

# 没入型多面ディスプレイのためのインタラクティブ 高臨場感音場提示手法

小木 哲朗<sup>\*1,\*2</sup> 茅原 拓朗<sup>\*1,\*2</sup> 加藤 允文<sup>\*2</sup> 浅山 宏<sup>\*3</sup> 廣瀬 通孝<sup>\*2</sup>

## High Presence Interactive Sound Field Simulation for Multi-screen Immersive Projection Display

Tetsuro Ogi<sup>\*1,\*2</sup>, Takuro Kayahara<sup>\*1,\*2</sup>, Masafumi Kato<sup>\*2</sup>, Hiroshi Asayama<sup>\*3</sup> and Michitaka Hirose<sup>\*2</sup>

**Abstract** - This paper describes the high presence interactive sound field simulation method that can control virtual sound field interactively in the multi-screen immersive projection display. In this method, convolution filters, that were calculated based on the wave equation, are replaced in real-time using the multi-channel digital signal processor, and the simulated sounds are displayed using the 16-channel speaker system. In addition, compensation filters are used in order to reduce the influence of the screen attenuation. This system was applied to the video avatar communication system in the shared virtual world, and the effectiveness of this method was evaluated.

**Keywords** : interactive sound field simulation, immersive projection display, multi-channel digital signal processor, multi-channel speaker system

### 1. はじめに

バーチャルリアリティの視覚ディスプレイ装置として、CAVEやCABINに代表される没入型多面ディスプレイの研究開発が盛んになってきた[1][2]。これらのディスプレイ装置は、広視野の立体映像を提示することで、臨場感の高い仮想世界を提示することが出来る。しかしながら、没入型多面ディスプレイと共に用いるべき高臨場感の音響ディスプレイ技術に関しては、種々の研究が行われてはいるものの、いまだ決定的な手法が確立されていないのが現状である[3][4][5]。

バーチャルリアリティで用いられている代表的な音響提示技術としては、頭部伝達関数 (HRTF: Head Related Transfer Function) を用いる方式があげられる[6][7]。この方法は、自由空間で計測された頭部伝達関数を音源信号に畳み込むことで、インタラクティブな音像定位を実現することができる。しかし、頭部伝達関数には、音の反射や回折等の空間内の影響が含まれないため、これだけでは仮想世界内の音響特性を表現することはできない。頭部伝達関数による音像定位手法を用いながら、仮想音源を仮定することで反射音の模擬を行ったり、透過損失等の代表的な音響特性フィルタを畳み込む研究も行われてい

る[8][9]、仮想音源数の制限や音響特性フィルタのインタラクティブ性の問題から、複雑な仮想世界の音場を十分に表現することは困難である。

一方、反射音の影響等を含む臨場感の高い音場を再現する方法として、幾何音響解析や波動音響解析に基づいた数値シミュレーションによって、受聴点におけるインパルス応答を算出する方法があげられる[10][11][12]。これらの方法は、音の粒子性や波動性を考慮することで、空間的な音響特性を精度良く求めることができるため、コンサートホールの設計等の建築音響の分野で広く利用されている。しかしながら、これらの数値シミュレーションは一般に計算負荷が大きいため、インタラクティブな出力が要求されるバーチャルリアリティの音響シミュレーションとして、リアルタイムに利用することは難しい。

本研究では、バーチャルリアリティの音響ディスプレイとして、仮想世界における音の反射や回折等の空間的な音響特性を含んだ音場を、インタラクティブに提示可能なディスプレイ技術を開発することを目的としている。またここで開発する手法は、没入型多面ディスプレイと共に利用可能にすることで、視聴覚ともに高い臨場感を持つ統合的な仮想世界の構築を行うことを目指している。

没入型多面ディスプレイは、HMDに比べて複数の利用者が仮想世界を同時に体験できるという特徴がある。そのため、音響システムに関しても個人毎に提示を行うヘッドフォン方式ではなく、マルチスピ

\*1: 通信・放送機構さふMVLリサーチセンター

\*2: 東京大学IML

\*3: リアルウェーブリサーチジャパン

\*1: Gifu MVL Research Center, TAL

\*2: IML, University of Tokyo

\*3: Real Wave Research Japan

一カを用いた音場提示型のシステムを用いる方法が適していると考えられる。また、没入型多面ディスプレイでは利用者を囲い込むようにスクリーンが配置されるため、スピーカからの出力音がスクリーンによって減衰等の影響を受けるといった固有の問題も存在する。そのため、これらの問題を解決しつつ、臨場感の高い音響ディスプレイ技術を開発することがここでの課題である。

このような要求に応えるため、本研究では波動方程式に基づいて計算されたインパルス応答のフィルタをリアルタイムに切り替えることで、インタラクティブな3次元音場を生成する手法を開発した。またこの際に、スクリーンの透過に関する逆特性を補正用フィルタとして用いることで、スクリーンによる音の減衰の影響を軽減する方法を用いた。以下、本論文では、提案するインタラクティブ音場提示手法の原理と没入型多面ディスプレイCABINへの実装方法、および試作システムを用いた知覚実験、バーチャルリアリティの応用システムへの適用例等について述べる。

## 2. インタラクティブ音場シミュレーション

### 2.1 基本原理

本研究で提案する手法は、まず波動方程式に基づいた数値シミュレーションによって、仮想空間内の音源と受聴者の位置関係に対するインパルス応答を計算する。数値シミュレーション手法としては、有限要素法や境界要素法等を用いた種々の解析手法が提案されているが、ここでは有限音線積分法と呼ばれる方法を用いた[13]。この方法は、キルヒホッフ積分方程式をもとにしながら、音源から放射される多数の音線ベクトルを用いることで、要素分割を行わずに、比較的短時間で計算を行うことができるのが特徴である。

音の出力にマルチスピーカ方式を用いる場合、各音線に対して計算されたインパルス応答は、音線の

到来方向を取り囲むスピーカに振り分けられ、スピーカ毎にこれを合計していくことで、最終的に各スピーカに与えられるインパルス応答が算出される。このインパルス応答に音源信号を畳み込むことで、受聴者の周りの音場を再現することができる。

図1は、以上の音場シミュレーション手法の原理を図示したものである。この方法は、空間的な音響特性を含むシミュレーション手法を用いることにより、臨場感の高い音場を生成することができる。例えば、本手法を用いることで間接音の生成を行ったり[14]、壁面による反射音の影響を含んだ音像定位[15]等が再現されている。

しかしながらこの方法は、与えられた音源と受聴者の位置関係に対して計算されたインパルス応答を使用しているため、静的な音場しか生成することができない。そのため、音源あるいは受聴者が仮想空間内で移動する場合には、その都度新しいインパルス応答に置き換えるが必要になる。このインパルス応答の計算は負荷が大きいので、リアルタイムで実行することは不可能である。そこで本研究では、あらかじめ想定される音源と受聴者のあらゆる位置関係に対してインパルス応答を求めておき、これを動的に切り替えることで、インタラクティブな音場の変化を実現する方法を開発した。

具体的には、構築された仮想世界を等間隔の立方体格子にメッシュ分割し、音源と受聴者はメッシュのグリッド（格子点）上に位置するものとした。このとき、音源と受聴者がそれぞれ移動する可能性のあるあらゆるグリッドの2点間（例えば、音源は3次元的に動くが、受聴者は耳の高さだけに限定できる）でインパルス応答を計算しておき、音源や受聴者の動きに応じて最も近いデータを使用することで、インタラクティブな音場の変化を実現しようというのが本手法の基本原理である。この際、必要なメッシュ間隔については、対象とする仮想世界に依存するため、改めて4章で議論を行うことにする。

また本研究で開発するシステムは、没入型多面ディスプレイで使用することを想定し、音の出力にはマルチスピーカによる提示方式を用いることとした。数値シミュレーションで計算された音場をヘッドフォンを用いて提示する方法も考えられるが、この場合音場を表すフィルタに更に頭部伝達関数を畳み込む等の処理が必要になる。これに対してマルチスピーカ方式では、利用者の頭の回転に応じて提示音の制御を行う必要がないという特徴がある。また、数値シミュレーションで計算されるインパルス応答は、厳密にはディスプレイ中央位置の受聴点における音場を表すことになるが、スピーカ数を増やすことで、

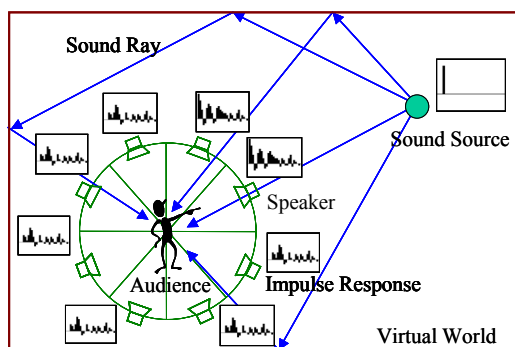


図1 音場シミュレーション手法の原理

Fig.1 Basic Principle of Sound Field Simulation Method

中央近傍の領域では近似的な音場が生成されると考えられる[16][17].

各インパルス応答の計算では、等立体角状に約1934万本の音線を放射させ、150msまでの計算を行った。計算には16CPUの並列計算機SGI Origin2000を用いた場合、1ケースあたり1CPUを用いて数時間を要したが、複数ケースの計算では並列化を行うことができるため、比較的効率良くデータセットの作成を行うことが可能であった。

## 2.2 マルチチャンネル畳み込み演算装置

インタラクティブ音場提示手法をシステムとして実現するためには、マルチチャンネルの畳み込み演算をリアルタイムに実行しながら、音源と受聴者の位置関係の変化に応じて使用するインパルス応答のフィルタをインタラクティブに切り替えられることが必要である。このような機能を実現するため、本研究ではマルチチャンネルの畳み込み演算装置 WAVE ENGINEの開発を行った。

図2は開発したWAVE ENGINEの外観、図3は機能構成を图示したものである。このシステムは1入力のデジタル音源データに対して、16チャンネルの音響フィルタデータとの畳み込み演算をリアルタイムで行うことができる。フィルタは、32タップのマルチタップフィルタと512タップのFIRフィルタから構成されている。マルチタップフィルタはインパルス応答の畳み込み演算用に、FIRフィルタは後述するスクリーン補正用のフィルタとして使用される。各フィルタはそれぞれ2系統を有しているため、直接音の制御と反射音の合成を分けて行うこともできる。これらの演算を高速に行うために、DSPとしてAnalog Devices社のADSP-21065Lを37個使用した。

また、マルチタップフィルタはメモリ上に最大3072種類のフィルタデータを格納しておくことができ、畳み込み演算中に使用するフィルタデータを動的に切り替えることができる。本手法では、各メッシュ点上の音源と受聴者の位置関係について計算されたインパルス応答のデータをメモリ上に格納し、これを切り替えながら使用することで、インタラクティブな音場の変化を実現する。



図2 マルチチャンネル畳み込み演算装置WAVE ENGINE  
Fig.2 Multi-channel Digital Signal Processor: WAVE ENGINE

この際、フィルタデータの切り替えによって出力音が不連続にならないように、クロスフェーディングの切り替え機能を持たせた。この方法では、フェードアウトテーブルとフェードインテーブルに、それぞれ最大1000個の係数データ列で表される任意のフェーディングのグラフ形状を定めることができる。フェーディングの処理は、図4に示すように、現在のフィルタとこれから切り替えるフィルタの2つのデータが用意され、音源にそれぞれのフィルタを畳み込んだ後に、フェードアウトテーブルとフェードインテーブルで指定された係数を掛け合わせた和が提示される。このフェードアウトテーブルとフェードインテーブルの中で使用する係数値を順に変えていくことで、出力音をなめらかに切り替えることができる。

クロスフェーディングを用いた音質変化の制御は一般にサウンドモーフィングと呼ばれることがあるが、16チャンネルの出力音に対して上記のフェーディングを行うことで、グリッド点毎に計算された臨場感の高い音場をなめらかに切り替える、“3次元音場モーフィング”を実現することが可能になる。

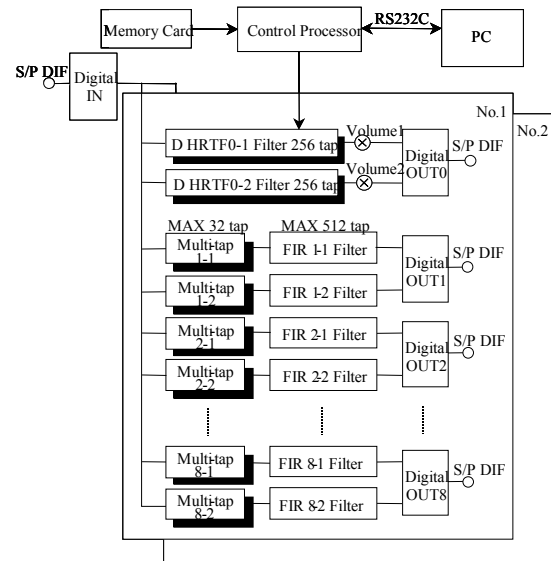


図3 WAVE ENGINEの機能構成  
Fig.3 Construction of Functions of the WAVE ENGINE

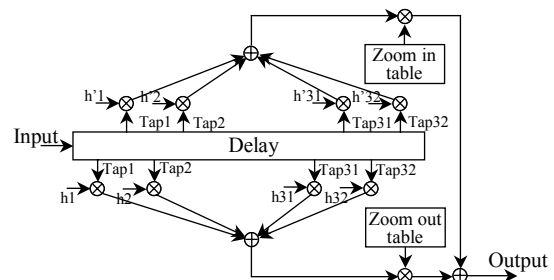


図4 マルチタップフィルタによるクロスフェーディングの方法  
Fig.4 Cross Fading Method Using Multi-Tap Filter

図5は、WAVE ENGINEを用いた音響ディスプレイ装置全体のシステム構成を示したものである。音源はA/D変換器を通してデジタルデータとしてWAVE ENGINEに入力され、畳み込み演算が行われた16チャンネルの出力音はD/A変換器を通してスピーカに送られる。また、WAVE ENGINEはRS-232CによってPCと接続され、PCから送られるコマンドによってフィルタデータの切り替えや畳み込み演算の実行等の制御が行われる。本システムをバーチャルリアリティのシステムに組み込む場合には、更に映像との同期をとる必要があるため、PCは映像生成用のグラフィックワークステーションとEthernetで通信を行いながら音場の制御を行う。

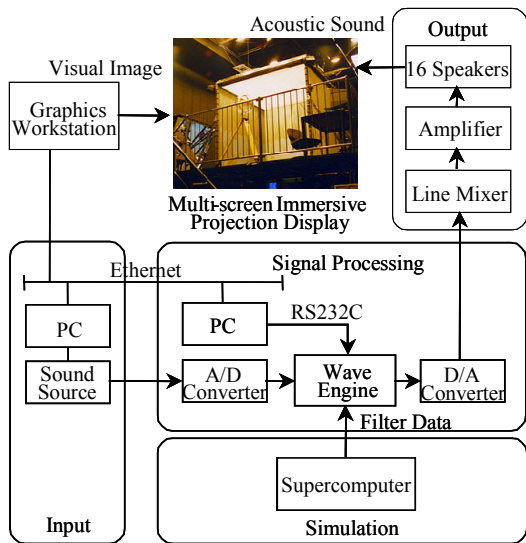


図5 WAVE ENGINEを用いた音響ディスプレイ装置  
Fig.5 Acoustic Display System Using WAVE ENGINE

### 3. CABINへの実装

#### 3.1 スピーカ配置

本研究では、インタラクティブ音場提示手法を没入型多面ディスプレイCABINに実装した。CABINとは、東京大学IMLで開発された5面構成の多面ディスプレイであり、立方体状のディスプレイ空間の正面、左右、上下の面がプロジェクタからの立体視映像を投影するスクリーンによって構成されている[2]。本手法では、マルチスピーカ方式による音場の提示を行うが、CABINと共に使用するためには、映像の妨げにならない位置に各スピーカを配置しなければならない。そのため、スクリーンの外側で、プロジェクタからの映像の投影領域に入らない位置に、16台のスピーカを配置した。

図6、図7は、没入型多面ディスプレイCABINのスクリーン周りに設置されたスピーカとその配置を

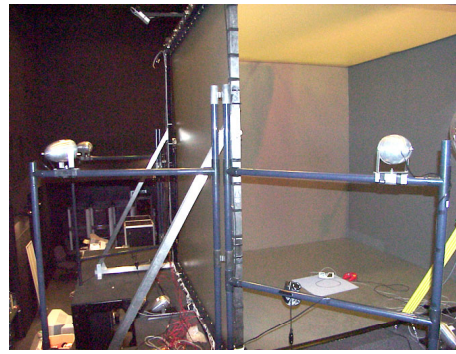


図6 CABINに設置したマルチスピーカ  
Fig.6 Multi-channel Speaker System Used in the CABIN

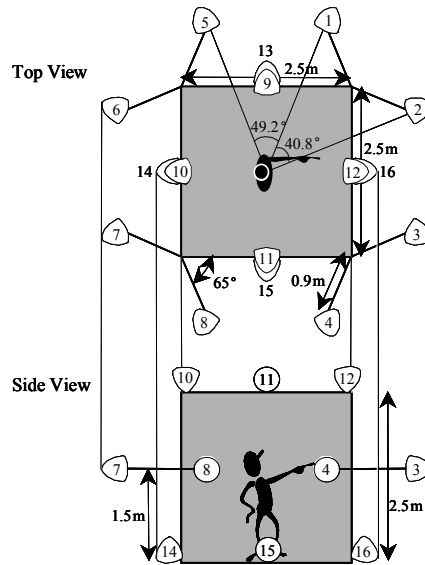


図7 マルチスピーカの配置  
Fig.7 Speaker Arrangement of the Multi-channel Speaker

示したものである。水平方向に関しては利用者の耳の高さ（床面から1.5m）に8台、上下方向に関してはスクリーンの各辺の中央位置にそれぞれ4台ずつが配置されている。各スピーカはWAVE ENGINEの16チャンネルの出力に対応しており、各チャンネルでインパルス応答との畳み込み演算が行われた結果が、出力音として提示される。

本手法では、各音線に対して計算されたインパルス応答を16台のスピーカに振り分けるが、この際、立体的に配置されたスピーカによって分割される三角形領域毎に振り分けを行った。離散的な伝達関数と任意方向の伝達関数に関しては、ある程度線形補間による合成の可能性が示されているため[18]、ここではVBAP (vector base amplitude panning) 法に従い[19]、各音線に関するインパルス応答が、音線近傍のスピーカに与えるインパルス応答の線形補間式と一致するように振り分けを行った。具体的には、音線が通過する三角形を構成する3つのスピーカに対する位

置ベクトルの重心が、対象とする音線ベクトルと一致するように分配率を決定した。例えば、図8に示すように、受聴点を原点とした3つのスピーカへの位置ベクトルを $s_1, s_2, s_3$ 、音線ベクトルと三角形との交点の位置ベクトルを $x$ とすると、各スピーカへの分配率 $a_1, a_2, a_3$ は

$$x = a_1 s_1 + a_2 s_2 + a_3 s_3 \quad (1)$$

を満たすように与えられる。

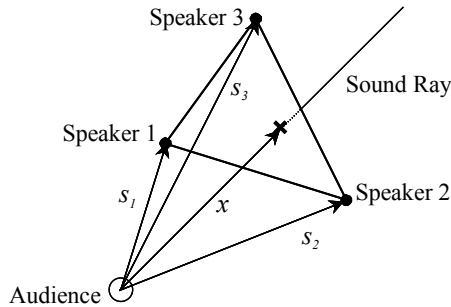


図8 インパルス応答のスピーカへの配分方法  
Fig.8 Division of Impulse Response among Speakers

### 3.2 スクリーン補正

上述のようなスピーカ配置を行う場合、受聴者から見てスピーカはスクリーンの背面に置かれるため、スクリーンの透過による音の減衰の影響を無視できなくなる。そのため、受聴者の耳元に正しい音場を提示するためには、スクリーンの透過による影響を補正することが必要になる。ここではスピーカからスクリーンを通して受聴点に到達するインパルス応答を計測し、この逆関数を補正用フィルタとして再生音に畳み込む方法を用いた。

ところで、CABIN内の受聴点におけるインパルス応答は、厳密にはスクリーンによる減衰の他に、スクリーン間での内部反射や背面からの回り込み等が混ざり合った複雑な影響を含んでいる。また、これらの影響はディスプレイ空間内の受聴位置によって異なるため、利用者がディスプレイ空間内を移動する際には複雑に変化する。そのため、ここでは簡単のために、利用者の移動に依存しない、スクリーン前後の透過の影響だけを補正することにした。具体的には、各スピーカとディスプレイ中央点を結ぶ直線上でスクリーンから30cm内側の透過直後のインパルス応答を計測し、この中から直接音に関する成分だけを取り出して近似的な補正用伝達関数を構築した。

図9は、スクリーンの透過直後に計測されたインパルス応答のデータ例、図10はこれから算出されたスクリーン補正用のフィルタデータを示したものである。スクリーン補正用フィルタデータは、計測さ

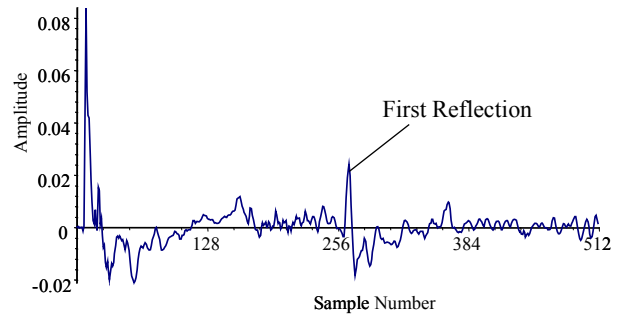


図9 スクリーン透過直後のインパルス応答データ  
Fig.9 Impulse Response Data after Passing through the Screen

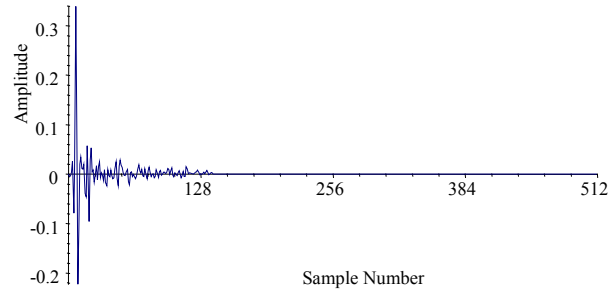


図10 スクリーン補正用フィルタデータ  
Fig.10 Compensation Filter Data for the Screen Attenuation

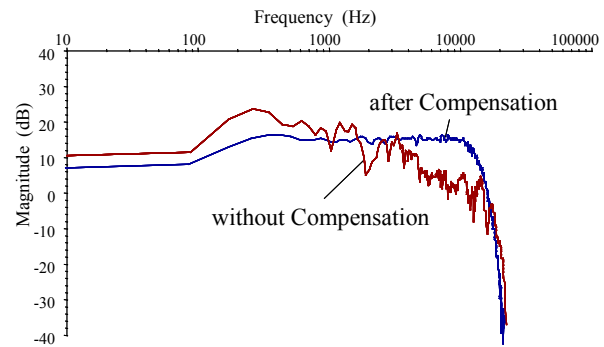


図11 補正用フィルタ使用時のインパルス応答  
Fig.11 Impulse Response Using the Compensation Filter

れたインパルス応答の一次反射のピーク以降をBlackmann-Harris窓関数を用いて減衰し、周波数領域で逆数を取ったものを時間領域に戻すことで作成を行った。

また、図11は補正用フィルタを用いた場合の、スクリーン直後に計測されたインパルス応答の周波数特性の変化を示したものである。グラフでは、補正を行わなかった場合と補正後のインパルス応答とが示されている。

この結果から、補正を行わなかった場合には周波数特性は大きく乱れていたのに対し、補正後にはかなり平坦なゲイン特性が得られていることがわかる。つまり、スクリーン近傍で計測されたインパルス応答から作られた補正用伝達関数を用いることによって、スクリーンの減衰の影響はかなり改善された

考えることができる。本システムでは、スピーカ毎に補正用伝達関数を作成し、WAVE ENGINEのFIRフィルタ上にセットすることで、各スクリーンに対する補正を行った。

#### 4. 知覚実験

##### 4.1 実験条件

本システムを用いることにより、没入型多面ディスプレイCABINで臨場感の高いインタラクティブな仮想音場を提示することが可能になるが、実際に仮想世界を構築する際には、どのくらい滑らかに音場が変化するか、またそのためにはどれくらいの間隔でインパルス応答のフィルタデータを用意する必要があるかといった問題について、十分に検討しておくことが必要である。ここでは、仮想音源の移動について、用意するフィルタデータの間隔、仮想音源の移動速度と、知覚される音場変化の滑らかさに関する評価実験を行った。

実験では、図12に示すような大きさ10m×10m、天井の高さ3mの仮想の部屋のモデルを用意し、仮想音源を床面から1.5mの高さ、被験者から5mの距離（遠距離）と1mの距離（近距離）でそれぞれ左から右への横方向に移動させた。この際、音源の移動に合わせて、視覚情報として音源位置にスピーカの映像を提示した。壁面での音の反射の影響を考慮するため、被験者は仮想の部屋の一方の壁面近く（左の壁から3mの位置）に立ってもらった。壁面は、天井を完全吸音面、その他は完全反射面とした。5mの距離の音源移動に対しては、フィルタデータを1.0m, 2.0m, 4.0mの間隔でそれぞれ用意し、音源を2.0m/s, 4.0m/sの速度でそれぞれ移動させた。また、1mの距離の音源移動では、フィルタデータを0.25m, 0.5m, 1.0m間隔で用意し、音源を0.5m/s, 1.0m/sの速度でそれぞれ移動させた。この条件で、遠距離、近距離のそれぞれの音源移動に対して、単位時間当たりのフィルタデータの切り替え回数は等しくなっている。

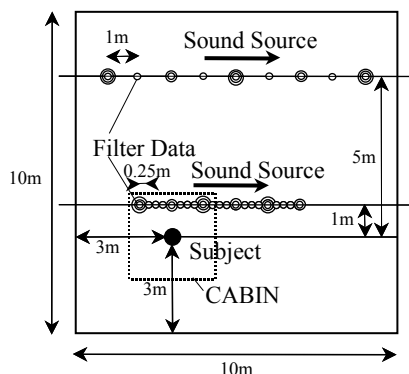


図12 知覚実験で使用した仮想の部屋

Fig.12 Virtual Room Used in the Perception Experiment

被験者はCABINの中央に立ち、仮想音源の移動を今回開発した音響ディスプレイ装置を用いて提示した。図中では、用意されたフィルタデータの音源位置とCABINとの関係が示されている。

##### 4.2 予備定位実験

実験では、まず各位置に置かれた仮想音源が本手法によって正しく聞こえるか、音像の定位精度に関する予備実験を行った。音源としてはホワイトノイズを使用し、近距離、遠距離の移動線上に静止音源を置き、被験者に音の聞こえる位置を答えてもらった。この予備実験ではスピーカの映像は提示せず、被験者はwandのコントローラで視覚表示されたマークを音源と思われる移動線上の位置に動かすことで回答を行った。被験者数は5人で、各移動線上から選んだ3点ずつの音源位置に対して、2回ずつ回答を行った。

図13は、予備定位実験の結果を示したものである。グラフでは、回答された定位方向の平均値と標準偏差が示されている。角度は正面方向を0度とし、右方向を正の角度としてある。この結果から、知覚された定位方向には多少のずれがあるが、それぞれ壁面に近い方向にずれているため、これは壁面による反射音の影響が表れたものと考えられる。

このような定位方向のずれを含め、本システムでは仮想空間の音場としての特性がシミュレーションされていると解釈することができる。また、音像定位の予備実験としては、各位置の音像方向は離れて知覚されており、仮想音源の移動感に関する評価実験を行う上では、十分な定位精度を確認することができた。

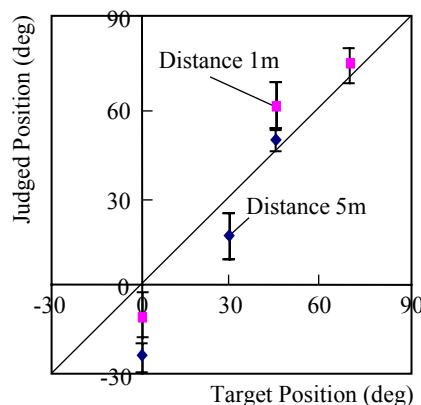


図13 予備定位実験の結果

Fig.13 Result of the Sound Localization Experiment

##### 4.3 音源移動実験

次に本実験として、仮想音源を被験者から5mと1mの距離でそれぞれ移動させ、フィルタの間隔と音源

の移動速度の各条件に対して、音像の変化の滑らかさを被験者に5段階で評価してもらった。仮想音源の移動によるフィルタの切り替えには、最も基本的な線形によるクロスフェーディングの方法を用い、切り替えに要する時間は4.5msとした。各条件につきホワイトノイズの仮想音源を左から右へ移動させ、被験者には評価の数値を口答で答えてもらった。被験者数は5人で、実験条件はランダムな順番とし、同一条件についてそれぞれ2回ずつ評価を行った。

図14は実験結果を示したものである。このグラフでは、各条件に関する評価結果の平均値と標準偏差が示されている。分散分析を行った結果、5mの距離の音源移動に関しては、フィルタデータの間隔、音源の移動速度のどちらについても有意水準5%で有意差が表れた。1mの音源距離に関しては、フィルタデータの間隔については有意水準5%で有意差が表れたが、移動速度に関する有意差は表れなかった。これはフィルタ間隔0.5m以下では、どの条件でも評価がほとんど高得点に達していたためと考えられる。

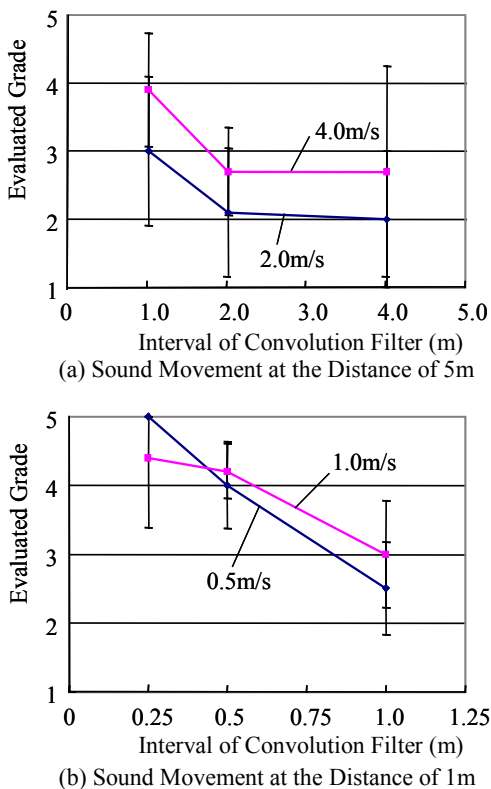


図14 音源移動の知覚実験の結果  
Fig.14 Results of the Perception Experiment on the Virtual Sound Source Movement

これらの結果から一般的な傾向として、用意するフィルタデータの間隔が小さいほど、音像の移動は滑らかに感じられることが分かる。また、音源の距

離が近いほど、あるいは音源の移動速度が遅いほど条件は厳しくなり、より小さい間隔でフィルタデータを用意する必要があることが分かる。これは、音源距離が近いほど音像変化に対する空間的な解像度が高くなること、また音源の移動速度がゆっくりであるほど音場変化の時間的な解像度が高くなることの原因として考えられる。用意すべきインパルス応答のフィルタデータの間隔に関する具体的な数値については、提示する仮想世界や音源と受聴者の位置関係等の条件によって異なるが、本実験で用いた一般的な部屋のモデルでは、評価点3.0以上で判断すると、約1.0m間隔程度でフィルタデータを用意する必要があるとすることができる。

### 5. VRアプリケーションへの応用

本研究で開発したインタラクティブ音場提示システムの有効性について評価を行うため、具体的なVRアプリケーションへの統合を行った。対象としては、ビデオアバタを用いた臨場感通信システムを取り上げた[20]。ビデオアバタとは、広帯域ネットワークを用いて没入仮想空間の共有を行う際に、ステレオカメラで撮影した利用者のビデオ映像をお互いに送受信し、共有仮想空間に合成することで、臨場感の高いコミュニケーションを行う方法である。

このシステムにインタラクティブ音場提示手法を統合することで、音響的にも臨場感の高い仮想空間を共有することが可能になる。特に、ビデオアバタの表示位置に相手の音声为正しく定位されることで、より自然な対話コミュニケーションが実現されることが期待される。

図15は構築したアプリケーションシステムを実行している様子を示したものである。実験システムでは、共有仮想空間として図16に示すような形状の部



図15 インタラクティブ音場提示を用いたビデオアバタ通信  
Fig.15 Video Avatar Communication Using the Interactive Sound Field Simulation

屋を用意し、図中の点で示したメッシュの格子点に置かれた音源と受聴者の位置関係について、それぞれインパルス応答フィルタの作成を行った。

利用者が仮想世界の中を移動すると、相手側ではビデオアバタの合成位置が移動すると同時に、音声に畳み込むフィルタデータが切り替えられる。この実験システムでは、仮想空間内でお互いの利用者が話をしながら移動してもビデオアバタに追従した音声の定位を実現することができた。特に、相手が視覚的に見えない位置に移動した場合でも、壁の陰から相手の音声聞こえてくるという状況を再現することができ、仮想空間共有における音響的な臨場感の向上を確認することができた。

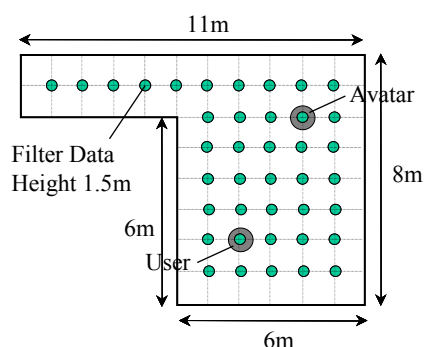


図16 仮想空間と音響フィルタデータの作成  
Fig.16 Grid Points for Preparing Convolution Filters

## 6. 結論

本研究では、波動方程式に基づいて計算された音響フィルタをリアルタイムに切り替えることで、臨場感の高い仮想音場をインタラクティブに提示する音響ディスプレイ技術の開発を行った。また、本手法を没入型多面ディスプレイCABINへ組み込むため、マルチチャンネル畳み込み演算装置WAVE ENGINEの開発、多面ディスプレイに対するスクリーン補正の導入等を行った。本システムを用いて音源移動に関する知覚実験を行った結果、一般的な仮想の部屋の中では約1.0m程度の間隔でインパルス応答を用意することで、滑らかな仮想音場の変化を実現することが確認できた。

以上の音響ディスプレイ技術を用いることで、臨場感の高い仮想音場をインタラクティブに提示するという本研究の目的はある程度達成することができた。実装上の課題としては、インパルス応答のデータセットの作成に多大な計算時間を要するという問題がある。今後の研究としては、インパルス応答データを容易に作成できるように、より高速な数値シミュレーション手法の開発、あるいは補間手法の導入によりインパルス応答データを近似的に作成する

方法等について検討を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., DeFanti, T.A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, *Proceedings of SIGGRAPH'93*, pp.135-142 (1993).
- [2] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J81-D-II, No.5, pp.888-896, (1998).
- [3] Bargar, R., Choi, I.: Model-based Interactive Sound for an Immersive Virtual Environment, *Proc. of International Computer Music Conference*, pp.471-474 (1994).
- [4] 田村祐一, 村井紀仁, 陰山聡, 花木聖一, 満岡耕造, 佐藤哲也: 仮想現実空間における立体音響システムの開発と数値シミュレーションモデルへの適用, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, pp.383-386 (1999).
- [5] 久木元伸如, Ewe Chin Huat, 竹田仰: プロジェクション型没入ディスプレイにおける3次元音場生成のための実用的検討, 電子情報通信学会応用音響研究会EA99-32, pp.29-36 (1999).
- [6] Wightman, F.L., Kistler, D.J.: Headphone Simulation of Free-Field Listening I- Stimulus Synthesis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.85, No.2, pp.858-867 (1989).
- [7] Wenzel, E.M.: Localization in Virtual Acoustic Displays, *PRESENCE*, Vol.1, No.1, pp.88-107 (1992).
- [8] Kendall, G.S., Martens, W.L., Simulating the Cues of Spatial Hearing in Natural Environments, *1984 International Computer Music Conference* (1984).
- [9] 四宮葉一, 澤田一哉, 野村淳二: 住空間音疑似体験システムの開発, 日本音響学会誌, Vol.49, No.7, pp.515-521 (1993).
- [10] Schroeder, M.R.: Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Spaces, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.47, pp.424-431 (1970).
- [11] 高根昭一, 田中淳, 鈴木陽一, 曾根敏夫: 有限要素法を用いた三次元室空間のインパルス応答の推定, 平成元年度電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, pp.295 (1989).
- [12] 高根昭一, 山田祐生, 鈴木陽一, 曾根敏夫: 境界要素法を用いた3次元閉空間音場のインパルス応答の推定手法について, 日本音響学会誌, Vol.50, No.3, pp.188-197 (1994).
- [13] Asayama, H., Kimura, S., Sekiguchi, K.: Revised Finite Sound Ray Integration Method based on Kirchhoff's Integral Equation, *The Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, Vol.10, No.2, pp.93-100 (1989).
- [14] 大久保洋幸, 大谷眞道, 小野一穂, 正岡顕一郎, 池沢龍, 小宮山撰, 浅山宏, 湯山一郎: CG画像と同期したインタラクティブ音場再生システムについて, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.3, pp.965-974 (2000).
- [15] 浅山宏, 阿部功夫, 廣瀬通孝, 小木哲朗: 没入型多面ディスプレイ (CABIN) における音響空間情報の提示, 日本バーチャルリアリティ学会第3回大会論文集, pp.169-172 (1998).
- [16] 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).



- [17] Hirose, M., Komori, S., Nagumo, T.: A Study on the Synthesis of Environmental Sounds, *Proc. VRST'94*, pp.185-200 (1994).
- [18] 西野隆典, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠: 水平面上の頭部伝達関数の補間, *日本音響学会誌*, Vol.55, No.2, pp.91-99 (1999).
- [19] Pulkki, V.: Virtual Sound Source Positioning Using Vector Base Amplitude Panning, *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol.45, No.6, pp.456-466 (1997).
- [20] Ogi, T., Yamada, T., Kano, M., Hirose, M.: Immersive Telecommunication Using Stereo Video Avatar, *Proc. IEEE VR2001*, pp.45-51 (2001).

(2002年8月7日受付)

[著者紹介]

小木哲朗

(正会員)



1986年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年(株)三菱総合研究所入社。1994年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1996年東京大学IML助教授。1999年より通信放送機構研究員, 東京大学IML客員研究員。ビジュアライゼーション, 臨場感通信の研究に従事。博士(工学)。

茅原拓朗

(正会員)



1992年都立大学人文学部心理卒業。1997年都立大学大学院博士課程退学。同年東京大学IML COE研究員。2000年通信放送機構ぎふMVLリサーチセンター国内招聘研究員。2002年東京大学IML講師。人間の聴覚および視聴覚情報処理, 仮想現実感の研究に従事。博士(心理学)。

加藤允文



1999年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2001年東京大学大学院工学系研究科修士課程終了。バーチャルリアリティオーディオの研究に従事。現在, ソニー株式会社にてインターネットプロトコルの開発に従事。

浅山宏

(正会員)



1982年日本大学大学院理工学研究科博士前期課程修了。1988年日本大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。1985年株式会社タイムウェア設立。2001年リアルウエーブリサーチジャパン設立。音のバーチャルリアリティ, 建築音響の研究に従事。博士(工学)。

廣瀬通孝

(正会員)



1977年東京大学工学部産業機械工学科卒業。1982年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年東京大学工学部講師。1983年同助教授。1999年東京大学先端科学技術研究センター教授。システム工学, ヒューマンインタフェースの研究に従事。工学博士。