

音場シミュレーションと選択式頭部伝達関数個人化システムを用いた 2ch 立体音響システム

2ch stereophonic sound system using sound field simulation and selective head related transfer function personalization system

海野 沙弥香
Sayaka Unno

法政大学情報科学部デジタルメディア学科
sayaka.unno.4w@stu.hosei.ac.jp

abstract

With conventional music viewing methods, it is hard to say that a realistic sensation obtained when actually listening to a live performance in a concert hall is obtained. Therefore, this system aims to propose a simpler and more realistic 2ch stereophonic sound system. In this study, the proposed system uses the ray tracing method as a sound field simulation method that is a original form of sound field VR systems, and enables 2ch reproduction in which a HRTF is convolved with the obtained multidirectional impulse response. In addition, by using a selective HRTF personalization system as a solution to the personality of the HRTF, it is possible to select the optimal HRTF for the user. A selective HRTF personalization system performs a subjective evaluation of sound image localization. The system as a whole prepares a plurality of question items and performs a subjective evaluation of whether or not the user feels realistic, and compares the impulse response between the measured value and the calculated value and the frequency characteristic. As a result, for 100 % of the subjects, a sound image localization feeling and a sense of realism equal to or higher than that of binaural recordings were obtained. Of these subjects, the results of this system exceeded 50 %. From these results, a usefulness of the selective HRTF personalization system was clarified as a stereophonic system that can obtain a high sense of reality.

1 はじめに

様々な音楽イベントに出かけて、大好きなバンドやアーティストの演奏を体感したい。このような欲求を満たすには、金銭や時間など様々なコストを要する。そのため通常は、ステレオ録音やミキシングされた人工的 2 チャンネルの信号をスピーカーやヘッドホンで聴取することが大半である。最近では、5.1 チャンネルをはじめとするマルチスピーカーシステムなどもあり、それなりの臨場感を得ることはできるが、実際にホールへ出かけて得られる臨場感とは言い難い。一方、簡易的に臨場感を体感できる方法として立体音響や VR のような技術があげられる。それらのなかでも、音場 VR (virtual Reality) [1] とは音響空間を音場シミュレーションに基づき自由に構築することができるため、リアルな音響視聴を可能にするシステムである。音場 VR の評価には、頭の中に音像ができ、不自然な音場再生となるヘッドホン再生より、多チャンネルのスピーカー再生のほうが適している。しかし、手軽に音場 VR を手にするにはヘッドホンが優位であると考えられる。そこでヘッドホン再生での自然な音場再生を可能にする方法としてバイノーラル再生が挙げられる。バイノーラル再生 [2] とは、收音時の外耳道周辺における全ての情報を含んだ音を聴取時に再生することで、音場を臨場感のあるまま再生する技術である。しかし、收音時と聴取時で頭部の形状や外耳道特性が異なると高い臨場感を得ることは難しい。そのため、臨場感を高めるには頭部周りの空間特

性を示す頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function、以降 HRTF とする) の補正が必要となる。HRTF は頭部の形状などに大きく影響するため個人差の大きい関数であり、臨場感の高いシステムを目指すには HRTF の個人性は無視できない。そこで、受聴者それぞれに適合する高精度な HRTF をできるだけ簡単に提供する方法を考える。また、本研究での音場 VR の評価において、高い臨場感とは、原音場における残響・反射といった空間特性及び、音像の空間位置を知覚する「音像定位」 [3] の精度を指標とする。

以上を踏まえ、本研究では、音場 VR の手法に着目し、簡易的でより現実感・臨場感の高い 2ch 立体音響システムの提案を目指す。そのために、正確な 2ch 再生を可能にする音場シミュレーション方法及び HRTF の個人性の問題解決を可能にすることを目標とする。

2 音場シミュレーション

音場 VR システムの原形である音場シミュレーション [1] の基本は、元の音場を聴感的に正しく再現できているかどうかである。コンサートホールのステージ上で演奏された音は、壁や天井で何度も反射を繰り返して客席に到達する。このように、我々が室内で音を聞くとき、反射音のある音環境が前提となる。反射音の特徴は、音源から聴取者までの反射音のインパルス応答から知ることができる。このインパルス応答によって、部屋という一種の伝送系の物理特徴を表すことができる。つまり、このインパルス応答を原音場と同じになるように正しくシミュレーションすることができれば、聴取者は原音場にいるかのような臨場感を得られるといえる。音場シミュレーションにおいて室内インパルス応答を得る方法は

- (1) 実際の音場での測定に基づくもの、
- (2) 計算機内に作ったモデルをもとに、幾何音響理論、波動音響理論から計算で求めるもの、
- (3) 1/10、1/20 スケールモデルをつくり、そのモデル内の測定に基づくもの、

の 3 つに分類される。このうち (1)、(2) は実用のレベルに達する。詳しい手法については、参考文献 [1] を参照されたい。今回は、システムの汎用性を高めるため、(2) を採用する。

2.1 幾何音響理論に基づく音場シミュレーション

コンピュータ内に音場のモデルを作り、幾何音響理論に基づいて音場をシミュレートする方法は次の 2 つに大きく分類される。

- (1) 音源から多数の“音線”を放射し、それらの音線を 1 本 1 本追跡して、受信エリアに達した音線のみを聴取音 (インパルス応答) として採用する方法 (音線追跡法)
- (2) 光が鏡面反射する手法と同様に、音源の壁面に対する虚像音を求め、この虚像音と受信点を結んだ線分と壁面との交点をもとに反射音 (インパルス応答) を得る方法 (虚像法)

今回、多方向インパルス応答をバイノーラル再生可能な 2ch インパルス応答に変換するため、受信領域を設定することのできる (1) 音線追跡法を採用する。

3 音像定位

「音像定位」とは音像の空間位置を知覚することである。ある場所から放出される音は、壁・床等の部屋の構造や媒体などによる反射・回折・散乱の影響や、人間の頭部や耳介の影響を受けて両耳鼓膜上に到達し、人間は聴覚器官を介することにより、これを音として知覚する。視覚情報が前方の限られた視野しかカバーできていないが、聴覚は立体空間全体をカバーして、音像の位置を知覚することが可能だ。この定位感がすぐれることで、聴取者はあたかも原音場へ出かけたかのような疑似体験を経験できる。

3.1 頭部伝達関数

音源から鼓膜までの音の伝達をシステムとして捉えれば、周波数ごとのレベル差、位相差もすべて包含したシステム関数（伝達関数）を表現できる。これを頭部伝達関数（HRTF）と呼ぶ。HRTFは、音波の伝搬を示すシステム関数であるため、音像定位の手がかりをすべて包含していると言える。ただし、部屋の反射や残響は含まない環境で測定されることが通例である。こうすることで、部屋の特性関数と頭周りの音響現象を分けて考えることができる。また、測定に用いたスピーカーやマイクロホンの特性を打ち消す必要があるため、頭部のない状態の中心で測定した伝達関数で規格化が必要がある。

HRTFは方向、距離の関数であるが、距離の変化は、1~1.2m以上離れると小さくなり、一定の関数に収束する。これは、それ以上離れると頭部の大きさに対して波面に計上が変わらなくなることを意味する。実際の知覚においてもそれ以上の距離の判断は難しい。

3.2 HRTFの個人性の必要性

前述のように、HRTFは方向と距離の関数である。しかし、我々の頭部の大きさや、耳介のひだの形状や頭部への角度は個人ごとに異なる。特に、耳介に到達した音波の物理現象は複雑である。つまり、HRTFは個人性の高い関数であることが理解できる。よって、音像定位を正確にするにはHRTFを個人化する必要がある。HRTFの個人化の解決方法の1つが、耳介形状の平均値を用いて作成されたダミーヘッドによる“標準HRTF”である。しかし、これは結果的に誰も一致しないHRTFとなってしまう。また、どの受聴者にも適用可能なのか予想できないという問題がある。その他に、すべての方向・距離における頭部伝達関数を個人ごとに取得する方法が挙げられる。しかしこれは膨大な測定が必要となり、現実的ではない。[5]さらには、本人のHRTF以上に音像定位の効果が高まるHRTFが存在することが明らかになった。[2]よって、ユーザーは、自分のHRTFを測定するより、自分に最適なHRTFを生成又は選択することが、高い臨場感につながる可能性が高いと言える。そこで、本研究では聴取者に高い音像定位感を与える空間特性を与える頭部伝達関数を、あらかじめ用意されたものの中から選択する手法を検討する。

4 立体音響システムの実現

4.1 システム概要

シミュレートしたインパルス応答が実際にどのように聞こえるか、音で評価・判断するための可聴化手法として、今回はヘッドホンによる2ch再生を用いる。図1は、シミュレーションによって得られたインパルス応答から再生音を得られるまでの流れを表す。

- ① ユーザーは部屋のサイズの入力と、壁面材料の選択による吸音率の設定を行い、原音場であるモデル空間の詳細を決定する。
 - ② 1. で決定したデータから、音線追跡法を用いて、聴取者を1点としたときの音源から1点への多方向インパルス応答を計算する。このとき、受音点は聴取者から1.2mの点とする。
 - ③ 多方向インパルス応答へ選択したHRTFを畳み込み、受音点から左右両耳への2chインパルス応答へ変換する。
 - ④ 無響室録音した楽器の演奏音を信号として畳み込む。
 - ⑤ DA変換し最終的な2ch音を得てヘッドホンで再生する。
- ③で行っているように、ヘッドホン再生の場合、左右両耳のインパルス応答（Binaural Impulse Response, 以降BIRと呼ぶ）を計算及び測定によって得る必要がある。方法としては

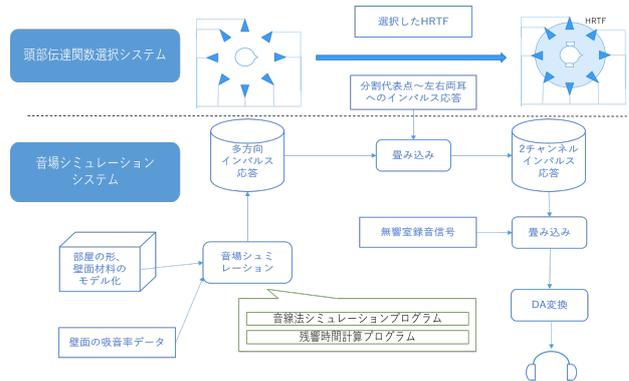


図1. 音場シミュレーションによって得られるインパルス応答の算出からヘッドホン可聴化までの流れ

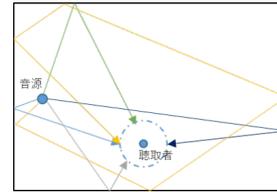


図2. 室内多方向インパルス応答を求める際のイメージ図

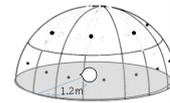


図3. 聴取者を中心とした音響空間の分割、・は分割の中心及び受音点を表す

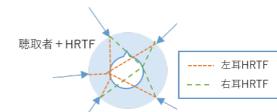


図4. 多方向インパルス応答をHRTFを畳み込み2chインパルス応答へ変換するイメージ図

- (1) 音源から左右両耳までのBIRを原音場で直接求める方法、
- (2) 受音点を中心とした多方向インパルス応答と、各方向～左右両耳間の応答が従属につながっていると考えるほう方法、

の2つがある。後者の方法の場合は、あらかじめ図3に示す再生空間の分割の中心から左右両耳までのインパルス応答（多方向～左右両耳間応答）を求めておき、これらを分割空間内のインパルス応答に畳み込み、左右2chのインパルス応答を得ている。ここでの畳み込むインパルス応答は、聴取者が選択したHRTFを用いる。

4.2 選択式頭部伝達関数個人化システム

【刺激の作成】音はホワイトノイズ (SampleRate:44100[Hz]) 又はTSP信号 (SampleRate:44100[Hz]) を使用する。HRTFのデータベース [7] より24セットを使用し下記のような軌道を作成する

【軌道】頭部周りを水平方向に反時計回りで移動していく、30°おきに12か所で離散的に再生される刺激（一箇所につき持続時間0.5s）

また、本研究で想定するコンサートホールでのバンド演奏の聴取では水平方向の移動のみを想定しているため、垂直方向に移動する刺激は考えていない。【選択方法】聴取者にはあらかじめ提示する軌道を伝えておく。そして、二つの異なるHRTFを畳み込んだ音像を聞かせ、軌道のイメージにより合う音像を選択させる。提示する24個の音像はあらかじめトーナメントを組んでおき、勝ち抜き戦をさせる。定位間の優れたHRTFが1回戦で敗れてしまわないように、スイス式トーナメント法を一部用いることにする。今回は2敗したものについてはリストから外していく。

以上のようにユーザーはシステムから提示されたHRTFを畳み込んだ音像を2つずつ聞いて一対比較してフィードバックすることを繰り返す。フィードバックを繰り返していくことで、

ユーザーに合った HRTF を 1 つ選択することが可能になる。

4.2.1 使用する刺激の評価

今回システムで用いる HRTF のデータセットは公開されるデータベース [7] から選択している。従来研究 [2] 並びに実際に HRTF の選択にかかる時間を考慮し、36 セット以下のセット数で十分と考えられる。そこで、36 セット周辺のデータセットで同じ条件のもと測定されているデータベースを使用する。条件を満たすものとして 24 セットのデータベースで実験を行った。

【実験方法】聴取者にはあらかじめ提示する軌道を伝えておく。それぞれ HRTF を畳み込んだの 24 個の音像を聞いてもらい、軌道のイメージに合うものがあるかを判断してもらう。

【刺激の作成】TSP 信号、ホワイトノイズを使用。頭部周りを水平方向に反時計回りで移動していく、30° おきに 12 か所で離散的に再生される刺激 (一箇所につき持続時間 0.5s)

【被験者】聴覚的に日常生活において支障のないない 20 代の男女 5 名

【実験結果及び考察】24 セットの中でイメージする軌道があったと回答した人がいたことから、HERF のデータセット数は 24 セットで十分であるとする。また、ホワイトノイズを使用したときの方が、TSP 信号を使用した時より、提示軌道とイメージ軌道が一致する音像があったと回答する人が増えたことから、ホワイトノイズのほうが軌道のイメージを得やすいことが分かった。しかし、ホワイトノイズより TSP 信号のほうがイメージしやすいという回答もあった。そのため、一概にホワイトノイズが優位であるとは言えない。また、一致する音像がなかったと回答した人は 24 セットの中に適切な HRTF がなかったと考えられる。よって、今後の実験は一致する音像があったと回答した人を対象に行うものとする。また、刺激が離散的軌道か連続的軌道かで音像定位感の高い HRTF が異なることも述べられている [2] ため、連続的刺激を用いて同実験を行う必要があると考えられる。

表 1. 実験結果

音	評価	人数(人)
TSP 信号	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像があった	2
TSP 信号	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像がなかった	2
TSP 信号	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像が複数あった	1
ホワイトノイズ	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像があった	3
ホワイトノイズ	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像がなかった	1
ホワイトノイズ	提示軌道とイメージ軌道が一致する音像が複数あった	1

4.3 ヘッドホンの自由空間特性

ヘッドホンでの再生時には、端子電圧から生じる音響インピーダンスの影響を補正する必要がある。ヘッドホンを装着した状態と装着しない状態との音響インピーダンス整合の違いの比を PDR 又は自由空間等価特性と呼ぶ。PDR = 1 が成立すると、補正の必要はなくなる。オープンエア型のヘッドホンがそれに近いと言われる。よって、今回の実験ではオープンエア型の ATH-AVA300 を用いている。

5 評価実験

5.1 選択式頭部伝達関数選択システムの評価実験

このシステムの評価は音像定位感についてである。ヘッドホンで立体音について検討する場合、基本的にバイノーラル信号が必要になる。[8]

5.1.1 装置

実験で使用する選択式頭部伝達関数選択システムは、ホワイトノイズ又は TSP 信号に HRTF を畳み込んで音像を作成しユーザに提示しながら勝ち抜き戦を行うプログラムと、それらをユーザーに聴取させるヘッドホン (ATH-AVA300) を使用する。プログラムの作成には MATLAB R2017 を使用している。音源のバイノーラル録音にはバイノーラルマイク (3Dio FS-Pro ii) を使用。モノラル録音には MP3 レコーダー (R-09HR) を使用する。原音場での音源再生にはマルチスピー

カー (MM-SPL2USV) を用いる。

5.1.2 刺激

以下の二つの音を用意する。

- (1) バイノーラルマイクを聴取者として音源を半径 1.2 m の位置に置き、バイノーラル収録した音
- (2) モノラル録音した音源に選択した HRTF を畳み込んだ音 (HRTF は聴取者の中心から 1.2m のもの)

音源は、ホワイトノイズ (1.0s)、TSP 信号 (1.0s) を用意する。音圧レベルは、原音場と近い値になるように再生システム内の頭部中心位置でそれぞれの刺激で設定する。

5.1.3 手続き

【被験者】聴覚健全な男女 4 名 (22~25 歳)

【評価方法】12 方向から 5 回ずつ計 60 回のランダムな刺激音の呈示を 1 セッションとし、1 被験者につき 4 セッション ((1),(2) とホワイトノイズ、TSP 信号の組み合わせ) の実験を行う。回答は、12 方向と頭内頭外が区分けされた紙に刺激音の呈示番号を記入して行う。(1) と (2) で音像定位の精度に差が生じるか聴取実験を行い比較する。(2) の音像定位の正確さが (1) と同等以上であれば、適切な HRTF が選択され畳み込まれているといえる。

5.2 音場シミュレーションの評価実験

5.2.1 装置

本研究では、音場シミュレーションで模擬し計算したインパルス応答に、音源である MP3 レコーダー (R-09HR) でモノラル録音したバンドの演奏音 (ボーカル、エレキギター、エレキベース、ドラム) を畳み込むことで音刺激を作成した。それらの聴取にはヘッドホン (ATH-AVA300) を使用する。音源のバイノーラル録音にはバイノーラルマイク (BME-200) を使用。モノラル録音には MP3 レコーダー (R-09HR) を使用する。原音場での音源再生にはスピーカー 2 台、各楽器のアンプ及びキャビネットを用いる。

5.2.2 刺激

以下の二つの音を用意する。

- (1) 実際のホールで音源をダミーヘッドを聴取者としてバイノーラルで収録した音
- (2) 同一のホールを模擬し、音場シミュレーションによって 2 方向インパルス応答に、音無響音室でモノラル録音した音源を畳み込んだ音

模擬するホールは法政大学小金井キャンパス東館体育館とする。

5.2.3 手続き

(1) 原音場でバイノーラル録音した音源と (2) 音場シミュレーションで模擬し計算したインパルス応答を畳み込んだ音のスペクトログラムを比較する。

5.3 立体音響システムの評価実験

5.3.1 装置

本研究では、音場シミュレーションで模擬し計算したインパルス応答に HRTF を畳み込み、さらに音源である MP3 レコーダー (R-09HR) でモノラル録音したバンドの演奏音 (ボーカル、エレキギター、エレキベース、ドラム) を畳み込むことで音刺激を作成し提示した。モノラル音源の録音には MP3 レコーダー (R-09HR) を使用する。これらの聴取にはヘッドホン (ATH-AVA300) を使用する。

5.3.2 刺激

以下の二つの音を用意する。

- (1) ホールを音場シミュレーションによって模擬し被験者が選択した HRTF を畳み込み、音無響音室でモノラル録音した楽器音源を畳み込んだ音
- (2) ホールを音場シミュレーションによって模擬しランダムに選択された HRTF を畳み込み、音無響音室でモノラル録音した楽器音源を畳み込んだ音
- (3) 楽器のモノラル音源を疑似ステレオ化した音

模擬するホールは法政大学小金井キャンパス東館体育館とする。

5.3.3 手続き 1

【被験者】聴覚健全な男性 1 名 (22 歳)

【評価項目】臨場感の評価要素として Q1~Q5 を、本システムのコンテンツとしての魅力を提示するために Q6~Q8 を必要な

項目として考えた。

表 2. 実験に用いた評価項目

No.	質問項目
(臨場感について)	
Q1	音に距離感を感じる
Q2	音に方向感を感じる
Q3	音に包まれている
Q4	情景が分かる
Q5	リアクションしたくなる
(総合評価項目)	
Q6	自分がその場にいるように感じる
Q7	音に動き又は変化を感じる
Q8	楽しめる

【手続き】8 評価項目についてリッカート法 (5 段階) を用いて主観評価実験を行う。被験者に各音源に対し、それぞれの評価項目について、「1:まったく感じない」から「5:とても感じる」までの 5 段階で回答させる。[9]

6 結果及び考察

6.1 選択式頭部伝達関数選択システムの評価

まず、被験者の音像定位正答率の平均を求めた結果、(1) ダミーヘッドで録音した音を用いた際の正答率は 21 %、(2) 選択 HRTF を用いて呈示した際の正答率 (音像の位置を正しく回答した割合) は 37 % となった。(2) の音像定位の正答率が (1) と同等以上であったことから、被験者に適切な HRTF が選択され積み込まれているといえる。次に、音源ごとの音像定位の呈示位置と被験者の回答位置の分布平均の例を図 5 図 6 に示す。図 5 は正比例の見える散布図となっている。これは理想の音像定位結果 [8]、に近い形である。一方、図 6 は、前後での間違いが多く、理想的でない音像定位結果であるといえる。散布図からは、それぞれの方向で音像定位ができていないかも見ることができ、そこから評価の低い部分は重点的に HRTF の改善が必要であると考えられる。

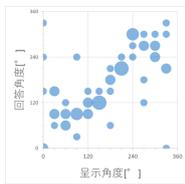


図 5. 選択された HRTF を積み込んだ際の音像定位結果

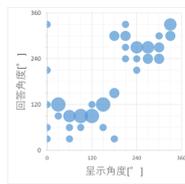


図 6. ダミーヘッドで録音した音の音像定位結果

6.2 音場シミュレーションの評価

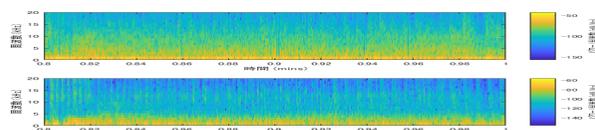


図 7. 上から、原音場におけるバンド演奏音右 ch, 音場シミュレーションにおけるバンド演奏音右 ch のスペクトログラム

(1) と (2) のスペクトログラムを比較した結果、シミュレーション音は原音場での音よりパワーの小さい部分が多い。これは、原音場での音源には残響が含まれ音声終端がぼやけていたのに対して、シミュレーション音は音声終端がはっきりして聴取比較しても、原音場に比べると残響が少ないと感じられる。今回の音場シミュレーションのパラメータの一部である「残響時間」や「吸音率」を調整することで残響を変化させるは可能である。しかし、パラメータを限界値に設定したが、精度の高い結果は得られなかった。よって、音場シミュレーションの計算法やその他のパラメータなど改良する必要がある。

6.3 立体音響システムの評価

図 8,9 では評価値が 5 に近いほど高評価である。立体音響システムを用いて再生した音は、「音に包まれている」「リアクションしたくなる」といった項目に対して評価が低かった。これは、音場シミュレーションの精度における残響が足りていな

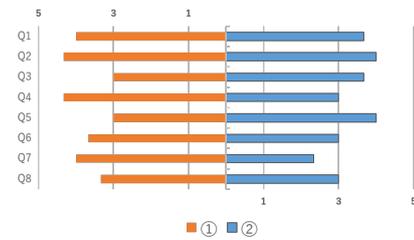


図 8. 立体音響システムの評価アンケートの結果①本システムによって再生した音,②ランダムな HRTF を積み込んで再生した音

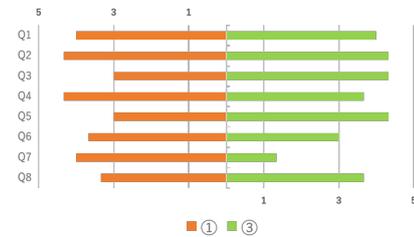


図 9. 立体音響システムの評価アンケートの結果①本システムによって再生した音,③モノラル音源を疑似ステレオ化した音

いという点や迫力に欠けるという点が原因であると考えられる。「音に方向感を感じる」「音に動き又は変化を感じる」などの項目が高い評価を得られたのは、選択した HRTF が有効的に組み込まれているためであると考えられる。

7 まとめ・今後の展望

本研究では、臨場感が高くかつ簡易的な 2ch 立体音響システムの提案のために、音場シミュレーション手法の検討と選択式を用いた HRTF の個人化システムを導入して評価実験を行った。選択式 HRTF 個人化システムにおいては、バイノーラル録音と同等の音像定位感を得た被験者の割合は 100 % で、このシステムの高い有効性を得ることができた。音場シミュレーションの導入は、部屋のサイズや障害物の情報を自由に変更できるため、場所や観客数が定まらないコンサートなどを模倣するのに汎用性が高いと言える。選択式 HRTF 個人化システムは、今回使用した HRTF が被験者すべての最適な HRTF をカバーすることはできていなかった。しかし、呈示する HRTF を見直すことで、より多くの人の HRTF を最適に個人化できると考えられる。また、信憑性向上のため被験者を追加して実験を行う予定である。

8 関連研究

参考文献

- [1] 西隆司, “最近の音場バーチャルリアリティシステムについて”, 日本音響学会誌, 1995, pp.965-970.
- [2] 岩谷幸雄, “小特集一音と映像で体験できる聴覚の不思議な世界—バイノーラル録音と再生—いろいろな耳で聞いてみる—”, 日本音響学会誌 61 巻 5 号, 2005, pp.289-294.
- [3] 岩谷幸雄, “小特集—頭部伝達関数とその応用— 頭部伝達関数による音像定位 —個人化へ向けたデータ群と課題—”, 日本音響学会誌 73 巻 3 号, 2017, pp.173-180.
- [4] 河野嘉憲, 長谷川光司, 阿山みよし, 春日正男, “動的マルチメディア環境での視覚と聴覚の相互作用”, 映像情報メディア学会技術報告 Vol25.No.64., 2001, pp.1-6.
- [5] MøllerH., “Fundamentals of Binaural Technology”, Applied Acoustics, 1992, 36(3/4), pp171-218.
- [6] 山本和彦, 五十嵐健夫, “Adaptive Variational AutoEncoder による 3 次元音響の特定個人への知覚ベースキャリブレーション”, 日本音響学会誌, 1995, pp.965-970.
- [7] <https://github.com/TWOEARS/SOFA>
- [8] 森川大輔, “はじめての音像定位実験”, 日本音響学会誌 74 巻 10 号, 2018, pp.547-554
- [9] 小林 まおり, 福井 誠人, 上野 佳奈子, “3 次元音場再現システムでのコンテンツ選択における指針の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 19 巻 1 号, 2014, pp.37-45