

# 2011年度 卒業論文

没入型バーチャルリアリティ装置における  
3次元音響の活用

神戸大学工学部情報知能工学科

守本敏明

指導教員 陰山聰

2012年2月22日

# 没入型バーチャルリアリティ装置における3次元音響の活用

守本敏明

## 要旨

スーパーコンピュータの進歩と共に、複雑な現象のシミュレーションが可能となった。その結果、一回の計算で出力される数値データは膨大なサイズとなり、その可視化・解析には大きな労力が必要となっている。このような状況の下、大規模3次元データの可視化のための新しい技術基盤としてバーチャルリアリティ技術が注目を集めている。しかし、複雑な空間構造を内在する膨大な数値データを可視化した場合、そのデータに含まれる情報を視覚だけで把握することには限界がある。そこで、数値データを3次元音響で表現するデータ可聴化の研究の重要性が高まっている。音の持つ特性を上手く活用することで、多くの情報が提示されることが期待される。また、3次元音響はバーチャルリアリティ空間におけるユーザーインターフェースを向上させることにも役立つ。本研究では、神戸大学統合研究拠点に設置された没入型バーチャルリアリティ装置  $\pi$ -CAVE を用いて、立体音響の可能性について研究した。バーチャルリアリティ環境における音の有用性を調べるために、バーチャルリアリティ装置向け可視化環境である Multiverse を用いて、音による物体位置情報の提示手法の検証と、音によるユーザーインターフェースの向上の研究開発を行った。その結果、バーチャルリアリティ環境における音の有用性を確認することが出来た。

# 目 次

1 序論	1
2 バーチャルリアリティ	4
2.1 バーチャルリアリティ	4
2.2 バーチャルリアリティにおける音の活用	5
2.3 CAVE 装置の概要	5
3 $\pi$ -CAVE	7
3.1 映像投影システム	7
3.2 トラッキングシステム	10
3.3 コンピュータシステム	11
3.4 音響システム	11
3.5 立体音響システム	12
3.6 MIDI	12
3.7 立体音響システムのハードウェア	13
3.8 立体音響システムのソフトウェア	14
4 Multiverse	18
4.1 Multiverse の開発の背景	18
4.2 ユーザーインターフェース	19
4.3 Multiverse に組み込まれた可視化アプリケーション	20
4.4 Multiverse の課題点	23
5 立体音響を用いたユーザーインターフェースの改良	25
5.1 目的と方法	25
5.2 実装方法	26
5.3 結果	26
6 立体音響による位置情報の可聴化	27
6.1 方法	27
6.2 実装方法	28
6.3 実験	29
6.4 結果	29
7 まとめと今後の課題	31
謝辞	31



# 1 序論

計算機シミュレーションにおいては多くの場合、計算結果として膨大な量の数値データが出力される。そこから情報を抽出し、計算機の中でどのような現象や構造が再現されたかを知るためにには、データの「可視化」と呼ばれる処理が不可欠である。データの可視化とは一般に、数値データを何らかの方法で画像に変換することである。人間の優れた視覚を駆使することで数値データに潜む隠れた構造や特徴を一目で読み取ることが可能となる。

データ可視化の最も身近な例は天気図であろう。我々は地表面上の気圧分布を数値データの表として提示されても、その時の大気の様子や天候を知ることは出来ない。ところが、その気圧分布の数値データを等高線を用いて画像にすれば、等高線の形状や等高線同士の間隔などを見ることで、文字通り一目で、どこに低気圧や、高気圧があるかを読み取ることが可能となる。慣れた人が見れば、それだけで次の日の天気を予測することさえできる。気圧の数値データを数表として見た場合にはとても不可能なことが天気図という可視化プロセスを経たことで可能となったわけである。

解釈・解析すべき数値データが、3次元空間中に分布しているときにもデータ可視化は有力な手段となる。ただし、3次元データの可視化は天気図のような2次元的な可視化とは異なり、可視化手法やそれを実現するためのハードウェアについて独特の工夫をする必要がある。人間が本来持つ立体視の能力を十分に活用するためには、現在標準的なハードウェア環境であるPCと、ウィンドウベースのGUI(Graphical User Interface)に基づく2次元的な表示法では不十分だからである。

現在、3次元データの立体的な表示方法を実現するために、バーチャルリアリティ(VR)技術への注目が高まっている。様々な方式のVRシステムの中でも特に高い現実感と没入感を実現することのできる優れたシステムとして、CAVE型と呼ばれるVRシステムが有名である。CAVEとは、部屋ほどの大きさの空間をスクリーンで取り囲み、そこに立体画像を投影することで高い没入感を実現するVR装置である。

CAVEシステムを用いてシミュレーションデータを3次元的かつ対話的に可視化する手法については、神戸大学の当研究室を含めて世界中で活発な研究が行われている。しかしそこでは通常、視覚のみを通じたデータの“仮想現実化”のみが試みられているのが普通である。人間が受ける情報のうち8割が視覚を通じたものであるといわれていることを考えると、視覚に重点を置いてデータのVR的解析手法を研究することは確かに重要であるが、一方、3次元データを解析する上で、視覚だけを用いることでは様々な困難や限界があることが指摘されている。

視覚の次に重要な感覚器官は聴覚である。聴覚が外界から受け取る情報は視覚ほ

ど多くないのは確かであるが、それでも聴覚には視覚にはない優れた特性がある。

視覚が立体視として物体の3次元的な位置を把握することができると同様に、聴覚も3次元的な位置を把握することが可能である。しかも、視覚の場合、前方と後方(背後)の2つの物体を同時に見ることができないのに対し、聴覚では前と後ろの2つの音源を同時に聞くことは容易である。従って、3次元空間に分布したデータの中に没入して解析を行う場合、視覚よりも聴覚を積極的に活用した方が良い場合もあるだろう。

また、聴覚は視覚の補助として重要な役割を果たす。特に計算機に関しては、聴覚は視覚によるユーザーインターフェースの機能を補助する目的で効果的に用いられる場合が多い。このことは、日常我々が用いているPCのグラフィカルユーザーインターフェースでも観察されることである。マウス操作で誤った操作をした時にビープ音などでユーザーに注意を喚起したり、あるいはメールの到着を音で知らせることは効果的であることは多くの人が認めるところであろう。

数値データから情報を引き出すために数値を音に変換し、聴覚を通じてシミュレーションデータを解析することをデータの可聴化と呼ぶ[1]。データ可聴化の良く知られた例は、放射線を測るガイガーカウンタであろう。放射線が計器を通過したことを知らせるこの機器は、パルス状の音の連なりにより情報(放射線のフラックス)を伝える。この場合、音の高さや強さなど音が持つその他の自由度は使われていないが、それでも(この場合はシミュレーションではなく測定に基づくものであるが)データに潜む情報を人間にとて直感的に分かりやすい形で可聴化していることの効果は注目すべきものである。もっと複雑なデータを対象とした場合、音の高さや強さまで活用すればさらに多くの情報を可聴化できるであろうということは容易に想像がつく。

また、人は複数の音を同時に聞いても、耳に到達した音波を脳で巧妙に処理することにより複数の音源を容易に聞き分けることができる[2]。例えば、オーケストラの演奏を聴いているときを思い起こせば、人は同時に耳に入る音波から別々の楽器を何の苦もなく聞き分けていることが分かる。人間の聴覚が持つ優れた機能に驚くとともに、この聴覚の能力を複雑な数値データの解析に生かすという発想が自然なものであることが納得できるであろう。

本研究では没入型(CAVE型)VR装置を用いたデータの3次元可視化システムに、3次元音響システムを利用した3次元音場生成機能を追加することで、以下の2つ:

- (i) データの可聴化
- (ii) 音によるユーザーインターフェースの向上

を目指すものである。利用するVR装置は、神戸大学統合研究拠点に設置された日本最大のCAVE装置 $\pi$ -CAVEである。可視化アプリケーションとユーザーイ

ンターフェースとして、当研究室において  $\pi$ -CAVE 用に開発されたソフトウェア “Multiverse” をベースとする。

## 2 バーチャルリアリティ

この章では、バーチャルリアリティ技術の概要と、バーチャルリアリティにおける音の利用事例についての先行研究を紹介する。

### 2.1 バーチャルリアリティ

バーチャルリアリティ (VR) 技術とは、計算機で構成された仮想的な世界を、現実と区別がつかないほどの高いリアリティをもって人に提示する技術である。人の感覚器官においては、視覚が最も重要な役割を果たしているため、通常、VR といえば視覚的 VR を指すことが多い。

視覚的 VR を実現するためには、3つの要素を満たす必要がある。一つ目は立体視、二つ目は双方向性 (あるいは対話性)、そしてもう一つは没入感である。

立体視だけでは真の VR とは呼べない。それは最近市場に登場してきている 3D テレビを体験したことのある人であれば納得できるであろう。何かが立体的に見えるということと、それが本当にそこに存在すると感じることとは、大きな違いがある。人が物を見て、それがそこに実在すると感じるためには、人の目の位置 (視点) の移動に供って、その物の見え方が自然に変わらなければならぬ。また、光源がある場合、その光源を動かした時に見えるはずの照明の当たり具合や、影の出来方など、見る人が見方を能動的に変化させたときに、対象物の見え方が自然に反応する必要がある。これが双方向性である。目の位置をリアルタイムで検出する“ヘッドトラッキング”と呼ばれる技術を用いれば、この双方向性を実現できる。ヘッドトラッキングは VR に不可欠の技術といえる。

高精能な VR 環境を実現するために必要なもう一つの要素である没入感とは、計算機が作り出した仮想世界に自分が本当に入り込んでいると感じる感覚である。ヘッドトラッキング装置を駆使して高精細なステレオ画像をいくら提示しても、体験者がその物体を別の世界にある仮想的なものであるという意識を常に持ちながら見ることになれば、それは真の VR とは言えない。仮想世界に自分が体ごと入り込み、その世界の中に自分がいるのだという感覚が没入感である。高い没入感を作り出すことが VR 技術上最も難しい部分であると言える。

VR 技術は最近大幅に進歩しており、科学研究にとって非常に有力な基盤技術になりつつある。VR 技術を用いて数値データを仮想現実化し、可視化することで、3 次元的かつ直感的にシミュレーションデータをより深く理解することができる。

## 2.2 バーチャルリアリティにおける音の活用

空間中のある一点に音源がある時、映像が無くても人間は音だけで指定された位置を推測することが出来る [3]。人間の聴力は（視覚ほどではないが）かなり高い3次元分解能を持っている。したがってVRにおいて、視覚と聴覚の両方を使うことは非常に有用となる。可視化では一般に、数値データを何らかの物体の形状や色で表現する。しかし、それらの要素だけでは表現しきれない時、音を用いることは有効な手段となる。音は大きさや周波数等、様々な要素を持っているので、数値をそれらにマッピングすることで可視化だけでは表現しきれないデータも表示し得る。また、3次元空間からあたかも音が出ているように再現できる立体音響装置を用いると、3次元空間内で視覚だけでは捉えきれない周囲の状況も知ることが出来る。

このようなVRにおける音の利用事例としては、上の例であげたように、あるデータを音の特性に対応させるパラメータマッピング以外にもいくつか研究がされている。Piivert[4]というソフトは、VR空間中に置かれた物体から音を出させる。手と指に装着されたセンサーを介して、ユーザーは様々な音を出すことが出来る。

数値データを音情報に変換する可聴化をVRと組み合わせた研究の例としてSuperSpider[5]がある。これは、データ空間中の各点に分布する複数のスカラー量の値を、音の強さと高さという2つのパラメータで可聴化したものである。

少し変わった応用分野として、民族音楽学の研究にVR技術と3次元音響技術を組み合わせたものがある [6]。また、可視化と可聴化にかかる興味深い研究として [7] が挙げられる。これは、データを可聴化するのではなく、逆に音を可視化する研究である。

## 2.3 CAVE 装置の概要

CAVE (Cave Automatic Virtual Environment) は、イリノイ大学シカゴ校で開発された。高い没入感と現実感を得ることのできる優れたVRシステムである。正面スクリーンのみの1面CAVE、正面、床面、左右片面の3面スクリーンのCAVE等、様々な種類のCAVEがあるが、標準的なCAVEは正面、左右、床面の合計4面のスクリーンで構成され、各スクリーンにプロジェクタでステレオ映像を投影する。ほとんどのCAVEシステムでは、時分割方式の立体視が採用されている。時分割方式のステレオでは、スクリーンに右目用と左目用の画像が交互に高速に切り替わって表示される。この映像に、CAVEの眼鏡が同期して、右目用の映像が outputされているときは右目のみ、左目用の映像が表示されているときは左目のみが見えるように眼鏡のシャッターが切り替えられる。これによって左右それぞ

れの目にはわずかに異なる映像が送られるため体験者は映像を立体的に感じることが出来る。

上述のようにVRで高い没入感を構成するためには、ヘッドトラッキングが不可欠である。CAVEのヘッドトラッキングでは磁気や赤外線等のセンサによって体験者の頭の位置や方向を取得する方式が多い。ヘッドトラッキングシステムによって立体眼鏡をつけた体験者の目の位置や視線方向の情報をリアルタイムで検出するため、体験者がCAVE内のどの位置にいても、そこから見えるべき正しい映像が表示される。ただし、トラッキングされる眼鏡は1つだけであり、CAVEで正しい映像を見ることが出来るのは1人に限られる。また、体験者はワンドと呼ばれる専用のコントローラを用いて、VR空間と対話的な操作が可能である。ワンドにもトラッキング装置が接続されていて、手の位置と向きがリアルタイムに取得されている。

VRを表現する上で必要なヘッドトラッキングシステムによる情報の取得、またそれに基づくリアルタイムの投影処理等のために、CAVEシステム専用のAPIが開発されている。中でもCAVElibというAPIが最も古く、現在のところ業界標準となっている。本研究においてもCAVE用APIとしてCAVElibを用いる。なお、CAVEシステムにCAVElibは必須でない。本研究室ではCAVElibにかわる新しいAPIとしてVR Jugglerを検討しており、VR Jugglerベースの新しいCAVE用可視化ソフトウェアの開発を行っている[8]。

### 3 $\pi$ -CAVE

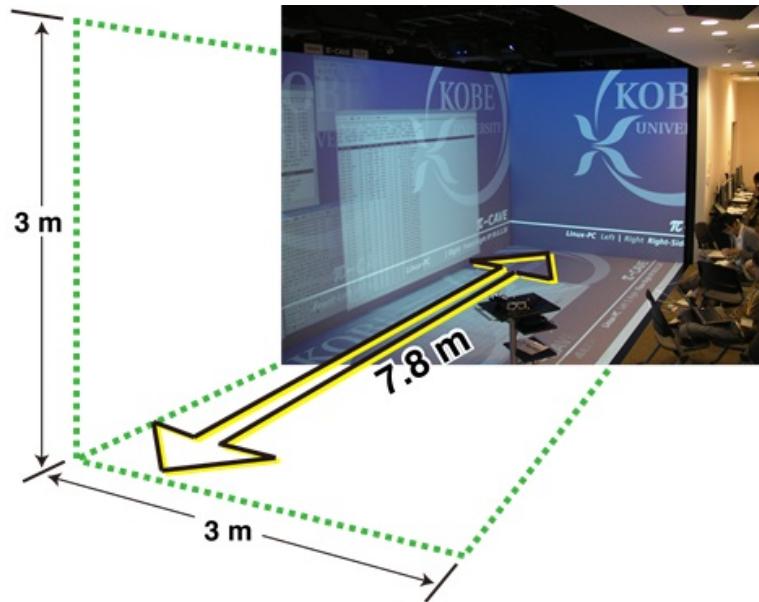
本研究ではハードウェアとして  $\pi$ -CAVE を利用した。 $\pi$ -CAVE は神戸市ポートアイランドにある神戸大学統合研究拠点 1 階に設置された没入型 VR 装置である。ポートアイランド (Port Island) の頭文字 P. I. から  $\pi$ -CAVE と名付けられた。この章では  $\pi$ -CAVE 装置の概要を説明する。

#### 3.1 映像投影システム

$\pi$ -CAVE は正面、床面、左右面の 4 面スクリーンから構成され、その大きさは幅 7.8m、高さ 3m、奥行 3m である (Fig.1)。これらスクリーンに映像を投影するプロジェクタ (Christie Digital Mirage WU12K-M) は 6 台ある (Fig.2)。正面、床面にそれぞれ 2 台、左右面にそれぞれ 1 台使用している。プロジェクタは Fig.3 のようにスクリーンの背面から鏡で反射されて映像を投影している。床面を除く 3 面は半透明のスクリーンであり、正面、床面ではそれぞれのプロジェクタからの映像が重なり合う部分がある。何もしなければ投影面の重なり部分の輝度が高くなってしまうが、つなぎ目部分の輝度をコントロールすることで隣り合った映像の境界が目立たなくなるように調整 (ブレンディング) している。プロジェクタの解像度は WUXGA (1920×1200) であり、輝度は 10,500lm ある。



(a) Overview of  $\pi$ -CAVE system



(b) Size of  $\pi$ -CAVE system

Fig. 1: Screens of  $\pi$ -CAVE system



Fig. 2: One of six projectors in  $\pi$ -CAVE

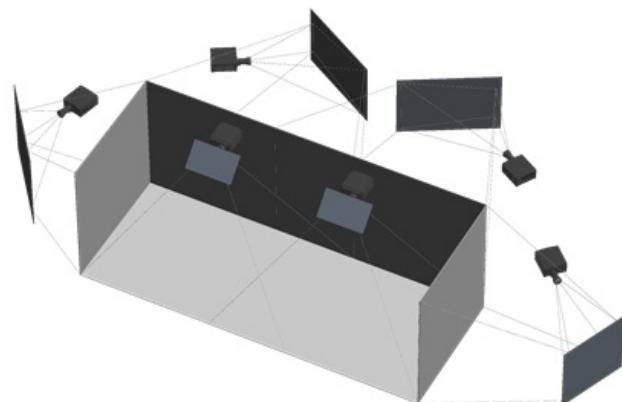


Fig. 3: Screens and projectors of  $\pi$ -CAVE

### 3.2 トラッキングシステム

-CAVE のトラッキングシステムは光学反射式モーションキャプチャシステムを採用している。 -CAVE 上面に設置された 10 台の赤外線カメラ (VICON Bonita) (Fig.4) で眼鏡やワンド (Fig.5) にそれぞれ取り付けられた 4 つのマーカーの位置を認識し、各々の位置情報を計算する。4 つのマーカーの位置関係を算出することで、眼鏡をかけたユーザーは現在の位置や視線方向を得ることが出来る。

ワンドのボタン入力の情報も取得出来る。多くのアプリケーションでは、ワンドの左スティックを操作することで、仮想現実空間の平行移動をするように設定されている。この平行移動をナビゲーションと呼ぶ。

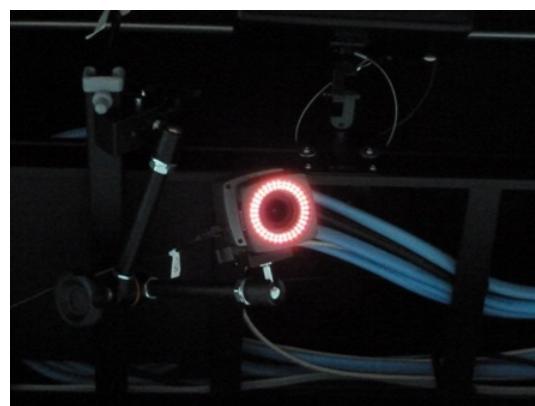


Fig. 4: One of IR cameras of  $\pi$ -CAVE



Fig. 5: Stereo shutter glasses and wand

### 3.3 コンピュータシステム

VR 空間の構成も含めた様々な数値演算と画像処理のために、 $\pi$ -CAVE には Linux ベースのシステムと Windows のクラスタシステムの 2 つの計算機システムが用意されている。それぞれのスペックを Table 1 に示す。

Linux ベースのシステムは HP 社の Z800 が採用され、OS は RHEL5 である。主記憶は 192GB RAM と大容量のメモリを搭載しており、GPU には Quadro PLEX 2200 D2 を 3 台使用している。このため、グラフィックの描画速度は非常に高速である。

一方、クラスタシステムは HP 社の Z400 が採用され、1 台の Master と 6 台の Slave から構成される。OS は Windows XP (64bit) であり、Memory は 1 台当たり 4GB、GPU は Quadro 5000 を使用している。Linux ベースのシステムと比べるとグラフィックの描画速度は劣るが、Windows 用の VR ソフトを  $\pi$ -CAVE で表示する場合、この PC クラスタが使用される。

	Linux System	PC-Cluster
PC	HP Z800	HP Z400
OS	RHEL5	Windows XP 64bit
Memory	192GB RAM	4GB RAM/node
GPU	Quadro PLEX 2200 D2 × 3	Quadro 5000

Table 1: Specification of  $\pi$ -CAVE's computer systems

### 3.4 音響システム

$\pi$ -CAVE は 2 種類の音響システムを持つ。一つは 7.1 チャンネルのサラウンドシステムである。もう一つは立体音響システムで、ユーザーが  $\pi$ -CAVE 内の任意の点からあたかも音が出ているように音場を生成することができる。この 3 次元音響システムについては次の節で詳しく述べる。

### 3.5 立体音響システム

$\pi$ -CAVE は前節で述べたように 2 つの音響システムがある。その内、ここでは立体音響システムについて述べる。 $\pi$ -CAVE は Fig.6 のように 8 台のスピーカーが設置されている。ユーザーは音響制御 PC のソフトウェア、またはプログラム内で任意の点を指定すると、8 台のスピーカーが指定された位置からあたかも音が出ているように音場を生成することが出来る。同時に 8 カ所の音源位置を指定することが出来る。

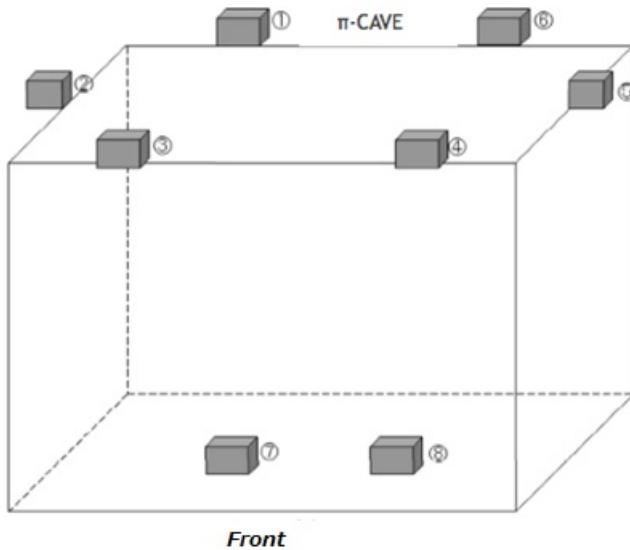


Fig. 6: Configuration of speakers of  $\pi$ -CAVE

### 3.6 MIDI

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) とは、電子楽器の接続や、電子楽器とコンピュータの接続に使う音楽用のプロトコルである。MIDI に準拠したシステムでは、音声データを直接やり取りするのではなく、数バイト単位の MIDI メッセージを送受信する。

立体音響システムでは音の制御を行う時、その情報はハードウェア内ですべて MIDI メッセージに変換される。

### 3.7 立体音響システムのハードウェア

$\pi$ -CAVE の立体音響システムは Fig. 7 に示すハードウェアから構成される。立体音響の生成には A&G SOLUZIONI DIGITAL 社の X-spat boX<sup>2</sup> 立体音響プロセッサ [9] を使用している。音響制御 PC、または開発したプログラム内から音の再生などの制御を行うと、HDSPe PCI サウンドカード経由でそのオーディオ信号と MIDI メッセージがオーディオインターフェース Multiface II へ出力される。Multiface II はそのオーディオ信号と MIDI メッセージをフォーマットコンバータ ADI-4DD 経由で X-spat boX<sup>2</sup> へ出力する。X-spat boX<sup>2</sup> は入力した各チャネルのオーディオ信号と、それに該当する MIDI メッセージの音の座標を関連づけ、8 台のスピーカーで音場が生成されるように信号処理が行われる。その後、オーディオ信号は再びオーディオインターフェース Multiface II へ入力され、アナログ信号に変換された後、パワーアンプに出力される。そして、それぞれのスピーカーから指定した位置から音が出ているように出力される。

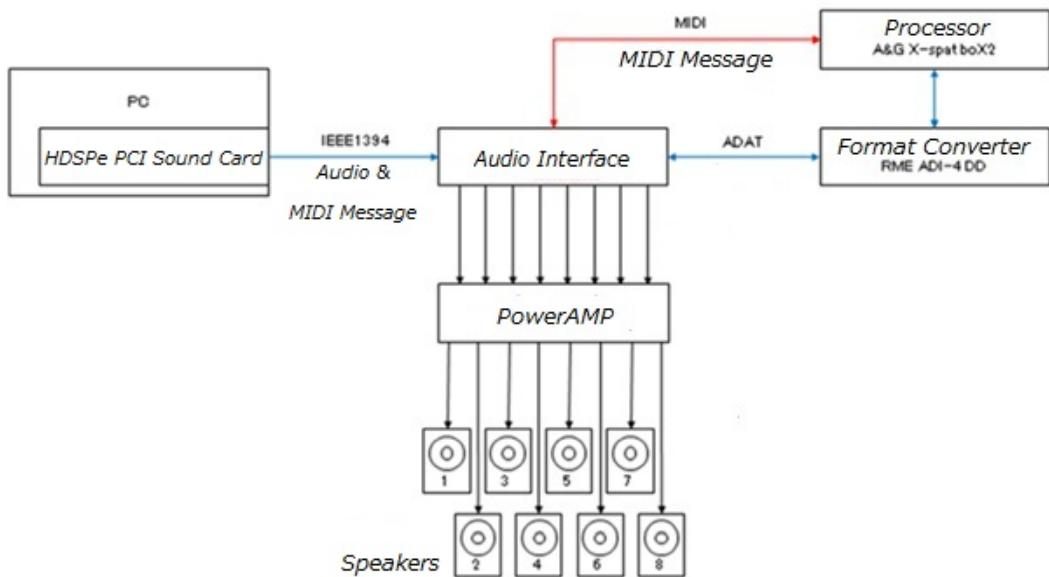


Fig. 7: Hardware of 3D sound system of  $\pi$ -CAVE

### 3.8 立体音響システムのソフトウェア

$\pi$ -CAVE の音響システムでは音響制御 PC、またはプログラム内から音の制御をリアルタイムにコントロールすることが出来る。コントロール可能なパラメータを Table 2 に示す。

プログラム内で Room Size 等のパラメータはメートル単位で指定する。そして、立体音響プロセッサには MIDI メッセージに変換され送られる。メートル値と MIDI 値の変換表を Table 3 に示す。

音源の位置は、 $\pi$ -CAVE のサイズに関係なく、Room Size のパラメータで設定した範囲内のどこに音が位置しているかをユーザーは指定することが出来る。 $\pi$ -CAVE と Room Size の関係を Fig.8 に示す。 $\pi$ -CAVE の大きさに関係なく、Room Size で設定した範囲内のどこに音が位置しているかを (x, y, z) 座標で指定する。 $\pi$ -CAVE の中心が音響空間の中心となり、それぞれの端点の値は Fig.8 のようになる。また、音の座標の MIDI 値は Room Size に対して常に一定だが、メートル値は Room Size の設定値によって変化する。MIDI 値は 7-bit であるので、仮にユーザーが Room Size を 10m と設定した場合、音は MIDI 値が 1 変わる毎に音は約 7.8cm 動くことになる。

ユーザーは各チャネルからの音源を出力するかをあらかじめ指定しておく必要がある。これは C:/3D\_audio/Software/Xspat/Windows-Server にある AudioTable を編集することで指定出来る。各チャネルに任意の wav ファイルを指定することでユーザーは各チャネルから任意の音源を出力することが出来る。また、AudioTable 内でファイル名を指定した後に 0 を入力すると、1 度だけその音源は再生される。一方、ファイル名の後に 1 を入力すると、その音源はループ再生される。AudioTable ファイルは複数生成することが出来る。また、その AudioTable ファイルの番号をプログラム内で指定することで各 AudioTable 内の音を再生することが出来る。しかし、一つのファイル内で指定出来る音源ファイルは 8 個までである。したがって、一つの AudioTable 内で複数の音を制御することは可能だが、複数の AudioTable で指定された音源を同時に制御することは出来ない。

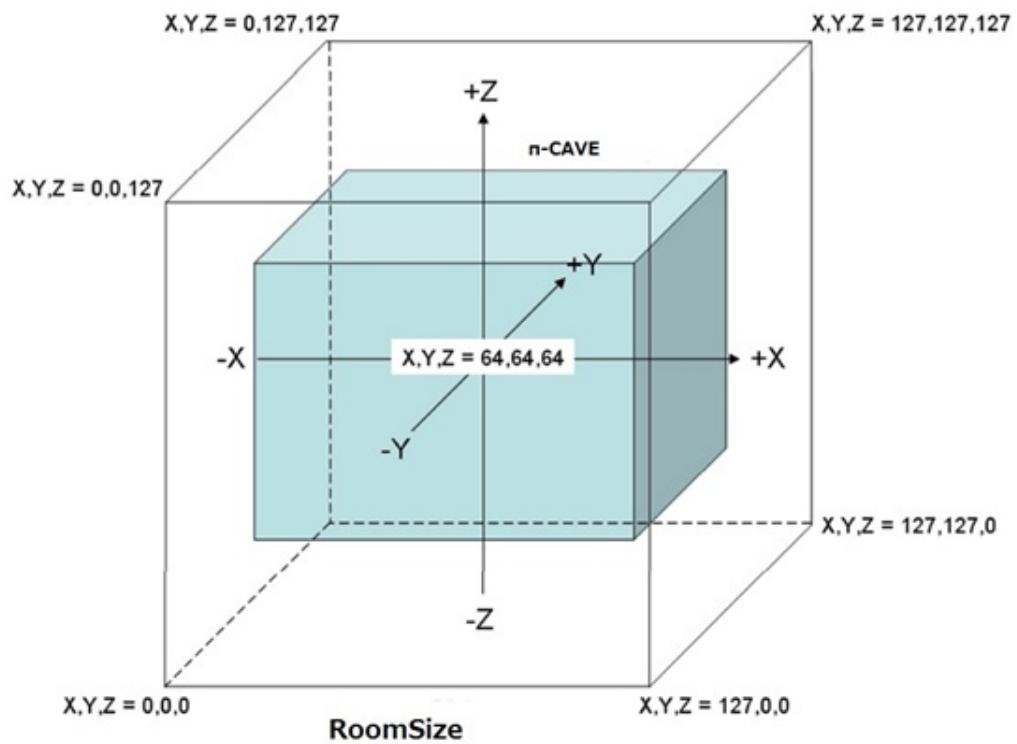


Fig. 8: MIDI parameters of 3D sound

Parameter	min	max	
MasterOutputLevel	$-\infty$	0dBFS	Master volume
Gain	$-\infty$	0dBFS	Each sound volume
RoomSize	4m	1000m	Size of virtual audio space
DistanceFactor	0.0	1.0	Attenuation by distance
DopplerTrackingSpeed	0.0	1.0	Tracking speed for Doppler effect
SpatialWidth	0.0	1.0	Spatial resolution of sound
ITDDepth	0.0	1.0	ITD depth to sound source
DopplerDepth	0.0	1.0	Level of Doppler effect
SpeakerSize	4m	1000m	Size of speakers
SpeakerPosition x	left	right	X-coordinate of each speaker's position
SpeakerPosition y	back	front	Y-coordinate of each speaker's position
SpeakerPosition z	under	top	Z-coordinate of each speaker's position
HeadFilteringDepth	0.0	1.0	Filter for head front/back direction
HFDampDepth	0.0	1.0	Frequency dependence of attenuation rate
SouceDerection	-180 °	180 °	Angle of sound propagation
SoucePosition x	left	right	X-coordinate of each sound source position
SoucePosition y	back	front	Y-coordinate of each sound source position
SoucePosition z	under	top	Z-coordinate of each sound source position
ElevationDepth	0.0	1.0	Filter for vertical direction
ObstructionDepth	0.0	1.0	Depth of obstruction
ObstructionWidth	0.0	90 °	Width of obstruction

Table 2: Parameters of 3D sound system

MIDI	meter	MIDI	meter	MIDI	meter	MIDI	meter	MIDI	meter
0	4.00	30	14.74	60	54.32	90	200.16	120	737.62
1	4.18	31	15.40	61	56.73	91	209.06	121	770.39
2	4.36	32	16.08	62	59.25	92	218.35	122	804.62
3	4.56	33	16.79	63	61.89	93	228.05	123	840.38
4	4.76	34	17.54	64	64.64	94	238.18	124	877.72
5	4.97	35	18.32	65	67.51	95	248.77	125	916.72
6	5.19	36	19.13	66	70.51	96	259.82	126	957.46
7	5.42	37	19.98	67	73.64	97	271.37	127	1000
8	5.66	38	20.87	68	76.91	98	283.43		
9	5.92	39	21.80	69	80.33	99	296.02		
10	6.18	40	22.77	70	83.90	100	309.17		
11	6.45	41	23.78	71	87.63	101	322.91		
12	6.74	42	24.84	72	91.52	102	337.26		
13	7.04	43	25.94	73	95.59	103	352.25		
14	7.35	44	27.09	74	99.84	104	367.90		
15	7.68	45	28.30	75	104.27	105	384.25		
16	8.02	46	29.55	76	108.90	106	401.32		
17	8.38	47	30.87	77	113.74	107	419.15		
18	8.75	48	32.34	78	118.80	108	437.78		
19	9.14	49	33.67	79	124.08	109	457.23		
20	9.54	50	35.17	80	129.59	110	477.55		
21	9.97	51	36.73	81	135.35	111	498.77		
22	10.41	52	38.36	82	141.36	112	520.93		
23	10.87	53	40.07	83	147.64	113	544.08		
24	11.36	54	41.85	84	154.21	114	568.25		
25	11.86	55	43.71	85	161.06	115	593.50		
26	12.39	56	45.65	86	168.21	116	619.88		
27	12.94	57	47.68	87	175.69	117	647.42		
28	13.51	58	49.79	88	183.50	118	676.19		
29	14.11	59	52.01	89	191.65	119	706.23		

Table 3: Conversion table between MIDI values and meter values

## 4 Multiverse

本研究では、3次元音響システムをシミュレーションデータの解析に応用することをめざし、 $\pi$ -CAVE の VR 空間に 3 次元音場を構成する。3 次元音響だけでデータを解析するのではなく、3 次元可視化ソフトウェアの機能を向上させることが目的である。本研究の開発基盤として、当研究室で開発した CAVE 型 VR 装置向け可視化環境である Multiverse を使用する。Multiverse は、複数の可視化プログラムを管理し、VR 空間に居ながら実行するプログラムを自由に切り替えることを可能にする VR アプリケーションランチャである。本章では、Multiverse の概要について説明する。

### 4.1 Multiverse の開発の背景

CAVE 型 VR 装置を用いた 3 次元可視化のために Kageyama ら [10] は核融合科学研究所において VFIVE という汎用 VR 可視化ソフトウェアを開発した。VFIVE はその後、海洋研究開発機構において Ohno を中心として開発が続けられ、ボリュームレンダリング機能の追加や、VTK との融合など、様々な改良が加えられた [11][12][13]。また、中央大学では、土木工学シミュレーションへの応用を目指して VFIVE が改良された。特にオリジナルの VFIVE ではカーテシアン座標に基づく構造格子上のデータしか可視化出来なかったものを、非構造格子データにも適用できるようにした改良は特筆すべきものである。

VFIVE は現在でも様々な改良と可視化機能の追加がされている。当研究室においてもトレーサー曲線法による流れ場の可視化機能が最近追加されたばかりである [14]。

VFIVE は 3 次元ベクトル場・スカラー場の可視化解析を目的としたアプリケーションである。しかし、CAVE 装置を用いた可視化ソフトウェアとしては、VFIVE のフレームワークに入りきらないほど多様なアプリケーションが既に存在する。

これまでの CAVE 環境において、複数の VR アプリケーションを利用するときは CAVE の制御用端末から、それらのアプリケーションを順番に立ち上げる必要があった。つまり、CAVE の部屋 (VR 空間) の中にいたユーザは、アプリケーションを切り替える毎に毎回:

- (i) かけている立体眼鏡を外し、
- (ii) CAVE の部屋から外に出て、端末の前まで歩いて行き、
- (iii) キーボードから次のアプリケーションの起動コマンドを入力し、
- (iv) CAVE の部屋に歩いて戻っていき、

### (v) 立体眼鏡をかける

という動きを繰り返す必要があった。これは極めて不便な状況である。

上の問題は、結局のところ CAVE 用のアプリケーションランチャがないために起きている。そこで、 $\pi$ -CAVE の導入を機に、本研究室では、CAVE 向けアプリケーションランチャを開発した。それが Multiverse である。Multiverse は複数の VR アプリケーションが組み込めるようになっており、アプリケーション間のユーザーインターフェース (Look & Feel) は統一されている。そのユーザーインターフェースも、WND のボタンやジョイスティックの複雑な操作は可能な限り避けるようにデザインされている。

## 4.2 ユーザーインターフェース

Multiverse は、CAVE のような没入型 VR 装置に初めて触れる人にも簡単に操作できるようなユーザーインターフェースを採用している。例えば、Multiverse では VR 空間に各可視化ソフトウェアを表したパネルが表示される。ユーザーは表示されたパネルを選択して各ソフトウェアを起動させる。VR 空間ににおける対話性を失わないようにするために、Multiverse ではタッチパネルを採用している。ユーザーは VR 空間内でWND をパネルに (仮想的に) 接触させることでそのパネルに対応したコマンドを駆動する。この 3 次元タッチパネルは Multiverse の利便性を大きく高めている。

### 4.3 Multiverse に組み込まれた可視化アプリケーション

Multiverse には現在、次の 5 種類の可視化アプリケーションが組み込まれている。

- **GeomagField** (Fig.9)

地球内部のコア領域の流れ場をシミュレーションする可視化アプリケーションである。この可視化アプリケーションは陰山教授らによって開発された VR 可視化ソフト VFIVE に基づいている。地磁気は地球コア内部の液体金属の流れによって発生する。地磁気の発生源である地球コア内部の流れ場をトレーサー粒子や矢印によるベクトル表示等、様々な手法で知ることが出来る。実装されている手法の一つを例に上げると、ユーザーはワンドのボタンを押し続けている間、VR 空間に線を描くことが出来る [15]。そして、ボタンの入力をやめると、VR 空間に描かれた線が流れ場に沿って流れたり、引き延ばされていく。このように、ユーザーは地球内部の流れ場を分かり易く直感的に知ることが出来る。

- **IonjetEngine** (Fig.10)

惑星探査機から噴射されたプラズマジェットのシミュレーションを可視化するアプリケーションである。探査機はマイクロ波放電によって生成されたイオンをエンジン内で静電的に加速して機外に噴射することによる反作用で推力を得ている。しかし、イオンビームと機体やその周辺環境との相互作用は未知の部分が多い。この可視化アプリケーションでは、イオンビームを黄色の球で、またそれを電荷的に中和する電子を青い球で表示することにより、ビームの粒子密度と速度分布を 3 次元的に可視化することが出来る。

- **RetinaProtein** (Fig.11)

人間の目の網膜にあるタンパクであるロドプシンの構造を分子動力学シミュレーションで計算した結果を 3 次元で可視化するアプリケーションである。ロドプシンは他の高分子と同様に複雑な分子構造を持つのでその形状をそれを 2 次元的に解析することは難しい。CAVE の 3 次元空間に可視化することによって、その構造をより深く理解することが出来る。

- **SeismicWave** (Fig.12)

2000 年 10 月 6 日に発生した鳥取県西部地震に対応する地震電波シミュレーションを可視化するアプリケーションである。3 次元で可視化することで、地震波が震源から広がっていく様子を、地図の上から見るような 2 次元的な広がりだけでなく、3 次元的に観察することが出来る。可視化された地震波の色は、そのエネルギー密度を表している。

- CellDivision (Fig.13)

マウスの胚の細胞分裂の撮影した顕微鏡 3 次元画像データを立体的に表示するソフトウェアである。他のアプリケーションのような、シミュレーションした数値データを可視化しているものではない。高速ボリュームレンダリングで VR 空間に実際に撮影された顕微鏡写真データを 3 次元で表示することで、マウスの受精卵が分裂していく様子を任意の位置から立体的に観察することが出来る。

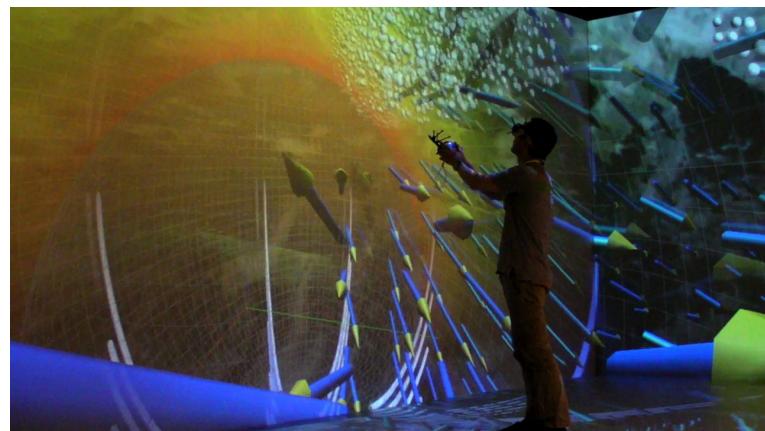


Fig. 9: GeomagField

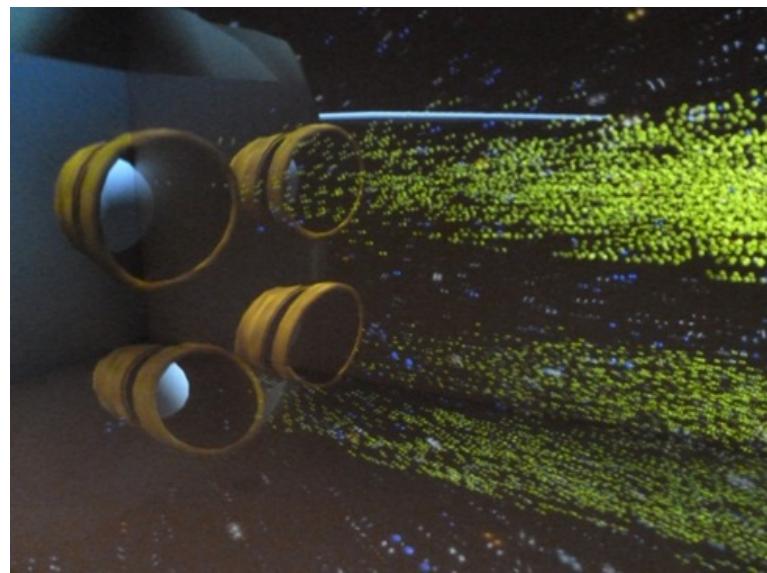


Fig. 10: IonjetEngine

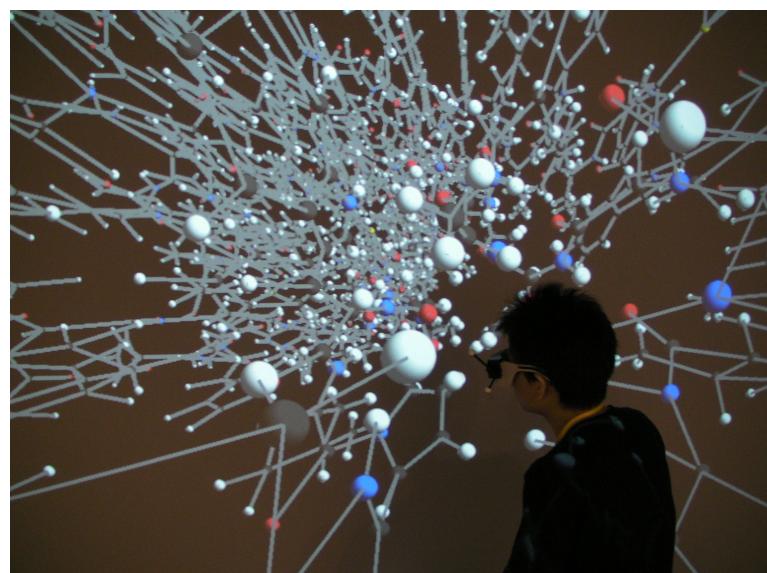


Fig. 11: RetinaProtein

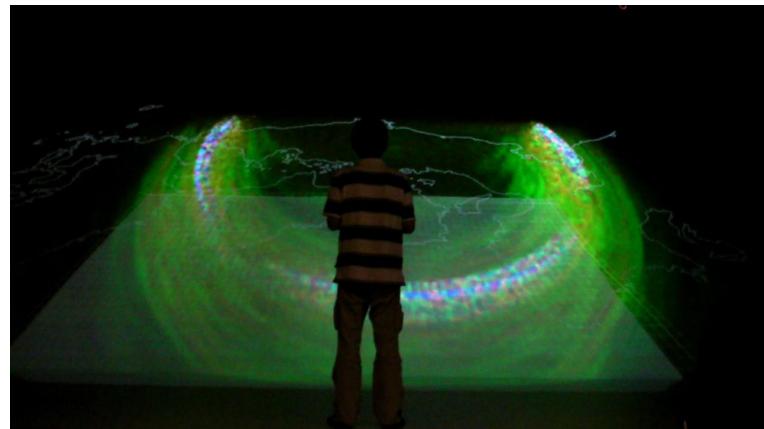


Fig. 12: SeismicWave

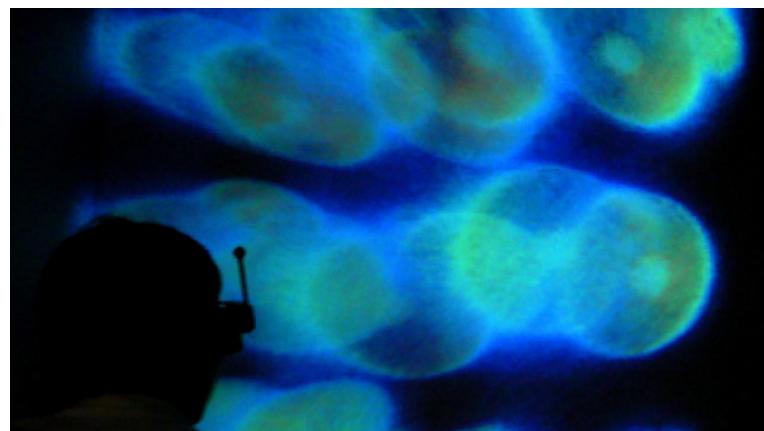


Fig. 13: CellDivision

#### 4.4 Multiverse の課題点

Multiverse は、CAVE が持つ高い現実感と没入感を有効に活かすことのできるすぐれた可視化環境であるが、いくつかの課題点を持つ。タッチパネルを例に上げると、ユーザーはワンドをパネルに触ることでパネルを選択することができるが、VR 空間に慣れていない体験者はパネルをタッチできたかどうかの判断が難しい。また、選択したいパネルに触れる前に別のパネルに触れてしまうこともある。これは両眼視差だけに基づく  $\pi$ -CAVE の立体視方式のハードウェア的な限界を反映しており、視覚だけに基づいてこのインターフェースを改良することは難しい。

また、データ可視化において視覚だけでは不十分な場合もある。 $\pi$ -CAVEの空間は映し出されるすべての映像を視界内で捉えきれないほど広い。そのため、体験者が気付いていない所で何らかの現象が起きている状況もあり得る。実際、Multiverseの可視化ソフトウェアの一つであるIonjetEngineでは、メニュー画面からこのアプリケーションを起動した直後、表示されている宇宙空間の中を惑星探査機が正面向かって右から左へと移動していく。しかし、初めて見学する人は、しばらく惑星探査機に気付かない場合が多い。このため、何らかの方法を用いて体験者の視線を特定の位置に向けさせる必要がある。

## 5 立体音響を用いたユーザーインターフェースの改良

本研究では、立体音響を使って、Multiverse のユーザーインターフェースを改良する試みと、可視化アプリケーションにおいて、映像だけでは十分に伝えることのできない数値情報（探査機の位置）を音を使って表現する試みの 2 つを行った。本章では前者について述べる。

### 5.1 目的と方法

前章で示した Multiverse の課題の一つであるユーザーインターフェースの改良に -CAVE に設置された立体音響システムを用いる。ユーザーがタッチパネルにワンドを近づけて、パネルに触れた時、パネルに触れた位置からあたかも音が出ているようにすることで、パネルにタッチできたかどうかの判断を明確にし、ユーザーの操作性を向上することが目的である。

音によってパネルのユーザーインターフェースを改良するためには、様々な方法が考えられる。（例えば、パネルとの距離を音の高さや強さで表現する等。）しかし、本研究ではその中で最も簡単で分かりやすい手法を採用した。それは、ワンドがパネルに触れた瞬間、その位置から音を出すという方法である (Fig.14)。この方法で実装されたパネルを、20 名の参加者に体験してもらい、アンケート調査を行った。



Fig. 14: Sound generation from virtual touch screen

## 5.2 実装方法

プログラム内で、パネルの情報を持つクラス「Panel」はワンドがパネルに触れたかどうかを判断する関数 `hitTest(double x, double y, double z)` を持つ。この関数の引数  $(x, y, z)$  はワンドの座標である。ワンドの位置（座標）がパネルに接触した時、関数 `hitTest` は `True` 値を返す。`hitTest` が `True` 値を返す時、つまりワンドがパネルに接触した時、その位置から音を出力すれば良い。音を指定した位置から出力するのは立体音響を構成するクラス「SEManager」の中にある関数 `play(int n, double x, double y, double z)` が行う。ここで、`play` 関数の第 1 引数は `AudioTable` で指定された音のチャンネル番号を表す。例えば、`AudioTable` 内でチャンネル 1 番に指定した音を出したい時、第 1 引数に 1 を入力する。また、第 2 ~ 4 引数は音を出力する位置を表す。あるパネルの `hitTest` 関数の返り値が `True` になった時、つまりワンドがパネルに接触した時、パネルが表示されている位置を `play` 関数の引数として、パネルが表示されている位置から音を出力することが出来る。

## 5.3 結果

20 名の参加者から「パネルが表示されている位置から音が出ているように感じたか」というアンケート調査を行ったところ、Fig.15 に示す結果が得られた。Fig.15 に示すように 55% の参加者がパネルが表示されている位置から音が出ているように感じていた。

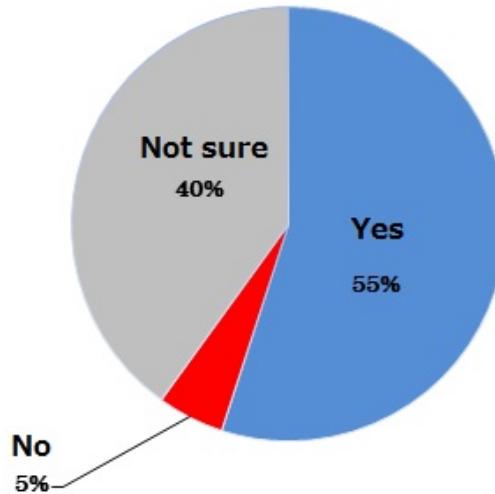


Fig. 15: Result of questionnaire on effect of sound from virtual touch screen

## 6 立体音響による位置情報の可聴化

$\pi$ -CAVE の空間は非常に大きいので、映し出されたすべての情報を視覚だけでは捉えきれない。しかし、このようなことは広い空間だからという理由で生じるものだけではない。例えば、津波のシミュレーションデータを可視化することを考えると、津波がまだ遠い位置にある時、視覚だけでは津波の開始を知ることが出来ない（見えない）。また、津波の大きさや速度を知ることも難しい。しかし、音を津波の前線から出し、また津波の速度を音の大きさにマッピングすることで、体験者は津波の位置やその規模を音によって知ることが出来るだろう。このように視覚では分からない情報を可聴化によって補う方法について本章では述べる。

### 6.1 方法

Multiverse の IonjetEngineにおいて、惑星探査機の位置情報を立体音響を用いて提示する試みを行った。Multiverse の課題点（第 4.4 章）で紹介したように、初めて Multiverse を体験する人は、惑星探査機が右方向から現れることに気付かない。そこで、Fig.16 に示すように惑星探査機が表示されている位置から仮想的な音を出しているようにすることで体験者の視線を探査機が表示されている方向に自然に向けさせる。

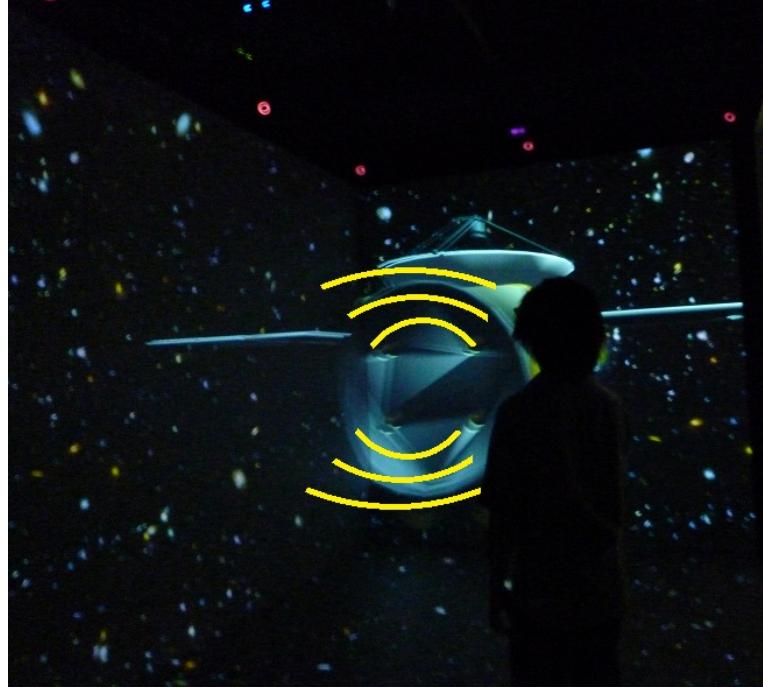


Fig. 16: Concept of virtual sound generation from the ion jet engine of a space probe in  $\pi$ -CAVE

## 6.2 実装方法

`IonjetEngine` を構成するクラス「`UIonjetEngine`」で、惑星探査機とイオン全体を移動させることで、あたかも探査機が推進しているような動きを実現している。探査機が移動すると当然その座標も変わるので探査機の座標を立体音響に用いることで、探査機から仮想的な音を出しているように実装する。惑星探査機の移動は `glTranslated(double x, double y, double z)` によって実現している。この関数によって移動した惑星探査機の位置から音を出せば良い。従って、立体音響を構成するクラス「`SEManager`」の中にある関数 `play(int n, double x, double y, double z)` の第1引数に惑星探査機の仮想的な音のチャンネル番号を、第2～4引数に惑星探査機の座標を引数として入力する。また、立体音響の情報を持つクラス「`XspatParam`」は Table 2 に記したパラメータから構成される。この中から、ドップラー効果量を表す `DopplerDepth` を調整することで惑星探査機の移動によるドップラー効果をかけることが出来る。

ユーザーは Fig.5 に示すワンドの左スティックを操作することでナビゲーションが可能である。この時、惑星探査機の移動と同期して音も移動させるには、惑星探査機の座標を `CAVENavConvertWorldToCAVE(float inposition[3], float outpo-`

sition[3]) を経由する必要がある。この関数は `inposition` で指定した、ナビゲーションされた座標を物理空間座標に変換し、`outposition` に出力する。

### 6.3 実験

立体音響による位置情報の提示を示す為に、27名の参加者を5グループに分け、そのうちグループ1～4に上記で説明したように立体音響を用いた映像を、残るグループ5に立体音響を用いていない映像を見せ、メニュー画面から `IonjetEngine` を起動し、惑星探査機の方向を振り向くまでの経過時間を測定した。この経過時間とは、他人の動作に影響されることを考慮して、各グループで最初に誰か一人が惑星探査機の方向を振り向くまでの時間と定義した。また、立体音響を用いた映像を見せた20名の参加者には、「惑星探査機から音が出ているように感じたか」というアンケート調査も実施した。

### 6.4 結果

各グループの経過時間を測定した結果を Fig.17 に示す。立体音響を用いたグループの経過時間はそれぞれ、1.1、2.0、1.8、1.2秒であった。一方、立体音響を用いない映像を見せたグループの経過時間は7.1秒であった。

また、アンケート調査の結果を Fig.18 に示す。惑星探査機が表示されている方向から音が出ているように感じた人は全体の7割であった。一方、そうでない、つまり惑星探査機が表示されている方向とは違うところから音が出ているように感じた参加者は一人も居なかった。

立体音響を用いることで、振り向くまでの経過時間を立体音響を用いない時より4倍以上短くすることが出来た。さらに、アンケート調査より、7割の参加者が惑星探査機が表示されている位置から音が出ているように感じていた。視覚では捉えきれない位置情報を音によって提示することの有効性が確認された。

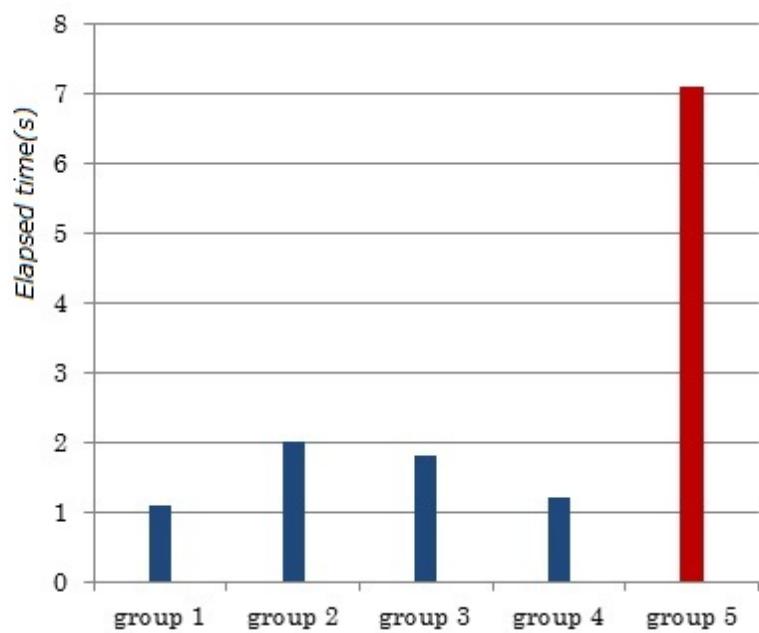


Fig. 17: Time for the notice

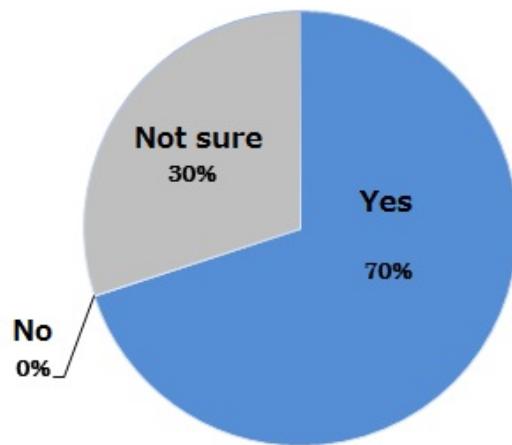


Fig. 18: Result of questionnaire on the effect of sound from the space probe

## 7 まとめと今後の課題

CAVE システムは、シミュレーションデータを可視化し、解析するためには強力なツールである。CAVE システム特有の高い没入感と対話的な操作により、シミュレーションデータを直感的に理解することが出来るからである。しかし、視覚だけを用いて解析することは困難な点や限界が指摘されている。そこで、本研究では立体音響を用いて視覚だけでは捉えられない情報を示す手法を提案した。

音は様々な特性を持ち、データを可聴化することで、多くの情報を提示し得る。また、音によってユーザーインターフェースの機能を向上させることも可能である。VR 環境におけるこれらの音の有用性を調べるために、本研究では、神戸大学統合研究拠点に設置された  $\pi$ -CAVE と VR 装置向け可視化環境である Multiverse を用いて、2つのテーマで研究開発を行った。一つは、音による VR ユーザーインターフェースの向上、もう一つは音による物体位置情報の提示手法の検証である。どちらも VR 環境における音の有用性を確認することが出来た。

今後の課題としては、データの可聴化とユーザーインターフェースの向上に利用する音を細かく管理・制御することがあげられる。音の様々な特性によって、人間に与える影響も変わる。周波数が低い音よりも、高い音の方が人間は気づきやすい傾向がある。データの可聴化を行うときや、ユーザーインターフェースの向上として音を使用する場合でも、それぞれに最適な音を出力する必要がある。これを VR 環境で調べる方法として、例えば、正面、左右、床面のどこか 1 か所、ランダムな色の球を表示し、球の表示されているところから音を出す方法が考えられる。体験者は、球の色に合わせたボタンを入力する。これにより、球が表示されてから体験者が球を確認するまでの経過時間を調べることが出来る。また、同様の実験を音の周波数や、音色を変えることによって、音の特性による経過時間の変化も調べることが出来る。このような実験を行い VR 空間における 3 次元音響の特性とそれを活かした技術を研究することで、VR 技術の計算機シミュレーションへの応用性を今後広げることが出来るだろう。

## 謝辞

本研究をするにあたって、いつも熱心に指導していただいた、陰山聰教授と政田洋平助教に深く感謝いたします。同研究室の山浦優気氏と目野大輔氏には CAVE や OpenGL 等の可視化に関する様々なアドバイスをしていただきました。深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Thomas Hermann and Andy Hunt, “An Introduction to Interactive Sonification”, *IEEE Multimedia*, Vol.12, pp.20-24 (2005)
- [2] Ralf Jung, “A Framework for Auditory Displays in Intelligent Environment”, *2010 Sixth International Conference on Intelligent Environments*, pp.40-45 (2010)
- [3] Tapiro Lokki and Matti Gröhn, “Navigation with Auditory Cues in a Virtual Environment”, *IEEE Multimedia*, Vol.12, pp.80-86 (2005)
- [4] Florent Berthaut, Martin Hachet and Myriam Desainte-Catherine, “Piivert: Percussion-based Interaction for Immersive Virtual EnviRonmenTs”, *Proceedings of the 2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp.15-18 (2010)
- [5] Wagner José Franchin, Lionis de Souza Watanabe, Haim Levkowitz and Rosane Minghim “Development, implementation, and evaluation of sonification tools for point-and surface- based data exploration”, *Proceedings of the 2009 Second International Conference in Visualisation*, pp.3-9 (2009)
- [6] Rasika Ranaweera, Michael Frishkopf and Mickael Cochen “Folkways in Wonderland: a cyberworld laboratory for ethnomusicology”, *2011 International Conference on Cyberworlds*, pp.106-112 (2011)
- [7] Hans G.Kaper, Elizabeth Wiebel and Server Tipei, “DATA SONIFICATION AND SOUND VISUALIZATION”, *Computing in Science & Engineering*, Vol.1, Issue 4, pp.48-58 (1999)
- [8] 目野 大輔, 陰山 聰, “VR Jugglerによる3次元可視化”, *スーパーコンピューティングニュース誌*, Vol.13, No.1, pp.34-45 (2011)
- [9] <http://xspat.aegweb.it/>
- [10] Akira Kageyama, Yuichi Tamura and Tetsuya Sato, “Visualization of Vector Field by Virtual Reality”, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, No.138, pp.665-673 (2000)
- [11] 陰山 聰, 大野 暢亮, “バーチャルリアリティを用いた対話的3次元可視化ソフトウェアの開発とその応用”, *プラズマ・核融合学会誌*, Vol.84, No.11, pp.834-843 (2008)

- [12] Akira Kageyama and Nobuaki Ohno, “Tutorial introduction to Virtual Reality: What possibility are offered to our field?”, *Proceedings of ISSS-7*, pp.127-136 (2005)
- [13] Nobuaki Ohno and Akira Kageyama, “region-of-Interest Visualization by CAVE VR System with Automatic Control of Level-of-Detail”, *Computer Physics Communications*, Vol.181, Issue 4, pp.720-725 (2010)
- [14] 村田 歌織, 陰山 聰, “タイムライン法による流れ場のVR可視化”, 第38回可視化シンポジウム講演会論文集, pp.309-313 (2010)
- [15] Kaori Murata, Akira Kageyama, “Virtual Reality Visualization of Frozen-in Vector Fields”, *Plasma and Fusion Research*, Vol.6, 2406023 (2011)