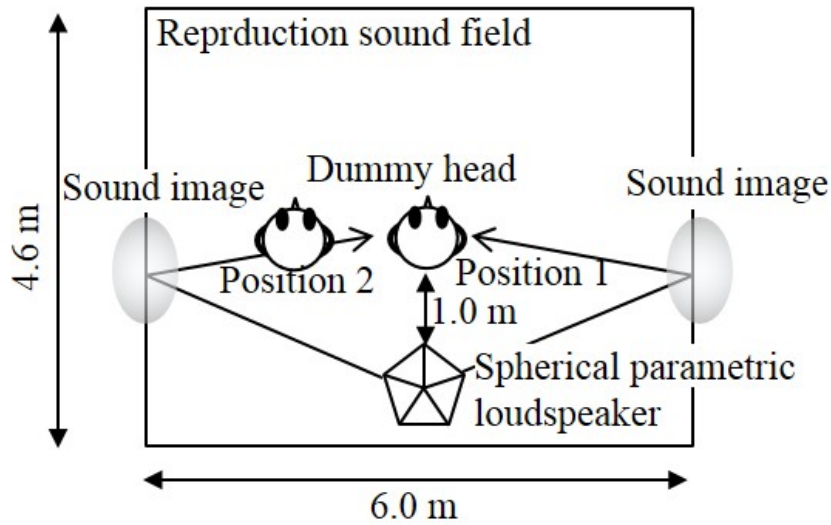


図 4.18 再生音場におけるダミーヘッドと多面体パラメトリックスピーカの配置

移動感を提示できていることを表す。図 4.19, 4.20 より, 提案手法を用いることでどの音源に対しても概ね実環境における移動音を再現できていることが確認できる。また, 図 4.21, 4.22 より, 原音場, 再現音場ともに構築した移動音が被験者に移動感を与えることを確認できる。加えて, ヘリコプターの飛行音と音声は, 移動していない場合と比較して差が明確であることから移動を知覚しやすい音源であることが分かる。特に, ヘリコプターの飛行音に関しては図 4.19, 4.20 においても高い値を示しており, 人が移動を知覚しやすい音源は本提案手法で十分再現可能であることが確認できる。しかしながら, ホワイトノイズ, 正弦波信号に関しては提案手法では十分な効果が見られない。また, 図 4.19 と図 4.20 を比較すると, わずかであるが全体的に評価位置 2 での再現性が低く, 振幅レベルの制御のみではあらゆる受聴位置に対応することが困難であることが分かる。

4.5.3 主観評価実験結果の考察

主観評価実験の結果から, 多面体パラメトリックスピーカを用いることで, 広範囲を移動する音源を再現できることが確認できた。また, 受聴位置が異なる場合に

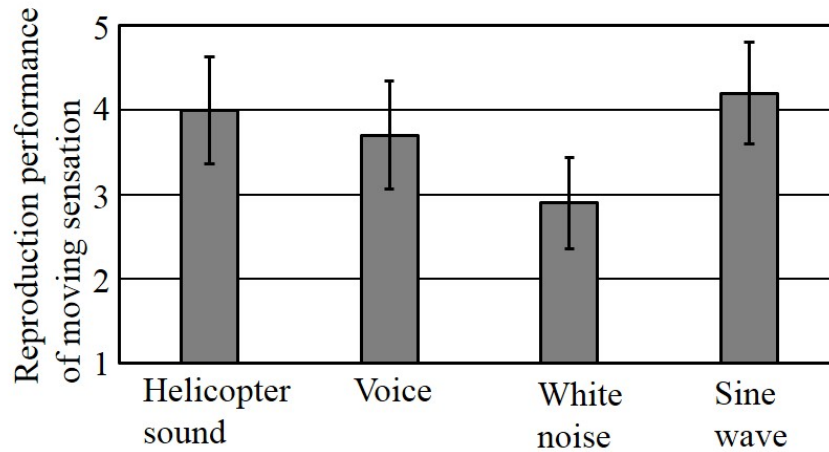


図 4.19 受聴位置 1 における移動音の再現性能

においても、予め各音像を受聴した際の ILD を算出し補正を掛けることで、ある程度実環境に近い移動感を与えることが可能であることを確認した。ここで、評価音源ごとの移動感に着目すると、図 4.21, 4.22 より、ヘリコプターの飛行音と音声信号を用いた時に高い移動感を得られることが分かる。一方、定常的な信号であるホワイトノイズと正弦波信号を出力した場合、実環境、再現環境共に移動感が低いことから、定常信号は移動感を得ることが困難な信号であると考えられる。次に、再現性能に直目すると、ヘリコプターの飛行音と音声信号では高い再現性を確認できるが、これは移動感を知覚しやすい非定常な信号の方が再現環境においても高い移動感をもつためであると考えられ、図 4.21, 4.22 の結果からも、実環境と再現環境においてそれぞれの移動感が概ね等しい結果となっている。ここで、図 4.21 のヘリコプターの飛行音の移動感に着目すると、どちらも高い移動感を有しており、その評価値も概ね同等である。しかしながら、再現性に関しては最も高い結果で 3.99 であり、高精度な移動音の再現を目指すうえで、提案手法だけでは不十分であると考えられる。この結果の原因のひとつとして、パラメトリックスピーカを利用したことによる、クロストーク成分の大幅な減少が考えられる。例として、図 4.23 にホワイ

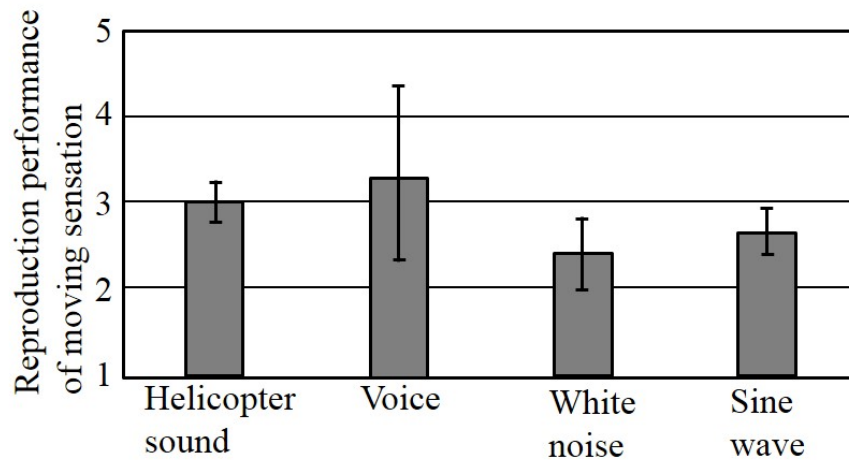


図 4.20 受聴位置 2 における移動音の再現性能

トノイズを使用した際の受聴位置 1 における実環境と再現環境の ILD の時間変化を表す。図 4.23 から確認できるように、受聴者の正面付近を通過する時間においては概ね同様の傾向を示すが、正面方向から離れるに伴い再現環境の方が ILD の絶対値が大きくなっていることが確認できる。したがって、実環境の移動感をより高精度に再現するためには、クロストーク成分を付加する手法を検討する必要がある。また、ITD の時間変化を提案手法に取り入れることで、より高い再現性能を発揮できると考えられる。なお、本実験では移動感のみに着目して評価を行ったが、今後は音質や移動速度、移動範囲などにも着目した評価を行い、3次元音場の高精度な再現に向けた手法を検討する必要がある。

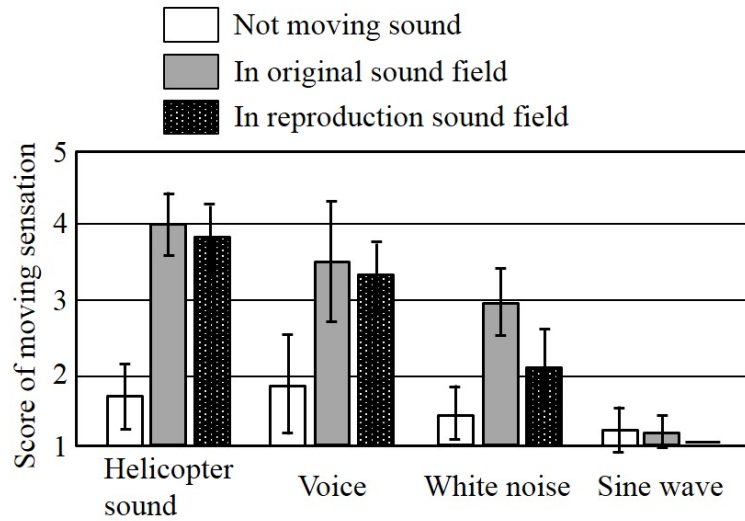


図 4.21 原音場と再生音場の受聴位置 1 における移動音の移動感

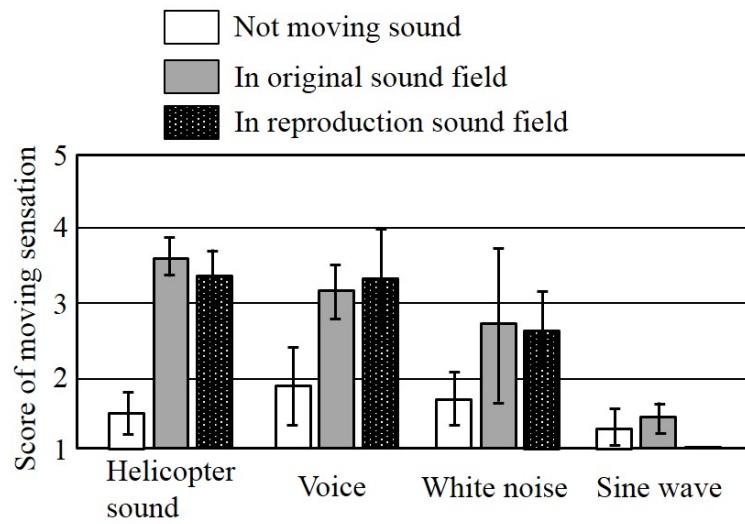


図 4.22 原音場と再生音場の受聴位置 2 における移動音の移動感

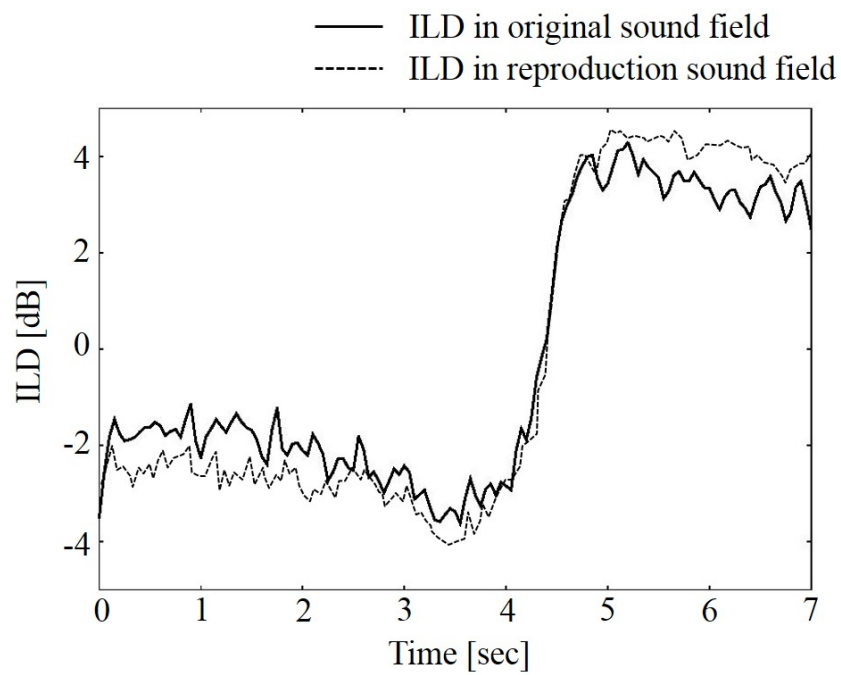


図 4.23 受聴位置 1 におけるホワイトノイズを再生した際の実環境と再現環境における ILD の時間変化

第5章 結論

5.1. 本博士論文のまとめ

飛行機の運転や災害現場での救出訓練などのシミュレート，またバーチャルリアリティの分野において，まるでその場にいるかのような3次元音場を構築する技術は聴覚上の臨場感を得るために必要不可欠である．従来の3次元音場再生技術には，大きく分けて複数のダイナミックスピーカを利用する手法と，ヘッドホンを利用する手法があるがどちらの手法も実現するうえで，物理的制約が大きい点に加え，高い音像定位性能を得ることが困難であった．そのため，近年高い音像定位性能を容易に得ることのできる新しい3次元音場再生方式として，パラメトリックスピーカを利用した音像プラネタリウム方式が提案され注目されている．音像プラネタリウム方式はパラメトリックスピーカの超指向性を利用することで，スピーカの設置が困難な壁面や天井に容易に音像を構築できる．しかしながら，パラメトリックスピーカ自体の音質劣化に加え，移動音の表現が困難であるという課題があった．そこで本論文では，音像プラネタリウム方式の品質向上のため，パラメトリックスピーカの音質改善手法を提案した上で，壁面上を移動する移動音像の構築手法を提案した．

本論文ではまず，従来の3次元音場再生方式の基礎として，2chのダイナミックスピーカを利用したステレオ再生方式と，ヘッドホンを利用したバイノーラル方式について述べ，それぞれの問題点として，スピーカの設置における物理的制約と受聴者本人の頭部伝達関数を正確に得ることが困難である点を指摘した．また，パラメトリックスピーカを用いた音像プラネタリウムによる3次元音場の構築手法およびパラメトリックスピーカの原理について述べ，その問題点として，パラメトリックスピーカ自体の低域の音圧低下および高調波ひずみの発生による音質劣化と，スピーカ本体を動かさずに壁面上を移動する移動音像の構築が困難である点を指摘した．

以上の問題点を解決し、高音質かつ移動音の提示も可能とする音像プラネタリウム方式による3次元音場の実現のため、本論文では次の方法を提案した。まず、パラメトリックスピーカの音質改善において、低域強調と高調波ひずみ低減のために、パラメトリックスピーカの入力信号である振幅変調波を生成する変調方式を新たに提案した。提案手法の有効性を評価するため、客観および主観評価実験を実施した結果、低域強調および高調波ひずみ低減に提案手法が有効であることを確認した。さらに、パラメトリックスピーカからの再生音の距離ごとの復調度を評価する指標を策定し、利用環境ごとに十分復調するために必要となる距離の推定を行った。策定指標の有効性を評価するために、客観評価実験の結果と主観評価実験の結果を比較したところ、策定した指標による距離ごとの復調度の増加に伴い、主観的な音質が増加することから策定指標の有効性を確認した。

次に、パラメトリックスピーカによる移動音像の提示において、パラメトリックスピーカ本体を動かすことなく壁面上を移動する音像を構築するために、曲面および球面に超音波素子を配置した曲面型パラメトリックスピーカ、多面体パラメトリックスピーカによる音像の制御手法を提案した。それぞれの手法を用いて移動音像の生成と再現を達成する手法を提案し、その有効性に関して、客観および主観評価実験を実施した。評価実験の結果、曲面型パラメトリックスピーカを利用することで壁面上を移動する音像を生成できることに加え、多面体パラメトリックスピーカを用いることで実環境の移動音源を再現できることを確認した。

以上の結果より、パラメトリックスピーカを用いた3次元音場再生手法において、パラメトリックスピーカ自体の音質改善と曲面型、多面体パラメトリックスピーカを用いた移動音像の提示によって、高音質かつ動きのある3次元音場の構築が可能となることを確認した。

5.2. 今後の課題

本論文で提案した方法により、パラメトリックスピーカを利用した3次元音場再生方式の音質向上と移動音像の実現が可能であることを確認した。しかしながら、本論文で提案した手法を実環境で運用するためには、以下の検討すべき課題がある。

1. パラメトリックスピーカのリアルタイム音質改善
2. 曲面型パラメトリックスピーカと多面体パラメトリックスピーカの統合
3. 複数人に対する3次元音場再生技術の実現

1. の課題は、一般家庭のようなスピーカの特性を計測することが困難な環境で、手軽に高音質再生するために検討が必要である。この課題を解決するためには、適応信号処理を用いて音声信号や音楽信号などの再生音から周波数ごとに利用すべき側波帯を決定する必要がある。

2. の課題に対しては、利用環境内でより自由度の高い音場再生を行うために必要であり、本論文で試作した多面体パラメトリックスピーカの各面を凹面上に湾曲させたような筐体に超音波素子を配置したパラメトリックスピーカを開発する必要がある。

3. の課題に対しては、災害時における救援シミュレーションやアミューズメント施設などへの応用を検討する上で必要となる技術である。この課題を解決するためには、複数マイクロホンを用いた多点制御や音場シミュレーションを用いた再生空間全体の音場制御手法を検討する必要がある。

上記の課題を解決するために今後も引き続き研究を行い、あらゆる音場を高品質に再生できる3次元音場再生方式を確立することで、万人が所望の音環境内で快適に活動できる社会の実現に僅かでも貢献できれば幸いである。

謝辞

本博士論文は、著者が立命館大学大学院情報理工学研究科博士課程後期課程において行った研究の成果をまとめたものです。本研究を遂行するにあたり、学内、学外を問わず多くの方にお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

立命館大学情報理工学部西浦敬信教授には、著者が本大学情報理工学部から博士課程後期課程に至るまで、指導教員として終始懇切なる御指導、御助言を頂きました。また、恵まれた研究環境に加え、著者の研究活動に有意義となる大学外での活動や実証実験に取り組む機会を数多く頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

同学部山下洋一教授には、著者が本大学院在籍中、多大な御指導を頂きました。山下先生の的確な御助言のお陰で、本大学院における研究活動を成し遂げ、博士論文執筆にいたる道を見出すことができました。心より深く御礼申し上げます。

同学部平林晃教授には、本論文審査委員として本論文の執筆における御指導を頂きました。平林先生から頂いた的確かつ有益な御助言によって本論文をより良い方向へ進歩させることができました。ここに心から感謝の意を表します。

同学部中山雅人助教には、著者が本大学院在籍中、様々な御指導、御討論を頂きました。ここに深く感謝いたします。

同学部福森隆寛助教には、著者が研究室に所属した時から数多くのご助言、激励を頂きました。ここに深く感謝いたします。

個々には御名前を申し上げられませんが、筆者の研究活動にご助力いただいた立命館大学情報理工学部音情報処理研究室の多くの先輩、同期、後輩、秘書の皆様、そして多くの励ましを頂いた学内外の友人に深く感謝いたします。

最後になりましたが、深い愛情と広い心で今日まで筆者を支えて頂いた家族に心から感謝いたします。

参考文献

- [1] “複合現実感特集,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 4, no. 4, 1999.
- [2] “複合現実感特集 (2), ” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 7, no. 2, 2002.
- [3] “複合現実感特集 (3), ” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 10, no. 3, 2005.
- [4] 比嘉 恭太, 西浦 敬信, 木村 朝子, 柴田 史久, 田村 秀行, “Watch the Birdie!-三感融合型複合現実感システムの実現,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 13, no. 2, pp. 227-238, 2008.
- [5] J. Bauck and D. H. Cooper, “Generalized transaural stereo and applications,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 44, no. 9, pp. 683-705, 1996.
- [6] 安藤 彰男, “音響インテンシティの一致に基づく音場再現,” 電子情報通信学会技術研究報告 (EA), EA-2009-44, vol. 109, no. 166, pp. 7-12, 2009.
- [7] B. B. Bauer, “Stereophonic earphones and binaural loudspeakers,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 9, no. 2, pp. 148-151, 1961.
- [8] J. Kawaura, Y. Suzuki, F. Asano and T. Sone, “Sound localization in headphone reproduction by simulating transfer functions from the sound source to the external ear,” *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, vol. 12, no. 5, pp. 203-216, 1991.

- [9] D. B. Ward and T. D. Abhayapala, “Reproduction of a plane-wave sound field using an array of loudspeakers, ” *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 9, no. 6, pp. 697-707, 2001.
- [10] M. Camras, “Approach to recreating a sound field, ” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 43, no. 6, pp. 1425-1431, 1968.
- [11] M. Miyoshi and Y. Kaneda, “Inverse filtering of room acoustics, ” *IEEE Transactions on the Acoustic, Speech and Signal Processing*, vol. 36, no. 2, pp. 145-152, 1988.
- [12] ITU-R BS. 775-2, “Multu-channel stereophonic sound system with or without accompanying picture, ” *Internatinal Telecommunication Union*, Recommendation BS. 775-2, 2006.
- [13] 小野 一穂, 小宮 山撰, “音像・音場制御用スピーカアレイの駆動法に関する検討, ” 電子情報通信学会技術研究報告 (EA), EA-94-20, vol. 94, no. 20, pp. 15-21, 1994.
- [14] 安藤 彰男, “音場再現, ” コロナ社, 2014.
- [15] P. Damaske, “Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction, ” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 50, no. 4, pp. 1109-1115, 1971.
- [16] 浜田 晴夫, “バイノーラル音場再生系について, ” 日本音響学会誌, vol. 48, no. 4, pp. 250-257, 1992.
- [17] 川浦 淳一, 鈴木 陽一, 浅野 太, 曾根 敏夫, “頭部伝達関数の模擬によるヘッドホン再生音像の定位, ” 日本音響学会誌, vol. 45, no. 10, pp. 756-766, 1989.
- [18] 伊勢 史郎, “キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式と逆システム理論に基づく音場制御の原理, ” 日本音響学会誌, vol. 53, no. 9, pp. 706-713, 1997.

- [19] M. R. Schroeder, "Computer simulation of sound transmission in rooms," *Proceeding of the IEEE*, vol. 51, no. 3, pp. 536-537, 1963.
- [20] 中村 智幸, "スタジオの音響設計," 日本騒音制御工学会論文誌, vol. 32, no. 5, pp. 276-280, 2008.
- [21] 平原 達也, 大谷 真, 矢入 聡, 岩谷 幸雄, 戸嶋 巖樹, "頭部伝達関数論考," 日本音響学会 聴覚研究会資料, H-2008-4, vol. 38, no. 1, pp. 19-24, 2008.
- [22] 鈴木 和憲, 日高 孝之, "バイノーラルシステムの等化器に関する基礎的検討: 音響パラメータとシステムの誤差要因に関する検討," 電子情報通信学会技術研究報告 (EA), EA95-207, vol. 95, no. 207, pp. 25-32, 1995.
- [23] 平原 達也, 大谷 真, 戸嶋 巖樹, "頭部伝達関数の計測とバイノーラル再生にかかわる諸問題," 電子情報通信学会 Fundamentals Review, vol. 2, no. 4, pp. 68-85, 2009.
- [24] P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 35, no. 4, pp. 535-537, 1963.
- [25] M. Yoneyama, J. Fujimoto, Y. Kawamo and S. Sasabe, "The audio spotlight: An application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, no. 5, pp. 1532-1536, 1983.
- [26] 青木 健一, 鎌倉 友男, 熊本 芳朗, "パラメトリックスピーカ: 応用例," 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. J76-A, no. 8, pp. 1127-1135, 1993.
- [27] J. J. Croft and J. O. Norris, "Theory, history, and the advancement of parametric loudspeaker," *White paper of American Technology Corporation*, 2001.
- [28] 鎌倉 友男, 酒井 新一, "パラメトリックスピーカの原理と応用," 信学技報, vol. 105, no. 556, pp. 25-30, 2006.

- [29] 田中 恒雄, 古 暁広, “美術館や博物館用のスピーカを開発 アレイ配置で指向性を絞る,” *日経エレクトロニクス*, vol. 587, pp. 155-165, 1993.
- [30] “超指向性音響システム「ここだけ」カタログ,” 三菱電気エンジニアリング株式会社, 2007.
- [31] C. Shi and W. S. Gan, “Development of parametric loudspeaker: a novel directional sound generation technology,” *IEEE Potentials*, vol. 29, no. 6, pp. 20-24, Nov/Dec 2010.
- [32] J. Yang, J. Tian and W. S. Gan, “Parametric loudspeaker: from theory to applications,” *21st International Congress on Sound and Vibration*, 2014.
- [33] C. Shi, Y. Kajikawa and W. S. Gan, “An overview of directivity control methods of the parametric array loudspeaker,” *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 3, 2014
- [34] 西浦 敬信, 森勢 将雅, “音像プラネタリウム-パラメトリック・スピーカを用いた三次元音響再生方式 (特集 超音波の利用 (2)),” *超音波 techno*, vol. 24, no. 4, pp. 47-51, 2011.
- [35] 廣川 孝太郎, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “壁面反射型オーディオスポット用反射物体の試作と特性評価,” 日本音響学会 2010 年春季研究発表会, pp. 675-676, 2010.
- [36] Y. Sugibayashi, S. Kurimoto, D. Ikefuji, M. Morise and T. Nishiura, “Three-dimensional acoustic sound field reproduction based on hybrid combination of multiple parametric loudspeakers and electrodynamic subwoofer,” *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 12, pp. 1282-1288, 2012.
- [37] 辻井 秀弥, 中山 雅人, 西浦 敬信, “動電型間接スピーカを用いた残響時間制御に基づく三次元音場再生システム,” 2012 年回路とシステムワークショップ論文集, vol 25, pp. 384-389, 2012.

- [38] 伊藤 仁一, 中山 雅人, 西浦 敬信, 木村 朝子, 柴田 史久, 田村 秀行 “X-Media Galaxy における移動音像実現のための音像補間,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 18, no. 3, pp. 405-414, 2013.
- [39] F. J. Pompei, “The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beam,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 47, no. 9, pp. 726-731, 1999.
- [40] H. M. Merklinger, “Improved efficiency in the parametric transmitting array,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 58, no. 4, pp. 784-787, 1975.
- [41] M. Chen, X. Qin, L. Xu, Y. Du, and L. Xu, “The distortion analysis of the single side band method for parametric loudspeaker based on orthogonal envelope detection,” *Proc. International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, pp. 1-6, 2008.
- [42] J. Yang, K. Sha, W. S. Gan, and J. Tian, “Nonlinear wave propagation for a parametric loudspeaker,” *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences*, vol. E87-A, no. 9, pp. 2395-2400, 2004.
- [43] G. S. Garrett, J. N. Tjotta and S. Tjotta, “Nearfield of a large acoustic transducer, Part II: Parametric radiation,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 74, no. 3, pp. 1013-1020, 1983.
- [44] T. Kamakura, K. Aoki, and Y. Kumamoto, “Suitable modulation of the carrier ultrasound for parametric loudspeaker,” *Acustica*, vol. 73, pp. 215-217, 1991.
- [45] 蘆原 郁, 桐生 昭吾, “可聴周波数帯域外の純音対に対するオーディオスピーカの混変調歪み,” 電子情報通信学会技術研究報告 (EA), vol. 98, no. 158, pp. 33-40, 1998.
- [46] 濱本 吉洋, 鎌倉 友男, 青木 健一, 酒井 新一, “パラメトリック音響システムの変換効率改善,” 電子情報通信学会技術研究報告 (US), vol. 105, no. 44, pp. 25-28, 2005.

- [47] 鎌倉 友男, 酒井 新一, “パラメトリックスピーカの実用化,” 日本音響学会誌, vol. 62, no. 11, pp. 791-797, 2006.
- [48] 愛甲 英寿, 野村 建太, 青木 健一, 鎌倉 友男, 酒井 新一, 吉田 俊治, “パラメトリックスピーカ駆動用デジタル変調器の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 (US), vol. 107, no. 20, pp. 29-34, 2007.
- [49] 原 祥之, 森 幸男, 鎌倉 友男, “パラメトリックスピーカの音質改善について,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, pp. 57-60, 2008.
- [50] M. Chen, Leon. Xu, Y. Cao, Limei. Xu, X. Wang, X. Li, and J. Ma, “Research on an improved amplitude modulation method of audio directional loudspeaker,” *Proc. International Conference on Audio, Language and Image Processing*, pp. 5-9, 2008.
- [51] 愛甲 英寿, 野村 建太, 青木 健一, 鎌倉 友男, 酒井 新一, “ダイナミック SSB 変調器を用いたパラメトリック音響システムの検討,” 電子情報通信学会技術研究報告 (EA), vol. 107, no. 470, pp. 35-40, 2008.
- [52] 酒井 新一, 鎌倉 友男, 野村 英之, 吉田 俊治, “パラメトリックスピーカ用ダイナミック SSB 変調器,” 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. 91, no. 12, pp. 1166-1173, 2008.
- [53] Y. Wang, X. Li, L. Xu, and L. Xu, “SSB modulation of the ultrasonic carrier for a parametric loudspeaker,” *Proc. International Conference on Electronic Computer Technology*, pp. 669-673, 2009.
- [54] H. Roder, “Amplitude, phase, and frequency modulation,” *Proc. Institute of Radio Engineers*, vol 19, no. 12, pp. 2145-2176, 1931.
- [55] D. Olszewski, F. Prasetyo and K. Linhard, “Steerable highly directional audio beam loudspeaker,” *INTERSPEECH 2005*, pp. 137-146, 2005.

- [56] C. H. Wong, Z. W. Siew, I. Saad, C. F. Liao and K. T. K. Teo, "Performance analysis on beam-steering algorithm for parametric array loudspeaker application," *Proc. of the 3rd (2011) CUTSE International Conference*, pp. 283-288, 2011.
- [57] S. Wu, M. Wu, C. Huang and J. Yang, "FPGA-based implementation of steerable parametric loudspeaker using fractional delay filter," *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 12, pp. 1271-1281, 2012.
- [58] M. Nakayama, T. Nishiura, R. Okuno and N. Nakasako, "A study on acoustic beam steering with parametric loudspeaker based on individual delay-filtering for carrier and sideband Waves," *Proc. IEEE APCCAS*, pp.447-450, 2014.
- [59] Y. Sagisaka, K. Takeda, M. Abel, S. Katagiri, T. Umeda, H. Kuwabara, "A large-scale japanese speech database," *Proc. International Conference on Spoken Language Processing 1990*, pp. 1089-1092, 1990.
- [60] ITU-T Rec. P.800, "Methods for subjective determination of transmission quality," *International Telecommunication Union, Recommendation P.800*, 1996.
- [61] 日本音響学会, 新版音響用語辞典, コロナ社, 2003.
- [62] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation Time," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 37, no. 3, pp. 409-412, 1965.
- [63] 羽入 敏樹, "室内音響指標値," 日本音響学会誌, vol. 60, no. 2, pp. 72 - 77, 2004.
- [64] A. J. Berkhout, D. de. Vries, and M. M. Boone, "A new method to acquire impulse responses in concert halls," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, no. 1, pp. 179-183, 1980.
- [65] A. Hyvarinen, J. Karhunen, E. Oja, "詳解 独立成分分析," 東京電機大学出版局, 2005.

- [66] E. Vincent, H. Sawada, P. Bofill, S. Makino, J. Rosca, “First stereo audio source separation evaluation campaign: data, algorithms and results,” *Proc. of International Commission for Acoustics 2007*, pp. 552-559, 2007.
- [67] N. Roman, D. Wang, G. J. Brown, “Speech segregation based on sound localization,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 114, no. 4, pp. 2236-2252, 2003.
- [68] 黒住 幸一, 大串 健吾, “音響信号の両耳間相関関数に基づく音像定位の予測モデル,” *日本音響学会誌*, vol. 44, no. 10, pp. 726 - 734, 1988.
- [69] 佐多 正至, 木村 真弘, 由田 幸一, 高橋 誠, “移動音像呈示時の音像定位に関する基礎的研究,” *電子情報通信学会技術研究報告, MBE*, vol. 100, no. 163, pp. 67-72, 2000.

研究業績

学術論文

1. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 須原 裕子, 中山 雅人, 西浦 敬信, “時間・周波数領域和音構造付与に基づく歯科治療音の快音化,” 電気学会論文誌 C, vol. 135-C, no. 12, pp. 1565-1573, Dec. 2015.
2. 小森 慎也, 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “フレキシブルパラメトリックスピーカを用いたオーディオスポットの制御,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 20, no. 3, pp. 189-198, Jul. 2015.
3. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成,” 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. J97-A, no. 4, pp. 304-312, May 2014.
4. 生藤 大典, 辻川 美沙貴, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づく室内騒音の不快感低減手法,” 電子情報通信学会論文誌 (A), vol. J96-A, no. 8, pp. 511-519, Aug. 2013.
5. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカのためのスペクトル包絡に基づく復調評価指標の策定,” 電子情報通信学会論文誌 (D), vol. J96-D, no. 3, pp. 655-663, Mar. 2013.
6. Yutaro Sugibayashi, Sota Kurimoto, **Daisuke Ikefuji**, Masanori Morise and Takanobu Nishiura, “Three-dimensional Acoustic Sound Field Reproduction Based on Hybrid Combination of Multiple Parametric Loudspeakers and Electrodynamic Subwoofer,” *Applied Acoustics*, vol. 73, no. 12, pp. 1282-1288,

Dec. 2012.

7. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “重み付き両側波帯変調方式によるパラメトリックスピーカの音質改善減,” 電子情報通信学会論文誌 (D), vol. 95-D, no. 3, pp. 588-596, Mar. 2012.

国際会議

1. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Robust Sound Image Localization for Moving Listener with Curved-type Parametric Loudspeaker, ” *Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015)*, Paper ID: 289, pp. 1045-1049, Dec. 2015.
2. Shinya Komori, **Daisuke Ikefuji**, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Reshaped Audible Area with Flexible Parametric Loudspeaker, ” *Proc. the 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC 2015)*, pp. 439-444, Dec. 2015.
3. Ryosuke Uemura, **Daisuke Ikefuji**, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Sound Pressure Improvement in Audio-spot-design Based on Separating Emission with Double Sideband Modulation, ” *Proc. the 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC 2015)*, pp. 473-478, Dec. 2015.
4. Rumi Ito, Yoshitaka Ohshio, **Daisuke Ikefuji**, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Speech Obscuration Based on Auditory Masking for Speech Security Protection, ” *Proc. the 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC 2015)*, pp. 479-485, Dec. 2015.
5. **Daisuke Ikefuji**, Takahiro Fukumori, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Audio Spot Expansion Based on Separating Emission

- with Multiple Curved-type Parametric Loudspeakers, ” *Proc. the 12th Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC 2015)*, pp.338-342, Dec. 2015.
6. Taku Yoshimura, Naoki Yoshimoto, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Reproduction of Human-phonatory Radiation Characteristic for Continuous Speech, ” *Proc. the 44th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2015)*, Paper ID: 234, Aug. 2015.
 7. Yoshitaka Ohshio, Takumi Honda, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Musical Piece Selection for Discomfort Reduction of Dental Treatment Sound Based on Auditory Masking in Time and Frequency Domains, ” *Proc. the 44th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2015)*, Paper ID: 284, Aug. 2015.
 8. Yoshitaka Ohshio, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “A Study on Comfortable Sound Design Based on a Single Chord-forming for Dental Treatment Sound, ” *Proc. the 44th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2015)*, Paper ID: 517, Aug. 2015.
 9. **Daisuke Ikefuji**, Tadashi Matsui, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Fundamental Study on Active Noise Control with Audio-Spot for Minimum Area Using Parametric Loudspeaker, ” *Proc. the 44th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2015)*, Paper ID: 497, Aug. 2015.
 10. **Daisuke Ikefuji**, Hideya Tsujii, Shohei Masunaga, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Reverberation Steering and Listening Area Expansion on 3-D Sound Field Reproduction with Parametric Array Loudspeaker, ” *Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2014)*, Paper ID: 1147, Oct. 2014.
 11. Shinya Komori, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Evaluation on Flexible Beamformers with Curved-type Parametric Loud-

- speaker for Spatial Audible Area Design, ” *Proc. the 43th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2014)*, Paper ID: p423, Nov. 2014.
12. Tadashi Matsui, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Multiple Audio Spots Design Based on Separating Emission of Carrier and Sideband Waves, ” *Proc. the 43th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2014)*, Paper ID: p420, Nov. 2014.
 13. Ryosuke Konabe, Tadashi Matsui, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “A Design of Reflective Audio Spot with Parabolic Reflector for Sound Pressure Improvement on Separating Emission of Carrier and Sideband Waves, ” *Proc. the 43th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2014)*, Paper ID: p414, Nov. 2014.
 14. Tomoyuki Wada, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “A Study on 3-D Sound Field Localization System Using Parametric Loudspeaker and Indirect Loudspeakers for Reverberation Reproduction, ” *Proc. the 43th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2014)*, Paper ID: p418, Nov. 2014.
 15. **Daisuke Ikefuji**, Yuko Suhara, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “A Design of Comfortable Dental Treatment Sound Based on Auditory Masking, ” *Proc. the 43th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2014)*, Paper ID: p421, Nov. 2014.
 16. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “Fundamental Study of Moving Sound Image Design with Curved-Type Parametric Loudspeaker, ” *Proc. the 7th Forum Acusticum 2014 (FA2014)*, Paper ID: R05D₃, Sept. 2014.
 17. Shohei Masunaga, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama and Takanobu Nishiura, “Listening Area Expansion of Reflective Audio Spot with Curved-type Para-

metric Loudspeaker, ” *Proc. 2014 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP 2014)*, pp. 425-428, Mar. 2014.

18. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura and Yoichi Yamashita, “An Active Unpleasantness Control System for Indoor Noise Based on Auditory Masking, ” *Proc. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2013)*, Paper ID: 130, Oct. 2013.
19. Tadashi Matsui, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “A Design of Audio Spot Based on Separating Emission of the Carrier and Sideband Waves, ” *Proc. the 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*, Paper ID: 1pSPc27, Jun. 2013.
20. Toru Iwasaki, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “Parametric Loudspeaker for Speech Signal Based on the Combination of Amplitude and Frequency Modulations, ” *Proc. the 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*, Paper ID: 1pSPc25, Jun. 2013.
21. Yuko Suhara, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “A Design of Control Signal in Reducing Discomfort of the Dental Treatment Sound Based on Auditory Masking, ” *Proc. the 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*, Paper ID: 3pNSc8, Jun. 2013.
22. Shohei Masunaga, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “Steering for Listening Area of Reflective Audio Spot with Parametric Loudspeaker Array, ” *Proc. the 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*, Paper ID: 1pSPc4, Jun. 2013.
23. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura, and Yoichi Yamashita, “An Investigation into the Relationship between Sound Quality and

Demodulation Ratio for Parametric Loudspeakers, ” *Proc. the 21st International Congress on Acoustics (ICA 2013)*, Paper ID: 2pSP7, Jun. 2013.

24. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Takanobu Nishiura, and Yoichi Yamashita, “Weighted Double Sideband Modulation toward High Quality Audible Sound on Parametric Loudspeaker, ” *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2014)*, Paper Number: AASP-P10-14, May 2013.
25. Yuko Suhara, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “Design of Comfortable Masking Sound on Auditory Masking for the Dental Treatment Sound, ” *Proc. 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP 2013)*, pp. 85-88, Mar. 2013.
26. **Daisuke Ikefuji**, Sota Kurimoto, Masato Nakayama, and Takanobu Nishiura, “Auditory Distance Perception with Combination of Parametric and Dynamic Loudspeakers, ” *Proc. 2013 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP 2013)*, pp. 532-535, Mar. 2013.
27. Shohei Masunaga, **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Masanori Morise, and Takanobu Nishiura, “Harmonic Distortion Measurement for A Parametric Loudspeaker with Logarithmic Time Stretched Pulse, ” *Acoustics 2012*, Paper Number: 4aSP21, May 2012.
28. **Daisuke Ikefuji**, Masato Nakayama, Masanori Morise, and Takanobu Nishiura, “Estimation of Demodulation Ratio for the Parametric Loudspeaker Based on Spectral Envelope, ” *Acoustics 2012*, Paper Number: 4aSP20, May 2012.
29. **Daisuke Ikefuji**, Masanori Morise, and Takanobu Nishiura, “An Evaluation of Demodulation in Distance for Parametric Loudspeaker Based on Sub-band Spectral Envelope, ” *Proc. 2012 RISP International Workshop on Nonlinear*

Circuits, Communications and Signal Processing (NCSP 2012), pp. 245-248, Mar. 2012.

30. **Daisuke Ikefuji**, Masanori Morise, and Takanobu Nishiura, “A Study of Sound Quality Improvement of the Parametric Loudspeaker Based on Weighted Double Side Band Modulation,” *Proc. the 40th International Congress on Noise Control Engineering (inter.noise 2011)*, Paper ID: Mon-P-12, Sept. 2011.
31. Masanori Morise, **Daisuke Ikefuji**, Hideya Tsujii, Kotaro, Hirokawa, and Takanobu Nishiura, “A Design of Reflective Audio Spot with Reflective Objects,” *Proc. the 20th International Congress on Acoustics (ICA 2010)*, Paper ID: 755, Aug. 2010.

研究会

1. 小辺 亮介, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と複数側帯波の独立遅延制御によるパラメトリックスピーカ近傍再生の検討,” 電子情報通信学会 第30回信号処理シンポジウム, B4-5, pp. 279-284, Nov. 2015.
2. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “コード進行の構造付与に基づく歯科治療音の快音化,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 169, EA2015-18, pp. 47-52, Aug. 2015.
3. 小林 碧海, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, 佐久間 春夫, “聴覚マスキングに基づく乳幼児泣き声の特徴量分析と不快感低減,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 169, EA2015-19, pp. 53-58, Aug. 2015.
4. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “歯科治療騒音に対する時間・周波数領域の和音構造付与に基づく快音化,” 騒音振動研究会, 資料番号 : N-2015-37, Jul. 2015.

5. 伊藤 瑠美, 大塩 祥剛, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “ANCと聴覚マスキングを用いた工場騒音の不快感低減の性能評価,” 第28回 回路とシステムワークショップ, Paper ID: 1029, pp. 406-411, Aug. 2015. (査読あり)
6. 上村 亮介, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “極小オーディオスポット形成における音圧改善に向けたDSB変調型分離放射法,” 第28回 回路とシステムワークショップ, Paper ID: 1026, pp. 329-334, Aug. 2015. (査読あり)
7. 小森 慎也, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “フレキシブルパラメトリックスピーカによるオーディオスポット形成の評価,” 第28回 回路とシステムワークショップ, Paper ID: 1018, pp. 335-340, Aug. 2015. (査読あり)
8. 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “球形パラメトリックスピーカを用いた両耳間音圧差の時間変化に基づく移動音像構築,” 第28回 回路とシステムワークショップ, Paper ID: 1050, pp.341-346, Aug. 2015. (査読あり)
9. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた分離放射法によるオーディオスポット拡大の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 473, EA2014-118, pp. 255-260, Mar. 2015.
10. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “球形パラメトリックスピーカを用いた3次元移動音像の構築,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 114, no. 473, EA2014-116, pp. 243-248, Mar. 2015.
11. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 梶川 嘉延, “極小領域オーディオスポットを用いたANCの基礎的検討,” 電子情報通信学会 第29回信号処理シンポジウム, P1-6, pp. 296-297, Nov. 2014.
12. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “超音波スピーカを用いた運動支援のための空間シェアリング,” 計測自動制御学会 ライフエンジニアリング部門シンポジウム 2014, 1B3-3, Sept. 2014.

13. 和田 朋之, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “直接・間接型スピーカを用いた残響再現可能な反射型オーディオスポットシステム,” 第 27 回 回路とシステムワークショップ, pp. 167-172, Aug. 2014.
14. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “帯域和音付与に基づく不快騒音の快音化に向けた最適帯域幅の検討,” 第 27 回 回路とシステムワークショップ, pp. 173-178, Aug. 2014.
15. 小辺 亮介, 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射におけるパラボラ反射型オーディオスポット形成による音圧改善,” 第 27 回 回路とシステムワークショップ, pp. 357-362, Aug. 2014.
16. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音像構築の評価,” 第 27 回 回路とシステムワークショップ, pp. 330-335, Aug. 2014.
17. 岩崎 亘, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音声再生に適したパラメトリックスピーカのための振幅・周波数ハイブリッド変調方式における最適パラメータの実験的検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.112, EA2014-6, pp. 7-12, Jun. 2014.
18. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音像構築手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol.114, no.112, EA2014-7, pp. 13-18, Jun. 2014.
19. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “サラウンドパラメトリックスピーカを用いたキャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成,” 電子情報通信学会 第 28 回信号処理シンポジウム, C8-2, pp. 677-678, Nov. 2013.
20. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “スペクトル包絡の相互相関に基づくパラメトリックスピーカの復調評価指標の策定,” 電子情報通信学会 第 28 回信号処理シンポジウム, P2-24, pp. 336-341, Nov. 2013.

21. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカアレーを用いた壁面反射型オーディオスポット領域の拡大,” 第 26 回 回路とシステムワークショップ, pp. 431-435, Jul. 2013. (査読あり)
22. 生藤 大典, 辻井 秀弥, 益永 翔平, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “間接動電型スピーカを用いた残響時間制御による全天周ドームにおける音像プラネタリウムの高臨場化,” 第 26 回 回路とシステムワークショップ, pp. 436-441, Jul. 2013. (査読あり)
23. 益永 翔平, 生藤 大典, 森勢 将雅, 中山 雅人, 西浦 敬信, “Log-TSP を用いたパラメトリックスピーカの 2 次高調波歪測定,” 第 25 回 回路とシステムワークショップ, pp. 349-354, Jul. 2012. (査読あり)
24. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “スペクトル包絡の相互相関を用いたパラメトリックスピーカの復調度測定,” 第 25 回 回路とシステムワークショップ, pp. 343-348, Jul. 2012. (査読あり)
25. 生藤 大典, 中山 雅人, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “スペクトル包絡に基づくパラメトリックスピーカの復調評価,” 電子情報通信学会応用音響研究会, vol. 112, no. 47, pp. 71-77, May 2012.

大会発表

1. 小森 慎也, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音像ホログラムへの挑戦 ～パラメトリックスピーカを用いた 3 次元音像構築～,” 第 18 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 43, Dec. 2015.
2. 上村 亮介, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “近傍再生スピーカの提案 ～曲面型パラメトリックスピーカを用いたキャリア波と側帯波の独立遅延付与による可聴エリア制御～,” 第 18 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 32, Dec. 2015.

3. 小林 碧海, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “乳児泣き声の不快感低減 ～振幅スペクトル総和比に着目した乳児泣き声の不快感低減法の提案～,” 第 18 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 29, Dec. 2015.
4. 伊藤 瑠美, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “工場騒音の快音化 ～気にならないドリル騒音の実現に向けて～,” 第 18 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 18, Dec. 2015.
5. 中山 雅人, 大塩 祥剛, 生藤 大典, 福森 隆寛, 西浦 敬信, “聴覚マスキングとメロディ構造付与に基づく歯科治療音の快音化手法の検討,” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, pp. 429-430, Sept. 2015.
6. 小林 碧海, 大塩祥剛, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づく乳幼児泣き声の不快感低減法の生理的評価の検討,” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, pp. 481-482, Sept. 2015.
7. 小森 慎也, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “多チャンネルパラメトリックスピーカを用いた 3 次元音像構築の基礎的検討,” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, pp. 705-708, Sept. 2015.
8. 伊藤 瑠美, 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, “ANC と聴覚マスキングに基づく工場騒音の不快感低減および音声了解性の評価,” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, pp. 483-484, Sept. 2015.
9. 生藤 大典, 福森 隆寛, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた壁面反射型移動音像の構築,” 日本音響学会 2015 年秋季研究発表会, pp. 709-710, Sept. 2015.
10. 岩崎 亘, 中野 皓太, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “振幅・周波数ハイブリッド変調方式を用いた高出力型パラメトリックスピーカの評価,” 日本音響学会 2015 年春季研究発表会, 3-10-8, pp. 617-620, Mar. 2015.

11. 小森 慎也, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “オーディオスポット制御のためのフレキシブルパラメトリックスピーカの基礎的検討,” 日本音響学会 2015 年春季研究発表会, 2-P-41, pp. 885-888, Mar. 2015.
12. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下洋一, “球形パラメトリックスピーカを用いた 3 次元音場構築の基礎的検討,” 日本音響学会 2015 年春季研究発表会, 2-P-40, pp. 883-884, Mar. 2015.
13. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた分離放射法によるオーディオスポット拡大,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, A-10-1, Mar. 2015.
14. 小辺 亮介, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いたビームステアリングの検討,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, SP-257, Mar. 2015.
15. 和田 朋之, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “反射型オーディオスポット形成における複数間接動電型スピーカを用いた多点計測に基づく広範囲残響制御,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, SP-260, Mar. 2015.
16. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “コード進行を用いた和音構造付与に基づく歯科治療音の快音化のための制御音の検討,” 2015 年電子情報通信学会総合大会, SP-261, Mar. 2015.
17. 上村 亮介, 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “両側波帯変調方式を用いた分離放射によるオーディオスポットの音圧改善の研究,” 電子情報通信学会関西支部学生会第 20 回学生会研究発表講演会, A2-2, Mar. 2015.
18. 小森 慎也, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いたフレキシブルオーディオスポット,” 電子情報通信学会関西支部学生会第 20 回学生会研究発表講演会, A2-4, Mar. 2015.
19. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “歯科治療音の不快感ゼロへの挑戦 ～不快音調和化の検討～,” 第 17 回日本音響学会関西支部若手研究者交流

研究発表会, p. 15, Dec. 2014.

20. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “和音構造付与に基づく歯科治療音の快音化の基礎的検討,” 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, G11-12, pp. 340-341, Nov. 2014.
21. 岩崎 亘, 中野 皓太, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “振幅・周波数ハイブリッド変調方式を用いたパラメトリックスピーカの音圧向上の基礎的検討,” 平成 26 年電気関係学会関西連合大会, G11-11, pp. 338-339, Nov. 2014.
22. 小辺 亮介, 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “分離放射を用いた反射型オーディオスポット形成手法における最適なりフレクタ形状の検討,” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 1-Q-34, pp. 721-722, Sept. 2014.
23. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた分離放射法における可聴領域拡大の検討,” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 2-P-50, pp. 883-884, Sept. 2014.
24. 島田祐平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音声プライバシー保護に向けたヒューマンスピーチライクノイズ生成における重畳音声の音圧レベルの検討,” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 3-Q-33, pp. 469-470, Sept. 2014.
25. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “曲面型パラメトリックスピーカによる移動音像の構築,” 日本音響学会 2014 年秋季研究発表会, 2-P-49, pp. 879-880, Sept. 2014.
26. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “サラウンドパラメトリックスピーカを用いたキャリア波と側帯波の分離放射における混変調歪みの低減,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 903-904, Mar. 2014.
27. 島田 祐平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングによる音声プライバシー保護のためのパワー変動を考慮したヒューマンスピーチライクノイズ生成法の検討,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 599-600, Mar. 2014.

28. 岩崎 亘, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音声再生に適したパラメトリックスピーカのための振幅・周波数ハイブリッド変調方式の客観評価,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 897-898, Mar. 2014.
29. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた壁面反射型オーディオスポットの拡大,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 959-960, Mar. 2014.
30. 須原 裕子, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “流水音に基づく長時間歯科治療音の聴覚マスキングと快音化,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 601-602, Mar. 2014.
31. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, 山下 洋一, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた移動音像構築の基礎検討,” 日本音響学会 2014 年春季研究発表会, pp. 889-890, Mar. 2014.
32. 和田 朋之, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “反射型オーディオスポット形成における間接動電型スピーカを用いた残響制御,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 19 回学生会研究発表講演会, p. 66, Mar. 2014.
33. 小辺 亮介, 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射における音圧改善のためのパラボラ反射型オーディオスポット形成,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 19 回学生会研究発表講演会, p. 62, Mar. 2014.
34. 大塩 祥剛, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “帯域和音付与に基づく不快音の快音化,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 19 回学生会研究発表講演会, p. 63, Mar. 2014.
35. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “サラウンドパラメトリックスピーカを用いたキャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成の音質評価,” 第 16 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 7, Dec. 2013.

36. 岩崎 亘, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音声再生に適したパラメトリックスピーカのための振幅・周波数ハイブリッド変調方式のパラメータ最適化,” 第16回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 8, Dec. 2013.
37. 須原 裕子, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づく歯科治療音の快音化の検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 3-P-40, pp. 529-530, Sept. 2013.
38. 島田 祐平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングによる音声プライバシー保護のためのヒューマンスピーチライクノイズ生成法の検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 3-P-39, pp. 527-528, Sept. 2013.
39. 岩崎 亘, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “音声出力に適したパラメトリックスピーカのための振幅・周波数ハイブリッド変調方式の検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 1-Q-25, pp. 755-758, Sept. 2013.
40. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “曲面型パラメトリックスピーカを用いた受聴領域拡大の検討,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 1-Q-21, pp. 743-744, Sept. 2013.
41. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成の評価,” 日本音響学会 2013 年秋季研究発表会, 1-Q-15, pp.721-722, Sept. 2013.
42. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づく騒音環境追従型不快感低減システムの開発,” 日本騒音制御工学会 2013 年春季研究発表会, pp. 113-116, Apr. 2013.
43. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカアレイを用いた壁面反射型音像再生の主観評価,” 日本音響学会 2013 年春季研究発表会, pp. 845-846, Mar. 2013.
44. 須原 裕子, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づいた歯科治療音の特徴量分析と不快感低減,” 日本音響学会 2013 年春季研究発表会, pp.

615-616, Mar. 2013.

45. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカの再生音場における主観的音質と復調度の評価,” 日本音響学会 2013 年春季研究発表会, pp. 715-716, Mar. 2013.
46. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側帯波の分離放射によるオーディオスポット形成の研究,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 18 回学生会研究発表講演会, p. 68, Mar. 2013.
47. 岩崎 亘, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “振幅・周波数変調方式を用いた音声に最適なパラメトリックスピーカの研究,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 18 回学生会研究発表講演会, p. 66, Mar. 2013.
48. 須原 裕子, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングに基づいた歯科治療音の不快感低減における制御音の検討,” 第 15 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 11, Dec. 2012.
49. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカアレイを用いた壁面反射型音像再生の制御,” 第 15 回日本音響学会関西支部若手研究者交流研究発表会, p. 12, Dec. 2012.
50. 松井 唯, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “キャリア波と側波帯の分離放射によるオーディオスポット形成の基礎的検討,” 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会, pp. 867-868, Sept. 2012.
51. 須原 裕子, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “聴覚マスキングを用いた摩擦系不快感に対する不快感低減手法の検討,” 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会, pp. 539-540, Sept. 2012.
52. 益永 翔平, 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “Log-TSP を用いたパラメトリックスピーカの 3 次高調波歪測定,” 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会, pp. 785-786, Sept. 2012.

53. 生藤 大典, 中山 雅人, 西浦 敬信, “パラメトリックスピーカにおける復調評価指標 DUA-CCn の主観評価に関する一検討,” 日本音響学会 2012 年秋季研究発表会, pp. 623-624, Sept. 2012.
54. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “スペクトル包絡の相関に基づくパラメトリックスピーカの復調評価指標の検討,” 日本音響学会 2012 年春季研究発表会, pp. 785-786, Mar. 2012.
55. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “スペクトル包絡に基づくパラメトリックスピーカの復調評価,” 日本音響学会関西支部第 14 回若手研究者交流研究発表会, p. 16, Dec. 2011.
56. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “Weighted Double SideBand 変調方式による超音波スピーカの高調波歪み低減の検討,” 日本音響学会 2011 年秋季研究発表会, pp. 755-756, Sept. 2011.
57. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “超音波スピーカにおける低域補償のための変調方式の提案,” 電子情報通信学会関西支部学生会 第 16 回学生会研究発表講演会, p. 77, Mar. 2011.
58. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “超音波スピーカにおける品質改善のための重み付き DSB 変調方式の主観評価,” 平成 22 年電気関係学会関西連合大会, pp. 239-240, Nov. 2010.
59. 生藤 大典, 森勢 将雅, 西浦 敬信, “重み付き DSB 変調方式を用いた超音波スピーカの品質改善の検討,” 日本音響学会 2010 年秋季研究発表会, pp. 657-658, Sept. 2010.

受賞

1. 生藤 大典, (財)電気通信普及財団 第 28 回テレコムシステム技術学生賞 佳作 受賞発表 (“重み付き両側波帯変調方式によるパラメトリックスピーカの音

質改善,” 電子情報通信学会論文誌 (D), vol. 95-D, no. 3, pp. 588-596, Mar. 2012.)