

立体音場合成システムの開発

渡辺 充敏 坪井 政義
平野 滋

Development of a 3-Dimensional Sound Field Simulation System

Mitsutoshi Watanabe Masayoshi Tsuboi
Shigeru Hirano

Abstract

This sound field simulation system was developed for acoustic design and psychological experiments of sound fields. This system has the feature of signal processing done for input to both ears throughout from numerical simulation to reproduction. The reproduction mode of this system appears like an ordinary stereo system, but it can reproduce a 3-dimensional sound field by using an active signal processing technique which cancels out cross-talk from the two speakers.

This paper describes the method of creating a 3-dimensioned sound field from a computer simulation and the organization of this system, and an experiment of a differential threshold about direction of sound source, which was used for a study on handling of directional information. As a result of the experiment it was learned that the threshold was changed by the direction of the sound source and its motion.

概要

今回開発を行った立体音場合成システムは、音響設計支援、各種の評価実験に用いることを目的としており、数値シミュレーションから再生まで、一貫して両耳への入力に着目した処理を行っているところに特徴がある。本システムの再生形態は、見かけ上通常のステレオと同様であるが、アクティブコントロール技術（キャンセリング—音を音で打ち消す—）を応用し、左右のスピーカの音が混じり合うのを防いで、立体的な音場を得ている。本報では、数値シミュレーションからの立体音場合成手法およびシステムの概要について示す。

また、本システムの根幹をなす方向情報をより人の感覚を合致させるための扱いについて検討を加えるため、人の音の方向の違いを聴き分ける能力に関する実験を行った。その結果、音の到来方向より、方向の違いを聞き分ける能力は大きく変化することがわかった。

1. はじめに

数値シミュレーションによってコンサートホール等の音場を精度よく予測できるようになってきたが、出力される物理量は一般に実感として捉えにくく、実際に音として聴けるシステムの開発が望まれた。また、計算の結果得られた物理量を音響設計に有効に利用していくためには、音場を構成する様々な要素と評価の関係を明らかにしていく必要がある。

今回開発を行った立体音場合成システムは、音響設計支援、各種の評価実験に用いることを目的としている。本システムは、両耳への入力に着目した処理を行っていることに特徴がある。再生形態は見掛け上、通常のステレオと同様であるが、アクティブコントロール技術の応用（キャンセリング—音を音で打ち消す—）により、スピーカからの音が左右で混じり合うのを防ぎ、立体音場を

得ている。また、本システムでは、数値シミュレーションからの音場を合成するだけではなく、既存ホールなどでの生演奏も実験室内に再現できるので、シミュレーションを行った架空のホールと著名ホールの音場の比較試験など、多様な使い方が可能である。

本報告では、数値シミュレーションからの音場合成手法、システム構成について示す。また、本システムにおいてより人の感覚に合致した方向情報の操作を行うために、方向の違いを聴き分ける能力（方向弁別能力）に関する実験を行ったので、あわせて示す。

2. 再生方法

人は左右二つの耳で音の到来方向など様々な情報を知ることができるが、実験室内において立体的な音場を得るためには、方向、響きなどの情報を含む信号を、どのようにして受聴者の左右の耳（両耳）に正確に入力する

か、が重要となろう。本システムでは、両耳に入力する信号の制御が可能であることから、OSS¹⁾ (Orthostereophonic System) を利用した再生を行っている。

耳の数に対応した2チャンネルによる再生を考えると、通常のステレオ再生では、左のスピーカからの音を左耳だけに入力しようとしても、右のスピーカからの音が受聴者の頭部を回り込んで乱し、正確な信号の入力が実現できない。そこで、本システムでは、アクティブコントロール技術の一つであるキャンセリング（音を音で打ち消す）を応用している。図-1では右のスピーカからまわり込んでくる音（実線）を左のスピーカからの同振幅、逆位相の音（点線）で、左耳に入る時点で打ち消している様子をモデル化して示している。

また、本システムでは、ホールなどで耳の部分にマイクを仕込んだ擬似頭 (Dummy Head) を用いて録音した音に上述の処理を加えることにより、実験室内に立体音場を再現できる。

3. 数値シミュレーションからの音場合成

数値シミュレーションにおいても、両耳への入力に着目した処理を行っており、音場合成のための数値シミュレーションは、二つのステップからなる。一つめのステップでは、波面積分法を用いて受音点への方向別インパルス応答の算出²⁾を行う。二つめのステップでは、得られた方向別インパルス応答が、頭部形状などの影響を受けながら両耳に入力される際の音響特性の変化（頭部伝達関数）を考慮しながら、数値シミュレーションからの音場合成の基となる両耳でのインパルス応答の算出を行う。

3.1 数値シミュレーションへの頭部伝達関数の組み込み

方向別インパルス応答から、両耳でのインパルス応答を算出するため、数値シミュレーションに空間の分割数に対応した頭部伝達関数の測定データを組み込んだ。空間の分割は細かいほど精度良い計算が可能であると考えられるが、分割数の増加は直接、演算時間、データ量の増大につながるため、実用上の制限から図-2に示すように、ほぼ均等に142分割とした。しかし、従来の同種のシステムでは、最大で24分割程度であったことを考えると、6倍近くの細かさが得られている。

頭部伝達関数の測定は、無響室において耳の部分にマイクを仕込んだ擬似頭 (Dummy Head) を用いて行った。測定の様子を写真-1に示し、その結果得られた水平方向の入射音に対する頭部伝達関数の例を左右一組で図-3に示す。音の入射方向によって、周波数特性や両耳でのレベル差が変化するのがわかる。人は、このような伝達関数の方向による変化および左右の耳で生じる時間差から、音の方向を判定している。

3.2 両耳でのインパルス応答の算出

波面積分法で算出された方向別インパルス応答に、方向に対応した左右一組の頭部伝達関数を畳み込み、重ね合わせることで、両耳でのインパルス応答を算出している。実施例について、簡略化して図-4に示す。

4. システムの概要

4.1 構成

構成図を図-5に示す。信号処理に適したEWSを用い、全体の構成を非常にシンプルなものとした。スーパーコンピュータによって算出された両耳でのインパルス応答は、ネットワークを通じてEWSに転送され、キャンセリングに必要な操作などはEWS上で行う。

4.2 特徴

本システムの特徴について次に示す。

- ① 同一システムで、数値シミュレーションなどから

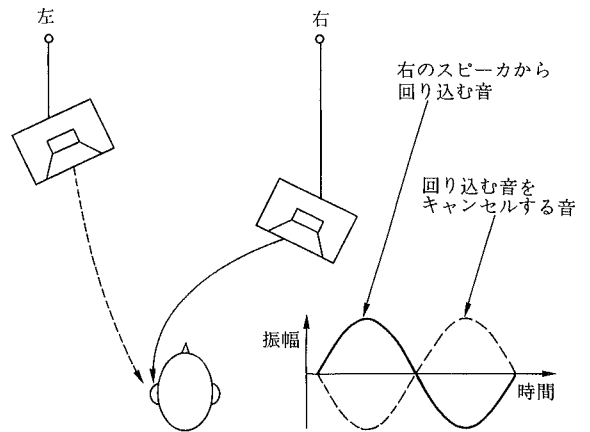


図-1 キャンセリングの概念図

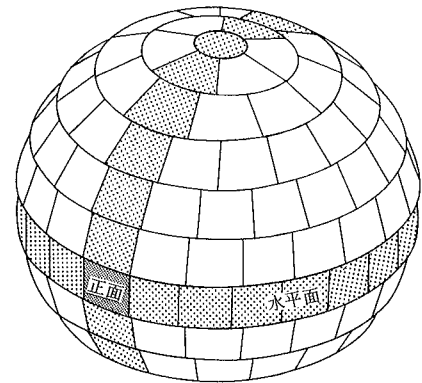


図-2 空間の分割の様子



写真-1 頭部伝達関数測定の様子

の合成音場とホールなどで録音した既存音場の再生ができ、合成音場と既存音場の一対比較など様々な評価実験が可能となる。

② システムの大部分が、ソフトにより構成されているため、変更・改良が容易である。インパルス応答とドライソースとの畳み込みもソフトにより行っているため、ハードによる制限を受けず、残響成分も初期反射音と同様に扱うことができる。

③ 受聴形態は、通常のステレオと同様である。現在多く使われているマルチスピーカのように大掛かりな装

置は必要なく、そのぶん高品質のものが使える。また、設置・撤去も容易である。

④ 耳の近傍に設置したスピーカによる再生でも立体的な音場が得られる³⁾。これにより可搬型システムとすることができ、再生を行う場所の制約をほとんど受けない。

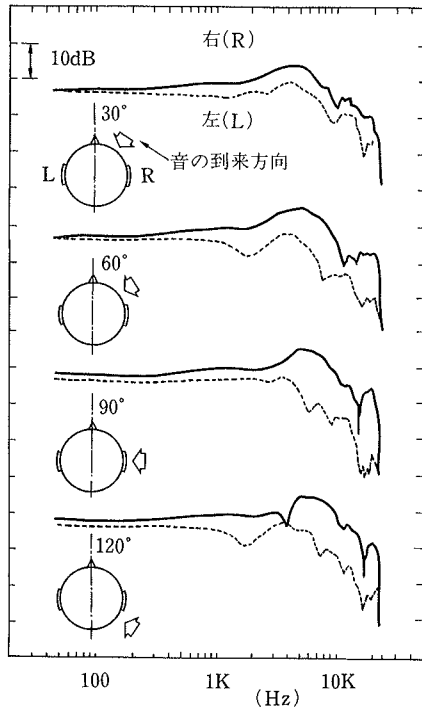


図-3 数値シミュレーションに組込んだ頭部伝達関数の例

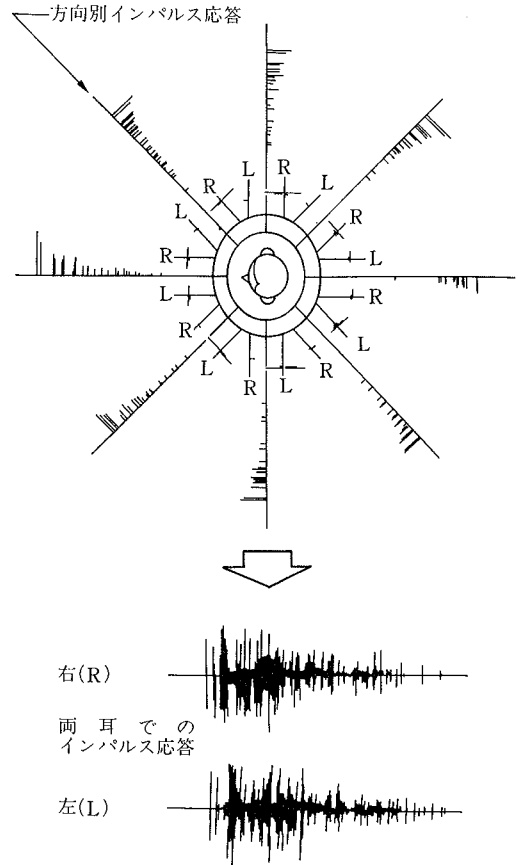


図-4 数値シミュレーションによる両耳でのインパルス応答の算出

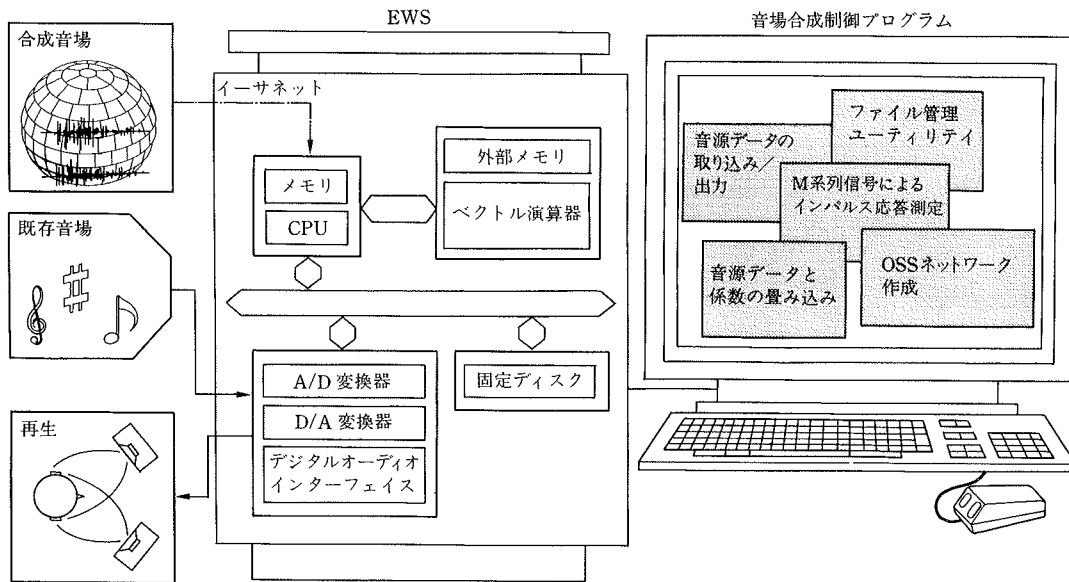
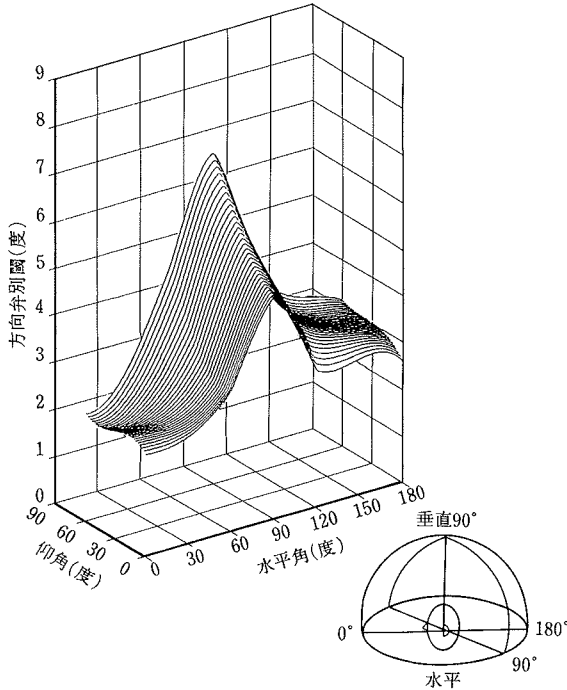
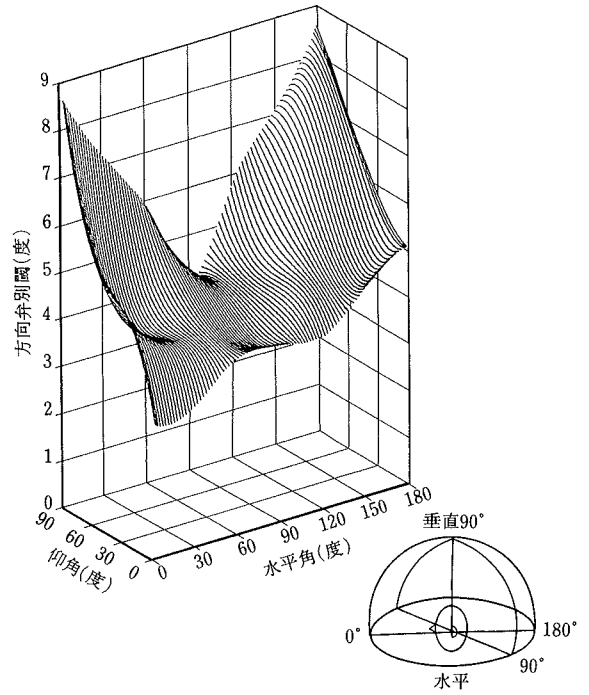


図-5 システム構成



図—6 音源の水平方向変化による弁別閾



図—7 音源の垂直方向変化による弁別閾

5. 音場合成のための方向弁別能力の検討

以上、開発を行ったシステムの概要を述べてきたが、空間の方向情報の分割数は、人の方向弁別能力とシステムの制御能力によって、必要条件を満たしながら最小限の数にすることが望ましい。そこで、数値シミュレーションからの音場合成の際の空間の合理的な分割方法について検討を加えるため、上半球についての方向弁別能力の測定を行った。

5.1 測定方法

被験者を中心とした半球上の任意の位置に、おのおの3.9°の角度をなす七つのスピーカを円弧状に配置した。中心のスピーカを基準方向とし、まず基準方向からの音を被験者に提示し、ついでその他のスピーカからの方向の変化した音を提示する。両者の方向の違いがわかるかどうかを被験者に判定させ、判定が入れ替わる間の角度をもって弁別閾とした。基準方向は水平角、仰角とも30°おきに設定した。音源の変化方向は、水平および垂直方向の2方向について行い、被験者数はそれぞれ10名と6名である。

5.2 測定結果および考察

水平方向、垂直方向の音源の変化に対する弁別閾の実験結果の平均値を補完し、3次元表示したものを、それぞれ図—6、7に示す。弁別閾が小さいほど、方向弁別能力が高いことを表す。

図—6の水平方向の変化に対する弁別閾を見ると、方向弁別能力は前後で高く、横方向で低下している。また、仰角が大きくなるほど低下しているが、前後で高く、横方向で低くなる同様の傾向を示している。図—7の垂直方向の変化に対する弁別閾では、横方向で若干方向弁別

能力が向上しており、仰角による変化も小さいが、その他の水平角では仰角が大きくなるほど、方向弁別能力が低下している。

以上のことから、垂直方向の変化に対しての方が、一般に弁別能力が高く、それぞれについて見ると、水平方向の変化では正面、垂直方向の変化では、横方向の弁別能力が良いのがわかる。したがって、空間の分割は、正面前方で最も細かくする必要があることがわかる。

6. おわりに

数値シミュレーションから、再生までの一連の立体音場合成システムの開発を行った。今後は、方向弁別能力の実験結果を、空間の分割方法、方向情報の操作方法に反映させ、響きの量などのパラメータを操作し、自由に音場を作れるシステムに発展させて行く予定である。また、立体音場の再生を耳の近傍に設置するイヤースピーカまたはヘッドフォンを用いた可搬型の装置でも可能とし、各種の評価実験、プレゼンテーションに活用していきたい。

参考文献

- 1) 浜田晴夫：基準的集音・再生を目的とする Orthostereophonic System の構成、音響学会誌 Vol. 39, No. 5, p. 337~348 (1983)
- 2) 坪井政義, 平野 滋, 池上雅之, 表 佑太郎：波面積分法 (PEIM) による室内音場予測の方向別インパルス応答の計算 — コンピュータによる室内音場予測その1—, 日本音響学会講演論文集 p. 789 (1991)
- 3) 吉田 実, 下平美奈子, 三浦種敏, 浜田晴夫：イヤースピーカを用いた新しい OSS 再生方式, AES 東京コンベンション '91 予稿集 p. 138~141 (1991)