

Title	立体音響を用いる小型サラウンドスピーカー環境の研究
Sub Title	Research of compact surround speakers for 3D audio
Author	庄子, 琢郎(Shōji, Takurō) 加藤, 朗(Katō, Akira)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2018
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	
Notes	修士学位論文. 2018年度メディアデザイン学 第679号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002018-0679

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

修士論文 2018 年度

立体音響を用いる
小型サラウンドスピーカー環境の研究



慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

庄子 琢郎

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学)授与の要件として提出した修士論文である。

庄子 琢郎

研究指導コミッティ：

加藤 朗 教授 (主指導教員)

杉浦 一徳 准教授 (副指導教員)

論文審査委員会：

加藤 朗 教授 (主査)

杉浦 一徳 准教授 (副査)

砂原 秀樹 教授 (副査)

修士論文 2018 年度

立体音響を用いる 小型サラウンドスピーカー環境の研究

カテゴリ：サイエンス / エンジニアリング

論文要旨

立体音響は複数のスピーカーを用いたサラウンドスピーカーやヘッドホン・イヤホンなどで体験できる。近年、オブジェクトベースサウンドなどの技術の登場により、より簡単に立体音響を体験できるようになった。またスマートフォンの登場により、人とインターネットが常に繋がっている世界が実現した。これにより、音もインターネット上で管理することが増えた。インターネットを利用し更に音を自由に扱えるようになってきている。立体音響もインターネットと組み合わせることで、更に簡単かつ自由に体験できるようになると予想される。

しかし、サラウンドスピーカーやヘッドホン・イヤホンといった再生環境には問題がある。サラウンドスピーカーは大規模なため一般家庭への導入が困難である。ヘッドホン・イヤホンは立体音響での音の聞こえてくる方向の精度が低い。バイノーラルといった技術があるが、バイノーラルを用いたヘッドホン・イヤホンであっても、サラウンドスピーカーを用いた立体音響と比較すると音の聞こえてくる方向の精度が低い。音をデジタルで自由に処理できるようになったが、音の再生環境の問題を解決しないと自由に音を体験することができない。

本論文は上記の問題を解決すべき課題とする。本論文の目的はヘッドホン・イヤホンのサイズで、サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現することである。そのための提案と設計、実装を行う。実装したものを用いて実験を行い評価する。実験結果を考察し更なる問題点の抽出とそれに対する解決案を提示する。

キーワード：

立体音響，音響，オブジェクトベース，音像定位，バーチャルサウンド

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

庄子 琢郎

Abstract of Master's Thesis of Academic Year 2018

Research of Compact Surround Speakers for 3D Audio

Category: Science / Engineering

Summary

We can experience 3D- sound with surround speakers and headphones / earphones. In recent years, with the advent of technology such as object based sound, it has become easier to experience 3D-sound. With the advent of smartphones, a world where people and the Internet are always connected is realized. The fact that sound is managed on the Internet is increasing. It is now possible to use the Internet to further handle sounds freely. By combining 3D sound with the Internet, it will become easier and more free to experience 3D sound.

However, playback environments such as surround speakers and headphones / earphones have problems. Since the surround speakers are large in size, it is difficult to introduce the surround speakers to general households. The headphone / earphone has low accuracy in the direction of sound is heard in 3D sound. There is technology such as binaural, but when compared with 3D sound using surround speakers, the accuracy of the direction in which the sound is heard is low. It is now possible to process sounds digitally and freely, but unless we solve the problem of output, we can not experience the sound freely.

This paper is intended to solve the above problem. The aim of this paper is to reproduce the direction of sounds are heard comparable to 3D sounds using ordinary surround speakers are heard using surround speakers of the size of headphones and earphones. i make suggestions, designs, and implementations for that.

Experiment and evaluate using Productions. From the result of the experiment I will present further problems and suggest solutions to it.

Keywords:

3D-Sound, Sound, object-base, Sound Localization, Virtual Sound

Keio University Graduate School of Media Design

Takuro Shoji

目次

第 1 章	序論	1
1.1.	研究背景	1
1.1.1	音と映像の自由化	1
1.1.2	映像と音のインターネット上での管理・運用	2
1.2.	研究目的	2
1.3.	本論文の構成	4
第 2 章	関連研究	5
2.1.	音響再生技術	5
2.1.1	モノラル	5
2.1.2	ステレオ	5
2.1.3	ハイファイ (Hi-Fi)	6
2.2.	Software Defined Media	7
2.3.	サラウンドスピーカーを用いたアプローチ	7
2.3.1	5.1ch サラウンド	7
2.3.2	Dolby Atmos	8
2.3.3	SDM 試作システム	11
2.4.	ヘッドホン・イヤホンを用いたアプローチ	12
2.4.1	バーチャルサウンド	13
2.4.2	バイノーラル録音	14
2.5.	ノイズキャンセリング	18
2.6.	DSP Car Audio	18
2.7.	本章のまとめ	20

第3章 提案と設計	21
3.1. 提案	21
3.1.1 既存の立体音響環境の利点・問題点	21
3.1.2 研究目的を達成するための要件	24
3.2. 設計	24
3.2.1 プロトタイプ設計	26
3.3. 本章のまとめ	27
第4章 実装	28
4.1. システム構成	28
4.2. 使用機材とソフトウェア	29
4.2.1 スピーカー	29
4.2.2 VIVE	31
4.2.3 XMV8140-D	32
4.2.4 RAZER BLADE	32
4.2.5 VSSS	33
4.2.6 MQTT	33
4.2.7 MIDI	34
4.2.8 Unity	36
4.3. システム起動手順	38
4.4. 本章のまとめ	40
第5章 実験	41
5.1. 実験1：音像定位の位置変化の確認	41
5.1.1 実験1：手法	41
5.1.2 実験1：手順	42
5.1.3 実験1：結果	44
5.2. 実験2：音が鳴り続ける場合での音像定位の確認	48
5.2.1 実験2：手法	48
5.2.2 実験2：結果	50

5.3. 実験3：自由に回転した場合の確認	51
5.4. 本章のまとめ	51
第6章 考察	52
6.1. 実験1の考察	52
6.2. 実験2の考察	53
6.3. 実験3の考察	54
6.4. 解決案の考察	54
6.4.1 時間差の利用	54
6.4.2 スピーカーの数を増す	55
6.4.3 スピーカーの選定	55
6.5. 本章のまとめ	56
第7章 結論	57
謝辞	58
参考文献	60

目 次

1.1	VR 空間での臨場感のある音の体験	3
2.1	5.1ch 配置図	8
2.2	Dolby Atmos を導入した映画館	9
2.3	Dolby Atmos のホームシアター	9
2.4	チェアースピーカー	11
2.5	SDM 試作システム	12
2.6	クロストーク	14
2.7	クロストークキャンセル	15
2.8	バイノーラル録音のためのダミーヘッド	15
2.9	ダミーヘッド録音と再生の差異	17
2.10	左右での時間差	17
2.11	WH-1000XM3	19
3.1	サラウンドスピーカー環境内での移動	22
3.2	提案するサラウンドスピーカー環境	25
3.3	サラウンドスピーカー環境が動いたことによる音像の移動	26
3.4	プロトタイプの概要	27
4.1	実装概要	28
4.2	F00805H0	29
4.3	サラウンドスピーカー環境	30
4.4	vive	31
4.5	XMV8140-D	32

4.6	VSSS	33
4.7	loopmidi	35
4.8	rtpmidi	36
4.9	Unity	37
4.10	DanteVirtualSoundcard	38
5.1	被験者を上から見た風景	42
5.2	回転後の被験者を上から見た風景	43
5.3	実験1：実験風景	44
5.4	実験1：被験者1	45
5.5	実験1：被験者2	45
5.6	実験1：被験者3	46
5.7	実験1：被験者4	46
5.8	実験1：被験者5	47
5.9	実験1：被験者6	47
5.10	角度計測器具	48
5.11	実験2：実験風景	50

目 次

4.1	F00805H0 のスペック	30
4.2	RAZER BLADE のスペック	32
4.3	サーバーのスペック	34
5.1	実験 1 : 結果 まとめ	44
5.2	実験 1 : 角度誤差	44
5.3	実験 2:被験者 1	50
5.4	実験 2:被験者 2	50
5.5	実験 2:被験者 3	51

第 1 章

序

論

1.1. 研究背景

1.1.1 音と映像の自由化

近年，音・映像体験の自由化が進んでいる．映像体験において，今まではテレビなど画面上に映し出された映像しか体験することはできなかった．しかし，収録技術の向上は 360 度撮影を可能にし，デジタル映像技術の発展は 360 度映像の製作を可能にした．映像の出力デバイスでは，Oculus¹といった VR HMD(ヘッドマウントディスプレイ)の登場により，映像を自由視点で体験できるようになった．また，スマートフォンやタブレット端末でも映像を自由視点で体験できる．

音に関しても立体音響技術の向上，バイノーラルといった収音技術の登場により，360 度どこからでも音を立体的に聞くことができるようになった．Dolby Atmos²では，複数のスピーカーを使用するサラウンドスピーカー方式を用いることで音を立体的に再生する．また，ヘッドホン・イヤホンでも立体音響を体験することが可能である．

映像・音響の三次元空間の演出をリアルタイムでレンダリング処理可能なオブジェクト志向のデジタルメディアの登場も，映像と音の自由化を促進させた要因の一つである．リアルタイムでレンダリング処理可能なので，音・映像とユーザーとのインタラクション性が向上した．

音と映像の自由が進んだことで様々な新しいコンテンツが生まれている．映像・

1 Oculus(<https://www.oculus.com/>)

2 ドルビーアトモス (<https://www.dolby.com/jp/ja/technologies/dolby-atmos.html>)

音響制作会社やゲーム会社だけでなく、ユーザーも Unity³などの無料で使用可能なソフトウェアを使うことで自由に映像と音を操ることができる。

1.1.2 映像と音のインターネット上での管理・運用

音と映像をインターネット上で管理・運用するが多くなっている。インターネットが普及する以前、デジタルデータを DVD・CD などの記録媒体で管理するのが大半であった。そしてインターネットの普及により、ダウンロードしたデジタルデータをローカルコンピュータ上で管理し、デジタルデータを WALKMAN などのポータブルメディアプレイヤーなどに転送することで音と映像を利用するようになった。近年では、Cloud 上で管理することが多くなっている。そしてスマートフォンの登場により、常に人とインターネットが繋がっているようになった。これにより、Netflix⁴などの動画配信サービス、Spotify⁵などの音楽配信サービスの利用者が急上した。ユーザーはインターネット上で運営されるサービスを活用することでデジタルメディアを管理するようになった。

1.2. 研究目的

映像・音響の技術の向上とインターネット上でのデジタルメディアの管理・運用により、ユーザーが自由にデジタルメディアを利用可能になった。例えば、複数のユーザーが同じクラシックコンサートの VR 空間に入り、みんなでコミュニケーションを取りながらコンサートを楽しむことが可能である。ヴァイオリンが目の前にある場合、目の前からヴァイオリンの音が再生されるのが理想である。また、VR 空間で背後からの声に振り向くと人がいる、というのも臨場感のある体験には必要である。

3 Unity(<https://unity3d.com/jp>)

4 Netflix(<https://www.netflix.com/jp/>)

5 Spotify(<https://www.spotify.com/jp/>)

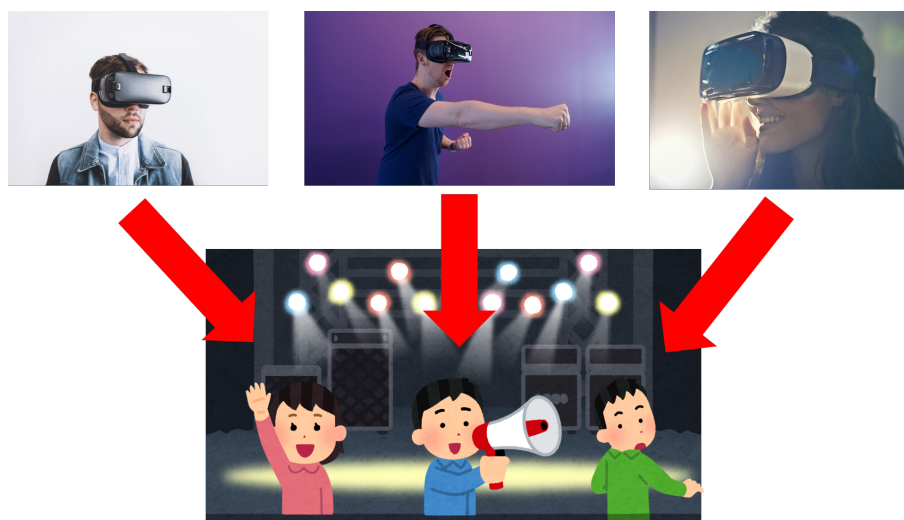


図 1.1 VR 空間での臨場感のある音の体験

しかし、アパートなどの狭い空間や公園のベンチの上といったパーソナルな空間でこのようなコンテンツを体験する場合、立体音響再生環境には多くの問題があるため臨場感が損なわれてしまう。

サラウンドスピーカーを用いた立体音響再生環境は、床・壁・天井にスピーカーを設置する。よって多くのスペースを占領することになる。また設置するためには施工が必要になり、スピーカーを取り外すことが難しく常に場所を占領することになる。さらに施工は高コストであり、また賃貸物件には導入できない。

ヘッドホン・イヤホンを用いた立体音響再生環境は誰でも簡単に導入することが可能である。サイズが小さく頭に装着するだけなのでスペースを取らない。音が自分にしか聞こえないようにすることが簡単なので、電車内など周りに人がいる環境でも使用できる。しかし、ヘッドホン・イヤホンの立体音響環境にも問題がある。ヘッドホン・イヤホンを用いた立体音響再生環境では、音の聞こえてくる方向・距離感の精度が低いものになる。これは、ヘッドホン・イヤホンは両耳の2箇所にしかスピーカーを設置できない且つ、耳に密接しているため前後・上下の音の再現が難しいためである。映像と組み合わせることでユーザーに錯覚させることは可能である。例えば、映像内の鳥が鳴いている場面でヘッドホン・イヤホンで立体音響を再生すると、あたかも鳥がいる位置から音が発生しているか

のように感じる。しかし画面外の音の表現を試みた場合、錯覚の効果を望むことはできない。また目をつぶってしまうと、映像による錯覚を使用することができない。列挙した問題点を以下にまとめる。

サラウンドスピーカー

- 床・壁・天井にスピーカーを設置するため広いスペースを必要とする
- スピーカーの取り外しが難しく常設しておく必要がある
- 施工が必要なため導入コストが高い

ヘッドホン・イヤホン

- 音の聞こえてくる方向・距離感の精度が低い
- 映像を用いた錯覚の利用には制限がある

上記の問題点を本研究で解決すべき課題とする。サラウンドスピーカーの立体音響の精度とヘッドホン・イヤホンの利便性、これらを両立させるべきと考える。よって本研究では、ヘッドホン・イヤホンのサイズで、サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現することを目的とする。音の聞こえてくる距離感を再現することも臨場感のある音の体験には必要だが、本論文では扱わない。

1.3. 本論文の構成

本章では序章として研究背景と研究目的を述べた。第2章では音響技術や音響再生環境の関連研究と、そこから得られる知見・問題点を述べる。第3章では第1章、第2章で述べた課題を解決するの手法を提案し、実装するために設計を述べる。第4章では第3章で述べた提案を実現するために行った実装を述べる。第5章では実装したものをを用いた実験について述べる。第6章では実験結果を考察する。第7章では本研究の結論を述べる。

第 2 章

関 連 研 究

2.1. 音響再生技術

2.1.1 モノラル

モノラルは音声を 1 個のマイクで録音する方法，あるいは 1 個のスピーカーで再生する方法のことである．モノラル (monaural) の “mono” には「単一」という意味があり，一般的に 1 個のマイクで録音された音源，あるいは 1 つのスピーカーで再生する方法のことである [1]．1960 年代にステレオが誕生するまでは，モノラルが一般的な録音再生技術であった．モノラルはスピーカーが 1 個なので，左右のイヤホンからは全く同じ音源が再生される．そのため，ステレオに比べると音を立体的に捉えられず，やや平面的で音の広がりを感じづらい．

しかしモノラルの音ならではのメリットが存在する．例えば，アナログレコードなどを聴く場合である．アナログレコードはモノラル録音の音源で，再生する時もモノラルの機器を使用する．全ての音が 1 つの真ん中に集まっているので，ステレオの臨場感とはまた違った迫力を感じることができる．モノラルの音は長時間聴いてもあまり耳が疲れないというメリットもある．

2.1.2 ステレオ

ステレオは音声を 2 本以上のマイクで録音する方法，あるいは 2 個以上のスピーカーから再生する方法である．スピーカーの数の違いによりステレオの方がモノラルに比べ音を立体的に聞きとることが可能であり臨場感も増加する [1]．

ステレオとは立体音響という意味があり、2個以上のスピーカからそれぞれ違う音を出力するので、テレビやラジオ、オーディオなどで再生すると立体感や臨場感のある音を出力することが可能である。

また実用的なシーンにおいては、ステレオ録音が便利な場合がある。例えば、大人数での会議の録音をする場合である。ボイスレコーダーで会議の様子を録音したものを聞いたとき、やりとりが聞き取りにくかったということがある。それはモノラルで録音した可能性が高い。ステレオ録音では2本以上のマイクで録音するため、音源からの時間差も録音されるため、話者それぞれの座席の位置、声や話し方の特徴も聞き取りやすくなる。実際に私たちが生活の中で聴く音は、あらゆるものがそれぞれ違った距離から発している音なので、ステレオ録音はそれらの音の微妙なニュアンスを把握するのに適している。

2.1.3 ハイファイ (Hi-Fi)

ハイファイ (Hi-Fi) とは、high fidelity (高忠実度) の略である。音や画像の再生にあたり、元のものに近い状態で忠実に再生される場合、フィデリティが高いといい、このような再生状態をハイファイ再生という [2]。

ハイファイという概念は音や画像だけでなく、あらゆる情報の再生の品質に対して適用できるものであるが、一般的には音の再生に対して適用されることが多い。これは記録・再生される各種情報のうち、音がもっとも頻繁かつ有用に利用されるものであること、人間の感性や情緒に対して音がきわめて密接な関係をもっているために、再生音の良し悪しが特に重要視されるからだと考えられる。

ハイファイという言葉は、ハイファイ録音、ハイファイ再生のように録音・再生のプロセスにおける質を評価するのに使用されたり、ハイファイ再生装置、ハイファイ増幅器のように再生機器の品質の評価のために使われたりする。これらの場合、録音・再生の過程で使われる機器の周波数特性が良く、また雑音やひずみを伴うことなく、元の音を損なわないで再生できることがハイファイの基本条件となる。

しかし広く使用されているが、ハイファイについて明確に統一された尺度は今のところできていない。これは演奏会場や再生する場で考えたとき何をもって元

の音と考え、どのような再生状態をもって高忠実再生と考えるかの基準を決めることがきわめて難しいからである。信号としての音の質だけでなく、再生音場の質まで考慮に入れたハイファイの尺度化は今後の検討課題である。

2.2. Software Defined Media

Software Defined Media（以下 SDM）はインターネット環境が前提の映像・音響空間を用いた研究とビジネス創造を行う、WIDE プロジェクトのワーキンググループである。

近年、IoT の普及によりインターネットと繋がっている状態が前提となってきた。また、映像・音響技術の向上によりオブジェクト指向のデジタルメディアが登場し、映像・音響の三次元空間の演出をリアルタイムでレンダリング処理可能になってきている。そこでインターネットに接続されている環境であるなら、それぞれの環境に最適化させることにより、今よりさらに映像と音を自由に扱える世界を目指し活動している。

2.3. サラウンドスピーカーを用いたアプローチ

2.3.1 5.1ch サラウンド

5.1ch サラウンドとは、6 個のスピーカーでユーザーを取り囲むように音を再生する音響システムのことである [3]。20Hz～20kHz の帯域のステレオスピーカーを前方正面、前方左右、後方左右にそれぞれ配置する（5ch）。加えて、中低音を強化するために 120Hz 以下の低域サブウーファーを配置する。このサブウーファーは帯域幅が制限されているので 0.1ch とカウントされ 合計で 5.1ch となる。5.1ch サラウンドのスピーカーはそれぞれ独立した音を再生する。周囲を囲むようにして音を再生することによって音の立体感が増加し、臨場感のある音響効果を生み出せる。

しかし、受聴者を取り囲むようにスピーカーを配置するためスペースを広く取る．またセッティングするのが手間である．5.1ch サラウンドの配置図¹を図 2.1 に示す．

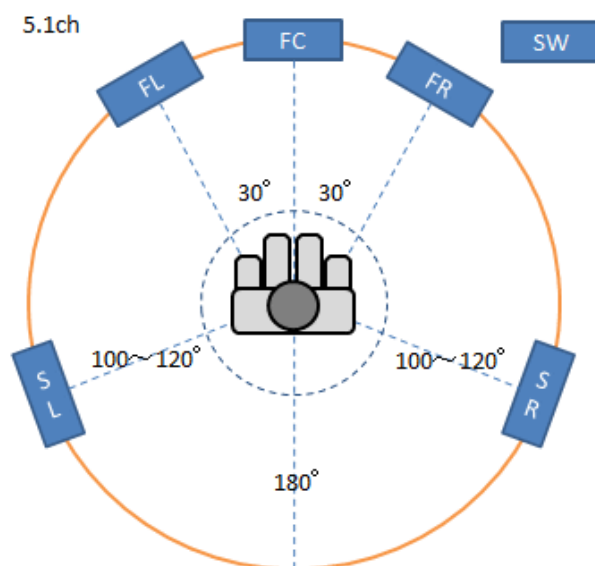


図 2.1 5.1ch 配置図

2.3.2 Dolby Atmos

Dolby Atmos とは Dolby Laboratories, Inc が開発したサラウンド記録再生方式である．映画館や自宅に導入される．図 2.2 に Dolby Atmos の映画館²を，図 2.3 に Dolby Atmos のホームシアター³を示す，

従来のサラウンド音声というのは各 ch に合うようにミキシング処理されて作成される．例えば，飛行機の音をコンテンツに入れ込もうとした場合，クリエイ

1 5.1ch サラウンドの配置図 (<https://matome.naver.jp/odai/2149530653352682601/2149535268884273503>)

2 DOLBYATMOScinema (<https://www.dolby.com/jp/ja/technologies/cinema/dolby-atmos.html>)

3 ホームシアターを変える「Dolby Atmos」とは (<http://www.itmedia.co.jp/lifestyle/articles/1407/24/news091.htm>)

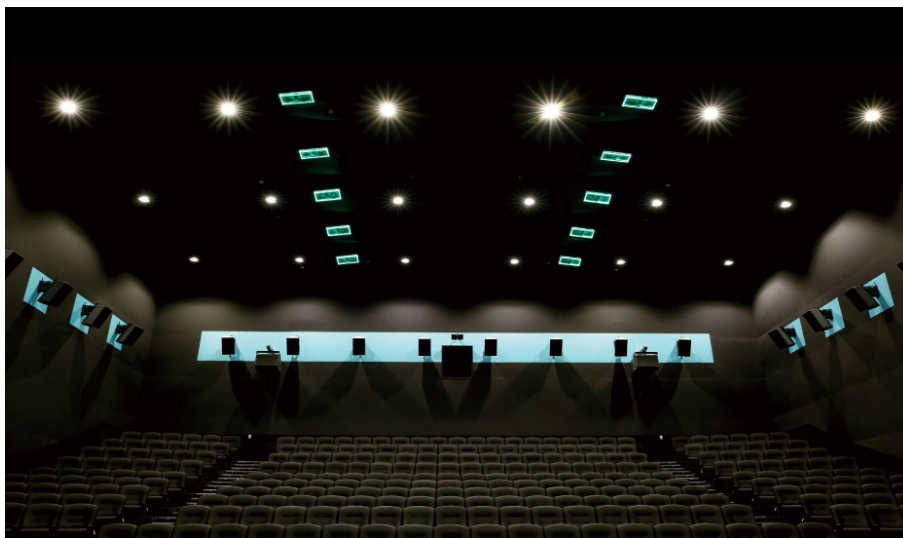


図 2.2 Dolby Atmos を導入した映画館



図 2.3 Dolby Atmos のホームシアター

ターは 5.1ch サラウンドなら全 6ch それぞれの位置に合うように飛行機音の位相差、音量などを考え、ほかの音とミキシングして作成する。ツールはたくさん開発されているが、これは基本的に各 ch に対して行わなければならない。また、5.1ch 用、7.1ch 用、9.1ch 用など複数用意してあるコンテンツも多い。このコンテンツを劇場側が再生する際には、自分の劇場の環境に合うような音声処理が必要になる。劇場によって、広さも違うためスピーカーの位置関係も異なる。当然、各スピーカーに対して入れなければいけないアンプの出力値も変わる。また、劇場側が 7.1ch のサラウンド環境を持っているとすれば、足りない 2ch 分を補間処理によって実現するための機材が必要になる。

これに対して、Dolby Atmos では音声オブジェクトという概念が導入された。これは、飛行機という音源の 3 次元的な位置情報をコンテンツの中に収録しておくというものである。クリエイターは各 ch に合わせたミキシング処理という手間がかからない。これを再生する際には、Dolby が提供するツールが音声オブジェクト情報からリアルタイムで各劇場の各 ch に合わせた音を作成し再生する。劇場側はわざわざ機材を導入しなくても、Dolby のツールに環境情報、スピーカー情報を入力すれば自動的に最適化する。

2 つ目のポイントは天井スピーカーの導入である。これによって音像定位をより正確に再現することが可能であり、音響オブジェクトがより生きてくる。5.1.2ch のように表記し、最後の .2 が天井部分を表している。

しかし、一般家庭で天井スピーカーの導入は難しい。また、椅子にスピーカーを取り付けたチェアースピーカーがある⁴。これは、従来の Dolby Atmos の音響環境に比較すると一般家庭へ導入しやすい。しかし外形寸法は 995 × 1,080 × 1,340[mm](幅 × 奥行き × 高さ)、最小幅は 70[cm]、重量は 93[kg] のため、一般家庭へ導入は難しい。図 2.4 にチェアースピーカーを示す。

4 Dolby Atmos の 11.2ch を理想配置した“チェアースピーカー”
(<https://av.watch.impress.co.jp/docs/news/1118530.html>)



図 2.4 チェアースピーカー

2.3.3 SDM 試作システム

SDM 試作システムはインターネットに接続されたことを前提とした，8ch サラウンドスピーカーを用いた立体音響システムである [4]．2.2 で述べた通り SDM はインターネット前提の音響環境を想定している．その実現のために試作されたものである．

音響環境に接続されているパソコンに VSSS という音響制御システムを導入し，これと外部サーバーを連携させることで様々な試みが可能である．例えば，位置情報センサーを使用し位置情報を読み取る．その位置情報をサーバーに転送する．そしてサーバーの情報を VSSS に送ることで，習得した位置情報の位置に音を配置して再生することが可能である [5]．

ローカル環境で使用することも可能である．ローカル環境の場合，iPad を使用することで3次元空間に音を自由に配置することができる．

しかし，このシステムも大掛かりであるので，一般家庭への導入は困難である．

まず視聴者を囲むように4個のスピーカーを配置する．そして伸縮が可能なスタンドを使用し，上部に視聴者を囲むように4個のスピーカーを配置する．縦，横，そして高さにおいて多くのスペースを必要とするため，一般家庭への導入は難しい．使用しないときはスピーカーとスタンドを移動させ収納することも可能であるが，設置する度に配線をつなぎ直す必要があり手間がかかる．図 2.5 に SDM 試作システム⁵を示す．



図 2.5 SDM 試作システム

2.4. ヘッドホン・イヤホンを用いたアプローチ

ヘッドホン・イヤホンを用いて音を立体的に表現することは可能であるが，複数の問題がある．ヘッドホン・イヤホンを用いた立体音響の先行研究をいくつか紹介し，その使用方法と問題点を指摘する．

5 Software Defined Media(<http://sdm.wide.ad.jp/img/IETF94/photo-2.jpg>)

2.4.1 バーチャルサウンド

バーチャルサラウンドは、複数チャンネルの音声トラックのソフトを少ないスピーカー数（ヘッドホンやイヤホンなどの2ch）で、仮想的に複数スピーカーで再生した時に聞こえるような音響空間を実現する技術である [6].

家庭に導入可能なサラウンド音声に対応した映像・音楽ソフトと AV 再生システムは、DVD や地上デジタル放送の普及に伴い身近な存在になったが、本格的な 5.1ch、7.1ch、9.1ch など多チャンネルのホームシアターシステムに必要な多数のサラウンドスピーカーを設置することは困難である。実際の空間に多数のスピーカーを配置して音場を形成することが困難な場合や、ヘッドホン・イヤホン (2ch) でもサラウンドのような立体的な音響を使用可能にするために、仮想的に音響空間を作り出す試みが行われている。

人の聴覚を考えると空間上の音源の位置や伝わり方は違っても、鼓膜で捕らえられる振動が同じであれば同じ音に聞こえるはずである。これは音の再生方法が違っても、両耳に到着した時点でサラウンドで聞いているときと同じ音波になれば、同じ音響空間が再現可能であることを意味する。仮想的に立体音響を再現するには、両耳の時点で同じ音波にさえすればよいということである。両耳に到達する音は到来方向、距離によって、両耳の間のレベル差、時間差、周波数特性が異なっている。

ヘッドホン・イヤホンで音を聴く場合、左のヘッドホン・イヤホンの再生音は左耳だけ、右のヘッドホンの再生音は右耳だけに到達する。一方、スピーカー再生で音を聴く場合、左スピーカーの再生音は左耳と共に右耳にも到達し、また右スピーカーの再生音は右耳と共に左耳にも到達する。これを両耳間のクロストークと呼ぶ。

バーチャル化の基本的な方法は、モノラル信号のバイノーラル化とクロストークキャンセル処理である。サラウンド Rch 信号（右チャンネル信号）のバイノーラル化は、サラウンド Rch のスピーカ位置と両耳との頭部伝達関数をサラウンド Rch 信号に畳み込むことにより行う。頭部伝達関数とは、両耳に到達する音の時間差や強度差、音色や音の大きさの変化などを表したものである [7]。畳み込みによって得られた左耳用信号と右耳用信号をスピーカーで再生すると左スピーカー

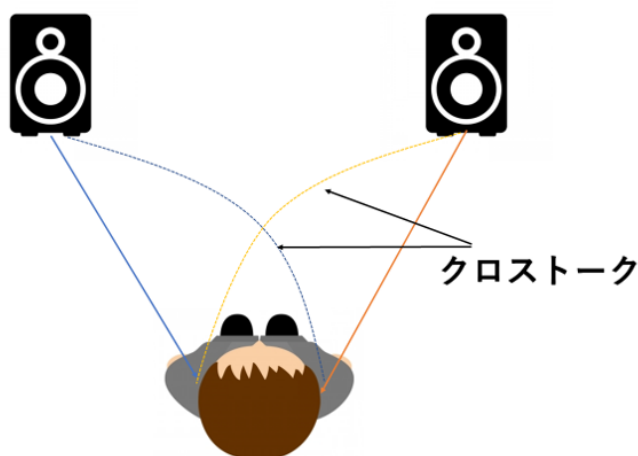


図 2.6 クロストーク

から右耳，右スピーカーから左耳に到達するクロストークが発生する．バイノーラル化した左信号は左耳だけに，右信号は右耳だけに到達させる必要があるので，バイノーラル化の次にクロストークをキャンセルする処理を行う必要がある．

このように SRch 信号（右後方チャンネル）を処理して前方の 2 つのスピーカーから再生すれば，ユーザーに対しては SRch のスピーカーから到達する音波と等価な信号が両耳に届くことになるので「後方右」からの音として認識される．全ての再生 ch の信号を同様に処理することで，前方 2 つのスピーカー（ヘッドホン）でサラウンドの音場を仮想的に実現することが可能である．

2.4.2 バイノーラル録音

バイノーラルとは，音場を臨場感のあるまま録音再生するための技術である．バイノーラルは「両耳（2つの耳）で聴く」を意味している．人が聴いている音をそのまま記録し，再生時に耳元に供給することが可能ならば，收音時の音環境が聴取時に再現されることになり，臨場感の高い收音再生が可能となる [8]．バイノーラル録音のためのダミーヘッド⁶を図 2.8 に示す．

6 バイノーラル録音 - Wikipedia(<https://ja.wikipedia.org/wiki/バイノーラル録音>)

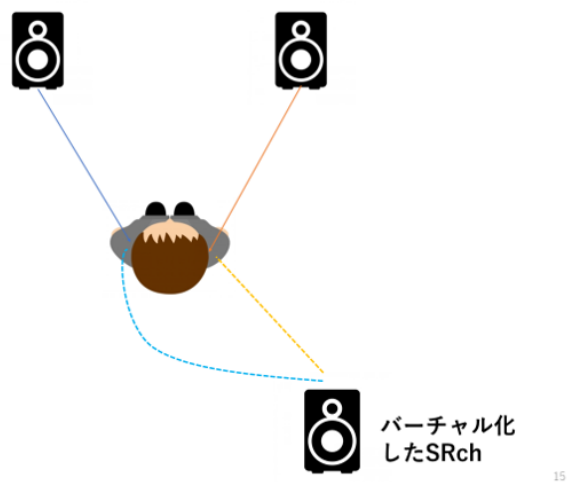


図 2.7 クロストークキャンセル



図 2.8 バイノーラル録音のためのダミーヘッド

バイノーラル録音には、人間の頭を模した人形の耳にマイクを設置したダミーヘッドと呼ばれるマイクロホンシステムで収録し、ヘッドホンで聴取する方法が用いられる。一般的なステレオ録音された音をヘッドホンで聴取する場合、「頭内定位」という頭の中で音がするように聴こえる。walkmanなどのポータブルデジタルオーディオプレイヤーをインナーイヤーヘッドホンで聞いているときに感じられる頭の中で演奏しているような感じである。これは、デジタル音源やmp3の圧縮による問題ではなくアナログ音源でも同様である。バイノーラル録音した信号をヘッドホンで聴取すると音に立体感が生まれ「よりリアルな臨場感」や「広がりのある空間」が感じられる。

しかし、バイノーラル録音には問題がある。ダミーヘッドを用いたとしても被験者が実体験しているかのような音場を完全に再現することはできない。以下の理由で厳密に聴取者とダミーヘッドの録音、再生の条件を合わせることができていないため、臨場感に差異が生じていると考えられる。

- ダミーヘッドと聴取者の両耳や胴体を含む音響特性が異なる
- ヘッドホンと耳との間の特性が存在する

図 2.9 にダミーヘッド録音と再生の差異⁷を示す。

またヘッドホンを用いて再生したときに、斜め方向や上下感、距離感は向上するが、正面、真後の方向感、距離感が感じられないという問題点がある。バイノーラル録音のヘッドホン再生では「頭内定位」は改善されるが、「前方定位」は解決されないことが知られている。定位方向について無響室で音源も被験者も動かない状態では、前方の信号音の定位があいまいになる。音の位置は、左右の耳に聞こえる差(わずかな時間差)によって認知されるというのが基本的な定位の原理である。正面の音は左右に差が生じないため、正面、もしくは真後の軸線上に音があると判断される。左右での時間差を図 2.10 に示す⁸。

7 バイノーラル録音・再生:音響技術と機器開発用語補足解説 (<http://www.ari-web.com/service/kw/sound/binaural.htm>)

8 バイノーラル録音・再生:音響技術と機器開発用語補足解説 (<http://www.ari-web.com/service/kw/sound/binaural.htm>)

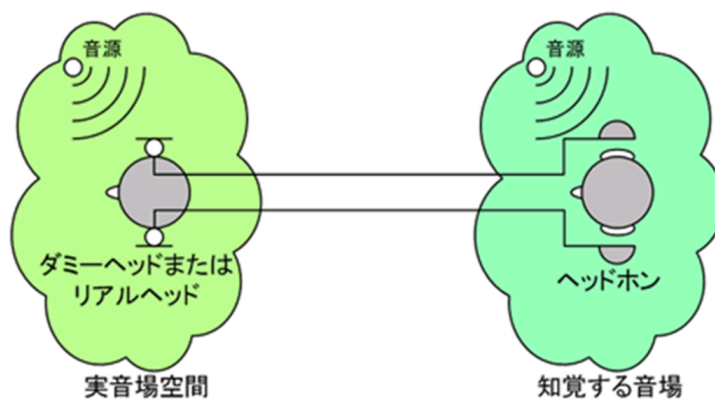
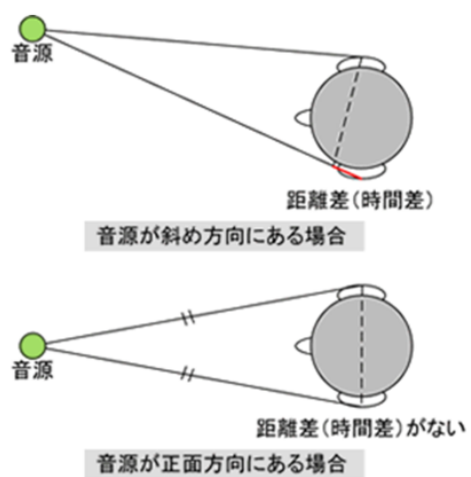


図 2.9 ダミーヘッド録音と再生の差異



17

図 2.10 左右での時間差

日常では、音源 (例えば車が接近するなど) が全く動かないことも人が動かないことは稀である。完全に左右が一致する上、音に変化がない (音量や周波数) ということが通常は起りえない。そのため、経験と変化によって位置や距離感が補正され問題なく空間が認識されていると考えられている。官能調査で用いられるような信号音を使用し、音源も人も動かないという条件ならば、実際の空間でも前方定位、後方定位は完全ではなくなる。バイノーラル録音された音源を聞いている状態で人が動いた場合は (右を向く、上を見るなど)、音源の位置は補正されないためこの補正問題は前方定位だけの問題ではなくなる。このような定位を完全に再現するためには、人の頭の動き補正に合わせて正確に再生音を追従させることが必要だと考えられる。

2.5. ノイズキャンセリング

ノイズキャンセリングとは、周囲の騒音やノイズを減少させる技術である。ヘッドホン・イヤホンで使用されることが多い。

ヘッドホン・イヤホンに内蔵されたマイクで周囲からの騒音を集音、ノイズキャンセリング回路がその信号を解析。解析した騒音を打ち消す逆位相の音を発生。そして元の音に逆位相の音を重ね、元の音を打ち消す [9]。こうすることで、周囲の騒音やノイズを減少させる。図 2.11 にノイズキャンセリングヘッドホンの WH-1000XM3⁹を示す。

2.6. DSP Car Audio

車内は音楽を聞く環境としては劣悪である [10]。まず、左右スピーカーの中心で音楽を聴く事が出来ない。右ハンドルの場合、運転席・助手席がある車内前方部には助手席の左前、運転席の右前にスピーカーを設置する。オーディオは左右スピーカーの中心、できれば左右スピーカーとリスナーが正三角形となる位置で

9 WH-1000XM3 — ヘッドホン — ソニー (<https://www.sony.jp/headphone/products/WH-1000XM3/>)



図 2.11 WH-1000XM3

聴く事が最良のステレオ効果を生み出す．左右の中心で聴けないだけで，ステレオ本来の性能はほとんど発揮できない．また，ホームオーディオのように，同一面に配置されたスピーカーユニットから音が出て来るのではなく，ドアの足元に付けられたミッドバス（低音用スピーカー），高い位置に付けられたツイーター（高音用スピーカー）など，音が出てくるところがバラバラである．

上記の問題を解決するために DSP（digital signal processso）を用いる．DSP とはデジタル化された音声，オーディオ，映像データや，温度，加速度などのセンシング情報に対して，フィルタリングや解析，伝送のための算術演算を高速に実行するプロセッサのことである [11]．DSP で処理することでリスナーが運転手の場合は運転席に適した音を再生する，リスナーが助手席に座っている場合は助手席に適した音を再生する，といったことが可能である．しかし，車内のリスナーの動きに合わせて音楽を再生する，といったことは行われていない．

2.7. 本章のまとめ

本章では立体音響に関する先行研究を詳しく取り上げ、メリット・デメリットを抽出した。サラウンドスピーカー環境では立体音響の精度、音の聞こえてくる方向・距離感の精度が正確であるため、臨場感のある音の体験することができるというメリットがある。しかし、サイズが大きすぎるため一般家庭への導入は困難であることがデメリットであることが分かった。ヘッドホン・イヤホン環境は頭部に装着するだけなので簡単に立体音響を体験できるが、音の聞こえてくる方向・距離感の精度が低いというデメリットが分かった。

本研究の目的は、ヘッドホン・イヤホンのサイズで、サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現することである。本章で取り上げたメリット・デメリットを考慮に入れ、第3章では研究目的を達成するための提案を行い実装のための設計を行う。

第 3 章

提 案 と 設 計

3.1. 提案

本論文の目的である，ヘッドホン・イヤホンのサイズでサラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現すること，を実現するための手法を提案する．既存の立体音響環境の利点・問題点を考察することで，本研究の目的を達成するための要件を導き出す．

3.1.1 既存の立体音響環境の利点・問題点

第 1 章，第 2 章で述べた問題点を解決した立体音響環境を提案するために，先行研究の利点・問題点を詳しく考察する．これにより，問題点を解決するための具体案を考える．

サラウンドスピーカー環境の利点

サラウンドスピーカーの立体音響環境は，音の聞こえてくる方向・距離感の精度が正確であり，スピーカーで囲まれた空間内をユーザーが移動することができる．第 2 章で述べた通り，クロストークはスピーカ群を使うことによって軽減されるので，逆伝達関数によるキャンセル処理が必要なく，また被験者のスイートスポットも広がる．よって，被験者はスピーカーで囲まれた空間を自由に移動することが可能である．また，スピーカーを増やすことで音像定位を正確に再現することができるので，音の聞こえてくる方向・距離感の精度を向上させること

ができる．そして，スピーカーで囲まれた範囲内であれば被験者が移動したとしても音像が移動することはない．

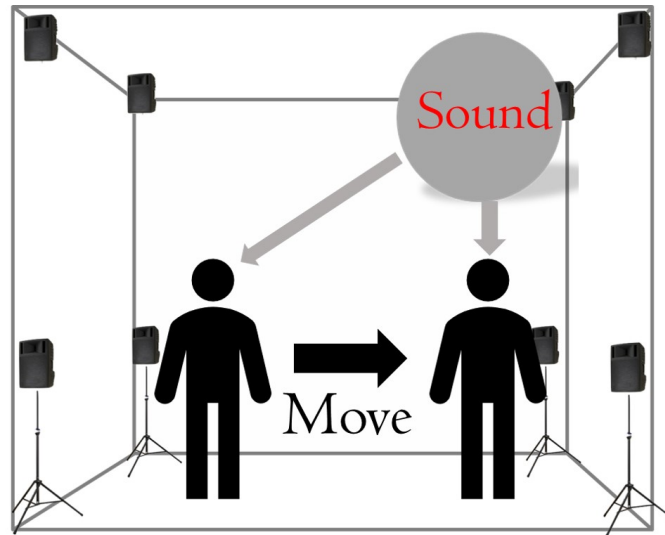


図 3.1 サラウンドスピーカー環境内での移動

以下にサラウンドスピーカー環境の利点まとめる

- スピーカーの囲まれた範囲内であるなら，どこにいても立体的な音を体験できる
- 音の聞こえてくる方向の精度・距離感が正確なため，臨場感のある音の体験になる

ヘッドホン・イヤホンの利点

ヘッドホン・イヤホンはコンパクトなので持ち運びが簡単であり，移動しながら使用することができる．頭・耳に装着するだけなので設置も簡単である．以下にヘッドホン・イヤホンでのメリットを述べる．

- 頭に装着するだけなので設置が簡単
- 持ち運びが簡単
- 移動しながら使用が可能

サラウンドスピーカー環境の問題点

サラウンドスピーカー環境では、スペースを広く占領することが問題点である。常設する場合、床・壁・天井にスピーカーを設置する。そのため広いスペースが必要となる。またスピーカーの取り外しが難しくなる。施工を行うため導入コストも高い。以下にサラウンドスピーカー環境の問題点を述べる。

- 床・壁・天井にスピーカーを設置するため、広いスペースを必要とする
- 常設した場合、スピーカーの取り外しが難しい
- 常設した場合、施工が必要なため導入コストが高い
- 常設しなかったとしても広いスペースが必要

ヘッドホン・イヤホンの問題点

第2章で述べた通り、ヘッドホン・イヤホンでは音の聞こえてくる方向の精度が低いものになる。しかし、映像と組み合わせることにより精度が上がったように錯覚させることができる。映像があると、その映像に音が追従していると感じてしまう。しかし目を閉じた場合、スクリーン外で音を表現したい場合などでは効果が見込めない。以下にヘッドホン・イヤホンの問題点を述べる。

- 音の聞こえてくる方向の精度が低い
- 映像を用いた錯覚の利用には制限がある

3.1.2 研究目的を達成するための要件

本論文の目的である，ヘッドホン・イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現することを現実にするために，サラウンドスピーカー，ヘッドホン・イヤホンの利点・問題点から，サラウンドスピーカーの立体音響の精度とヘッドホン・イヤホンの利便性を両立させるための要件を考察する．音の聞こえてくる方向・距離感の精度を高くするために，サラウンドスピーカー環境を用いるのがいいと考える．また，サラウンドスピーカー環境のように，被験者が動いても音像が移動しないようにする必要がある．ヘッドホン・イヤホンのようにコンパクトで狭い場所でも使用でき，移動しながらでも使用可能である必要がある．また，装着が容易でなくてはならない．以下に上記で述べた要件のまとめを示す．

- 音の聞こえて方向・距離感の精度を正確にするために，サラウンドスピーカーを用いる
- ユーザーが動いても音像の位置が移動しない
- 頭部に装着するだけで設置が完了する
- アパートなどの小さな部屋でも使用可能な大きさ
- 一人だけでも持ち運べる重さ

以上の要件を満たすものとして，一人で持ち運べるサイズ・重さのサラウンドスピーカー環境を提案する．

3.2. 設計

本研究の目的である，ヘッドホン・イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現する，を達成するために，一人で持ち運べるサイズ・重さのサラウンドスピーカー環境を設計する．

頭部に装着するだけで設置が完了する・アパートなどの小さな部屋でも使用可能な大きさ・人が一人だけでも持ち運べる重さ，を満たすために，図 3.2 のようなサラウンドスピーカー環境が良いと考える．

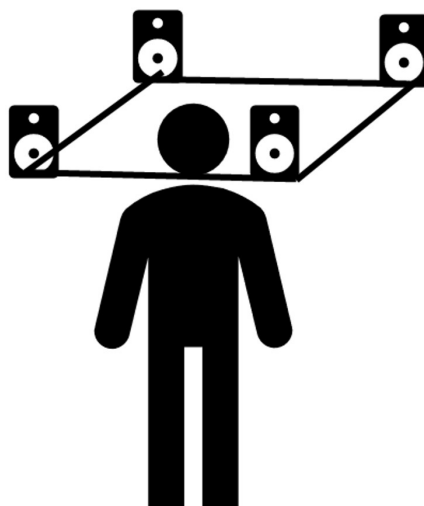


図 3.2 提案するサラウンドスピーカー環境

軽く持ち運べる大きさ，重さで被るだけで装着が完了する．図 3.2 のようなサラウンドスピーカー環境ならば，要件を満たしていると考え，しかし，ユーザーと一緒にサラウンドスピーカー環境が動いてしまうので，音像の位置が移動してしまう．

そこで，ユーザーの動きをセンシングし移動距離を測定し，デジタル処理することで音像の位置を測定した距離だけ移動させることで，音像の位置を変化させないようにする．

ヘッドホン・イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向，距離感を再現するために考察した手法を提案した．本研究では，研究目的を達成するためのファーストステップとして，上記で提案したものを実現するために小型サラウンドスピーカー環境のプロトタイプを制作し実験を行う．

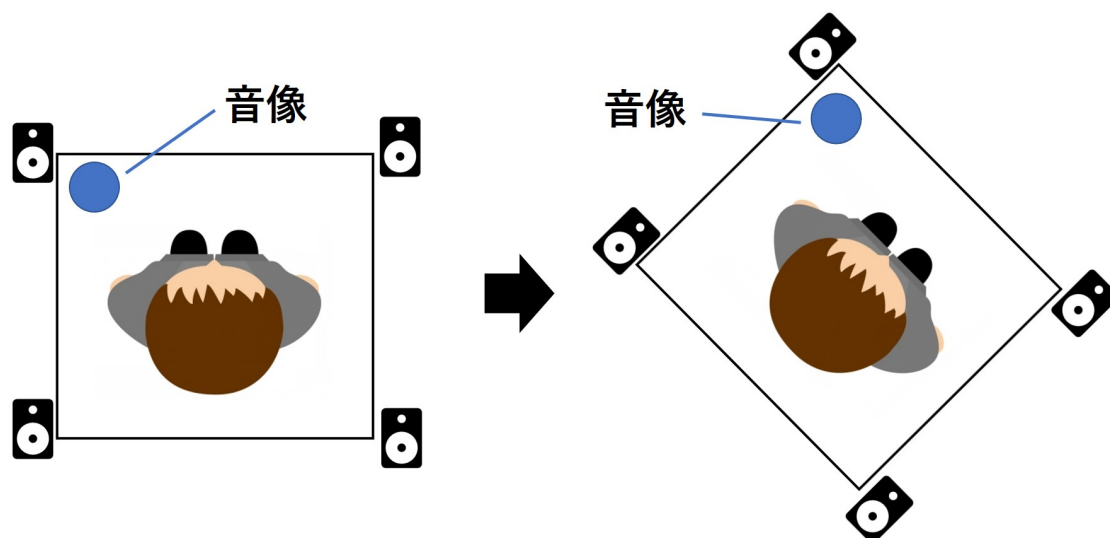


図 3.3 サラウンドスピーカー環境が動いたことによる音像の移動

3.2.1 プロトタイプ設計

提案したものの実現するために、以下のことを実現させる必要がある。

- 小型サラウンドスピーカー環境の制作
- 音像の位置のデジタル処理を可能にする

音像の位置をデジタル処理しても違和感がないのが理想である。被験者が移動しても音像の位置が初期位置と同じだと感じる事が出来ないと、サラウンドスピーカーの利点を生かしていないことになる。本実験では小型サラウンドスピーカー環境のプロトタイプを制作し被験者に装着させ動いてもらう。そして、音像の初期位置と移動後の位置にどれだけのずれがあるかを確認する。本実験では、まず最初にヨー角の音像の移動について検証する。ロール、ピッチ角については本論文では扱わない。被験者がヨー角回転、つまり体をねじる動きをする場合、高さは必要としない。なので、上下の音像の位置は無視するため、平面上に4つのスピーカーを配置すればいい。ピッチ角の音像の位置の移動を検証するための小型サラウンドスピーカー環境のプロトタイプ設計の概要を図 3.4 に示す。

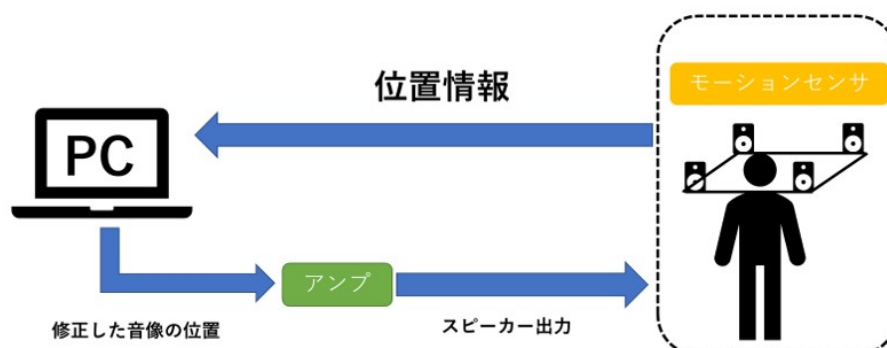


図 3.4 プロトタイプ概要

3.3. 本章のまとめ

本論文の目的である，ヘッドホン，イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現する，を達成するための提案と設計を述べた．サラウンドスピーカー環境とヘッドホン・イヤホンの利点・問題点を明確にすることで，本論文の目的を満たすための要件を導き出し，要件を満たすものとして，一人で持ち運べるサイズ・重さのサラウンドスピーカー環境を提案した．そして，実装をするために必要なことを考察し設計を行った．

第 4 章

実装

4.1. システム構成

システム構成の具体的な概要を図 4.1 に示す。構成するシステムはサラウンドスピーカー環境・モーションセンサー・サーバー・アンプ・音響制御ソフトウェアがある。

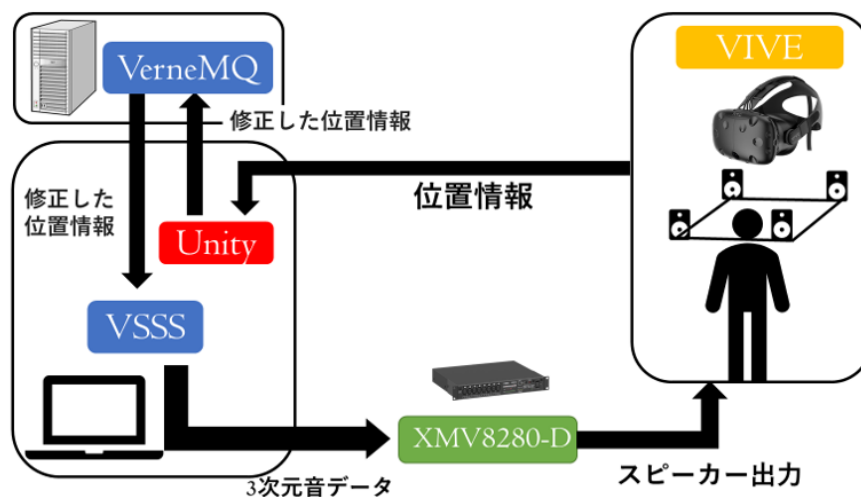


図 4.1 実装概要

4 個のスピーカーで構築されるサラウンドスピーカーを制作する。これを装着した被験者の動きを検出するモーションセンサを用意し、ヨー角回転を検出する環境を構築する。モーションセンサは VIVE を使用する。検出した動きをパソコン上で処理し、音の出力値を決定しソフトウェアに送る。被験者の動きを処理し音の出力値を決定するソフトウェアは Unity を使用する。Unity からサーバーに

構築した MQTT ブローカーに音の出力値を送る．MQTT ブローカーから MIDI を使用し，音響制御ソフトに音の出力値を送る．音響制御ソフトは VSSS を使用する．MQTT ブローカーを利用する理由は，Unity と VSSS では連携ができないからである．VSSS から計算した音データをアンプに送る．アンプは XMV8140-D を使用する．そして XMV8140-D からスピーカーに出力し，被験者の動きに合わせた音を出力する．

4.2. 使用機材とソフトウェア

本研究で使用する機材とソフトウェアについて説明する．制作したサラウンドスピーカー環境・モーションセンサ環境・サーバー・アンプ・ソフトウェアについて述べる．

4.2.1 スピーカー

本研究で使用するスピーカーは F00805H0 である．



図 4.2 F00805H0

F00805H0 を 4 つ使用しサラウンドスピーカー環境を構築する．F00805H0 のスペックを表 4.1 に示す．

作成したサラウンドスピーカー環境を図 4.3 に示す．

表 4.1 F00805H0 のスペック

Size	50mm 2inch
Rated Impedance	8ohm
Nominal Power	8W w/NETWORK
Frequency Range	2k 20k Hz
Sound Pressure Level	87dB
Voice Coil Diameter	13mm
Magnet Mass	25.8g 0.91oz
Total Mass	100g

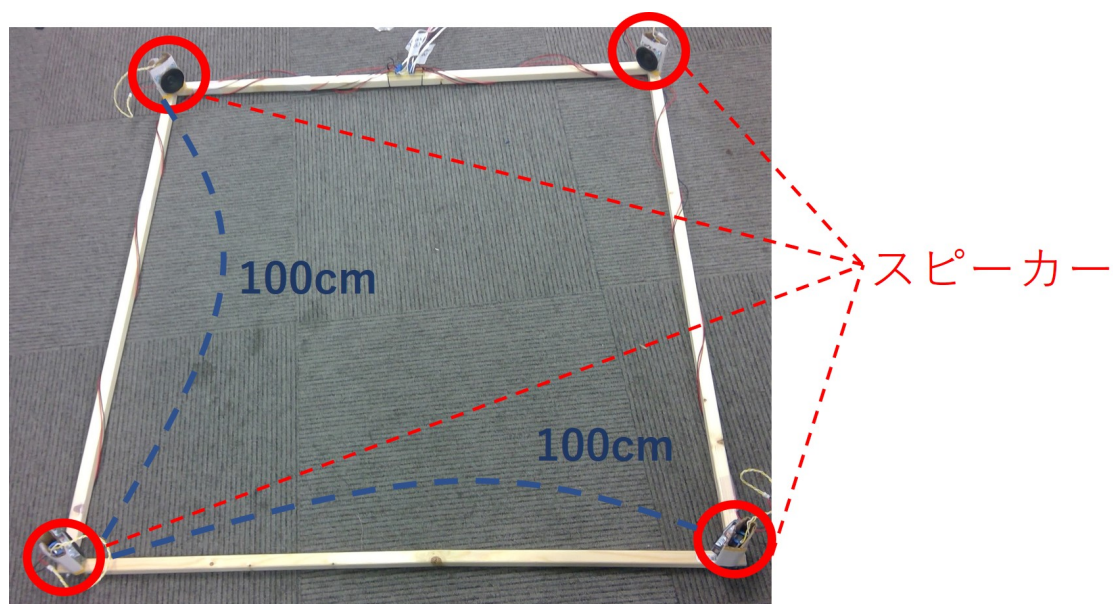


図 4.3 サラウンドスピーカー環境

一辺が100[cm]の木の棒を使用した．これを組合せ四角形にし，四隅にスピーカーを設置した．

4.2.2 VIVE

モーションセンサにVR HMDのVIVE¹を使用した．VIVEは専用のセンサーでHMDの動きを検出することができる．このセンサーはベースステーションという．これを利用して被験者のヨー角の動きを検出する．ベースステーションは2つあり，2[m]以上頭より高い場所に設置するのが良い．本研究では，スタンドを使用することでベースステーションを2[m]以上頭より高い場所に設置した．また，VIVEを使用するためにSteamVRというソフトウェアを使用する．SteamVRはHMDとベースステーションの起動の確認や，ベースステーションのキャリブレーションを行う．



図 4.4 vive

VIVEは専用のセンサーでHMDの動きを検出することができる．これを利用して被験者のヨー角の動きを検出する．

1 VIVETM 日本 (<https://www.vive.com/jp/>)

4.2.3 XMV8140-D

本研究で使用するアンプは XMV8140-D である。



図 4.5 XMV8140-D

XMV8140-D は Dante ネットワークに対応している。Dante とは Audinate 社が開発したデジタルオーディオネットワークの規格である [12]。IP ネットワークとギガビットイーサネットに準拠し、ネットワークスイッチとイーサネットケーブルを用いて、多チャンネルの非圧縮デジタルオーディオ信号を低レイテンシーで送受信することが可能である。

4.2.4 RAZER BLADE

本研究で使用するパソコンは RAZER BLADE である。スペックを表 4.2 に示す。

表 4.2 RAZER BLADE のスペック

OS	Windows 10 Home (64 ビット)
CPU	Intel Core i7 -7700HQ
メモリ	16GB
グラフィックスカード	GeForce GTX 1060(6GB GDDR5 VRAM)

4.2.5 VSSS

VSSSは立体音響再生ソフトウェアである。蚊や花火といった音を立体的に再生する。サラウンドスピーカー環境で使用する場合、スピーカーに囲まれた範囲内であればどこにでも音像を設置することが可能である。天井などの上部にスピーカーを配置した場合、上下方向にも音像を設置することが可能である。VSSSの画面を図4.6に示す。

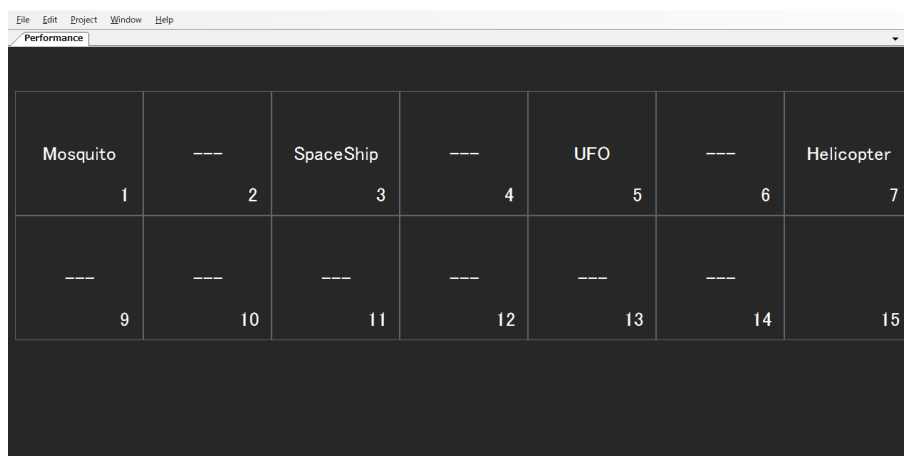


図 4.6 VSSS

4.2.6 MQTT

MQTT(Message Queueing Telemetry Transport)とはTCP/IPネットワークで利用できる通信プロトコルである [13]。MQTTはシンプルで軽量であるので、機械同士が通信を介して情報をやり取りするM2M(Machine-to-Machine)や、家電や自動車など多種多様な「モノ」がインターネットにつながり、お互いに情報をやり取りするIoT(Internet of Things)を実現するのに適したプロトコルとされる。音像の位置をリアルタイムで制御するためには高速で通信する必要があるのでMQTTを使用する。

本研究で構築したサーバーに MQTT ブローカーを構築した。MQTT ブローカーは VerneMQ²を使用する。サーバーのスペックを表 4.3 に示す。

表 4.3 サーバーのスペック

OS	Ubuntu 16.04.5 LTS
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E5530 2.40GHz
メモリ	4Mb
ソフトウェア	VerneMQ

4.2.7 MIDI

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) とは、日本の MIDI 規格協議会 (JMSC, 現在の社団法人音楽電子事業協会) と国際団体の MIDI Manufacturers Association (MMA) により策定された、電子楽器の演奏データを機器間でデジタル転送するための世界共通規格である³, 物理的な送受信回路・インタフェース, 通信プロトコル, ファイルフォーマットなど複数の規定からなる。

loopMIDI

loopMIDI は複数の異なる MIDI 対応ソフトを接続できるようにする仮想 MIDI ポート作成ソフトである⁴。loopMIDI を使用すると, MIDI アウトプットと MIDI インプットが設定できるソフトならどんなものでも連携させることが可能である。VSSS で MIDI インプットすることで連携する。図 4.7 に loopMIDI の画面を示す。

² VerneMQ(<https://vernemq.com/>)

³ MIDI(<https://ja.wikipedia.org/wiki/MIDI>)

⁴ loopMIDI(<https://www.tobias-erichsen.de/software/loopmidi.html>)

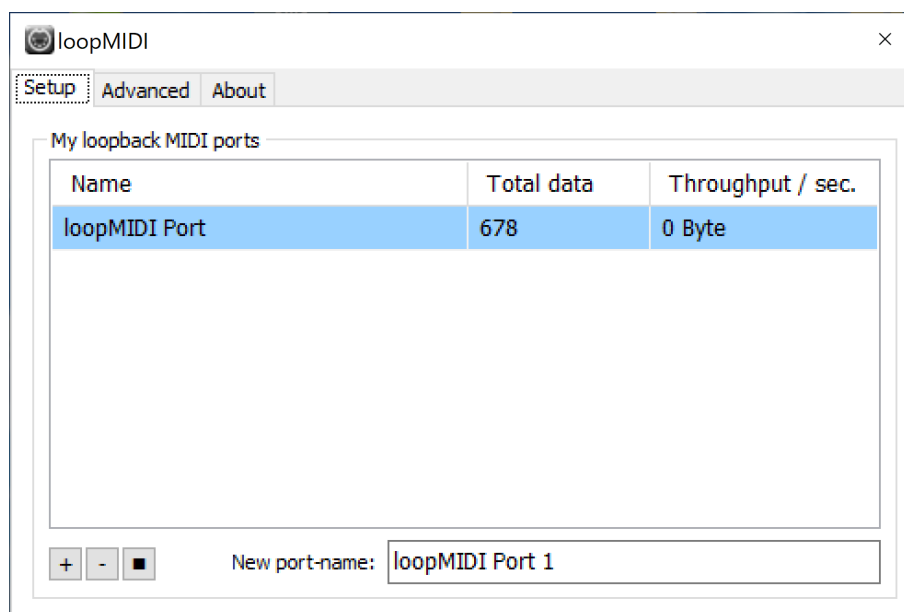


図 4.7 loopmidi

rtpMIDI

rtpMIDI ドライバは、DAW(Digital Audio Workstation) アプリケーションがネットワーク経由で他のコンピュータと通信するための仮想 MIDI ドライバである⁵。DAW はデジタルで音声の録音、編集、ミキシング、編曲など一連の作業が出来るように構成された一体型のシステムを指す。VSSS と MQTT とのデータのやり取りのために使用する。

図 4.8 に rtpMIDI の画面を示す。

5 rtpMIDI(<https://www.tobias-erichsen.de/software/rtpmidi.html>)

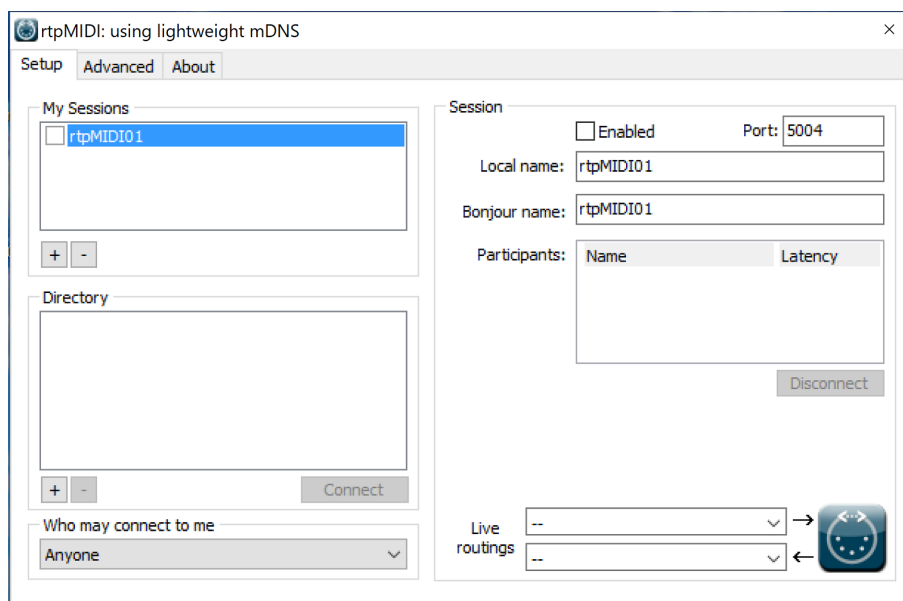


図 4.8 rtpmidi

4.2.8 Unity

VIVE と連携させるために Unity を使用した。Unity とは統合開発環境を内蔵し、複数の機材に対応するゲームエンジンである⁶。本研究では Smart Life Hackathon⁷ で使用した UnityAsset を基に構築した。Smart Life Hackathon には SDM も参加しており、Unity 上で音像の位置を指定すると、MQTT ブローカーに音像の位置情報を送信し、MQTT ブローカーから VSSS へ指定した位置情報を送信し音を出力するものを提供した。

この Asset を利用し、VIVE で検出した被験者のヨー角回転を検出し音像の移動距離を計算、そして計算で導き出した距離だけ音像を戻すものを制作した。

提供された Asset の画面を図 4.9 に示す。

⁶ Unity(<https://unity3d.com/jp>)

⁷ Smart Life Hackathon(<http://www.smartlife-hackathon.jp/wordpress/>)

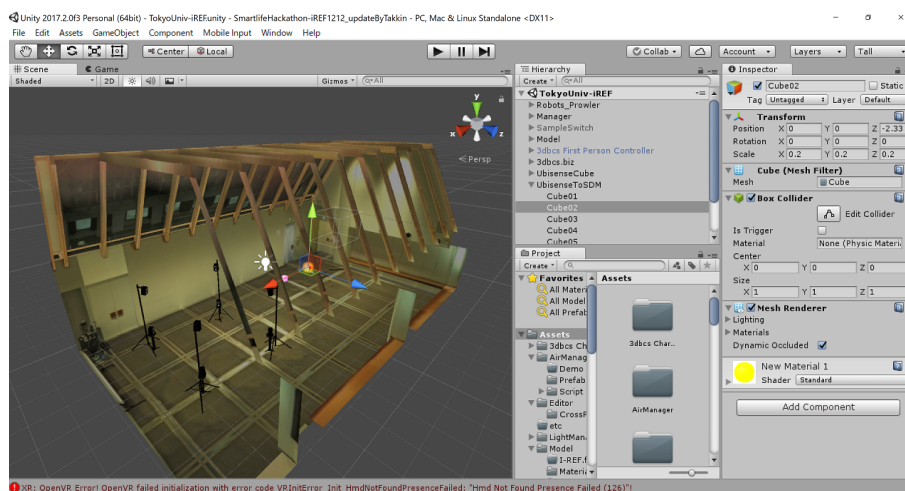


図 4.9 Unity

Dante Virtual Soundcard

Dante Virtual Soundcard はパソコンをネットワーク上の Dante オーディオデバイスとシームレスに接続し、コンピューターを Dante に対応したワークステーションに変換するものである⁸。オーディオアプリケーションと Dante デバイスを合わせて使用することにより、瞬時に接続し、録音やミックス、また音源の再生をすることが可能である。Dante Virtual Soundcard は Dante Controller を使用するために必要である。

図 4.10 に Dante Virtual Soundcard の画面を示す。

Audio Interface は ASIO に設定する。ASIO は、ドイツのスタインバークによりオーディオを入出力するためのアプリケーション用 API として提供された規格であり、販売されている高級オーディオカードの多くがこの規格に準拠し、Windows 用および macOS 用のドライバも存在し、ほぼ業界標準として採用されている。

本研究で使用するスピーカーが 4 個なので、Audio Channels は 4×4 以上に設定する。

8 Dante Virtual Soundcard - Audinate(<https://www.audinate.com/products/software/dante-virtual-soundcard?lang=ja>)

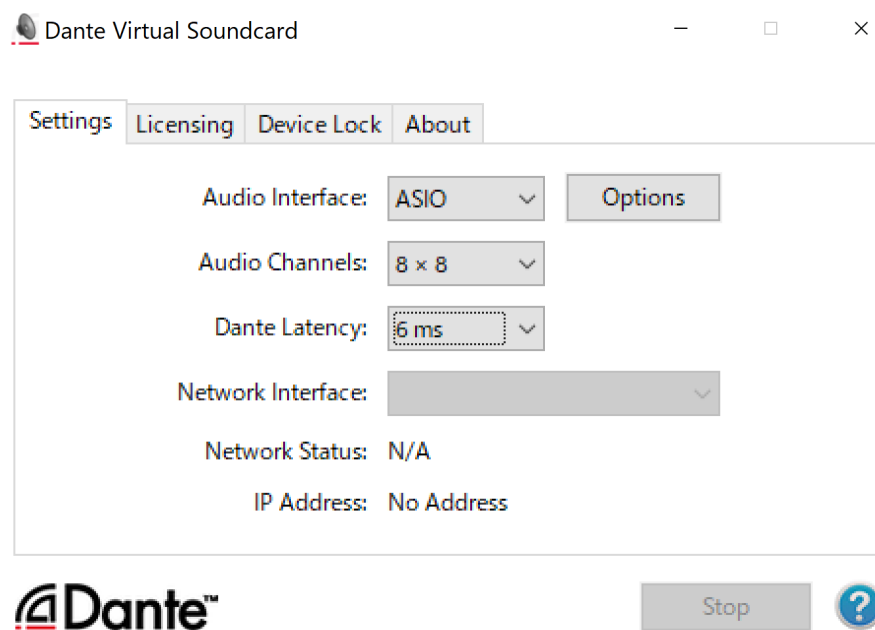


図 4.10 DanteVirtualSoundcard

Dante Controller

Dante Controller は Dante ネットワーク上でオーディオのルーティングおよびデバイスの設定を行うためのフリーソフトである⁹。自動デバイス検出、ワンクリックシグナルルーティング、そしてユーザーによるエディットが可能なデバイスおよびチャンネルラベルなどにより、Dante ネットワークの設定が非常に簡易である。

4.3. システム起動手順

Dante による音の出力の手順について以下に示す。

- XMV8140-D を起動
- XMV8140-D とスピーカーを接続

9 Dante Controller - Audinate(<https://www.audinate.com/products/software/dante-controller?lang=ja>)

- DanteVirtualSoundcard を起動し，画面右下の Start をクリック．このとき Stop になっていた場合，既に起動している
- Dante Controller を起動
- VSSS を起動

以上の手順を行い，VSSS で指定した種類の音出力されたならば起動に成功している．

VIVE ベースステーションの設置手順を以下に示す．

- HMD を電源とパソコンに接続
- ベースステーションを電源と接続
- ベースステーションをスタンドを使用し 2 [m] 以上頭に設置
- SteamVR を起動

MQTT による連携のシステムの起動手順を以下に示す．

1. run mosquitto.cmd を起動
2. run felix.cmd を起動
3. felix を起動した際に立ち上がったコマンドラインで，「External loopMIDI port」のデバイス番号を探す
*** (デバイス番号) ***
Description: External MIDI Port
Name: loopMIDI Port
Vendor: Unknown vendor
4. mqtt2midi.properties をエディタで開き，最後の行の「midiDeviceId=(デバイス番号)」の部分を該当するデバイス番号に書き換える

5. felix のコマンドラインを閉じて、もう一度 `run felix.cmd` をダブルクリックして起動

以上の操作は VSSS が起動しているかどうかに関わらず可能である。loopMIDI は起動している必要があるが、自動的に起動する設定にしてあるので、通常は設定の必要はない。

以上を行い Unity を起動しスタートをする。そしてスピーカーから音が出力されたなら構成した全システムが正常に動作している。

4.4. 本章のまとめ

本章では第3章で述べた設計を基に、本論文の目的である、ヘッドホン・イヤホンのサイズで、サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現すること、を実現するための実装を行った。全体概要では位置情報の処理方法、音の出力方法などを実際に使用した機材・ソフトウェアを示し説明した。そして、使用した機材・ソフトウェアの概要、使用方法を詳しく説明した。システムの起動手順も詳しく述べた。

第 5 章

実 験

5.1. 実験 1：音像定位の位置変化の確認

音の聞こえてくる方向性を正確にすることが重要である。よって、被験者がヨー角回転しても音の聞こえてくる位置が変化していないかを確認する必要がある。実装したシステムが音像の位置を固定できているか、つまり、音の聞こえてくる位置が変化していないかテストを行った。

5.1.1 実験 1：手法

実験制約

サラウンドスピーカー環境の向いている方向と HMD の向いている方向が一致していないと正確な実験は行えない。しかし、サラウンドスピーカー環境と HMD が一体化されていないため、同時に動かすことは難しかった。被験者がサラウンドスピーカー環境を持ち HMD を頭に装着する。この場合、頭の HMD と持っているサラウンドスピーカー環境を同時にヨー角回転させる必要がある。しかし、頭だけ動かしてしまうケースが多発し、正確な実験が行えなかった。よって HMD を被験者に装着させるのではなく椅子の上に置き、筆者がサラウンドスピーカー環境の方向と HMD の向きを一致させるという手法をとった。

実験 1：環境

実験には蚊の音を使用した。これはホワイトノイズ、全ての周波数で同じ強度となるノイズ、では音像の位置を正確に認識することが難しいためである。特に

人は 2kHz または 12kHz 以上の周波数帯域の場合はホワイトノイズの位置を把握できない [14]. 本実験は音像の位置を修正できているか確認することが目的であるため、音像の位置を把握しやすい蚊の音を使用した.

また、実験場所は慶應義塾日吉キャンパス協生館 3F の MediaStudio である.

5.1.2 実験 1：手順

被験者を上から見たものを図 5.1 に示す.

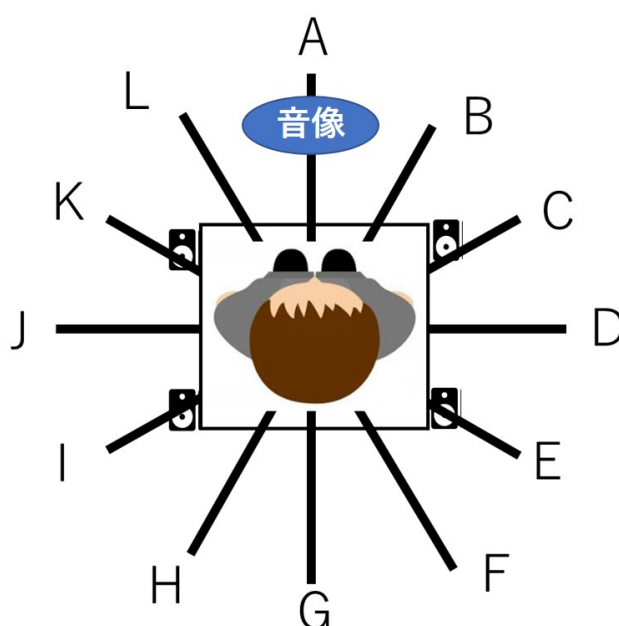


図 5.1 被験者を上から見た風景

被験者に A～L の 12 方向のどこから音が聞こえるかを答えてもらう. この A～L は絶対的な方向である. 被験者のヨー角回転後を図 5.2 に示す.

音の聞こえてくる方向を時計の 1～12 時方向のどれかで答えてもらう. 答えてもらう方向は相対的な方向である. 例えば、被験者が図 5.2 の状況で 2 時の方向から音が聞こえると答えた場合、A の方向から音が聞こえたことになる.

実験手順を以下に示す.

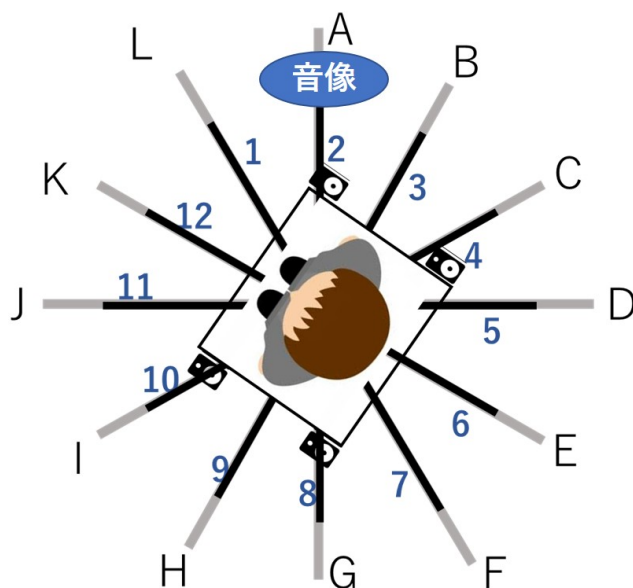


図 5.2 回転後の被験者を上から見た風景

- 目隠した状態で回転椅子に座る
- 音を再生
- 音の聞こえてくる方向を示す
- 音を停止
- サラウンドスピーカーと一緒にヨー回転

被験者が音の聞こえてくる方向を示した後、音を停止させる。これは、被験者が向いている方向をランダムにするためである。音が鳴り続けた場合、被験者は音像の位置で自分自身が向いている方向を予想できてしまうためである。また、A～Lの12方向に各1回、ランダムでの回転を12回行った。この12回を被験者1人に対して3セット行った。被験者は6人であるため合計216回テストを行った。実験風景を図5.3に示す。

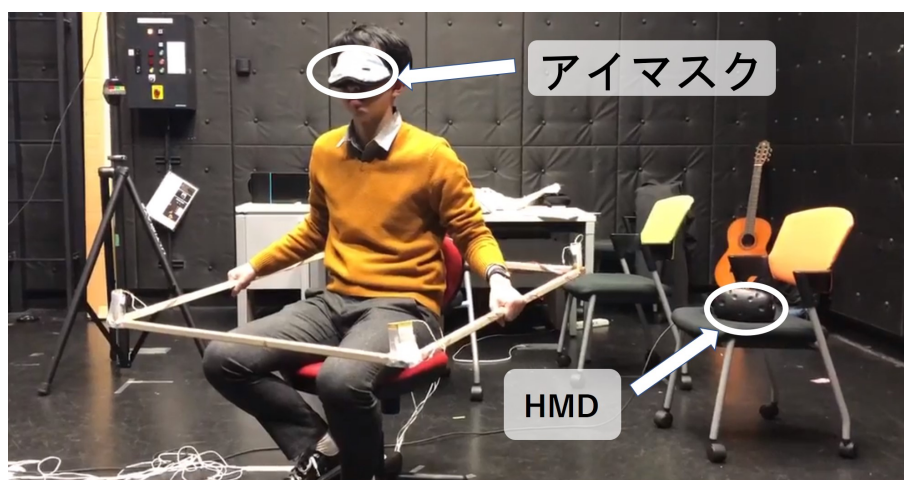


図 5.3 実験 1：実験風景

5.1.3 実験 1：結果

表 5.1 に実験結果をまとめたものを示す．右側方向のずれは正，左側方向のずれは負である．表 5.2 は実験結果の絶対値，すなわち角度誤差を示す．また，実験結果を図 5.4～図 5.9 に示す．また実験結果は，左の値から A 方向に 3 回，B 方向に 3 回～L 方向に 3 回といった形にまとめた．

表 5.1 実験 1：結果 まとめ

-	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6	合計
平均 [°]	-0.9	17.5	14.2	8.4	7.5	17.5	10.7
標準偏差 [°]	29.2	34.7	54.9	35.6	27.2	45	39.1

表 5.2 実験 1：角度誤差

-	被験者 1	被験者 2	被験者 3	被験者 4	被験者 5	被験者 6	合計
平均 [°]	22.5	28.3	37.5	25	17.5	25.8	26.1
標準偏差 [°]	18.1	26.8	42.1	26.3	22	40.7	30.9

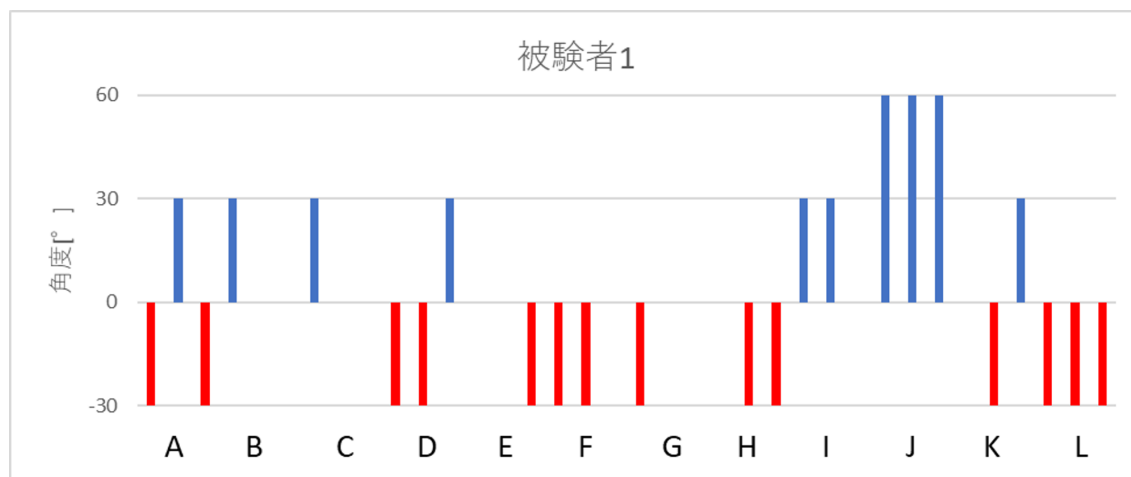


図 5.4 実験 1：被験者 1

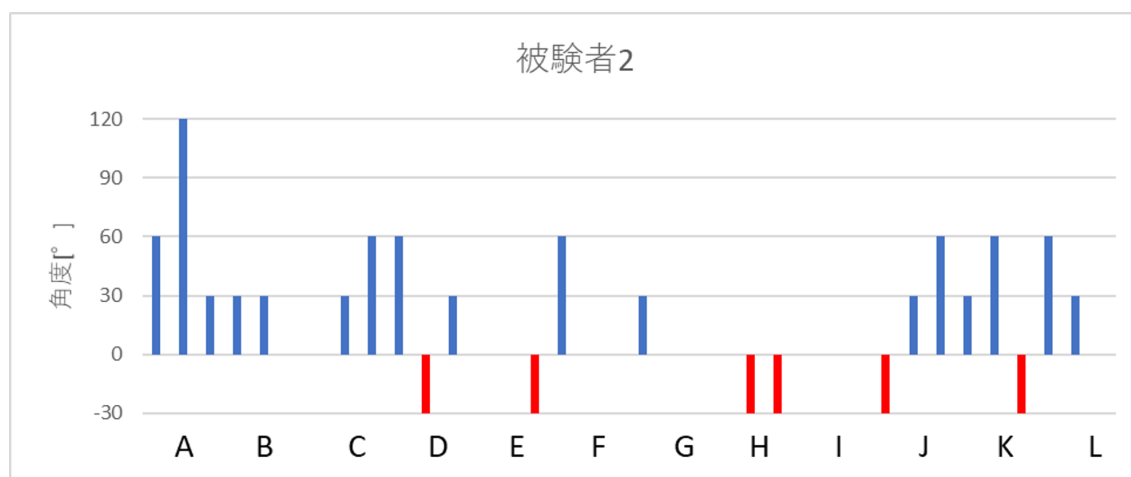


図 5.5 実験 1：被験者 2

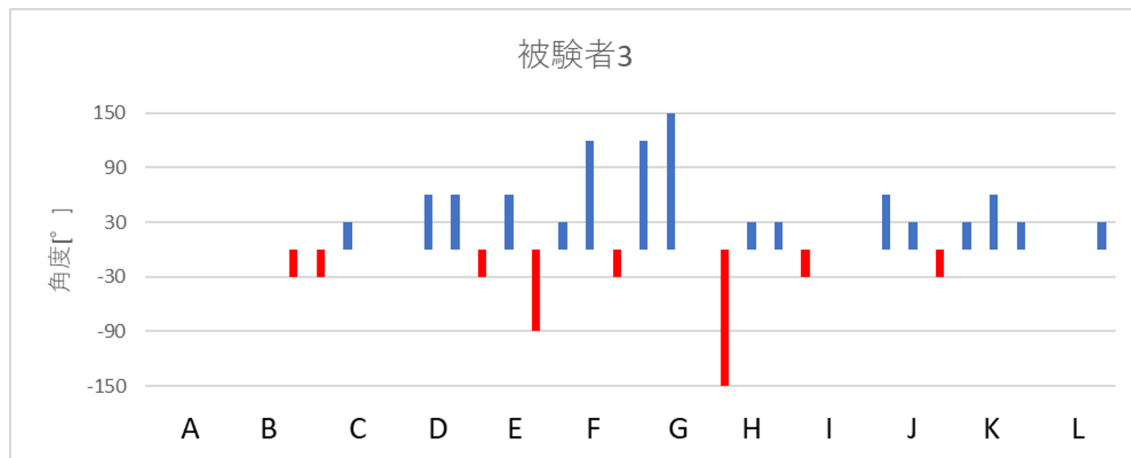


図 5.6 実験 1：被験者 3

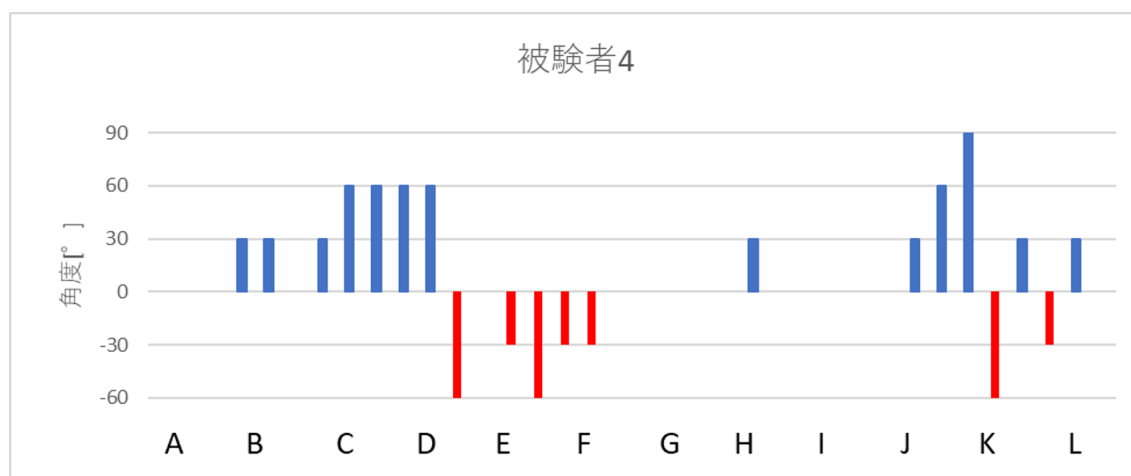


図 5.7 実験 1：被験者 4

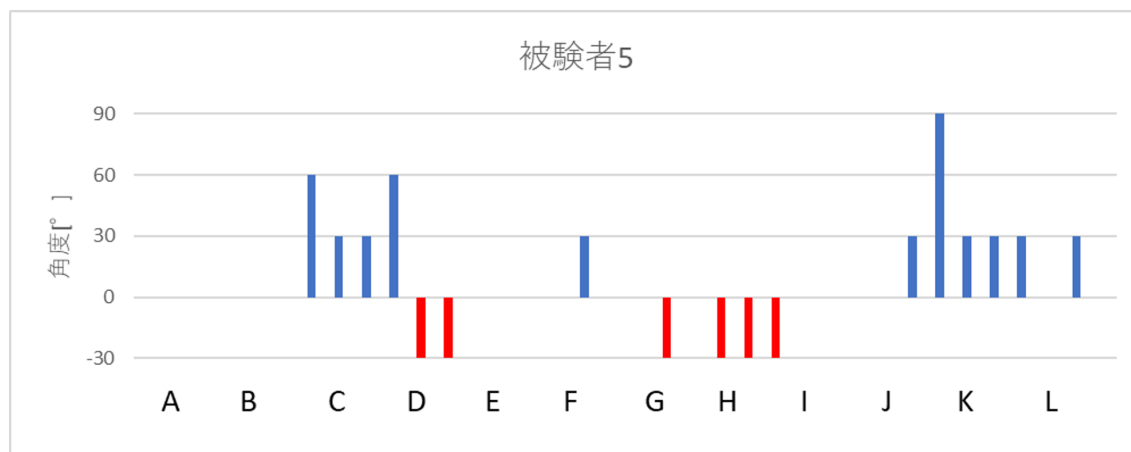


図 5.8 実験 1：被験者 5

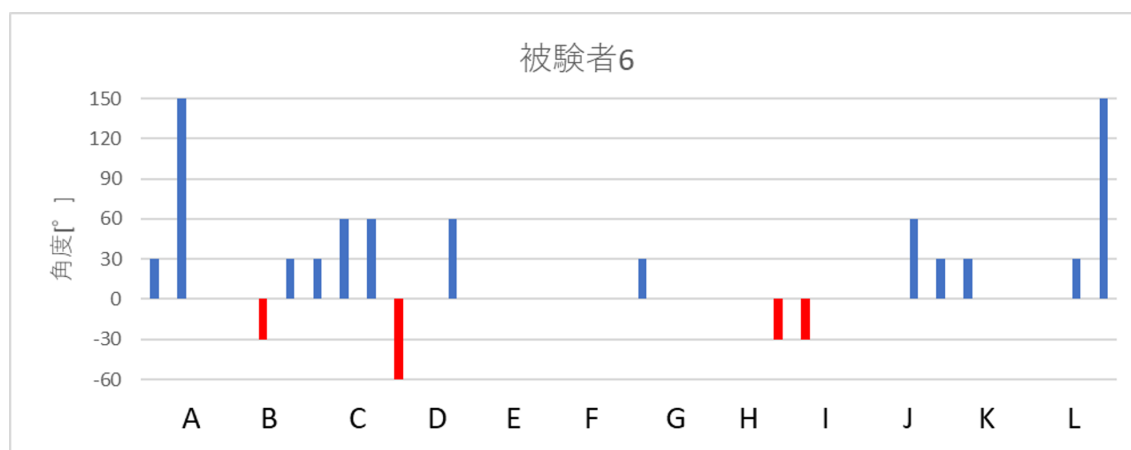


図 5.9 実験 1：被験者 6

5.2. 実験 2：音が鳴り続ける場合での音像定位の確認

実験 1 では音を持続させなかった．しかし音が持続した場合，被験者が音像の位置をどのように把握するのかを確認する必要がある．よって，音が鳴り続ける場合での音像定位の確認を行う．

5.2.1 実験 2：手法

被験者に HMD を装着してもらい，制作したサラウンドスピーカー環境を持ってもらう．立ち位置は HMD の動きを計測するために設置したベースステーションの中心とする．そして，ヨー角方向に回転してもらう．このとき，HMD とサラウンドスピーカー環境の動いた角度が一致していないといけいないので，被験者には首と腕を動かないようにしてもらい，HMD とサラウンドスピーカー環境は固定してもらう．そして，音の位置を示してもらう．被験者に HMD を装着してもらうとき，目を覆うまで被ってしまうと計測器具が見れなくなってしまうため，オデコの位置まで装着してもらう．

半円に A～Z まで描いた角度計測器具を制作した．角度計測器具を図 5.10 に示す．

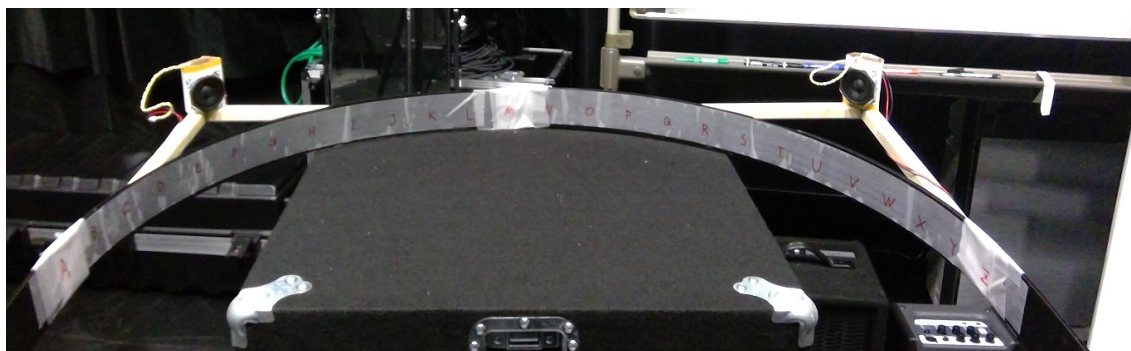


図 5.10 角度計測器具

左端が 0 度の位置が A，右端が 180 度の位置が Z になっている．アルファベットが 26 個，半円が 180 度なので，A～B，B～C といった一つ移動するごとに，

$$180 \div (26 - 1) \approx 7$$

となる．よって，被験者はサラウンドスピーカー環境の中央に立ってもらうので，被験者から観測した場合，A～B と一つ移動するごとに 7 度移動していると考ええる．最初に音がなっている位置が A～Z のどれかを示してもらう．そして移動後にもう一度，音の位置が A～Z のどれかを示してもらう．移動後と移動前の音の位置と比較することで，音の位置が変わっているかを計測する．また被験者，つまり HMD の移動角度を計測する必要もある．被験者の移動角度と音の移動角度を比較する必要があるからである．例えば，被験者が 28 度回転したとする．被験者が最初の音の位置を F と示し，移動後に B を示した場合，F～B 移動なので 28 度となるので，音の位置が変わっていないと感じていることになる．被験者の回転角度は HMD の回転角度と同じなので，Unity 上で確認できる．

以下に実験方法をまとめたものを示す．

- 被験者に HMD をオデコまで装着してもらう
- ベースステーション中央に立ってもらう
- 被験者にサラウンドスピーカー環境を持ってもらう
- HMD とサラウンドスピーカー環境の移動角度を一致させるために，首と腕は動かないように固定してもらう
- 動かない状態での音の位置を示してもらう
- 移動後の音の位置を示してもらう
- 移動後の被験者の回転角度を計測する

まず，右に 90 度回転してもらい計測する．次に初期位置に戻ってもらい，左に 0 度～90 度回転してもらい計測する．90 度を超過してしまうとアルファベットのメモリが見れなくなってしまうので，90 度以上では計測は行わない．

本実験は協生館 3F のメディアスタジオを利用した．実験風景を図 5.11 に示す．

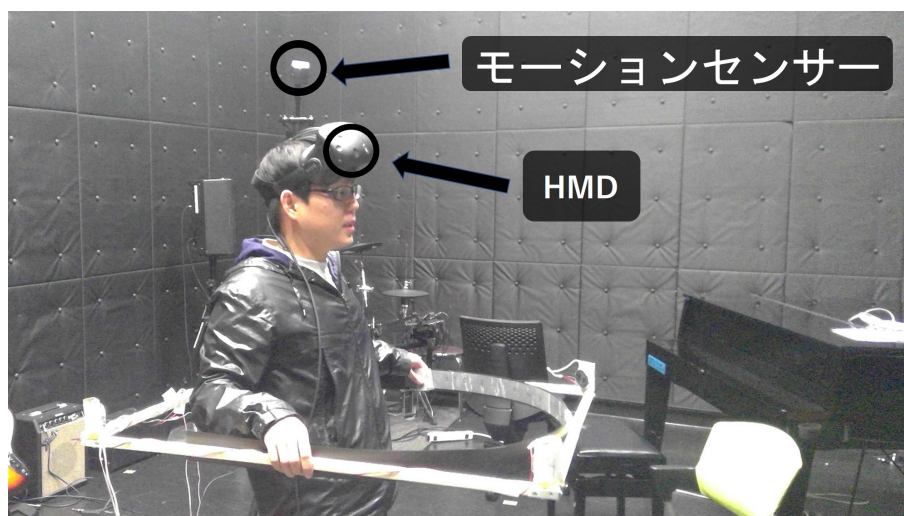


図 5.11 実験 2：実験風景

5.2.2 実験 2：結果

実験結果を以下に示す.

表 5.3 実験 2:被験者 1

初期位置 [°]	右回転 [°]	角度差 [°]	初期位置 [°]	左回転 [°]	角度差 [°]
230	275	45	271	320	49
M	G	45	M	F	49

表 5.4 実験 2:被験者 2

初期位置 [°]	右回転 [°]	角度差 [°]	初期位置 [°]	左回転 [°]	角度差 [°]
200	260	60	192	13	60
O	J	35	N	W	63

表 5.5 実験2:被験者3

初期位置 [°]	右回転 [°]	角度差 [°]	初期位置 [°]	左回転 [°]	角度差 [°]
180	226	46	179	141	38
M	B	77	M	Z	78

5.3. 実験3：自由に回転した場合の確認

実験2では被験者背後などの音像の位置を確認することはできなかった。しかし、音が持続した場合で被験者が背後にある音像をどのように認識しているかを確認する必要がある。よって、被験者に実験2と同様な環境で360度自由に回転してもらい、音の位置変化をどう感じたのかをヒアリングした。被験者のコメントを以下に示す。

- 音の位置は変わっていないように感じた
- アルファベットが視野外に行ってしまい見づらい
- 後ろの音が大きく聞こえる
- 後ろの音は大きい音が音の位置は少ししかずれていないように感じた
- HMDとサラウンドスピーカー環境を同時に動かすことが難しい
- 真後ろ付近に音がある場合、音の位置があいまいになる
- 音像が動いてる場合でやるべき
- 後ろのスピーカーから音が出る状況に移行したとき、音の方向が変化したように感じた

5.4. 本章のまとめ

本章では音像定位の位置変化の確認、音が鳴り続ける場合での音像定位の確認、自由に回転した場合の確認を行うために、3つの実験を行った。それぞれのの実験の目的、手法を述べ、実験結果を示した。次章では実験の考察を行う。

第 6 章

考 察

6.1. 実験 1 の考察

被験者の右側に音像がある場合と左側に音像がある場合を比較した所，右側の方が音像を正確に認識できた，といった偏りは確認されなかった．よって，左右の偏りはないと考える．

しかし，各被験者では聞き取りやすい位置があることが確認された．被験者 3 と被験者 5 は右側に音像がある場合，正確に音像の位置を把握している．また，被験者 5 は後方に音像がある場合，正確に音像の位置を把握していた．人は耳，頭の形によって音を聞き取りやすい方向というものが変わる [15]．よって耳，頭の形により，各被験者で聞き取りやすい位置が生じたと考える．

また，角度誤差が大きいという結果になった．人はスピーカーなどの音源の位置であっても，音を聞いただけでは正確に音の聞こえてくる方向を認識できない．被験者の正面方向に音源があるとき約 4 度，左右方向に音源があるとき約 10 度の誤差がある [16]．本実験の角度のずれの平均は 26.1 度なので，角度誤差が大きい．これは，30 度刻みの計測をしたことが原因であると考ええる．答えるアルファベットが 1 つずれるだけで 30 度ずれてしまう．このため角度誤差が大きくなってしまったと考える．

また，角度のずれの平均は 26.1 度である．このことから，角度のずれはアルファベット 1 つ分のずれ以内に収まっている．よって，音像の位置は概ね正しいと考える．

6.2. 実験 2 の考察

実験 2・3 はサラウンドスピーカー環境と HMD が同時に動いていることが条件である。被験者に HMD を装着してもらい、サラウンドスピーカー環境を持って頭を動かさないでヨー角方向へ体ごと回転してもらい実験を行った。

計測結果から、被験者 1, 2 ではほぼ全てでずれが 10 度以内に収まった。被験者も、音の位置は変わっていないとコメントした。よって、音の位置を一定にできたと考察する。しかし、大きなずれが生じたケースがある。表 5.4 は 25 度の差を示している。被験者にヒアリングしたところ、音の位置は常に一定に感じた述べた。このことから、目盛り W が視野の限界に近い所にあったため、選択を誤ったのだと考察する。被験者 3 は差が大きい結果となった。しかしヒアリングしたところ、音の位置は変化してないと感じたと述べている。本実験での計測方法だと、首が動いてしまうとも述べていた。

頭を完全に動かさないようにすること、またサラウンドスピーカー環境を完全に動かさないで持っていることは困難であった。このため、計測結果に多少のずれが生じたと予想する。また、実験がやりづらいという意見が出ている。なので、HMD とサラウンドスピーカー環境を同時に動かすために、ヘルメットとサラウンドスピーカー環境を接続して固定し、ヘルメットとサラウンドスピーカー環境が同時に動くようにする必要があると考える。また、本研究では視野内での範囲で計測したので、角度の計測範囲が狭くなってしまった。視野外を計測する方法を考える必要がある。

また、実験 1 の結果と比較すると、角度誤差は小さくなっている。これは、7 度刻みの計測をしたことでより正確な測定ができたからだと考える。また、実験 2 は常に音を鳴らしていたため、音像の位置が一定であると錯覚してしまっと思える。例えば、A の位置 (A の位置を絶対座標とする) に音像があると感じる、その後、回転しても A の位置に音像があると感じてしまう。よって、角度誤差は小さくなったと考える。

6.3. 実験3の考察

本研究で使用した立体音響再生環境は、背後からの音，すなわち背後に配置されているスピーカーから出力される音が大きくなる．これは，人は前方からの音より後方からの音の方が認識しづらいため，意図的に音響を大きくしているからである．このため，音の聞こえてくる方向が同じであっても，回転中に音の大きさが変化してしまうので違和感が生じる．また，前方スピーカーの音が後方スピーカーより大きな音出力されている状態から，後方スピーカーの音が前方スピーカーより大きな音出力されている状態に移行したとき，音の聞こえてくる方向も変化しているように感じるというコメントがあった．

6.4. 解決案の考察

実験結果を考察することで様々な問題があることが分かった．その問題点の解決案を考察する．

6.4.1 時間差の利用

時間差を利用して音の聞こえてくる方向を正確にするべきだと考える．人間は左右の耳で生じる音の聞こえてくる時間差で音の聞こえてくる方向を認識している．つまり右耳と左耳での音の聞こえてくる時間差を再現することで，より正確な方向に音像を設置することができる．本来のホームシアターなどのサラウンドスピーカー環境は，各スピーカーの音量の差で音像の位置を決定している．これは映画館などの複数人で体験する場合，有用である．しかし，時間差はあまり利用していない．複数人に時間差で音の聞こえてくる方向を再現するのは困難である．なぜなら，人のいる位置によって時間差は変わってしまうので，違う位置にいと音像の位置も違う位置になってしまうからである．しかし本研究の目的は，ヘッドホン・イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の方向性を再現することである．なので，サラウンドスピーカー環境を持って人が同時に動くことで目的を達成することを目指した．一人用で人と

サラウンドスピーカー環境が同時に動くのであれば、時間差を利用することができる。また、後方からの音の認識が正確になるなら、後方スピーカーの音だけを大きくする必要もなくなる。

6.4.2 スピーカーの数を増す

スピーカーを増やし、適切に配置する必要がある。スピーカーを増やせば、より正確に音像を配置できる [17]。スピーカーの数によってスピーカーを設置する位置も変わってくる。よって、一人で持って動ける大きさに収まるスピーカーの数、小スペースでのスピーカーの配置を考える必要がある。

6.4.3 スピーカーの選定

音の強弱が鮮明なスピードを使用するのがいいと考える。音の聞こえてくる方向は音の大きさにも関係している。例えば、右方向からの音は右耳の方が大きな音だと感じる。音の差で音の位置を認識しているということは、スピーカーでより細かく音の強弱を表現できれば、音の聞こえてくる方向も正確になると考察する。実験から考察された問題点とそれに対する解決案を以下にまとめる。

問題点

- 角度誤差が大きい
- HMD とサラウンドスピーカー環境が同時に動かないため、音の聞こえてくる方向がずれてしまう
- 後方スピーカーからの音が大きくなってしまう
- 前方スピーカーより後方スピードの方が音が大きい状態に変化するとき、音の聞こえてくる方向が変化してしまう

解決案

- HDM とサラウンドスピーカー環境を一体化させる

- 時間差を利用する
- スピーカーの数を増やし，適切な位置にスピーカーを配置する
- 細かい音量の強弱を表現できるスピーカーを利用する

6.5. 本章のまとめ

本章では実験結果の考察を行った．3つの実験のそれぞれの結果から問題点を抽出し，具体的な解決案を提示した．次章では本論文の結論を述べる．

第 7 章

結

論

本論文ではヘッドホン・イヤホンのサイズで，サラウンドスピーカーを用いた立体音響に匹敵する音の聞こえてくる方向を再現するために，小型サラウンドスピーカー立体音響システムを制作し実験を行い評価した．また実験結果を考察することで，更なる問題点の抽出とそれに対する具体的な解決案を提示した．

実験結果から，本論文が提案したシステムは音像の位置を修正し，概ね正しい位置に修正できたと考える．しかし，角度誤差が大きいといった様々な問題があることが判明した．この問題はスピーカーの数を増やすこと，時間差を利用することで解決できる可能性があると考えた．よって音の聞こえてくる方向性をより正確にするために，上記の解決案を本論文のシステムに導入し角度誤差を減らすことが必要である．

また，本論文ではピッチ・ロール角での実験は行っていない．より臨場感のある音の体験にはピッチ・ロール角での音像位置の修正が必要になると考える．よってピッチ・ロール角での実験環境を構築し，実験を行う必要がある．

謝 辞

本研究の指導教員であり，幅広い知見からの的確な指導と暖かい励ましやご指摘をしていただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心から感謝いたします。研究について理解していない私を粘り強く何度も指導していただきました。本当にありがとうございます。

研究指導や論文執筆など数多くの助言を賜りました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の杉浦一徳准教授に心から感謝いたします。

研究の方向性について様々な助言や指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授に心から感謝いたします，砂原先生の様々な知見には何度も助けていただきました。本当にありがとうございます。

研究や研究以外での NetworkMedia の活動で様々なご指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の山内正人特任講師に心から感謝いたします。KMD 在学中に研究以外の活動を通して勉強できたことを，とても幸運であると感じております。

研究指導や数多くの助言だけでなく NetworkMedia の仕事の指導をしていただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科博士課程の加藤大弥さんに心から感謝いたします。プライベートでも飲み회에誘っていただくなど気に掛けていただき，本当にありがとうございます。とても心強かったです。

NetworkMedia 博士課程の岡田光代さん，石井美穂さん，NetworkMedia の活動や KMDForum では何度も助けていただきました。本当にありがとうございます。

M1 のときから苦楽を共にした小野寺好広さん，瀧口晃太郎さん，小澤理奈さん，塚越さくらさん，富安香澄さん，三好葉月さん，沈さんに感謝を示します。みんなと研究できて本当に良かったです。

NetworkMedia の先輩である紀室翔子さんに感謝を示します。紀室さんに Soft-

ware Defined Media のミーティングに誘っていただいたおかげで、様々な貴重な経験を積むことができました。

NetworMedia の秘書さんの森有里さん、伊藤彩翔さん、安藤千歳さん、書類の修正など様々なことを助けていただき、ありがとうございます。

実装を手伝っていただいた Embodied Media の中村開さんに感謝を示します。中村さんの技術と鋭い指摘には何度も助けてもらいました。本当にありがとうございます。

実験のアドバイス、手助けをしていただいた Embodied Media の畠山海人さん、Geist の中尾拓郎さん、Global Education の有馬俊さん に感謝を示します。実験の方法などの分からない所を夜遅くまで指導していただき、ありがとうございます。

Software Defined Media ワーキンググループの活動において様々な助言をいただいた東京大学大学院情報理工学系研究科の江崎浩教授、塚田学特任助教、粕谷貴司さん、YAMAHA の曾根卓朗さん、奥村啓さん、エスイーディー株式会社の高坂茂樹さん、Aplix の根本忍さん、株式会社 T スポットの瀧澤広直さん、WIDE の國司光宣さん、慶応義塾大学大学院メディアデザイン研究科の小川景子さんに感謝を示します。研究だけでなくプライベートの相談にも親身になって応えていただき、ありがとうございます。塚田さんには KMD に来てまでご指導していただきました。本当にありがとうございます。

大学院で学ぶことに深い理解と多大な支援をしてくれたら家族に感謝を示します。家族がいたからこそここまで来ることができました。本当に感謝しています。

参 考 文 献

- [1] 「モノラル」と「ステレオ」の違い. <https://gimon-sukkiri.jp/monoral-stereo/>.
- [2] ハイファイとは. <https://kotobank.jp/word/%E3%83%8F%E3%82%A4%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4-356532>.
- [3] 5.1ch サウンドの意味や定義. <https://www.weblio.jp/content/5.1ch%E3%82%B5%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%B3%E3%83%89>.
- [4] 塚田学, 小川景子, 池田雅弘, 曾根卓朗, 丹羽健太, 齊藤翔一郎, 粕谷貴司, 砂原秀樹, 江崎浩. Software Defined Media: 視聴空間サービスのソフトウェア制御. 日本ソフトウェア科学会学会誌『コンピュータソフトウェア』「ネットワーク技術」特集, September 2017.
- [5] Keiko Ogawa. Tangible sound : a tangible interface for object-based sound systems. Master's thesis, KMD:Graduate School of Media Design, Keio University, March 2016.
- [6] バーチャルサラウンド : 音響技術と機器開発 用語補足解説. <http://www.ari-web.com/service/kw/sound/surround2.html>.
- [7] 頭部伝達関数～手軽に楽しめる高臨場感音響を目指して～. https://www.nhk.or.jp/str1/publica/giken_dayori/jp2/rd-0711.html.
- [8] バイノーラル録音・再生 : 音響技術と機器開発用語補足解説. <http://www.ari-web.com/service/kw/sound/binaural.htm>.

- [9] 騒音だけなぜ消える?「ノイズキャンセリング」の仕組みとは. <https://time-space.kddi.com/ict-keywords/kaisetsu/20160427>.
- [10] デジタルプロセッサの極意 2017 - エモーション. <http://www.emotion-jp.com/digital-processor/index.html>.
- [11] DSP（デジタル信号処理）とは? <https://www.analog.com/jp/design-center/landing-pages/001/beginners-guide-to-dsp.html>.
- [12] Dante とは. <http://www.watanabe-mi.com/shopping/list/c3998/?page=1>.
- [13] MQTT とは、IoT時代の通信プロトコル. <https://kfep.jp/solution/iot-mqtt/mqtt>.
- [14] 森川大輔, 島倉希, 平原達也. 水平面音像定位に必要な周波数帯域と聴感度特性の関係. 日本音響学会講演論文集, 2009.
- [15] 難波精一郎. 聴覚ハンドブック. ナカニシヤ出版, 1984.
- [16] イェンスブラウエルト 森本政之 後藤敏行. 空間音響. 鹿児島出版会, 1986.
- [17] 飯田一博 森本政之 福留公利 三好正人 宇佐川毅. 空間音響学. コロナ社, 2010.