立体音響を用いる小型サラウントスピーカー環境の研究

庄子 琢郎[1]　塚田 学[2]　加藤 朗[1]　砂原 秀樹[1]

概要：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システムやヘッドホン・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，音を Cloud 上に保存し管理することが増加した．また，Spotify などの音楽ストリーミングサービスの利用者も増加した．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た．立体音響もインターネットと組み合わせることで，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システムやヘッドホン・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システム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システム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．音をデジタル技術を用いて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．

本論文では上記の問題を解決すべき課題とする．サラウンドスピーカーシステムとヘッドホン・イヤホンの問題点・利点を考察することで，サラウンドスピーカーシステムの音の聞こえてくる方向の精度と，ヘッドホン・イヤホンの持ち運べる手軽さを両立すべきと考え，「身に付けられるサイズの音響再生環境で，サラウンドスピーカーシステム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」を目的と定めた．これを実現するための提案と設計，実装を行い，実装したもの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．

A Compact Surround Speaker System for 3D Audio

TAKURO SHOJI[1]　MANABU TSUKADA[2]　AKIRA KATO[1]　HIDEKI SUNAHARA[1]

1. はじめに

1.1 背景

近年，3 次元空間上での音の再生と映像の自由視点化が進んでいる．映像体験において，以前はテレビなどの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 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．DolbyAtmos[1] 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 3 次元空間の演出をリアルタイムでレンダリンク処理可能なオブジェクト志向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．オブジェクト志向のデジタルメディアとは，空間に存在するメディアを 3 次元モデルとして解釈し，「複数のデジタルメディアオブジェクトに分解」して伝送し，受信側では「これらのオブジェクトを用いて空間を

[1] 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Keio University Graduate School of Media Design
[2] 東京大学大学院情報理工学系研究科
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

© 2019 Information Processing Society of Japan

再合成」する方式である [2]．オブジェクトベースの音響システムは従来のチャネルベースのサラウンドではなく，複数のサウンドトラックを位置情報と一緒に記録することで劇場の任意の位置に音像を配置し，動かすことが可能である．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．音と映像を自由に処理できるようになり，様々な新しいコンテンツが生まれている．

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．しかし、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メディアをローカルコンピュータ上で管理し，iPod 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 上にデジタルメディアを保存し管理するようになった．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，Netflix などの動画配信サービス，Spotify 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 本研究の目的

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．

しかし，サラウンドスピーカーシステムやヘッドホン・イヤホンといった音の再生環境には問題がある．サラウンドスピーカーシステムは大規模なため一般家庭への導入が困難である．一方，ヘッ ドホン・イヤホンを用いた立体音響では，音の聞こえてく る方向の精度が低い．バイノーラル技術 [3] 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システム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**?**．デジタル処理によって音を自由に扱えるようになったが，音の再生環境の問題を解決しないと，音を自由に体験することができない．以下に問題のまとめを示す．

サラウンドスピーカーシステム

- 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

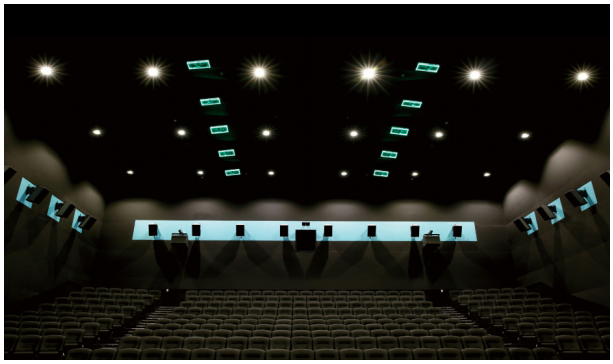
- 音の聞こえてくる方向・距離感の精度が低い
- 映像を用いた錯覚の利用には制限がある

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システム音の聞こえてくる方向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，身に付けられるサイズの音響再生環境で，サラウンドスピーカーシステム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．

2. 関連研究と課題

Dolbu Atomos

先述したオブジェクトオーディオを導入した Dolby Atmos がある．Dolby Atmos とは DolbyLaboratories,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 1 に Dolby Atmos の映画館を示す．



デジタル TCXDOLBYATMOS 上映について より引用 [1]

図 1 Dolby Atmos を導入した映画館

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な音場を構築する．しかしシステムが大規模なため，一般家庭への導入は困難である．

バイノーラル

ヘッドホン・イヤホンを用いた立体音響にバイノーラルがある．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．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，収音時の音環境が聴取時に再現されることになり，臨場感の高い収音再生が可能となる．バイノーラルでは，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音し，ヘッドホンで聴取することで臨場感のある音を再生している．人間の両耳にマイクを設置し録音する事も可能だが，服地が擦れる音や咳き込む音など自身の動作に伴う音が録音されてしまう．また，無意識に頭を動かすことが多いので録音された音を再生して聞いていると不意に音が回るような錯覚を感じてしまう．よって，ダミーヘッドを用いた録音が推奨されている．

しかし，バイノーラル録音には問題がある．以下に問題

© 2019 Information Processing Society of Japan

点を示す．

- 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

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．上記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．

3. 提案と設計

3.1 提案

本論文の目的である，身に付けられるサイズの音響再生環境で，サラウンドスピーカーシステム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システム，ヘッドホン・イヤホンの利点・問題点から，研究目的を達成するための要件を考察する．音の聞こえてくる方向の精度を高くするために，サラウンドスピーカーシステムを用いるのがいいと考える．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システムを用いる
- 聴者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システムを提案する．

3.2 設計

本研究の目的である，身に付けられるサイズの音響再生環境で，サラウンドスピーカーシステム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システムを設計する．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 2 のようなサラウンドスピーカーシステムが良いと考える．

図 2 の S1，S2 は聴者前面の左右に，S3，S4 は聴者後方の左右に配置する．スピーカーの向きは聴者の方向，つまりスピーカーを設置する正方形のフレームの中心に向ける．

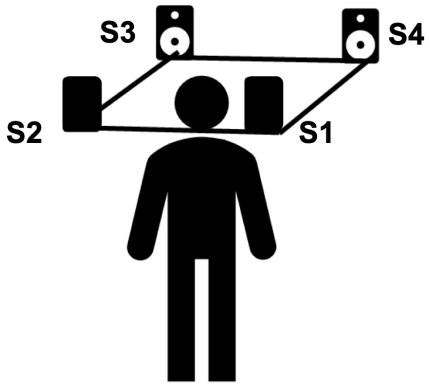


図 2　提案するサラウンドスピーカー環境

しかし，図 2 で示すシステムでは問題が生じる．従来のサラウンドスピーカーシステムはスピーカーが固定されており，それらのスピーカーで囲まれた内側に聴者が入り立体音響を体験する．よって，聴者が移動してもスピーカーは移動しないので，音像の位置も移動しない．しかし提案するシステムでは，聴者と一緒にサラウンドスピーカーシステムめうが動いてしまうので，音像の位置が移動してしまう．

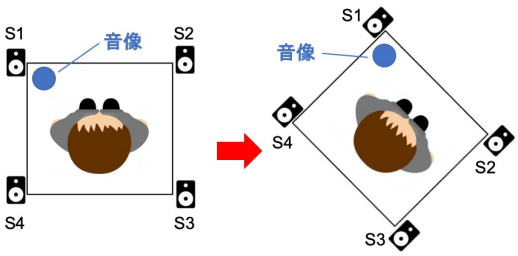


図 3　サラウンドスピーカーシステムが動いたことによる音像の移動

そこで，聴者の動きをセンシングし回転角度を測定し，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．

4. 実装

システム構成の具体的な概要を図 4 に示す．

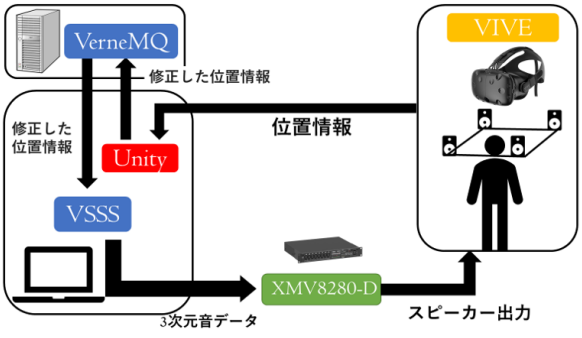


図 4　実装概要

© 2019 Information Processing Society of Japan

構成するシステムはサラウンドスピーカーシステム・モーションセンサー・Unity[4]・サーバー・アンプ・音響制御ソフトウェアがある．

4 個のスピーカーで構築されるサランドラスピーカーシステムを制作する．使用するスピーカーは小型スピーカーの F00805H0 である [5]．F00805H0 のスペックを表 1 に示す．

表 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

F00805H0 を 4 つ使用しサラウンドスピーカーシステムを構築する．作成したサラウンドスピーカーシステムを図 5 に示す．

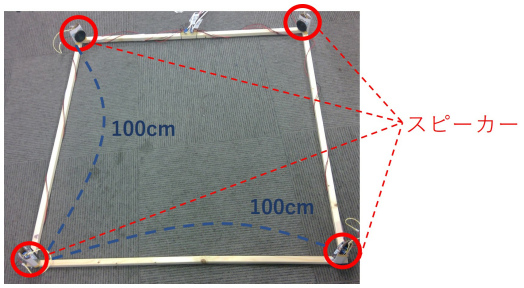


図 5　サラウンドスピーカーシステム

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．

これを装着した聴者のヨー角回転の動きをモーションセンサ (VIVE[6]) で検出する．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．検出した値を Unity に送る．Unity は送られた値を処理し，音の出力値を算出できる．Unity からサーバーに構築した MQTT ブローカー [7] に音の出力値を送る．MQTT 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．MQTT ブローカーから MIDI[8] を使用し，音響制御ソフト (VSSS[2]) に音の出力値を送る．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 (XMV8140-D[9]) に送る．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．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．

5.　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，音の聞こえてくる方向が変化してないかテストを行った．

サラウンドスピーカーシステム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システムと 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システムを持ち 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システム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 HDM 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システムの方向と HDM の向きを一致させるという手法をとった．

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 [10]．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．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．被験者を上から見たものを図 6 に示す．

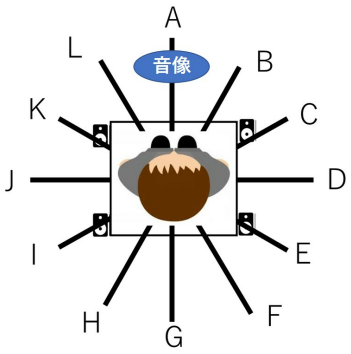


図 6　被験者を上から見た風景

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 7 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方向である．例えば，被験者が図 7 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

© 2019 Information Processing Society of Japan

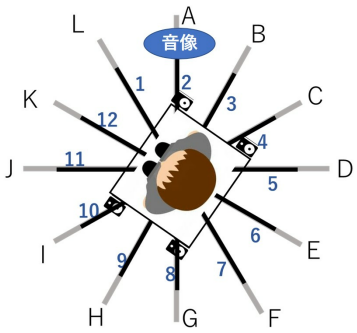


図 7　回転後の被験者を上から見た風景

験手順を以下に示す．

(1) 目隠した状態で回転椅子に座る
(2) 音を再生
(3) 被験者に音源の方角を腕で示してもらう
(4) 音を停止
(5) 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．また，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からである．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．また，被験者は全員男性，平均年齢は 23.5 才である．

5.1.1　実験 1　結果

12 方向を 3 回試行した結果の平均とその標準偏差を表 2 に示す．右側方向のずれは正，左側方向のずれは負である．また表 2 の角度誤差を左右の方向を無視して，ずれの絶対値で平均と標準偏差を計算すると表 3 のようになる．

表 2　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 3　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

実験結果を図 8〜図 13 に示す．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．

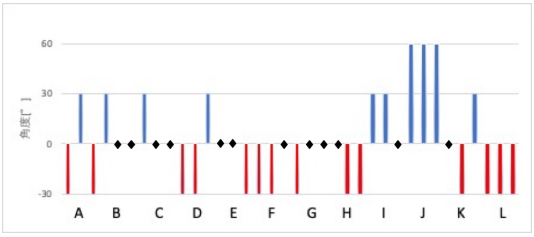


図 8　実験 1：被験者 1

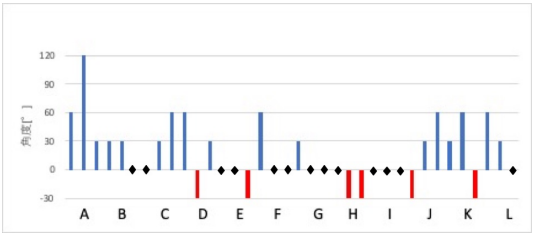


図 9　実験 1：被験者 2

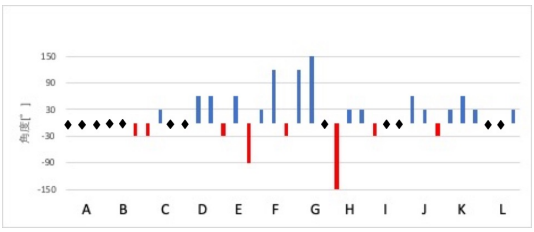


図 10　実験 1：被験者 3

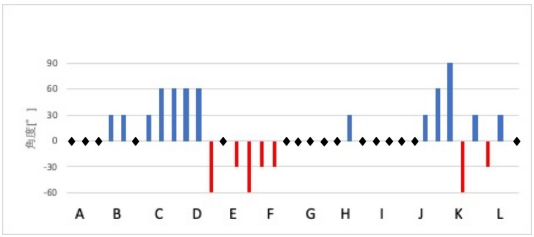


図 11　実験 1：被験者 4

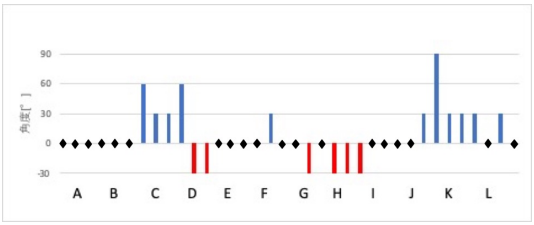


図 12　実験 1：被験者 5

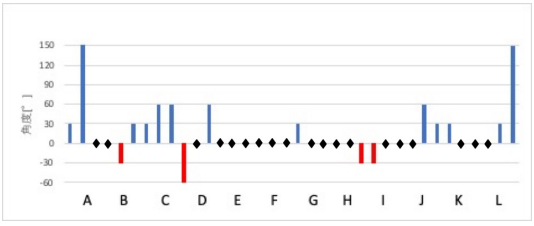


図 13　実験 1：被験者 6

© 2019 Information Processing Society of Japan

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．

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システムを持ってもらう．立ち位置は HMD の動きを計測するために設置したモーションセンサの中心とする．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システムの動いた角度が一致していないといけないので，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 14 に示す．

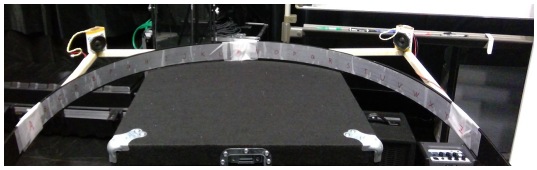


図 14　角度計測器具

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 ÷ (26 - 1) ≒ 7

となる．よって，被験者はサランドラ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．実験風景を図 15 に示す．

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
- モーションセンサの中央に立ってもらう
- 被験者にサラウンドスピーカーシステムを持ってもらう
- HMD とサラウンドスピーカーシステム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

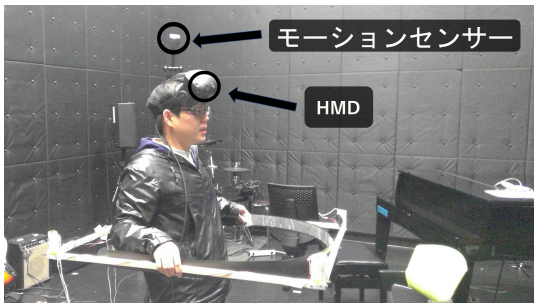


図 15　実験 2：実験風景

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 度を超え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．

5.2.1　実験 2　結果

実験結果を以下に示す．

表 4　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　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

5.3　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
- 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，

© 2019 Information Processing Society of Japan

音の方向が変化したように感じた

6. 考察

6.1 実験の考察

実験 1

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 [11]．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 [12]．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．

実験 2

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．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と述べた．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．よって，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，実験 2 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考える．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．

6.2 解決案の考察

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ンドラスピーカー環境は，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，違う位置ににいると音像の位置も違う位置になってしまうからである．本研究では一人用を想定しているので，ヘッドホン・イヤホンのように時間差の利用が可能である．

スピーカーの数を増やす

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 [13]．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．

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．

7. 結論

本論文では，身に付けられるサイズの音響再生環境で，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，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

© 2019 Information Processing Society of Japan

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察した．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．

参考文献

[1] DOLBYATMOScinema，入手先 ⟨https://www.dolby.com/jp/ja/technologies/cinema/dolby-atmos.html⟩（参照 2019-05-07）.

[2] SDM WG メンバー，2015，「特集 2 視聴空間サービスのソフトウェア制御（Software Defined Media）」，『WIDE 報告書 2015』

[3] 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，入手先 ⟨http://www.ari-web.com/service/kw/sound/binaural.htm⟩（参照 2019-05-07）.

[4] Unity，入手先 ⟨https://unity3d.com/jp⟩（参照 2019-05-09）.

[5] F00805H0，入手先 ⟨http://www.kitanihon-onkyo.co.jp/jp/archives/tweeters/f00805h0⟩（参照 2019-05-08）.

[6] VIVE，入手先 ⟨https://www.vive.com/jp/⟩（参照 2019-05-08）.

[7] MQTT とは、IoT 時代の通信プロトコル，入手先 ⟨https://kfep.jp/solution/iot-mqtt/mqtt⟩（参照 2019-05-09）.

[8] MIDI，入手先 ⟨https://ja.wikipedia.org/wiki/MIDI⟩（参照 2019-05-010）.

[9] Dante とは，入手先 ⟨http://www.watanabe-mi.com/shopping/list/c3998/?page=1⟩（参照 2019-05-08）.

[10] 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』

[11] 難波精一郎，1984 年，「聴覚ハンドブック」，ナカニシヤ出版

[12] イェンスブラウエルト，森本政之 ，後藤敏行，1986 年，「空間音響」，鹿児島出版会

[13] 飯田一博，森本政之，福留公利，三好正人，宇佐川毅，2010 年，「空間音響学」，コロナ社

© 2019 Information Processing Society of Japan