

多感覚を用いた能動的データ提示
に関する研究

小 木 哲 朗

①

多感覚を用いた能動的データ提示に関する研究

Study of Multisensory Active Data Sensualization

平成 5 年 12 月

小木 哲朗

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	2
1.2 本論文の構成	5
第2章 データ・センシュアライゼーション	8
2.1 データ・センシュアライゼーションの考え方	9
2.2 従来の関連研究	11
2.2.1 多感覚を用いたデータ提示	11
2.2.2 3次元空間の中での能動的データ提示	13
2.2.3 本研究の立場	14
第3章 感覚と情報提示	15
3.1 人間の感覚	16
3.1.1 感覚の分類	16
3.1.2 感覚刺激パラメータ	18
3.2 刺激量と感覚量	22
3.2.1 刺激量と感覚量の関係	22
3.2.2 感覚量によるデータ提示	23
3.3 3次元感覚情報	25
3.3.1 3次元視覚情報	25
3.3.2 3次元聴覚情報	26
3.3.3 3次元触覚情報	27
第4章 感覚ディスプレイ	29
4.1 緒 言	30
4.2 視覚ディスプレイ	31
4.2.1 HMD (Head Mounted Display)	31
4.2.2 ハンディモニタ	34
4.3 聴覚ディスプレイ	40

4.3.1	3次元音像定位	40
4.3.2	Convolvotron システム	41
4.3.3	音像定位精度	48
4.4	触覚ディスプレイ	57
4.4.1	触覚的情報提示	57
4.4.2	風覚に関する予備実験	58
4.4.3	風覚ディスプレイの開発	60
4.4.4	システムの評価	70
4.5	本章のまとめ	78
第5章	データセンシュアライゼーション環境の開発	79
5.1	緒言	80
5.2	データ・センシュアライゼーション環境のシステム構成	81
5.2.1	ハードウェア構成	81
5.2.2	ソフトウェア構成	85
5.3	データ提示機能	91
5.3.1	視覚を用いたデータ提示機能	91
5.3.2	聴覚を用いたデータ提示機能	92
5.3.3	触覚を用いたデータ提示機能	95
5.3.4	動作に関する機能	95
5.4	利用方法	98
5.4.1	基本操作方法	98
5.4.2	データ提示の利用形態	99
5.5	応用事例	103
5.5.1	構造解析データの提示	103
5.5.2	流体解析データの提示	103
5.6	情報伝達効果	108
5.7	本章のまとめ	109
第6章	情報の伝達精度	110
6.1	緒言	111

6.2 知覚に与える誤差要因	112
6.3 感覚ディスプレイの尺度構成	114
6.3.1 刺激パラメータの選択	114
6.3.2 刺激と感覚量の非線形性	118
6.3.3 感覚量による尺度補正	127
6.4 データ提示における感覚統合	129
6.4.1 判断のばらつき	129
6.4.2 錯覚	130
6.4.3 感覚統合	132
6.5 本章のまとめ	140
第7章 ポリウムデータの認識	141
7.1 緒言	142
7.2 ポリウムデータの認識モデル	143
7.3 データ提示空間	145
7.4 内界データの認識	146
7.4.1 データ提示方法	146
7.4.2 ポリウムデータの認識実験	149
7.4.3 実験結果および考察	152
7.5 外界データの認識	158
7.5.1 外界データの認識における問題点	158
7.5.2 音源配置による位置情報の提示	161
7.5.3 外界データの認識実験	167
7.6 本章のまとめ	171
第8章 多感覚へのデータ振り分け方法	172
8.1 緒言	173
8.2 多感覚の利用方法	174
8.2.1 データ相互間の関係の提示	174
8.2.2 感覚統合を利用したデータ提示	174
8.2.3 複合イメージを利用したデータ提示	175

8.3 感覚間の干渉	176
8.3.1 感覚間の干渉実験	176
8.3.2 実験結果	179
8.3.3 利用方法に対する指標	189
8.4 本章のまとめ	200
第9章 展望および考察	201
9.1 データ・センシュアライゼーションの利用レベル	202
9.2 CAD/CAE への応用	203
9.3 プレゼンテーションとしての利用	204
9.4 ビジュアライゼーションのあり方	206
第10章 結 論	209
参考文献	213
謝 辞	220

第 1 章

序論

Introduction

1.1 研究の背景と目的

近年の計算機技術の発展はめざましく、その情報処理能力は大幅な拡大を示している。例えば、大容量の記憶装置の開発、演算速度の向上、あるいは計算手法やアルゴリズムの研究等が、これまでに大きな成果をあげてきている。しかしながら、計算機技術に関するこれらの多くの研究は、主に計算機内部の演算能力の拡大に注意が向けられており、これらの成果に比べて、計算機から人間へ情報を伝達するための表現能力は、十分に満足されているとは言えない。

全ての情報処理を計算機だけで実行することは不可能であり、より高度な問題解決を行うためには、計算機と人間という2つの異なる知的主体を結び付けた、トータルな系としての情報処理能力を拡大していくことが必要である。計算機の中だけでいかに高度な情報処理が行われても、その結果を人間に伝えることができれば、情報を有効に活用することはできない。このような意味から、計算機内部の演算能力だけではなく、計算機から人間へ情報を伝えるための情報伝達能力の拡大が重要視されるようになってきた。すなわち、計算機と人間との間で、幅広い高度な情報コミュニケーションを実現しようということである。

このような情報の伝達能力は、計算機の中で行われる情報処理が高度なものになればなるほど、問題解決におけるボトルネックとして重要な課題となってくる。特に、本研究で取り扱う科学技術計算の分野では膨大な数値データが取り扱われるため、それをわかりやすく提示する方法は非常に重要な問題である。最近の科学技術計算では、スーパーコンピュータ等を用いた大規模な数値シミュレーションが盛んに行われており、計算機から生成されるデータの量は加速的に増大している。また、数値シミュレーションとしての計算方法も、2次元モデルから3次元モデルの計算へと進んでおり、データそのものが非常に複雑なものとなってきている。そのため、計算機から出力されるデータは、もはやリスト上の数字を眺めるだけでは理解することが不可能であり、これらのデータをいかにわかりやすく人間に伝達できるかという表現力が、計算機に要求されている。

流体解析をはじめとするエンジニアリングや医療分野等で研究が盛んに行われているデータ・ビジュアライゼーションは、これらの科学技術データを視覚化して表現するための手法である。数値データの視覚化を行うことによって、確かに直観的な理解は可能になってきた。しかしながら、データ・ビジュアライゼーション手法では、既存の計算機ハードウェアである2次元ディスプレイ上でデータ提示が行われるため、その表現力には限界がある。そのため、3次元計算によって得られるボリュームデータ等を、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法によって正しく認識することは容易ではなく、ユーザは頭の中で何らかのデータの再構成を強いられる。特に、ベクトルデータ場のような多次元データの場合にはなおさらであり、情報の正確な伝達、現象の理解のため

には、さらなる表現力の向上が必要とされている。

一方、人間と計算機との間のヒューマン・インタフェースの研究分野では、ここ数年、人工現実感 (Artificial Reality)、あるいは仮想現実感 (Virtual Reality) と呼ばれる技術の研究が盛んになっていく [Haton91, Rheingold91]。人工現実感とは、「現実とは異なる仮想的な世界、あるいは仮想的環境の中で、あたかもそれが現実であるかのような感覚を持って体験し、行動することを可能にする技術」である [Tachi92, Hirose93a]。この人工現実感技術では、キーボードとCRTディスプレイという従来の標準的なインタフェース装置だけではなく、Data Glove や HMD (Head Mounted Display) に代表される人工現実感特有の入出力インタフェース装置を使用する。このような特殊なインタフェース装置を利用することによって、人間と計算機との間で広帯域の感覚チャネルを利用した、情報コミュニケーションを実現することができる。そのため、人工現実感の技術は、人間に対してより豊かな表現力を持つ情報提示技術として、利用されることが期待されている。

本研究は、このような人工現実感技術を応用することによって、科学技術データに対する有効なデータ提示方法の実現に関する研究を行ったものである。人工現実感技術を応用したデータ提示方法としては、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法のように情報を視覚化するだけではなく、視覚、聴覚、触覚、あるいは深部感覚等の人間のあらゆる感覚を利用したデータ提示を行うことが考えられる。また、データの提示場所としても、CRTディスプレイ上の2次元的な領域だけではなく、計算機によって合成される3次元的な仮想空間を利用することができる。さらに、身体的な動作を入力として用いることによって、空間中でのインタラクティブで能動的なデータ提示を実現することが可能になる。このように、人工現実感の技術を応用したデータ提示では、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法に比べて、大幅なデータ提示能力の拡大が期待される。またこのようなデータの提示方法は、従来の視覚化によるデータ・ビジュアライゼーションに対して、さまざまな感覚を利用したデータ提示という意味で、データ・センシュアライゼーション (Data Sensualization) と呼ぶことができる。

人工現実感技術のデータ提示手法としての応用の可能性は、既に M. Krueger 等によって示唆されているが [Krueger90]、本研究の目的は、その具体的な実現方法を示し、その有効性や利用方法についての検討を行うことである。研究の内容としては、データ・センシュアライゼーション環境のプロトタイプ・システムを実現するために、各種感覚ディスプレイ装置の開発、あるいはデータ提示を実行するためのデータ・センシュアライゼーション・ツールの開発等を行った。この環境下では、視覚、聴覚、触覚等の複数の感覚を利用した統合化されたデータ提示を行うことができる。特に、触覚的なデータ提示を行うためのディスプレイ装置としては、風を利用した風覚ディスプレイの開発を行い、利用している。また、ここで実現したデータ・センシュアライゼーション手法の効

果については、幾つかの実験を行い、定量的な評価を行った。視覚以外の感覚を用いた情報の提示方法については、既に幾つかの研究事例が見られるが、本研究では主に、多感覚を同時に用いた場合の効果に着目して議論を行っている。具体的なデータ・センシュアライゼーションの効果としては、情報の伝達精度の向上、3次元ボリュームデータに対する認識効率の向上等が考えられる。また本論文の最後の部分では、実際にデータ・センシュアライゼーションを利用するにあたり、データをどの感覚に振り分けるべきかという利用方法についての検討を行った。

データ・センシュアライゼーション手法は、その表現能力の拡大によって、よりわかりやすい情報提示を行うための、非常に有効なデータ提示方法となり得ることが期待される。また、このようなデータ提示に関する研究は、機械工学をはじめとする今後の科学技術の発展にとって、きわめて重要な研究課題であると言えることができる。

1.2 本論文の構成

本論文は、「多感覚を用いた能動的データ提示に関する研究」と題し、全部で10章から構成されている。Figure 1.2.1は、本論文の構成を示したものである。以下、各章の概要について述べる。

まず、最初の第1章は序論である。ここでは、研究の背景と目的、あるいは本論文の構成について述べている。

第2章では、本研究のテーマであるデータ・センシュアライゼーションの提案を行い、その基本的な考え方について説明を行う。また、本研究に関連する従来の研究についてのサーベイを行い、これまでに行われた関連研究に対して、本研究の特徴および立場を明らかにする。

第3章では、人間の感覚についての基礎的な事項について整理を行う。データ・センシュアライゼーションでは、人間のさまざまな感覚に対する情報の提示を行う。そのため、効果的なデータ・センシュアライゼーション方法を実現するためには、人間の感覚についての十分な理解を行っておく必要がある。本章では人間の各感覚についての特性、あるいはデータ提示としての利用可能性等について検討を行う。

第4章と第5章では、本研究を進めるにあたって開発を行ったデータ・センシュアライゼーションのためのプロトタイプ・システムについて説明を行う。まず第4章は、データ提示を行うための各種ディスプレイ装置についての説明である。本研究では、データ提示を行うために視覚、聴覚、触覚に対するディスプレイ装置を使用している。特に、触覚的なデータ提示を行うためのディスプレイ装置としては、風を利用した風覚ディスプレイの開発を行い、使用している。ここでは、これらの各種感覚ディスプレイ装置の原理、構造、特性等について説明を行う。

第5章は、第4章で説明を行った各種感覚ディスプレイを統合した、データ・センシュアライゼーション環境について説明を行う。データ・センシュアライゼーション環境は、ハードウェアとしてのシステム構成とソフトウェアとしてのデータ・センシュアライゼーション・ツールから構成される。本章では、データ・センシュアライゼーション環境のシステム構成、この上で実行可能なデータ提示方法、あるいはその利用方法等について説明を行う。また、実際の応用例として構造解析データ、あるいは流体解析データの提示についての利用例を示す。

第6章と第7章では、ここまで述べてきたデータ・センシュアライゼーション手法を用いたデータ提示効果について検討を行う。まず第6章では、情報の伝達精度という問題を取り上げ、従来のデータ・ビジュアル化手法に比べたデータ・センシュアライゼーション手法の効果について議論を行う。ここでは、データ提示に含まれる誤差要因について分析を行い、これらの誤差要

因を減少するための方法について実験的な検討を行う。ディスプレイ側の誤差要因に関しては、人間の感覚量を用いた尺度補正を行うことによって、ある程度誤差を減少することができる。また人間側の認識に係わる誤差要因に関しては、複数の感覚を利用した感覚統合の効果を利用することによって、誤差を減少できることを示す。

第7章では、データ・センシュアライゼーションを用いた2つめの効果として、3次元ボリュームデータの認識効率について議論を行う。3次元的なボリュームデータの認識に対しては、深部感覚を利用した能動的なデータ提示方法が有効であると考えられる。またこの際、人間とデータ空間との関係は、内界データと外界データという2つの場合に分けて考えることができる。本章では、内界データと外界データのそれぞれの場合について、深部感覚を利用した幾つかのデータ提示方法の提案を行い、その効果について実験的な検証を行う。

第8章は、データ・センシュアライゼーション手法を実際に利用するにあたっての利用方法の検討である。データ・センシュアライゼーションは、従来のデータ・ビジュアライゼーションに比べて、利用できる感覚やデータ提示方法が増えるため、その利用方法も多様になる。本章では特に、複数のデータ項目を提示する場合に、各データをどの感覚に振り分けて提示するべきかという問題について検討を行う。具体的には、感覚間の干渉について実験的な計測を行い、ここで得られる感覚間干渉度を、データ振り分け方法に対する指標として導入する。

第9章は、展望および考察である。ここでは、本研究で提案を行っているデータ・センシュアライゼーションの発展の可能性、あるいは今後の展開等について考察を加える。

第10章は、結論である。ここでは、本研究で得られた知見について総括を行う。

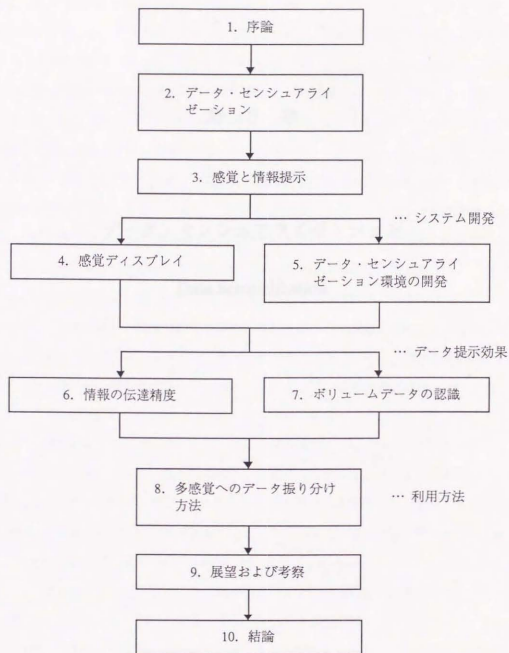


Figure 1.2.1 本論文の構成

データ・センシュアライゼーション

Data Sensualization

2.1 データ・センシュアライゼーションの考え方

本研究では、科学技術データに対する有効な提示方法としてデータ・センシュアライゼーションの提案を行っているが、本章では、その概念を明らかにしておくことを目的とする。そもそも、センシュアライゼーション (Sensualization) という言葉は M. Krueger が “Artificial Reality II” の著書の中で、人工現実感を用いた科学技術データの提示という応用分野の可能性に対して用いた言葉であるが [Krueger90]、ここでは、本論文内で具体的に実現化しているデータ・センシュアライゼーションの考え方と定義について説明にする。

データ・センシュアライゼーションの目的は、前章で述べたように、計算機から人間に対する情報の表現力を拡大することである。従ってデータ・センシュアライゼーションの基本的な考え方としては、人間が本来備えている認識能力を十分に活用したデータの提示方法を実現することである。そこで、現実世界における人間の認識活動について考えてみると、従来のデータ・ビジュアルイゼーション手法にはない、幾つかの特徴的な認識方法を行っていることがわかる。

まず人間は、視覚、聴覚、触覚等のさまざまな感覚を統合して対象の認識、判断を行っているという点をあげることができる。すなわち、人間の持つそれぞれの感覚は、どれもあいまいさを含み完全なものではないが、複数の感覚を統合することによって、より正確な認識、判断を行うことが可能になる [Yamasaki92]。これに対して、従来のデータ・ビジュアルイゼーション手法では、人間の感覚の中で視覚だけしか利用していないため、人間の認識にも自ずから限界がある。

また次の特徴として、人間は3次元空間の中での能動的なインタラクションに基づいて、対象の認識を行っているという点があげられる。すなわち、人間の認識活動においては、受動的な感覚情報だけでなく、対象に対する能動的な働きかけという、運動と感覚との統合作用が重要な役割を果たしているという考え方である [Nakamura79, Shimojo90, Katayama90]。しかしながら、従来のデータ・ビジュアルイゼーション手法では、1枚の画像の中でいかに情報を表現するかというところに多くの関心が払われており、ユーザは常に受動的な立場で情報の提示が行われていた。また、データの提示領域も2次元的な世界に限られているため、3次元的な情報を提示するためには十分な方法とは言えない。

以上の問題を考慮すると、データ・センシュアライゼーションに対する基本的な方法論としては、次のような項目が要求される。すなわち、

- a) 多感覚を用いたデータ提示
 - b) 3次元空間の中での能動的データ提示
- を実現することである。

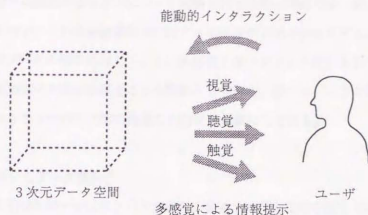


Figure 2.1.1 データ・センシュアライゼーションの概念

Figure 2.1.1は、以上のデータ・センシュアライゼーションの概念を図示したものである。すなわちデータ・センシュアライゼーションでは、まず3次元空間を利用したデータの提示が行われる。ユーザは、このデータ空間に対して、身体的な行動を伴う能動的なインタラクションを行うことができる。また、この際に人間に提示されるデータは、視覚、聴覚、触覚等の多感覚を用いた提示が行われるということである。

このようなデータ・センシュアライゼーションの考え方を実現するための方法としては、人工現実感の技術を応用することが考えられる。人工現実感技術はその構成要素として、自律性、多感覚、3次元、臨場感、インタラクション等の多くの要素を含んでいる [Helse91, Zeltzer92]。科学技術データの提示では、提示情報が物理的なシミュレーションとして生成されるため、データそのものの中に自律性が含まれている。また、ここで行うデータ・センシュアライゼーションでは、上述した a) b) の特徴を持つことから、多感覚、3次元、インタラクション等の要素を利用したデータ提示方法であると考えることができる。さらに、このようなデータ提示方法は、単なる計算結果の提示にとどまらず、仮想的な物理現象として、臨場感を伴った情報提示が行われることが期待される。

以上のことからデータ・センシュアライゼーションの実現は、1つの人工現実感システムの開発として考えることができる。

2.2 従来の関連研究

前節では、本研究の基本的な考え方について説明を行ったが、本節では、関連する従来研究についてのサーベイを行い、これらの関連研究に対する本研究の立場を明確にする。本研究は、前述したように科学技術データの提示に対して、1) 多感覚を用いたデータ提示を行うこと、2) 3次元空間の中での能動的データ提示を行うことを特徴としている。従って、ここで取り上げる従来研究としても、このような2つの方向性に関連した研究を対象にしてある。

2.2.1 多感覚を用いたデータ提示

まず、多感覚を用いたデータ提示という点から、関連する従来研究を取り上げる。研究事例としては、科学技術データの提示にこだわらず、視覚以外の感覚、すなわち聴覚、触覚、力覚等を用いた情報提示に関する研究を取り上げている。

(1) 聴覚による情報提示

計算機とのインタフェースに聴覚情報を用いる場合、従来は主にイベントの警告音等の利用方法が行われていたが、最近、計算機からのデータ提示に積極的に聴覚情報を利用することの重要性が認識されるようになってきた [Reuter90]。

University of Lowell の Smith 等は、2次元テキストや統計データ等の提示に聴覚情報を利用する研究を行っている [Smith90]。このようなデータ提示に音を利用する場合には、どのような音を生成するかが重要な問題となる。この研究では、多次元の情報を表現するために、音の大きさ、高さ、立ち上がり、減衰等のパラメータを利用している。また Xerox の Gaver 等は、飲料水ブランドの稼働状態を聴覚情報を用いて提示する ARKola と称するシミュレーション・システムの開発を行っている [Gaver91]。この研究では、ブランド全体の稼働状態を1つの音として表現すると同時に、各要素に関する情報を音のパラメータとして分離できるような音作りの研究を行っている。これらの研究では、音の持つパラメータを利用した情報提示を行っており、音の持つ空間情報は利用されていない。

東京大学の光石等は、テレ・マシニングに聴覚による情報提示を利用した研究を行っている [Mitsui92]。この研究では、遠隔地の加工機械の状態を音で表現するために4つのスピーカを用いており、2次元的な音像定位ではあるが、空間情報としての音を利用した情報提示を行っている。

さらに、人工現実感の3次元音像定位技術を応用することによって、3次元的な空間情報として音を利用した情報提示の研究が行われるようになってきた。NASA の Wenzel 等は、視覚とともに

音の3次元音像定位を取り入れた情報提示システムVIEWを開発し、テレロボティックス等への応用を試みている[Wenzel90a]。また松下電工の四宮等は、システムキッチン疑似体験システムの中に同様の3次元音像定位システムを取り入れている[Shinomiya91, Shinomiya93]。

(2) 触覚による情報提示

次に、触覚を利用した情報提示に関する研究を取り上げる。人間の感覚についての生理学的な分類は第3章で詳しく述べるが、人間の“触る”という行為の中では、触圧覚、力覚等の感覚が使われる。そのため、一般的に触覚という場合には、生理学上は触圧覚、力覚等の感覚が含まれる。

University of North CarolinaのBrooks等は、Project GROPEと称する力覚を利用した情報提示に関する研究を行っている[Brooks90]。この研究では、6自由度のマスタ・マニピュレータを応用した力覚ディスプレイ(Haptic Display)を開発し、ポテンシャル場の認識、あるいは分子結合のシミュレーション等の科学技術データの提示への応用を試みている。また筑波大学の岩田等は、デスクトップ型の力覚ディスプレイを用いたボリュームデータの提示に関する研究を行っている[Iwata93, Noma93]。このシステムは、パラレル・マニピュレータの頂部に取付けられた球状のグリップを握ることで、グリップを通して力覚の提示が行われる。

力覚を用いたさらに細かいデータ表現に関する研究としては、MITのMinsky等が開発したSandpaperシステムがある[Minsky90]。このシステムは、2自由度のジョイスティックにモータで反力を生成し、これを制御することで、物体表面のテクスチャを力覚によって表現することができる。また同様の研究としては、製品科学研究所の赤松等が開発したマルチモーダル・マウスがある[Akamatsu91, Akamatsu92]。このシステムは、底部に電磁石を取付けたマウスを鉄製のマウス操作台の上で使用することによって、抵抗力を生成し、テクスチャの力覚表現を行うことができる。これらのシステムでは、かなり細かい情報を力覚によって提示することができるが、基本的には2次元情報であるため、空間的な3次元情報の提示に利用することは困難である。

その他、数値データの提示が目的ではなく、形状操作等を目的とした力覚ディスプレイとして幾つかの研究が行われている。例えば、製品科学研究所の福井等は、XYレコグを用いて形状操作を行う際の抵抗力を提示するシステムの開発を行っている[Fuku90]。東京工業大学の佐藤等は、糸を利用することで親指と人指し指の指先に力覚を生成するシステムSPIDARを開発している[Sato89, Hirata90]。筑波大学の岩田等は、パラレルマニピュレータを用いて各指の動きに対応した触圧覚、力覚を生成する提示装置を開発している[Iwata90]。また東京大学の広田等は、接触板を用いることで人指し指の指先に触圧覚、力覚を提示する面提示型デバイスを開発し、弾性やテクスチャ等の表現を行っている[Hirota92, Hirota93]。しかしながら、これらのディスプレイ装置では、物体の形状

に触る感覚を生成することが主な目的であるため、科学技術データの提示にはそのままでは応用することが困難である。

2.2.2 3次元空間の中での能動的データ提示

次に、3次元空間の中での能動的データ提示という点から見た場合の、関連研究について取り上げる。3次元空間を利用した計算機インタフェースの考えは、1960年代に提案された Sutherland の Ultimate Display にさかのぼる [Sutherland65]。彼は、この考えをもとに3次元的な視覚情報を提示するための HMD (Head Mounted Display) の開発を行っている [Sutherland68]。

その後、NASA の Fisher 等は具体的なシステムとして VIEW システムの開発を行っている [Fisher86]。このシステムは、HMD、Data Glove 等を組み合わせることによって、3次元的な情報提示環境を構築している。またこの中には、前述したように3次元聴覚情報等も取り入れられている。また NASA の Bryson 等は、数値流体データを提示するために Virtual Windtunnel と称するシステムの開発を行っている [Bryson91, Bryson92a, Bryson92b]。このシステムはインタフェースとして、Data Glove やリンク式のディスプレイ装置である BOOM を用いており、数値シミュレーション結果として得られる航空機まわりの流体の流れを3次元的に表示することを可能にしている。

また、University of North Carolina の Bajura 等は、Video See-Through HMD を用いて医療情報の提示に関する研究を行っている [Bajura92]。この研究では超音波診断によって得られた映像や CG 画像を患者の身体に3次元的に重ね合わせて表示することで、診断への応用を試みている。

Columbia University の Feiner 等は、多次元の科学技術データや統計データ等を提示するために n-Vision というツールの開発を行っている [Feiner90]。このツールでは Data Glove を用いることで、入れ子状の座標世界を3次元空間上に表示することができる。SUNY の Kaufman 等も、Data Glove を使ったビジュアルイゼーション・ツール edvol の開発を行っている [Kaufman90]。このツールでは、ポリウムデータの提示を行うことができ、ジェスチャを使った3次元のインタラクションを可能にしている。

また科学技術データではないが、東京電力の甘利等はソフトウェアの3次元視覚化を行うためのシステムを開発している [Hirose90a, Myoi91, Amari91]。このシステムでは、Data Glove とステレオ・プロジェクタを用い、電力制御用のソフトウェアの構造や動作を3次元的に表示している。

これらの研究事例は、主に3次元空間の中での視覚情報を利用したデータ提示であり、この中で能動的なインタラクションを行うためには Data Glove に代表される3次元入力装置が利用されている。また、3次元空間の中での聴覚情報を利用する場合には、前述の3次元音像定位等の技術が必要となる。この場合、ユーザの頭部の移動に応じた音像の制御を行うことで、聴覚情報に基づいた

能動的インタラクションを行うことが可能になる。また、触圧覚や力覚を利用する場合には、ユーザの手の動きに応じた情報提示を行うため、前述の触圧覚、力覚ディスプレイの多くは、システム自体が3次元的な能動性に基づいていると考えることができる。

2.2.3 本研究の立場

以上、本研究に関連する主な従来研究について述べたが、ここではこれらの従来研究と比べた本研究の立場を明確にしておく必要がある。本研究の特徴としては、1) 多感覚を用いたデータ提示、2) 3次元空間の中での能動的データ提示、という2項目をあげたが、本研究の特色と意義は、まさにこの2つの特徴を同時に備えていることである。

すなわち、聴覚や触圧覚、力覚等の視覚以外の感覚を、個々に用いた研究事例は幾つが行われているが、本研究ではこれらの多感覚を同時に用いた場合の効果に注目している。また3次元空間の中での能動性に関しても、視覚に基づいた能動的データ提示だけではなく、聴覚や触覚等の全ての多感覚についての能動性を利用しているという点が本研究の立場である。

感覚と情報提示

Sense and Sensory Information

3.1 人間の感覚

前章で説明したように、データ・センシユアライゼーションでは、人間のさまざまな感覚に対して情報の提示を行う。そのため、データに対する有効な提示方法を実現するためには、人間の感覚についての十分な理解が必要である。本節では、人間の持つ各種感覚について整理を行い、各感覚のデータ提示への利用可能性について検討を行う。

3.1.1 感覚の分類

感覚とは、体の内外における環境の変化、すなわち刺激によって即時的に引き起こされる意識内容のことである。この刺激を受けるための感覚神経細胞を受容器、あるいは感覚神経細胞を含む付属器官を合わせて感覚器と呼んでいる。人間の持つ感覚については、一般には五感という表現がよく使われるが[Smith89]、生理学的にはTable 3.1.1に示すような分類が行われている[Tasaki89]。以下、これらの各感覚について説明を行う。

(1) 特殊感覚

特殊感覚とは、身体の特定の場所に固有の感覚器を持つ感覚である。特殊感覚に分類されるものとしては、視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚があげられるが、これらの感覚には、それぞれ目(網膜)、耳(蝸牛)、舌(味蕾)、鼻(嗅粘膜)、前庭器官(三半規管)等の特殊な感覚器が存

Table 3.1.1 人間の感覚の分類

種 別	名 称
特殊感覚	視覚、聴覚、味覚、嗅覚、平衡感覚
体性感覚	
皮膚感覚	触圧覚、温覚、冷覚、痛覚
深部感覚	運動感覚(位置覚、速度覚、力覚) 深部痛覚
内臓感覚	内臓痛覚 臓器感覚(空腹感、満腹感、尿意、便意等)

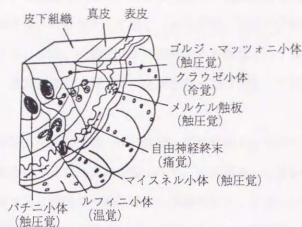


Figure 3.1.1 皮膚感覚の各種受容器 [Suzuki72]

にしている。

(2) 皮膚感覚

皮膚感覚は、皮膚表面に分布した受容器によって感じられる感覚であり、触圧覚、温覚、冷覚、痛覚等から構成される。Figure 3.1.1は皮膚および皮下組織内に存在する各種受容器を示したものである [Suzuki72]。この中で触圧覚の受容にはマイスネル小体、メルケル触板、ゴルジ・マツオニ小体、パチニ小体等が関与している。また温覚にはルフィニ小体、冷覚にはクラウゼ小体、痛覚には自由神経終末がそれぞれ関与している。

(3) 深部感覚

深部感覚は、筋、腱、関節等の皮膚と内臓との中間領域に起源を持つ感覚であり、これは運動感覚と深部痛に分けられる。運動感覚とは、体肢の関節角度あるいは筋収縮による動きや張力等が複合された感覚であり、動きの少ない場合の位置覚、動きを伴う場合の速度覚、あるいは筋に発生する力である力覚等に分類することができる。また深部痛は、筋肉の痛み等による感覚である。

前述の皮膚感覚とこの深部感覚とを合わせて、体性感覚と呼ばれている。

(4) 内臓感覚

内臓感覚は、内臓で受容される感覚であり、これは内臓痛覚と臓器感覚に分けられる。内臓痛覚とは、病的な状態において臓器で引き起こされる痛みの感覚であり、臓器感覚とは、空腹感、満腹感、原意、便意等の身体内部の状況変化によって引き起こされる感覚である。

人間の持つ基本的な感覚は、以上のように分類されるが、この他にも幾つかの複合的な感覚を考えることができる。例えば、本研究で利用している風覚（風を受けたときに感じる感覚）は、生理学的には特別に分類されている感覚ではない。しかしながら、風は触圧覚の刺激分布、あるいは場合によっては温覚、冷覚等を伴った感覚として感じられるため、上述の分類の中では皮膚感覚の一種として考えることができる。また、一般的によく使用される触覚という表現も生理学的な用語ではなく、厳密には触圧覚、温覚、冷覚、痛覚等の皮膚感覚と力覚を含んだ統合的な感覚として考えることができる。

その他の感覚に関する分類方法としては、外部感覚、内部感覚という分け方がある。外部感覚とは、自分の外部環境の情報を取り込むための感覚であり、内部感覚とは自分自身の状態を知るための感覚である。外部感覚はさらに遠隔の情報に対する遠隔感覚と、近接した情報に対する近接感覚とに分けられる。視覚、聴覚、嗅覚は遠隔感覚であるが、味覚、皮膚感覚は近接感覚である。また深部感覚、内臓感覚等は内部感覚として分類することができる。

3.1.2 感覚刺激パラメータ

上で述べたような、感覚器の種類の違いによって生じる感覚内容の相違は感覚の“種”と言うが、これに対して同じ感覚器内での感覚の違いを“質”と言う。データ・センシュアライゼーションでは、これらの感覚の質を用いてデータの提示を行う。本節では、各種感覚における質について整理を行い、データ提示に利用可能な感覚パラメータの検討を行う。

まず視覚に関する質としては、色、形、大きさ等があげられる。視覚は基本的に光を受容する感覚であるが、光の分光組成（スペクトル分布）によって引き起こされる視感覚が色である。色に対する感覚としては、色を構成する3原色の変化、あるいは色相、明度、彩度という心理的属性等の感覚パラメータが存在する。色相、明度、彩度の3つは、色の心理的3属性と言われており、これらは独立な感覚パラメータとして考えられる。また、より高次の視感覚としては、形、大きさ、方向等があげられる。これらの感覚は、網膜上の画像から線、面等の幾何学的な構造を知覚することによって引き起こされる感覚である [Marr82, Watt88]。

聴覚に関する質としては、音の心理的3要素である音の大きさ、音の高さ、音色があげられる。聴覚は音波を受容する感覚であるが、その振幅に対する感覚が音の大きさであり、周波数に対する感覚が音の高さ、波形に対する感覚が音色である。これらの各要素は物理的な刺激としてはそれぞれ独立なものであるが、感覚としては相互に依存している。例えば Figure 3.1.2 は音の等感曲線（同一曲線上の音は等しい大きさに聞こえることを示す）を示したものであるが、周波数によって聞こえる音の大きさの変化が示されている [Robinson56]。またその他に、音の方向、リズム等も聴覚に

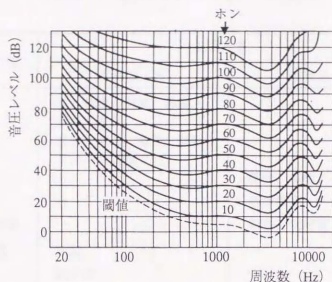


Figure 3.1.2 音の大きさの等感曲線 [Robinson56]

関する質として考えることができる。

視覚、聴覚に関するこれらの質は、データ提示において重要かつ有効な感覚パラメータとして利用可能であると考えられる。

味覚に関する質としては、酸味、塩味、苦味、甘味の4種類が基本的な味覚要素として考えられている。これらの味覚要素はそれぞれ感覚パラメータとして利用することも可能であるが、味覚の場合には口に入れるという動作が必要になるため、データ提示の目的としては実用的ではない。嗅覚に関しても、幾つかの原臭が嗅覚の基本要素として報告されているが、その原理はあまり明らかにされていない。また、嗅覚は長時間同じ刺激が与えられると感覚が麻痺してくる等の特性があるため、味覚同様に感覚パラメータとしての有効性は低い。

平衡感覚は、身体の傾斜、加速度等を感じる感覚である。データ提示としては、これらの刺激の大きさを感覚パラメータとすることができるが、身体全体に対する情報提示が必要になるため、利用方法としてはかなり大掛かりな装置が必要になる。

触圧覚、温覚、冷覚、痛覚等の皮膚感覚は、それぞれの刺激の大きさが感覚パラメータとなり得る。この中で痛覚に関しては、苦痛が伴うためにあまり適した感覚パラメータではないが、触圧覚、温覚、冷覚等はデータ提示のための有効な感覚パラメータとして利用することが可能である。

Table 3.1.2 感覚の質とデータ提示への有効性

感覚の種	感覚の質	
	有効性 大	有効性 小
視覚	色、色相、明度、彩度 形、大きさ	—
聴覚	音の大きさ、高さ、音色 リズム、方向	—
味覚	—	酸味、塩味、苦味、甘味
嗅覚	—	各種原臭
平衡感覚	—	傾斜、加速度
触圧覚	圧力	—
温覚	温かさ	—
冷覚	冷たさ	—
痛覚	—	痛さ
位置覚	位置	関節角、筋収縮
速度覚	—	関節、筋の動き
力覚	力の大きさ、方向	—
深部痛覚	—	痛さ
内臓痛覚	—	痛さ
臓器感覚	—	空腹感、満腹感、尿意、 便意等の刺激の大きさ

また運動感覚の中では、位置覚、速度覚等は、関節角、筋収縮やその変化を感覚パラメータとして利用することが考えられる。しかしながらこれらの感覚は、刺激を提示するために、身体あるいはその一部を動かすことが必要であるため、位置情報と結び付いたデータ提示には有効ではない。位置覚等は、むしろ直接データ値の提示に利用するよりも、3次元空間での位置情報提示という補助的な役割に利用する方が効果的であると思われる。このような深部感覚の利用方法に関しては第7章で詳しく検討を行う。また力覚に関しては、刺激の大きさを感覚パラメータとすることができ、データ提示として十分に利用可能であると考えられる。

その他、深部痛覚や内臓痛覚では、痛みの大きさを、臓器感覚では空腹感、満腹感、尿意、便意等の各刺激の大きさを感覚パラメータとすることは可能であるが、これらの感覚は苦痛や不快感を伴うため、データ提示という目的のためには有効な感覚パラメータとは言えない。

Table 3.1.2 は、以上の各感覚に対する質と、データ提示に対する感覚パラメータとしての利用の有効性をまとめたものである。これらの結果から、感覚パラメータとしての実用性、有効性等を考慮し、本研究では特に視覚、聴覚、触覚（具体的には風覚を利用するがここでは広い意味で用いる）の3つを、データ提示のための基本感覚として利用することにする。また位置覚に関しては、位置情報提示という補助的な手段として利用することにする。

3.2 刺激量と感覚量

3.2.1 刺激量と感覚量の関係

本節では、各種感覚パラメータの利用方法について考える。データ・センシユアライゼーションで用いられる色、音、風等の感覚刺激は、媒体となる光、音波、空気の流れ等の物理的な性質によって、知覚される感覚が決定づけられる。しかしながら人間は、これらの感覚刺激を受ける場合に、刺激の持つ物理的性質を直接知覚するのではなく、感覚器というフィルターを通して知覚が行われる。そのため一般には、提示される刺激量と人間が受け取って感じる感覚量とは一致せず、両者は線形にはならないことが知られている [Aiba70, Saito82]。

刺激量と感覚量との関係については、Weber、Fechner、あるいは Stevens 等により、いくつかの関係式が提示されている。これらの研究では、感覚刺激の持つ物理的性質と人間が受ける心理的印象との間に数値的な関係導き、刺激-感覚間の尺度構成を行っている。ここでは、これまでに知られている両者の関係式について概要をまとめる。

(1) Weber-Fechner の法則

2つの刺激に対して、違いを区別できる最小の刺激量の差を弁別閾というのが、Weber は全ての感覚刺激に対して、刺激量 S とその刺激量に対する弁別閾 ΔS との間に

$$\Delta S/S = \text{一定} \quad (3.2.1)$$

という関係があることを仮定した。この $\Delta S/S$ を Weber 比と言う。Fechner は、さらにこの $\Delta S/S$ が一定の単位感覚量を与えるものと仮定し、単位感覚量 ΔE を

$$\Delta E = k \Delta S/S \quad (3.2.2)$$

と表した。ここで、 k は比例定数であり、感覚によってそれぞれ決まった値を持つ。ここで $\Delta S \rightarrow dS$ 、 $\Delta E \rightarrow dE$ という近似を行うことにより

$$dE = k dS/S \quad (3.2.3)$$

となり、これを積分することによって

$$E = k \log S \quad (3.2.4)$$

の関係が成り立つ。すなわち、弁別閾に対する単位感覚量を積み重ねていくことによって尺度構成が得られたことになる。この関係式を Weber-Fechner の法則と言う。この式では、人間が受ける感覚量は刺激量の対数に比例するという、刺激量と感覚量の間の非線形性が示されている。しかしながら、この Weber-Fechner の法則は狭い範囲での刺激変化に対してしか成り立たず、実際にはこの法則に適合しない幾つかの現象が発見されている。

Table 3.2.1 Stevensの法則におけるベキ指数 [Stevens60]

感覚の種類	指数 n	刺激の種類
視 覚	0.33	10^{-10} ランペールに対して 56 ~ 96 dB の白色光
聴 覚	0.6	47 ~ 87 dB の 1000 Hz の純音
触圧覚	1.1	手掌に対して 0.25 ~ 2.5 kg
温 覚	1.6	無関温度以上 2 ~ 14.5 °C
冷 覚	1.0	無関温度以下 3.3 ~ 30.6 °C
痛 覚	3.5	0.29 ~ 0.73 mA の交流刺激
振動覚	0.95	閾値に対して 17 ~ 47 dB の強さで 60 Hz

(2) Stevensの法則

これに対し Stevens は、2つの刺激に対する感覚量の大きさを、直接数値で比較判断させるといふ実験的な方法を用いて、尺度構成を行った。この実験では、ある特定の刺激を標準刺激として与え（例えば、この標準刺激に対する感覚量を 100 の数値で表す）、被験者に提示された刺激に対する感覚量を数値で回答してもらうことによって尺度を決定するという方法を行った。この方法はマグニチュード推定法と呼ばれており、Stevens はこの方法を通して刺激量 S と感覚量 E の間に

$$E = k S^n \quad (3.2.5)$$

のベキ乗則が成立することを見出ししている。ここで k は比例定数、 n は感覚に固有のベキ指数である。このベキ乗則で表される関係を Stevens の法則と言う。Table 3.2.1 は、Stevens によって得られた各感覚についてのベキ指数を示したものである [Stevens60]。この表により、各感覚についてかなり広範囲での刺激変化に対して成立する、刺激量と感覚量との関係が得られている。

3.2.2 感覚量によるデータ提示

データ・センシュアライゼーションでは、提示すべき数値データを感覚刺激にマッピングすることでデータ提示を行う。しかしながらこれまでに述べたように、提示される刺激量とそれを人間が受けたときの感覚量とは比例せず、両者の間には非線形性が存在する。そのため、提示すべき数値データをそのまま刺激量に対応させるのでは、人間に対して正しい情報伝達を行うことはできない。

い。感覚刺激を用いたデータ提示の基本的な考え方としては、データを感覚量によって提示することが必要である。すなわち、提示すべき数値データの値を、刺激量ではなく、感覚量に対応させてデータ提示を行うということである。このようなデータ提示を行うためには、利用する感覚刺激に対して刺激量と感覚量の間の非線形性を把握し、両者の関係を用いた補正を行うことが必要である。

また、刺激量と感覚量の関係については、もう一つ考慮すべき問題が存在する。一般に感覚としては、“大きさ”に関する感覚（*prothetic continuum*）と“種類”に関する感覚（*metathetic continuum*）とが存在する[Lindsay77]。例えば、色の明るさや音の大きさ等は大きさに関する感覚であるが、色の色相や音の高さ等は種類に関する感覚であると考えられる。上述したStevensの法則は、大きさに関する感覚について成立する関係であり、種類に関する感覚については必ずしも成立しないことが知られている。

本研究で行うデータ・センシュアライゼーションでは、大きさに関する感覚刺激だけではなく、色相や音の高さ等の種類に関する感覚刺激も重要な情報として利用する。そのため、これらの感覚刺激に対しても、刺激と感覚量との間の数値的な尺度構成を決定しなければならない。本研究では、先述のマグニチュード推定法を拡張した実験的方法によって、これらの刺激量と感覚量の間の関係を計測し、その結果を利用している。この尺度構成に関する具体的な方法および結果については、第6章で改めて詳述を行う。

3.3 3次元感覚情報

前節までは、データ・センシュアライゼーションに利用可能な各種の感覚パラメータとその利用方法について述べてきた。データ・センシュアライゼーションでは、このような多感覚の利用だけではなく、3次元空間の中での能動的データ提示を行うというもう1つの特徴を持っている。3次元空間でのデータ提示を行うためには、各感覚に関する3次元の情報知覚能力を利用することが必要である。本節では、本研究で利用する視覚、聴覚、触覚に関する3次元情報の知覚について整理を行い、各種感覚ディスプレイに要求される機能の検討を行う。

3.3.1 3次元視覚情報

まず、視覚における3次元情報について整理を行う。視覚は、その感覚器である網膜上では2次元的な画像情報しか持たないが、この2次元画像をもとにして3次元的な情報の知覚を行っている。人間がこのような3次元情報、すなわち奥行き感を知覚する立体視のメカニズムの要因としては、Table 3.3.1に示す項目が考えられている [Masuda90]。

すなわち立体視の要因は、まず大きく生理的要因と心理・記憶的要因とに分けられる。生理的要因としては、水晶体の調節、両眼の輻輳角、両眼の視差、単眼の運動視差、取り込み効果があげられる。ここで水晶体の調節とは、像のピント合わせにより水晶体の厚さを調節する働きであり、両眼の輻輳角とは、対象物を注視したときに両眼の視線が注視点となす角度である。また両眼の視差とは、両眼における網膜像の差異であり、単眼の運動視差は、観察者と対象との相対運動によって生じる網膜像の視差である。また取り込み効果は、広視野角の画像空間内に取り込まれるような錯覚によって生じる立体感である。これらの要因の中でも、特に近距離の場合には、両眼視差、運動視差の影響が大きいと言われている [Nagata77]。

また心理・記憶的要因としては、物の大小、物の高低、物の重なり、きめの粗密、形状、線遠近法、面遠近法等による幾何学的立体視の要因と、明暗、コントラスト、彩度、色相、解像度、陰影等の光学的立体視の要因とがあげられる。

データ・センシュアライゼーションで行う視覚表示では、3次元空間上での立体表示を行うことが要求されるため、これらの立体視の要因を考慮した情報提示を行うことが必要である。この中で生理的要因に関しては、使用するディスプレイ装置として条件を満たすことが必要であるが、心理・記憶的要因に関しては、画像生成時におけるレンダリング手法としてこれらを考慮する必要がある。

Table 3.3.1 立体視の要因 [Masuda90]

要因	項目	遠	近	適用域	特徴
生理的要因	水晶体の調節	薄	厚	数 m 以下	単眼で可能
	両眼の輻輳角	小	大	10 m 以下	両眼が必要
	両眼の視差	小	大	10 m 以下	両眼が必要
	単眼の運動視差	小	大	数 m 以上	単眼で可能
	取り込み効果			数 m 以上	単眼で可能
心理・記憶的要因	幾何学的立体視	物の大小	小	大	数 m 以上 単眼で可能
		物の高低	高	低	
		物の重なり	後	前	
		きめの粗密	密	粗	
		形状			
		線遠近法			
		面遠近法			
	光学的立体視	明暗	暗	明	数 m 以上 単眼で可能
		コントラスト	弱	強	
		彩度	鈍	鮮	
		色相	青	赤	
		解像度	小	大	
		陰影			

3.3.2 3次元聴覚情報

次に、聴覚の3次元情報について考える。聴覚では、両耳聴によって得られる両耳間の情報の差を用いることによって、3次元的な音の方向感覚、すなわち3次元音像定位を行うことができる。この場合、音の方向判断を行うためには、両耳での音の音圧差と到達時間差が重要な手掛かりになると考えられている [Blauert86]。Figure 3.3.1 は、音源がある程度遠い場合に両耳に到達する音の経路を示したものである。音波は音源に近い方の耳には直接到達するが、遠い方の耳には頭に沿って回折して回り込む。このとき、音源から両耳までの伝達経路の距離の差 d は、次式で近似的に表すことができる。

$$d = r \theta + r \sin \theta \quad (3.3.1)$$

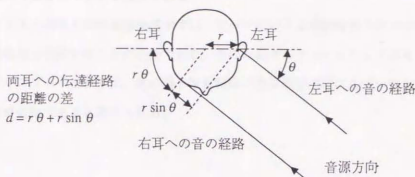


Figure 3.3.1 両耳聴における音の伝達経路

ここで θ は音源方向、 r は人間の頭の半径である。この伝達経路の差は、音の到達時間差、すなわち位相差を引き起こす。このような到達時間差が有効な手掛かりになるのは低周波領域においてであり、波形の1サイクルが位相差よりも小さい広周波領域に関しては、時間差の影響はあいまいであり、音圧差の方が重要な手掛かりになると考えられている。

また3次元音像定位に関するその他の要因としては、頭や耳介による反射や回折があげられる。これらの影響を受けることで、音波形は到達方向に従ったさまざまな変形が引き起こされるため、音像定位において重要な手掛かりになっていると考えられている。

データ・センシュアライゼーションにおける聴覚ディスプレイとしては、これらの3次元音像定位の原理を応用することによって、音源の3次元配置が可能なディスプレイ装置を用いることが必要である。すなわち、聴覚を用いたデータ提示では、データが存在する場所からデータに対する音情報が聞こえるような提示方法を実現することが要求される。

3.3.3 3次元触覚情報

上述の視覚、聴覚では遠隔感覚としての特徴を利用することで、3次元情報の知覚を行っている。これに対して触覚は近接感覚であるために、感覚刺激自体には位置情報は含まれていない。しかしながら触覚の場合には、位置覚等の深部感覚と結び付けることによって、3次元情報としての知覚を行うことが可能になる。例えば手のひらの触圧覚を利用する場合には、手を移動すること

で、手の位置の触圧覚刺激を感じると同時に、腕の関節角や筋収縮による位置覚からデータが存在している位置に関する情報を得ることができる。すなわち、触覚と位置覚を統合することで3次元情報の知覚を行うことができると考えられる。

このように3次元空間上の触覚情報提示では、データに対する感覚情報だけではなく、位置覚等の深部感覚を有効に利用することが必要である。そのためデータ・センシュアライゼーションで利用する触覚ディスプレイとしては、腕の動き等を利用できる深部感覚に基づいたディスプレイ装置を用いることが必要であると考えられる。

第 4 章

感覚ディスプレイ

Sense Displays

4.1 緒言

データ・センシュアライゼーションでは、前述したように、人工現実感技術を応用することによって、3次元空間の中での多感覚を用いた能動的なデータ提示を行う。このようなデータ提示を行うためのディスプレイ装置としては、従来のデータ・ビジュアルライゼーションで用いられていたCRTだけではなく、人工現実感技術特有のディスプレイ装置が必要とされる。これらのディスプレイ装置としては、既存の人工現実感システムの中から利用可能なものも幾つか存在するが、データ提示という目的のためには、必ずしも有効でないものが多い。そのため本研究では、幾つかのディスプレイ装置に関しては、データ提示のために特別なシステムを試作して、使用している。

本研究で行うデータ提示方法は、人間の各種感覚に対する刺激を提示することで、データの提示を行う。そのため、ディスプレイとしては人間のさまざまな感覚に対応したディスプレイ装置を考えることができる。しかしながら前章で検討を行ったように、科学技術データの提示という目的を考えた場合、人間の感覚の中にはあまりにも実用的ではない感覚が含まれている。例えば、数値データを食べて味や吐き気で判断したり、数値データに触れて痛さで判断する等という方法は、おもしろさとしての興味はあるが、実用的な方法としては考えにくい。また、そのためのディスプレイ装置を開発する努力に対しても、あまり大きな効果を期待することはできない。そのため、本研究では人間の感覚の中でも最も基本的な感覚である、視覚、聴覚、触覚の利用について考えている。

以下本章では、視覚ディスプレイ、聴覚ディスプレイ、触覚ディスプレイの各節に分けて、それぞれの説明を行う。視覚ディスプレイとしては、HMD (Head Mounted Display)、あるいは試作したハンディモニタ等のディスプレイ装置を使用している。聴覚ディスプレイとしては、Crystal River Engineering社の3次元音響ディスプレイであるConvolutronを利用している。また触覚ディスプレイとしては、風覚を利用してデータ提示を行うための風覚ディスプレイという装置を試作して使用している。以下、これらの各種感覚ディスプレイ装置について、ディスプレイの機能、構造、あるいはデータ提示性能等について説明を行う。

4.2 視覚ディスプレイ

本研究では視覚ディスプレイとして、通常のCRTの他に、HMD、あるいはハンディモニタ等が必要に応じて使用している。ここでは、人工現実感技術を応用した特殊な視覚ディスプレイ装置として、HMDとハンディモニタについて説明を行う。

4.2.1 HMD (Head Mounted Display)

HMDは、小型のディスプレイ画面をユーザの目の前に提示し、空間上での立体視を可能にしたディスプレイ装置である[Kalawsky93]。このディスプレイは、装置全体をユーザの頭に搭載して利用するため、頭部搭載型ディスプレイとも呼ばれている。通常は、空間位置センサと組み合わせて使用するため、ユーザの目の位置に応じた立体映像を提示することができる。従って、視覚に対する立体視要因としては、両眼の輻輳角、両眼視差、運動視差等を利用したディスプレイ装置と行うことができる。本研究では、HMDのシステムとしてVPL社のEyephoneを使用している。

(1) Eyephone の構造

Figure 4.2.1は、Eyephoneの外観を示したものである。Eyephoneの構造としては、ゴーグル状の枠組みの目の位置に、それぞれ右目と左目に対応する小型のカラー液晶ディスプレイ(LCD)が取り付けられている。このLCD上に提示された画像は、光学系のレンズを通して人間の目に提示される[Robinett92]。また、頭の部分には空間位置センサが取り付けられており、これによってユーザの頭の位置、すなわち両目の位置が計測され、それぞれの目の位置に従った画像が生成される。

画像の生成方法としては、ユーザの左右それぞれの目の位置に、レンダリング上のカメラモデルを置いた画像が、ユーザの目の前のディスプレイ画面に提示される。この際、カメラモデルの視野角はEyephoneの持つ視野角に一致させることで、提示される物体の大きさや距離感を現実の空間と一致させることができる。Table 4.2.1はEyephoneのハードウェア諸元を示したものである。視野角は水平方向83度、垂直方向58度、またLCDの解像度は360×240の画素数である[VPL89a]。

(2) 3SPACE Isotrak

Eyephoneでは、頭部の位置を計測するための空間位置センサとして、Polhemus社の3SPACE Isotrakを使用している。Figure 4.2.2は、3SPACE Isotrakの外観を示したものである。このセンサは、磁気を利用することによって、3次元空間内での位置と方向を計測することができる。

3SPACE Isotrakの基本的な原理は、以下の通りである。センサは発振コイルと計測コイルから構



Figure 4.2.1 Eyephone の外観

Table 4.2.1 Eyephone のハードウェア諸元

名 称	Eyephone
視野角 (水平方向)	83 度 (単眼)
視野角 (垂直方向)	58 度 (単眼)
解像度	360×240
重 量	1020 g (Eyephone) 1984 g (ハーネス含む)
ビデオ入力	NTSC

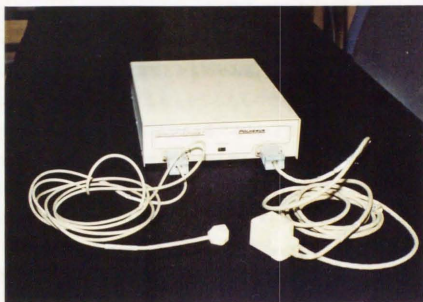


Figure 4.2.2 空間位置センサ 3SPACE Isotrak の外観

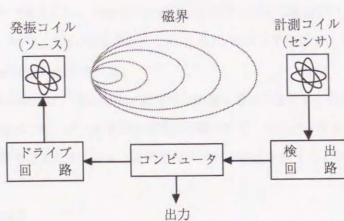


Figure 4.2.3 3SPACE Isotrak の原理

成されており、それぞれ互いに直交する3つのコイルから成り立っている。発振コイル側の3つのコイルを次々に励磁すると、磁界が発生し、計測コイル側の3つのコイルには電磁誘導によってそれぞれ起電力が発生する。この計測コイル側に誘導される電流は、発振コイルと計測コイルの相対的な位置関係によって決定されるため、この電流値から逆に両者の相対的な位置を求めることができる。Figure 4.2.3は以上の原理を図示したものである。

Table 4.2.2は3SPACE Isotrakの主な諸元を示したものである。センサ精度としては、半径75cmの球内では位置精度が3mm、角度精度が0.8度である。また計測可能範囲は半径150cmの半球内である。しかしながら、実際にこのセンサを利用するにあたっては、まわりに存在する磁性体等が大きく影響を与えるため、精度は劣化し、計測される空間は歪みを持つ。そのため、利用環境の中の空間的な歪みを計測し、これを補正することが必要になる [Hirose90b, Enomoto91]。

(3) HMDを用いたシステム構成

Figure 4.2.4は、本研究でHMDを用いる場合のシステム構成を示したものである。システム構成としては、グラフィックス・ワークステーション、Eyephone、3SPACE Isotrak、CCDカメラ等から構成される。

グラフィックス・ワークステーションとしては、Silicon Graphics社のIRIS SkyWriterを使用している。空間位置センサ3SPACE Isotrakによってユーザの頭の位置が計測されると、このデータはRS232Cを通してグラフィックス・ワークステーションに送られる。グラフィックス・ワークステーションではこのデータをもとに、ユーザの左右の目の位置に応じた画像データを生成する。この画像は一度CRTディスプレイ上に表示され、これをCCDカメラで撮影することによってNTSC信号に変換され、Eyephoneに提示される。

HMDを利用する場合には、視野全体が仮想的な映像で覆われるため、仮想世界への没入感を得ることができる。そのため、データ提示に利用する場合にも、単にデータを眺めるだけではなく、データ空間の中に身体ごと入り込むような状態でのデータ提示を行うことが期待できる。

4.2.2 ハンディモニタ

次に、視覚ディスプレイとして試作したハンディモニタについて説明を行う。データ・センシユアライゼーションで要求される視覚ディスプレイとしては、3次元空間上でデータが存在する位置にデータを提示できる機能が要求される。このような要求を満たすディスプレイ装置としては、HMDのように視野の全体を覆うタイプの他に、見たい場所だけにディスプレイを持っていくようなタイプの装置が考えられる。このような目的で試作を行ったものが、ハンディモニタである。

Table 4.2.2 3SPACE Isotrak の緒元

名 称	3SPACE Isotrak
位置精度	3 mm
角度精度	0.8 度
測定範囲	半径 150 cm の半球
精度保証範囲	半径 75 cm の半球
インタフェース	RS232C
ボーレート	300 ~ 19200

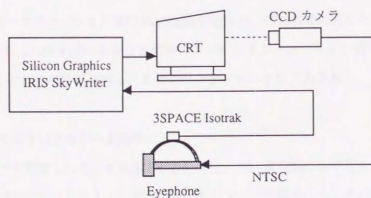


Figure 4.2.4 Eyephone を用いたシステム構成

(1) ハンディモニタの構造

ハンディモニタとは、手で持ちながら自由に空間内を移動できる形態の視覚ディスプレイ装置である。Figure 4.2.5 は、試作したハンディモニタの構造を、また Figure 4.2.6 は、ハンディモニタを使用している状況を示したものである。構造としては、小型のカラー液晶ディスプレイ (LCD) に手で持つためのグリップと空間位置センサである 3SPACE Isotrak が取付けられた構造をしている。このハンディモニタを空間内で動かすと、空間位置センサによってモニタの位置と方向が計測され、その位置と方向に応じた映像をモニタ上に提示することができる。このディスプレイ装置では、輻輳角、両眼視差等に基づく立体視は実現していないが、モニタ自体を移動することで、3次元空間上での情報提示を行うことができる。

Table 4.2.3 はハンディモニタの仕様に関する諸元を示したものである。ディスプレイ画面の大きさは4インチ (63.3 mm×82.0 mm) で、画素数は480×240である。また、重量は全体で520gである。

(2) ハンディモニタを用いたシステム構成

Figure 4.2.7 は、ハンディモニタを用いたシステム構成を示したものである。システムとしては、グラフィックス・ワークステーション、ハンディモニタ、空間位置センサ、CCDカメラ等から構成される。空間位置センサ3SPACE Isotrakで計測されたハンディモニタの位置に関するデータは、グラフィックス・ワークステーションIRIS SkyWriterに送られ、その位置に応じた画像が生成される。この画像データは、HMDを用いる場合と同様に、一度CRTディスプレイに表示されたものをCCDカメラで撮影し、NTSC信号に変換したものがハンディモニタに入力される。

(3) ハンディモニタによるデータ提示

ハンディモニタを利用したデータ提示方法としては、データ空間の中で見たい位置に直接手でハンディモニタを移動することによってデータ提示を行う。この場合、モニタに提示される画像は、ハンディモニタをウインドウとして、そこから覗いた世界がディスプレイ面上に提示されることになる。このような画像を厳密に生成するためには、ユーザの目の位置とモニタ面の位置を計測し、ハンディモニタに対するユーザの視野角を常に求めておかなければならない。しかしながら、このハンディモニタではディスプレイにLCDを用いているため、利用者が鮮明な画像を得るためには正面からディスプレイ面を見ることが必要になる。そのため、ここでは簡易的な方法として、モニタに対するユーザの視点を40cmの位置に固定したカメラモデルを仮定して、画像の生成を行って

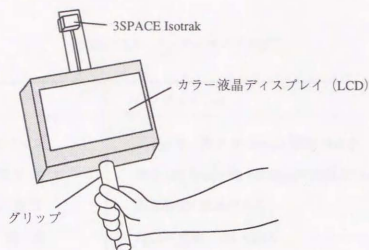


Figure 4.2.5 ハンディモニタの構造



Figure 4.2.6 ハンディモニタの使用状況

Table 4.2.3 ハンディモニタの緒元

名 称	ハンディモニタ
画面サイズ	4 インチ (高さ 63.3mm×幅 82.0mm)
外形寸法	高さ 110.5mm×幅 147.0mm×奥行 37.5mm
表示方式	透過型 TN 液晶パネル
画 素 数	115200 画素 (480×240)
重 量	520 g

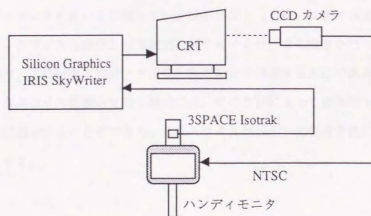


Figure 4.2.7 ハンディモニタを用いたシステム構成

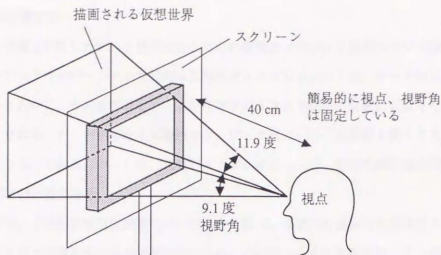


Figure 4.2.8 ハンディモニタにおける画像生成モデル

いる。Figure 4.2.8は、このような画像生成の方法を図示したものである。

また、ハンディモニタを用いる特殊なデータ提示方法としては、スライス面表示のための利用方法が考えられる。スライス面表示とは3次元のボリュームデータの提示を行う場合に、データ空間にある平面で切り、この断面上のデータ変化を色の变化で表示する方法である。ハンディモニタを用いてこのようなスライス面表示を行う場合には、モニタ面によって切り取られる断面図を、そのままモニタ面上に表示することができる。このスライス面表示への利用方法については、第7章で詳述することにする。

4.3 聴覚ディスプレイ

4.3.1 3次元音像定位

本節では、聴覚を利用したデータ提示を行うための聴覚ディスプレイ装置について説明を行う。データ・センシュアライゼーションで使用する聴覚ディスプレイとしては、データ値に応じた音情報を生成すると同時に、その音情報をデータが存在する3次元空間上の位置に定位させることが要求される。すなわち、データが存在する場所から、データ値に応じた音情報を聞くことができるようにするというのである。そのため、聴覚ディスプレイとしては、音の生成技術と同時に3次元音像定位の技術が必要になる。

ここではまず、3次元音像定位技術について検討を行う。3次元音像定位を実現するための技術としては、これまでに種々の方法が提案されている。その中で、生成音源に対して（録音再生技術ではなく）3次元音像定位を行う方式としては、

- a) 複数スピーカを用いる方法
- b) 頭部伝達関数を用いる方法

があげられる。

a) の複数スピーカを用いる方法は、多数のスピーカを使用することによって、音の伝播方向をシミュレートする方法である。この方法では、空間内に配置された複数のスピーカの音量バランスを制御することによって3次元空間内での音像定位を実現する。Figure 4.3.1は、当研究室で開発された複数スピーカによる3次元音響ディスプレイ・システムである。このシステムでは、ユーザを取り囲むように8つのスピーカが配置されている。スピーカに囲まれた音響空間は、水平方向には1辺330cm四方の正方形領域、鉛直方向にはユーザの足元から高さ200cmまでの空間である。この空間内でユーザの位置が計測され、設定音源の位置が与えられ、各スピーカの音量レベルを計算し、仮想音源を提示することができる。各スピーカの音量レベルは、パーソナル・コンピュータPC-9801によって制御が行われる。

この方式によって、ある程度の音像定位は実現できることが示されており[Yokoyama92]、本研究においても初期段階ではこのシステムを使用していた。しかしながら、音像の定位精度、反響音等を含めた制御能力、あるいは開放型であるため外界の雑音を避けられない等の理由から、次に述べる頭部伝達関数を用いる方法へと切り替えている。

b) の頭部伝達関数を用いる方法は、音源から耳の鼓膜までの頭部伝達関数(HRTF: Head Related Transfer Function)を用いて音像定位を行う方法である。この方法では、あらかじめ、あらゆる方向の音源から耳に至る伝達関数を計測しておき、これを提示する音源波形に作用させることに

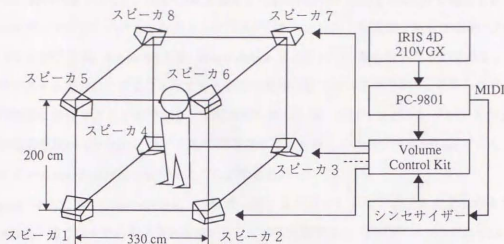


Figure 4.3.1 複数スピーカによる3次元音響ディスプレイ・システム

よって、鼓膜直前の音の波形を再現する。この頭部伝達関数を用いる方式では、音源と聴取者の位置関係だけではなく、人間の頭部形状や耳介の影響等を考慮した音源を再生することができる [Blauert86]。そのため、前述の複数スピーカによる方法よりは、精度の高い音像定位が実現できることが期待されている。この原理を用いた音の提示方法としては、生成波形をヘッドフォンで提示する方式、あるいはクロストークの打ち消し信号を用いることでスピーカから提示する方式 [Majima92] 等が実現されている。

本研究では、この頭部伝達関数を用いたヘッドフォン提示による聴覚ディスプレイ・システムを使用している。使用したシステムの詳細については、次節以降で説明を行う。

4.3.2 Convolutron システム

本研究では、聴覚ディスプレイとして Crystal River Engineering 社で開発された Convolutron システムを用いている。これは、前述した頭部伝達関数を用いる方法によって、3次元音像定位を行うシステムである。以下、本節ではこの Convolutron の構成、原理、および Convolutron を用いた聴覚ディスプレイのシステム構成等について説明する。

(1) Convolutron の構成

Convolvotron は、3次元音像定位をリアルタイムで実行する高速の DSP (Digital Signal Processor) システムである。このシステムは IBM-PC 上の 2 枚のボード、すなわち、TMS320C25 を搭載した Spectrum Board と、IMSA100 を搭載した Convolution Engine Board から構成されている。これらのボードは互いにパラレルポートで通信が行われ、ホスト計算機である IBM-PC 上から制御を行うことができる。Figure 4.3.2 は、Convolvotron システムの外観を示したものである。

このシステムで定位させることができる音源の種類は最大 4 つまでであり、これらの各音源はそれぞれ独立に操作することができる。実行速度に関しては、音のサンプリングレートが 50 kHz、DSP の演算速度が 320 MIPS、また平均の時間遅れは 1 音源入力の場合で 0.041 sec であり、ほぼリアルタイムに近い音像定位を実現することができる。

Figure 4.3.3 は Convolvotron の構成に関するブロックダイアグラムを示したものである [Wenzel92]。図では 4 つのモノラル音源に対して 3 次元配置を行う際のデータの流れが示されている。入力された音源信号は、それぞれ Spectrum Board 上の A/D コンバータによってデジタル化され、Convolution Engine Board で頭部伝達関数とのコンボリューション演算 (畳込み積分) が実行される。この演算結果は、再び D/A コンバータによってアナログ信号に変換され、ヘッドフォンから 3 次元音像として提示が行われる。

コンボリューション演算を行う際に実際に使用される頭部伝達関数は、あらかじめ計測されたシステム内に格納されている頭部伝達関数データをもとに算出される。ここで行われるコンボリューション演算の具体的なアルゴリズムに関しては、次項で詳述する。

(2) Convolvotron の原理

ここでは、Convolvotron が 3 次元音像定位を行う際の原理、および具体的なアルゴリズムについて説明を行う [Crystal90]。

Convolvotron は、あらかじめシステム内に格納されてある頭部伝達関数のデータを用いて、入力音源に対する 3 次元配置を行う。この頭部伝達関数のデータは、University of Wisconsin の Wightman 等によって計測されたものであり、空間内を多数のメッシュに分割し、各格子点方向から人間の両耳に至るインパルス応答が計測されている [Wightman89a]。このメッシュ分割は、被聴者の左右それぞれの耳を中心として、水平方向 (azimuth 方向) には -180 度から 180 度までを 15 度間隔で 24 点、鉛直方向 (elevation 方向) には -36 度から 54 度までを 18 度間隔で 6 点とっており、合計 144 点の格子点に分けられている。データとしては、これらの各格子点から耳に到達するインパルス応答が 50 kHz でサンプリングされ、各データは時間領域における 512 点のデータとして表現されている。Figure 4.3.4 はこのメッシュ分割の様子を示したものである。



Figure 4.3.2 Convolvotron システムの外観

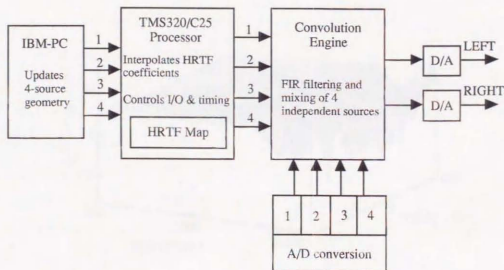


Figure 4.3.3 Convolvotron の構成 [Wenzel92]

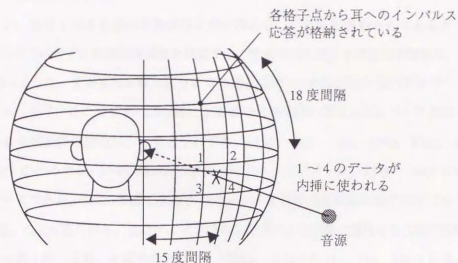


Figure 4.3.4 メッシュ分割された頭部伝達関数と内挿方法

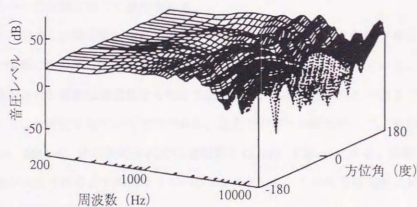


Figure 4.3.5 Convolutron に格納されている頭部伝達関数の一例

また、Figure 4.3.5 は Convolutron に格納されている頭部伝達関数の一例を示したものである。この図では、格納されているインパルス応答のデータをフーリエ変換して得られた周波数特性で示している。図中のデータは、水平面での方位角に対するデータであり、本システムで使用している頭部伝達関数の一部を表している。

Convolutron は、定位すべき音源の位置情報を受け取ると、これらの格納されてあるデータから、左右それぞれの耳に対する頭部伝達関数を決定する。左右の耳に対する頭部伝達関数は、Figure 4.3.4 に示してあるような、音源方向を取り囲む4つの格子点データから空間的な内挿を行うことによって算出される。以下、ここで行われる内挿による頭部伝達関数の算出方法について説明する。

内挿に使用される頭部伝達関数のデータをそれぞれ、 $L1(i)$ 、 $L2(i)$ 、 $L3(i)$ 、 $L4(i)$ 、 $R1(i)$ 、 $R2(i)$ 、 $R3(i)$ 、 $R4(i)$ で表すことにする。 $L1(i) \sim L4(i)$ は左耳に対する4つのデータ、 $R1(i) \sim R4(i)$ は右耳に対する4つのデータである。また i は離散化されたインパルス応答の各係数を表す数字であり、1 から L (タップ数) の値を取り得る。使用するインパルス応答のタップ数は操作する音源の数によって異なる。音源の数1個、2個、4個の場合のタップ数は、それぞれ512、256、128となる。このとき、左右それぞれの耳に対する音源方向の頭部伝達関数 $EL(i)$ 、 $ER(i)$ は、次式に従って計算される。

$$EL(i) = W1 \cdot L1(i) + W2 \cdot L2(i) + W3 \cdot L3(i) + W4 \cdot L4(i) \quad (4.3.1)$$

$$ER(i) = W1 \cdot R1(i) + W2 \cdot R2(i) + W3 \cdot R3(i) + W4 \cdot R4(i) \quad (4.3.2)$$

ここで、 $W1$ 、 $W2$ 、 $W3$ 、 $W4$ は、内挿計算に使用される重み係数であり、音源方向を取り囲むまわりの格子点4点からの距離に応じて決定される。

また、被聴者に対する音源位置が移動する場合には、これをスムーズに移動させるために、コンボリューション演算に使用する頭部伝達関数を徐々に変化させる方法をとっている。これは、時系列的に次々と決定される頭部伝達関数をそのまま使わずに、前回の値から次の値までの時間的な補間をとることによって変化させていく方法である。左右それぞれの耳に対して、前回決定された伝達関数を $EL(i, n)$ 、 $ER(i, n)$ 、次に決定された伝達関数を $LL(i, n)$ 、 $LR(i, n)$ とする。前回の伝達関数から次の伝達関数が決定されるまでの間を1つのブロックとして、この間を時間的に N 等分すると、この中の n 番目の頭部伝達関数は、

$$L(i, n) = (N - n) \cdot EL(i) / N + n \cdot LL(i) / N \quad (4.3.3)$$

$$R(i, n) = (N - n) \cdot ER(i) / N + n \cdot LR(i) / N \quad (4.3.4)$$

によって与えられる。ここで時間的なブロックの分割数 N はタップ数に一致させている。このように頭部伝達関数の決定を時間的に補間していくことによって、スムーズな音源の移動を実現することができる。

Convolvotron で行われるコンボリユーション演算は、以上のようにして決定された頭部伝達関数と入力される音源信号の間で行われる。入力音源は 50 kHz でサンプリングされ、それぞれの時刻 n において決定される頭部伝達関数を用いて出力信号が計算される。コンボリユーション演算の計算式は、次式で表される。

$$OL(n) = \sum_{i=1}^N (L(i, n) \cdot IN(n-i)) \quad (4.3.5)$$

$$OR(n) = \sum_{i=1}^N (R(i, n) \cdot IN(n-i)) \quad (4.3.6)$$

ここで $IN(n)$ は入力音源の信号を、 $OL(n)$ 、 $OR(n)$ は左右の耳に対する出力音源の信号を表している。

以上をまとめると、Convolvotron の入力音源に対する出力信号は、次式で表されることになる。

$$OL(n) = (N \cdot n) \cdot \left(\sum_{i=1}^N (EL(i) \cdot IN(n-i)) \right) / N + n \cdot \left(\sum_{i=1}^N (LL(i) \cdot IN(n-i)) \right) / N \quad (4.3.7)$$

$$OR(n) = (N \cdot n) \cdot \left(\sum_{i=1}^N (ER(i) \cdot IN(n-i)) \right) / N + n \cdot \left(\sum_{i=1}^N (LR(i) \cdot IN(n-i)) \right) / N \quad (4.3.8)$$

Convolvotron では、このようなコンボリユーション演算をリアルタイムで実行することによって、被聴者に対するスムーズな 3 次元音像の提示が実現されている。

また Convolvotron では、音源の方向とは独立に被聴者から音源までの距離を設定することができる。音像の距離感については、基本的には音量の制御によって行っている。一般に音の反響を無視した空間では、音の伝播距離と音圧との関係は次式で表すことができる。

$$A = 1/R \quad (4.3.9)$$

ここで、 A は音圧、 R は音源からの距離を表している。しかしながら我々が経験する日常の空間では、音は複雑な反響を繰り返すため (4.3.9) 式では音圧の減衰が大きすぎる。そのため Convolvotron では、rolloff 係数という値を導入することによって、次式による近似的な距離感の計算を行っている。

$$A = 1/(R^{\text{rolloff}}) \quad (4.3.10)$$

このような近似的な音の減衰モデルは、near-field モデルと称しており、rolloff 係数の値は、経験的に 0.65 という値が採用されている。

(3) 聴覚ディスプレイのシステム構成

Figure 4.3.6 は、本研究で使用している Convolvotron を用いた聴覚ディスプレイのハードウェア構成を示したものである。システム構成としては、グラフィックス・ワークステーションをホスト計算機として、音源、空間位置センサ、Convolvotron 等から構成されている。

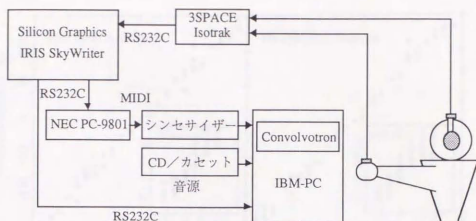


Figure 4.3.6 聴覚ディスプレイのハードウェア構成

グラフィックス・ワークステーションとしては、Silicon Graphics社のIRIS SkyWriterを使用している。このグラフィックス・ワークステーションでは、視覚的なグラフィックス描画の他に、音源の制御、ユーザ位置の計測、音像位置の計算等が行われる。

また音源としては、シンセサイザー、CD、カセットテープ等の音源を必要に応じて選択し、使用することができる。シンセサイザーを使用する場合には、グラフィックス・ワークステーションからRS232Cを通して音源制御用のデータがパーソナル・コンピュータNEC PC-9801に送られる。PC-9801では音源制御用のデータをもとにMIDI (Musical Instrument Digital Interface) によってシンセサイザーの制御を行う。シンセサイザー、CD、カセットテープ等から出力される音源は、モノラル音としてConvolvotronに入力され、Convolvotronによって音像の3次元配置が行われる。また、これらの音源は同時に4つまで使用することができる。

ユーザの手と頭には、空間位置センサとしてPolhemus社の3SPACE Isotrakが取り付けられ、これによってユーザの手と頭の位置と方向が計測される。ユーザの手の位置に関するデータは、提示データの指定に使われる。これによって、ユーザは聞きたいデータを直接手で指定しながら、データの提示を行うことができる。また、ユーザの頭の位置と方向に関するデータは、ユーザの頭に対する相対的な音源位置を算出するために用いられる。この音源の位置情報は、RS232Cを通してConvolvotronを内蔵したパーソナル・コンピュータIBM-PCに転送される。IBM-PCでは、

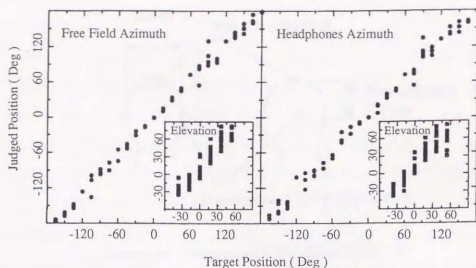


Figure 4.3.7 自分の頭部伝達関数を用いた場合の音像定位精度 [Wightman89b]

Convolverton を用いて前述のアルゴリズムに従った 3 次元の音像配置をリアルタイムで実行する。

4.3.3 音像定位精度

次に Convolverton の音像定位精度について検討を行う。Convolverton をデータ提示用のディスプレイ装置として用いるためには、その音像定位精度について調べておく必要がある。

(1) 単音源に対する定位精度

Figure 4.3.7 は、開発者の 1 人である Wightman 等によって計測された音像定位精度の結果を示したものである [Wightman89b]。図では、実際の音源に対する定位精度 (図中左) と Convolverton を用いた音像の定位精度 (図中右) が、それぞれ水平方向の方位角 (azimuth) と上下方向の仰角 (elevation) について示してある。それぞれ横軸が提示した音源方向であり、縦軸が被験者が知覚した音像の方向である。人間の音源に対する方向の知覚では、2 つの耳で知覚するという原理上の問題から、実際の音源に対しても前後方向や上下方向の逆転という誤りがしばしば発生する。そのためこの実験結果では、前後、上下の誤りに関しては正しい方向に知覚したものととして修正を加えて表示してある。

Convolverton を用いた場合の提示した音源方向と知覚された音像の方向との相関は、方位角に関

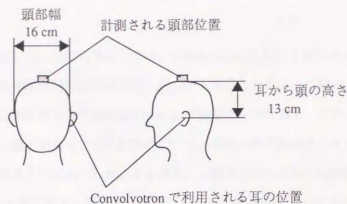


Figure 4.3.8 Convoltotron で用いる頭部形状モデル

しては 0.99、仰角に関しては 0.92、また前後方向の知覚の誤り率は 11%、上下方向の知覚の誤り率は 12% と報告されている。この結果から、仰角の定位精度に関してはややばらつきが目立つが、方位角に関しては非常に高い定位精度が実現されている。

この Wightman 等の実験結果は、被聴者本人の頭部伝達関数を用いて計測が行われたものである。しかしながら、実際に頭部伝達関数による方式を用いる場合には、各個人ごとに異なる伝達関数値を持つという個人差の問題を考慮しなければならない。特に、Convoltotron に格納されている頭部伝達関数は米国人の計測データであるため、頭の大きさや耳の位置等の違いから、我々日本人が利用するにあたっては十分な注意が必要である。この頭部形状等の違いは、計測される頭部伝達関数値に影響を与えるだけでなく、格納された頭部伝達関数を利用する時にも影響が与えられる。頭部伝達関数の利用時には、計測された被聴者の頭の位置から両耳に対応する位置を求め、それぞれの耳から音源方向に対する伝達関数値が使用される。このとき、頭部位置から両耳位置の算出を行うためには、人間の頭部形状のモデルが利用される。従って、頭部形状のモデルが異なると、使用される伝達関数値も異なることになる。本研究では、平均的な日本人の頭部形状として、Figure 4.3.8 に示す頭部形状モデル（頭の幅は 16 cm、耳から頭までの高さは 13 cm）を利用している。

この Convoltotron システムを用いて、一般ユーザに対する音像の定位精度を調べる実験を行った。この実験では、頭部伝達関数としてあらかじめ Convoltotron 内に内蔵されている米国人のデータを用いているため、他人の頭部伝達関数を用いた一般の利用時における定位精度を調べることが

ここでの目的である。実験としては、

- a) 水平面内の方位角
- b) 正面方向の仰角
- c) 横方向の仰角

についての定位精度を計測した。計測方法としては、Convolutronを用いて提示された仮想音源に対して、被験者が知覚した音源方向を指示棒で指し示してもらうことによって計測を行った。指示棒の両端には、それぞれ空間位置センサ3SPACE Isotrakが取り付けられており、このセンサによって計測された両端位置から、指示棒の示す方向を求めている。音源の提示方向としては、あらかじめ伝達関数が計測されているメッシュ点とした。すなわち、方位角に対しては15度間隔の24点、仰角に対しては18度間隔の6点である。提示データは、これらの各方向についてランダムな順序で提示を行い、音源はシンセサイザーから出力されるドラム音を用いている。また、被験者は顔を正面に向けた固定した状態で実験を行い、指示棒は体の正面で各方向を指し示した。Figure 4.3.9は、この実験の様子を示したものである。

Figure 4.3.10 ~ Figure 4.3.12 は、これらの実験結果を示したものである。それぞれ水平面内の方位角、正面方向の仰角、横方向の仰角に対する被験者4人の実験結果が示されている。各グラフとも、横軸は音源の提示方向、縦軸は知覚された定位方向である。前後方向の誤りや上下方向の誤りに関しては、特にグラフ上のデータとしては修正を行っていないが、補助線を引くことで示している。グラフ上の2種類の直線のうち、傾きが1の直線上のデータは正しい定位を表しており、傾きが-1の直線上のデータは前後方向の誤りを示している。

またTable 4.3.1はこれらの結果をまとめたものである。表では、前後方向あるいは上下方向に関する誤り率、あるいはこれらの誤りに修正を加えた場合と加えない場合について誤差角度の平均値、提示方向と知覚方向の相関係数を示している。この結果、水平面内の方位角に関しては、前後方向の誤りに修正を加えた定位精度では、誤差角度の平均値は19.98度、提示方向と知覚方向の相関係数は0.977であった。また仰角に関しては上下方向の誤りに修正を加えた場合、誤差角度の平均値は正面方向で18.82度、横方向で16.89度、提示方向と知覚方向の相関係数は正面方向で0.796、横方向で0.816であった。また前後方向の誤り率は水平面内で30.21%、上下の誤り率は正面方向で20.83%、横方向で26.39%であった。

これらの定位精度は、Figure 4.3.7に比べるとやや成績が低下しており、この差は被験者本人の頭部伝達関数を使用していないことが原因として考えられる[Wenzel91]。特に仰角に関しては定位精度が非常に低く、被験者によってはほとんど定位できない例も見られている。また、横方向に比べて正面方向の定位精度が低いことは、頭部伝達関数の方式を用いた場合の欠点として言われている。

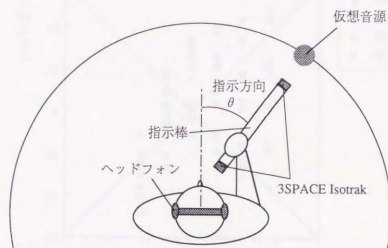


Figure 4.3.9 音像定位実験の様子

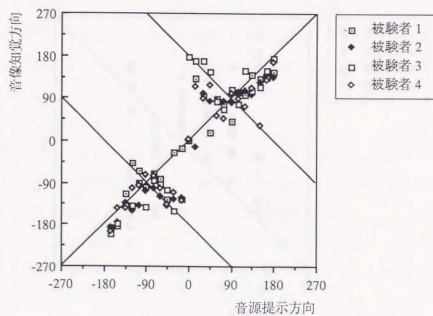


Figure 4.3.10 単音源に対する音像定位実験の結果（水平面内の方位角）

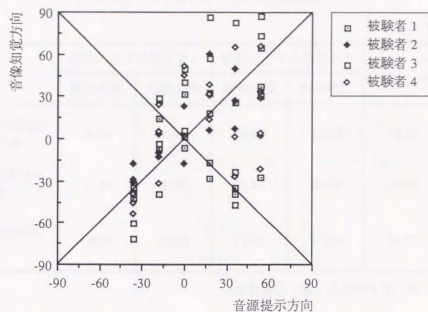


Figure 4.3.11 単音源に対する音像定位実験の結果（正面方向の仰角）

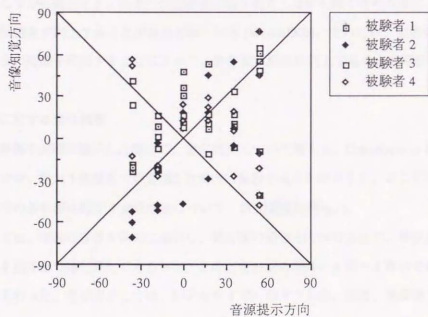


Figure 4.3.12 単音源に対する音像定位実験の結果（横方向の仰角）

Table 4.3.1 単音源に対する音像定位精度

	前後／上下の修正なし		前後／上下の修正あり		前後／上下 の誤り率
	誤差角度	相関係数	誤差角度	相関係数	
水平面内の 方位角	39.28	0.900	19.98	0.977	30.21
正面方向の 仰角	27.65	0.518	18.82	0.796	20.83
横方向の仰 角	28.97	0.238	16.89	0.816	26.39

(誤差角度：度、前後誤り率：%)

[Wightman89b]。

この実験では、音源位置や被験者の頭の位置は固定した状態で実験を行った。しかしながら、音源の位置を移動しながら提示する、あるいは被験者が頭を動かしながら聞く等の方法によって、ある程度音像の定位精度が向上することが報告されている [Wenzel90b]。そのため、実際の利用にあたっては、これらの効果を利用することによって、多少定位精度は向上することが期待される。

(2) 複数音源に対する定位精度

次に、複数の音源を同時に提示した場合の、定位精度について考える。Convolutronを用いた聴覚ディスプレイでは、最大4種類までの音源を空間内に配置することができる。ここでは複数の音源を配置した場合の各音源に対する定位精度について、計測実験を行った。

実験方法としては、複数の音源を同時に提示し、単音源の場合と同様の方法で、被験者に知覚した各音源の方向を指示棒で指し示してもらった。このとき音源の数は、1個～4個のそれぞれの場合について比較を行った。各音源としては、シンセサイザーのドラム音、音楽、英会話テープ、水の流れる音という4つの音源を選択した。これらの音源は、複数の音源どうしが一緒にならず互いによく分離できるものを選んである。音源の提示方向は、水平面内の方位角について計測を行った。被験者数は4人である。

Figure 4.3.13 ~ Figure 4.3.15 は、それぞれ音源数 2 個、3 個、4 個の場合の同一音源（シンセサイザーのドラム音）に対する定位精度を示したものである。また、Table 4.3.2 は音源数による定位精度の比較をまとめたものである。表では、前後方向の誤り率、あるいは前後方向の誤りを修正した場合と修正しない場合について、誤差角度の平均値、提示方向と知覚方向の相関係数等を示している。この結果から、前後方向の誤りを修正してしまうと、音源数による誤差角度には大きな差はなかった。しかしながら、前後方向の誤り率に関しては、音源数が 3 個以上になると成績が大きく低下していることが示されている。このことから、音源数が 2 個まではある程度の定位精度を期待して利用することができるが、音源数が 3 個以上になると前後方向の誤り等が増え、あまり高い定位精度は期待できないことがわかる。

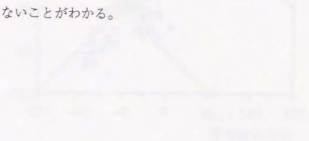


Figure 4.3.13: Localization accuracy for 2 sound sources



Figure 4.3.14: Localization accuracy for 3 sound sources

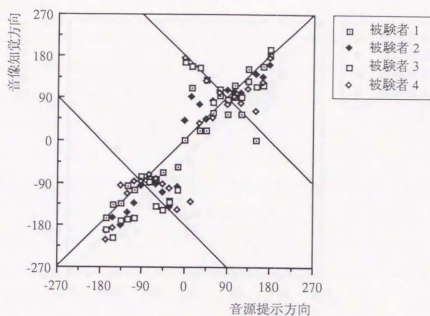


Figure 4.3.13 音源 2 個の場合の音像定位実験の結果

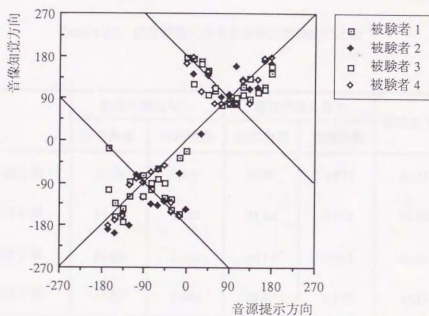


Figure 4.3.14 音源 3 個の場合の音像定位実験の結果

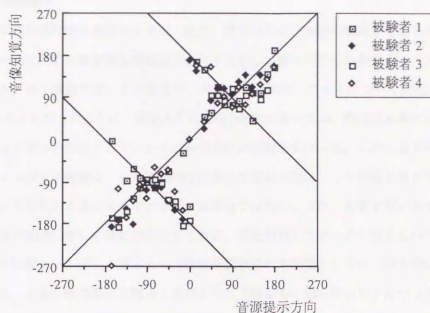


Figure 4.3.15 音源4個の場合の音像定位実験の結果

Table 4.3.2 複数音源に対する音像定位精度の比較

	前後の修正なし		前後の修正あり		前後誤り率
	誤差角度	相関係数	誤差角度	相関係数	
音源1個	39.28	0.900	19.98	0.977	30.21
音源2個	41.93	0.888	21.14	0.976	34.90
音源3個	50.62	0.834	20.14	0.971	40.63
音源4個	47.87	0.840	20.47	0.973	40.89

(誤差角度：度、前後誤り率：%)

4.4 触覚ディスプレイ

4.4.1 触覚的情報提示

データの提示に利用可能な感覚としては、視覚、聴覚以外に、触覚の利用が考えられる。本研究では、数値データに対する触覚的な情報提示を行うために、風を利用した風覚ディスプレイを試作して用いている。以下本節では、この風覚ディスプレイの試作システムについて説明を行う。

2.2節でサーベイを行ったように、現在人工現実感の研究においては、触圧覚あるいは力覚を生成するためのディスプレイ装置として、いくつかの方法が提案されている。しかしながら、触覚に関する多くのディスプレイ装置は、主に物体の幾何学的な形状に触ることが目的とされているため、データ提示という目的のためには、そのままでは有効ではない。また、力覚を用いたデータ提示方法では、主に腕の筋肉に対して情報提示を行うため、手を伸ばしてデータに触るという直接的な認識感を得ることは難しい。データ提示という目的で要求される触覚としては、手を伸ばすことで直接データに触れ、しかも物の形状に触るときのような「触るか、触らないか」というデジタル的な触覚ではなく、データに触ってその値を感じ取れるような、アナログ的な触覚の生成が望まれる。

そのため、触覚的なデータ提示を行うためには、既存のディスプレイ装置ではなく、新たな情報の提示方法、およびディスプレイ装置の開発が要求される。本研究では、このようなデータ・センシュアライゼーションにおける触覚情報を生成するために、人間の風覚という感覚に着目している。風覚とは、手や顔に風を受けたときに感じられる感覚であるが、広い意味で触覚の一種として利用することが考えられる。風覚を利用する方法では、手のひらで風を受けてデータを感じ取れるため、直観的な触覚情報の表現を行うことができる。

本研究では、このような風覚を生成し、制御するためのディスプレイ装置として、風覚ディスプレイの開発を行った[Ogi92a]。この風覚ディスプレイは、データの値に応じた風を人間の手に提示することによって、データ値そのものに触っているような感覚を作り出すことがねらいである。また、データ提示に用いる風という物理的現象は、大きさ（強さ）と方向という要素をもっているために、提示データとして、スカラー量だけではなくベクトル量として表されるデータを提示することが可能である。そのため、風覚ディスプレイを利用したデータ提示方法は、データ・センシュアライゼーションのための有効な手段になり得ると考えられる。

次節以降では、まず風覚を利用するにあたって、人間の持つ基本的な風覚特性に関する予備的な実験を行い、ここで得られた知見をもとに、風覚ディスプレイの開発を行った。以下、この風覚ディスプレイの原理、構成、あるいはその評価について説明を行う。

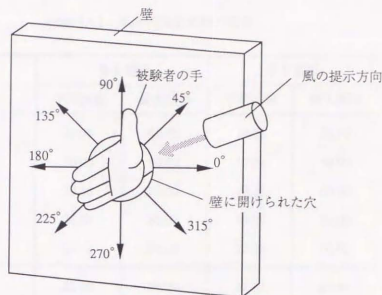


Figure 4.4.1 風向の知覚実験の様子

4.4.2 風覚に関する予備実験

風覚ディスプレイの開発にあたっては、まず人間の持つ基本的な風覚の特性について調べておく必要がある。人間の風覚を構成する要素としては、風の強さに関する知覚と風の方向に関する知覚がある。風覚ディスプレイの開発にあたっては、特に風の方向感覚の生成が重要である。ここでは、人間の風覚に関する予備実験として、風の方向に対する知覚実験を行った。

(1) 実験方法

この実験は、風の方向に対する人間の知覚精度、あるいは知覚特性を調べることが目的である。実験方法は以下の通りである。被験者は壁で仕切られた片側に立ち、壁の真中に開いている穴から手だけを出す。この被験者の手に対して、壁の反対側からいろいろな方向の風を提示し、被験者に知覚した風の方向を答えてもらうという方法で実験を行った。Figure 4.4.1はこの実験の様子を示したものである。このとき被験者は壁で隔てられた反対側にいるため、風が提示されている様子を見ることはできない。また、音による手掛かりを除くために、ヘッドフォンによって耳をふさいでいる。壁には方向を示す360度の目盛りが付けられており、被験者は知覚した風の方向を目盛りを読むことで回答を行った。

風の生成は、DCモータによってファンを回転させることによって行っている。また実験条件と

Table 4.4.1 風向の知覚実験の結果

	手を固定		手を回転	
	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差
被験者 1	23.06	60.00	10.28	50.00
被験者 2	30.00	90.00	17.22	50.00
被験者 3	30.56	100.00	23.33	60.00
被験者 4	28.89	80.00	33.89	90.00
被験者 5	27.22	100.00	23.89	60.00
平 均	27.94	86.00	21.72	62.00

(単位：度)

しては、被験者の手をまっすぐに固定した状態（親指側を上、小指側を下にした状態）と、自由に回転して方向を探れる状態の2通りで実験を行った。提示した風は、風速4.47 m/secの大きさであり、方向は10度間隔で360度の全方向についてランダムな順序で提示を行った。被験者数は5人である。

(2) 実験結果

Table 4.4.1は、これらの実験結果を示したものである。表では、手を固定した場合と手の回転を自由にした場合について、それぞれ平均誤差と最大誤差の値を示してある。この実験における誤差の値の中には、厳密には風の方向に対する知覚誤差だけでなく、深部感覚上の誤差も含まれる。すなわち実験の方法上、被験者は自分の手の方向を視覚的に確認できないために、自分の思っている方向と実際に手が向いている方向との間に深部感覚上のずれがあると、これが誤差の値に影響を及ぼしてしまう。しかしながら、これらの影響を考慮したとしても、手を固定した場合の100.00度の最大誤差等は、明らかな方向の誤りが生じていると考えられる。また、手の回転の影響に関しては、被験者が手を固定した場合の平均誤差が27.94度であるのに対し、手の回転を自由にした場合は21.72度であり、誤差の減少に役立っていることがわかる。このような手の回転による効果は、聴覚の音像定位における頭の回転の効果と似たところがあり、方向を認識するために有効な本質的

な性質と考えることができる。

また Figure 4.4.2、Figure 4.4.3 は、それぞれ手を固定した場合と回転させた場合について、風の提示方向に対する誤差の値を示したものである。図では、各提示方向に対して被験者5人の知覚誤差の平均値と標準偏差が示されている。風の提示方向は Figure 4.4.1 に示した通りである。このグラフから風の提示方向に対して、かなり共通した知覚の傾向があることがわかる。風の提示方向が0~90、270~360度では誤差は主に正の値を取り、90~270度では誤差は逆に負の値を多く取っている。すなわち、手のひら側も甲側も、全体的に手に対して上方（親指側）から風が提示されているように知覚される傾向がある。知覚される方向感覚の歪みに関しては、視覚による歪みの特性等が報告されているが[Ellis91]、風覚を用いた場合にも知覚される方向感覚には歪みが存在していると考えられる。

以上の実験結果をまとめると、風の方向に対する人間の知覚精度はそれほど高いことがわかる。そのため風覚ディスプレイの開発にあたっては、厳密な風の方向性を実現することよりも、むしろ手の回転等の効果を利用したデータ提示方法を行うことが有効であると考えられる。

4.4.3 風覚ディスプレイの開発

(1) 風覚ディスプレイに要求される条件

人間の風覚に関する以上のような知見をもとに、風覚ディスプレイの開発を行った。前節で調べた風覚に対する基本的な特性を考慮い入れると、風覚ディスプレイに要求される条件としては、次のような項目をあげることができる。

- ・3次元空間の中で自由な手の移動が可能であること。
- ・風の大きさと方向をそれぞれ独立に制御できること。
- ・手の回転による風向の確認ができること。

データ・センシュアライゼーションでは、3次元空間の中でデータの提示を行う。そのためユーザは、データ空間の中で知りたいデータの位置に直接手をもっていくことによって、データ値に触ることが必要になる。ここであげた最初の条件は、このような3次元空間の中で、ユーザが直接的な動作と結び付けながらデータの触覚情報を得ることができるということである。次に風覚ディスプレイでは、データの提示媒体として風という物理現象を利用するが、風はその属性として大きさ、方向という2つの要素をもっている。風のもつ表現力を十分に利用したデータ提示を行うためには、この大きさ、方向という2つのパラメータを独立に制御できることが必要である。また、3番目の条件としては手の方向を自由に回転できることである。風覚における方向の知覚精度は、前節の実験結果からわかるように、手を固定した状態ではかなり誤差が大きい。しかし、手を回転さ

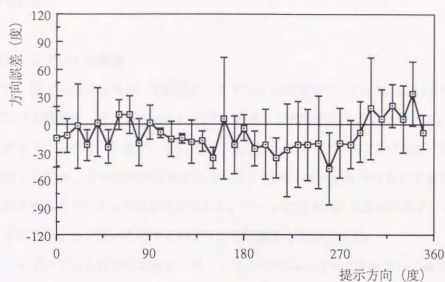


Figure 4.4.2 風の提示方向による知覚誤差 (手を固定)

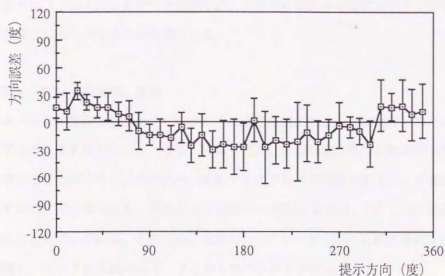


Figure 4.4.3 風の提示方向による知覚誤差 (手を回転)

せることによって、風の方向を確かめることができ、知覚誤差をかなり減少させることができる。風覚ディスプレイとしては、このような手の回転による風向の確認動作ができるような機構であることが要求される。

(2) 風覚ディスプレイの構造

本研究では、以上の条件を考慮して風覚ディスプレイの開発を行った。Figure 4.4.4 は試作した風覚ディスプレイの構造を、また Figure 4.4.5 は手に装着した状態を示したものである。

この風覚ディスプレイは、小型で、手に持って利用する形態のディスプレイ装置である。ディスプレイの構造としては、手の位置のまわりに6つの小型のファンが取り付けられており、これらのファンを回転させることによって風が生成される。ファンに囲まれた中央部分はグリップになっており、ユーザは手のひらを開いた形でこのグリップを握ることができる。

また、グリップの下方には空間位置センサとして、Pothemus 社の 3SPACE Isotrak が取り付けられており、これによって風覚ディスプレイを持ったユーザの手の位置と方向を計測することができる。ユーザは風覚ディスプレイを手を持ちデータ空間の中へ入ることによって、手の位置に応じたデータ値を風覚として感じることができる。数値シミュレーション等から得られる提示データは、一般に計算に使われるメッシュ上の点としてデータ値を持っている。そのため、手の位置に対応するデータ値は、手のまわりのメッシュ上のデータ値からの補間計算によって求めることになる。このように風覚ディスプレイによるデータ提示では、3次元空間の中で実際にデータが存在する場所でデータ値を感じ取るということが可能になる。

(3) 風覚ディスプレイの機能、原理

風覚ディスプレイの機能としては、データの値に応じて風の大きさと方向をそれぞれ制御できることが必要である。まず風の大きさ（強さ）に関しては、人間は触覚の刺激の大きさとして知覚していると考えることができる。そのため、風覚ディスプレイでは提示するデータ値に応じた圧力の風を生成することが必要である。風を生成するための機構としては、DC モータによってファンを回転させる方法を用いている。そのため、実際にはDC モータにかかる電圧値によってファンの回転数を制御し、提示される風の圧力、すなわち風の大きさが設定される。

Table 4.4.2 は風覚ディスプレイで用いている DC モータの諸元を示したものである。また Figure 4.4.6 は、この DC モータに対する印加電圧と生成される風の風速、圧力の関係を示したものである。ここでは生成可能な風速、圧力の最大値を 1.0 として正規化した値で示してある。風覚ディスプレイ・システムとしては、このような電圧と圧力との対応表を計算機内に持ち、その表を参照す

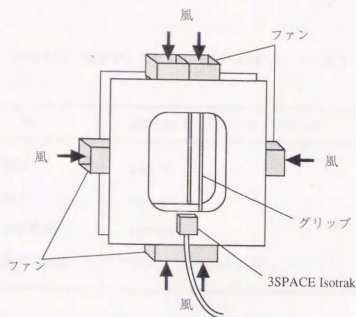


Figure 4.4.4 風覚ディスプレイの構造



Figure 4.4.5 風覚ディスプレイの装着状態

Table 4.4.2 風覚ディスプレイで用いる DC モータの諸元

機 種	RK-370CC-14280 (マブチモータ)
定格電圧	30.0 V
定格負荷	37.0 g · cm
定格負荷電流	440 mA
定格負荷回転数	16000 ± 2300 rpm

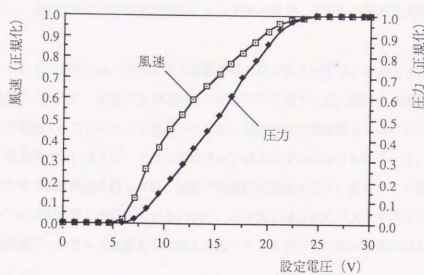


Figure 4.4.6 DC モータの印加電圧と風の風速、圧力の関係

ることでDCモータにかかる設定電圧が決定される。実際の利用にあたっては、さらに後述する刺激と感覚量の関係を考慮することで、修正した対応表を用いている。この修正方法については、第6章で説明を行う。この風覚ディスプレイで提示可能な風の大きさは、風速にして0.00～4.47 m/secであり、この間を256の分解能で生成することができる。

また、風の方向に関しては、風を手のひらに垂直な圧力成分と手のひらに平行な剪断成分とに分けて、それぞれ手の左右、上下に配置したファンの風量の組み合わせによって、風向を制御する方式を用いている。例えば、手のひらに対して大きさ W 、角度 θ の風を提示する場合、圧力成分、剪断成分はそれぞれ、

$$w_1 = W \cos \theta \quad (\text{圧力成分}) \quad (4.4.1)$$

$$w_2 = W \sin \theta \quad (\text{剪断成分}) \quad (4.4.2)$$

で表される。Figure 4.4.7は、この成分表示の様子を図示したものである。

このような成分による風の方向提示は、物理的な現象として、手のまわりに厳密な空気の流れを生成しているわけではなく、感覚としての風に対する人間の知覚モデルに従っている。すなわち人間は風を感じる場合に、方向を知覚できるような感覚受容器を備えているわけではなく、風の大きさは圧力として、また風の方向は皮膚に沿う刺激分布、あるいは刺激の変化として感じていると考えられる。そのため、感覚としての風を生成するためには、手のひらに垂直な圧力成分として風の大きさを提示し、手のひらに平行な剪断成分として刺激の変化、すなわち風の方向性を提示することができる。

風を生成するためのファンは、手のひらと甲側ではそれぞれ1つずつ、手の上下方向ではそれぞれ2つずつ配置されており、全部で6個のファンが取付けられている。風は、各成分に対応する2方向のファンを駆動することによって提示されるが、剪断成分の風に関しては手のひら側と手の甲側とで同時に風を受けないように、上下方向のファンは2つずつに分けられている。このような成分による風の方向の知覚精度に関しては、次節で実験的な検証を行う。また、この風覚ディスプレイでは平面内での方向制御しか行っていないため、基本的には2次元ベクトルの表現力しか持っていない。この風覚ディスプレイ装置を用いた3次元ベクトルデータの提示能力に関しては、第6章で実験を行っている。

次に、手の回転による風の方向を確認する機能について説明する。前節での実験結果から風覚ディスプレイの設計にあたっては、手を固定した状態での知覚精度を向上させるよりも、手の回転によって方向を探るような機能を実現する方が効果的であることがわかる。この風覚ディスプレイでは、装置上に空間位置センサが取付けられているため、常にユーザの手の位置と方向を計測しておくことができる。そのため、計測されたユーザの手の方向に対して相対的な角度で風を提示す

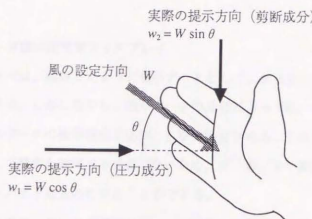


Figure 4.4.7 風覚ディスプレイの風向制御方式

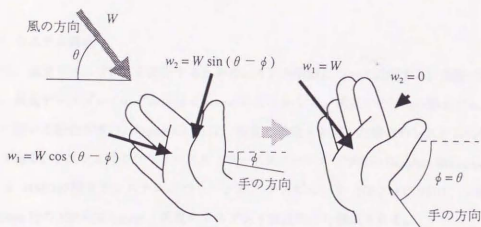


Figure 4.4.8 手の回転による風向の確認

ることが可能であり、これによって、ユーザは手を回転させて風の方向を確認するという動作を実現することができる。Figure 4.4.8は、このような手の回転によって風向を確認する様子を図示したものである。

(4) スカラーデータ提示用風覚ディスプレイ

風覚ディスプレイでは、前述したように提示データとして、スカラーデータ、ベクトルデータを提示することができる。しかしながら、提示データの分野によっては、スカラーデータの提示だけで十分で、ベクトルデータの提示機能を必要としない場合がある。このような用途の場合には、風覚ディスプレイとして風向を制御する必要がないため、ディスプレイ装置としては風圧の制御だけを行う、非常にコンパクトなものにすることができる。

Figure 4.4.9は、スカラーデータの提示専用として試作した風覚ディスプレイの構造を示したものである。このディスプレイでは、風の大きさだけを提示するため、1つのファンだけで構成されている。そのため、ベクトルデータを提示できる通常の風覚ディスプレイの重量が1.6kgであるのに対し、スカラーデータ提示用のディスプレイの重量は250gと、非常に軽量にすることができる。Figure 4.4.10はこのスカラーデータ提示用の風覚ディスプレイを装着した状態を示したものである。また、Table 4.4.3は、これらの風覚ディスプレイの仕様に関する諸元をまとめたものである。

(5) システム構成

次に、風覚ディスプレイを使用するときのシステム構成について説明する。実際の利用にあたっては、風覚ディスプレイをそれ単独で用いることは少なく、視覚やその他の感覚ディスプレイと併用して用いる場合が多い。Figure 4.4.11は、視覚と風覚を併用した場合のシステムの構成を示したものである。システムはグラフィックス・ワークステーション Silicon Graphics IRIS SkyWriter、CRT または HMDの視覚系システム、パーソナル・コンピュータ NEC PC-9801、空間位置センサ Polhemus社の3SPACE Isotrac、風覚ディスプレイ装置等から構成される。

グラフィックス・ワークステーション IRIS SkyWriter は、視覚系のデータ表示と同時に風覚データに関する計算を行う。データ空間内におけるユーザの手の位置と方向は、風覚ディスプレイに取付けられた空間位置センサによって計測される。IRIS上では、このユーザの手の位置と方向に関するデータから、風覚ディスプレイ上に提示する風覚に関するデータが計算される。この風覚データはRS232Cを通してパーソナル・コンピュータ PC-9801に送られ、ここで風覚ディスプレイの制御が行なわれる。

PC-9801では、風覚ディスプレイの6つのファンに対する風圧データが、8255インタフェース回

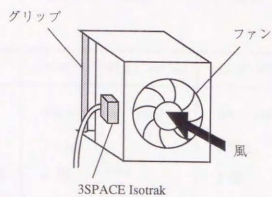


Figure 4.4.9 スカラーデータ提示用の風覚ディスプレイの構造

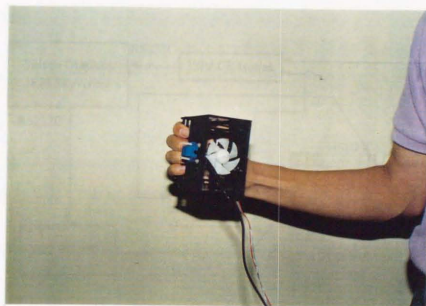


Figure 4.4.10 スカラーデータ提示用の風覚ディスプレイの装着状態

Table 4.4.3 風覚ディスプレイの諸元

種 類	ヘクトメータ用風覚ディスプレイ	スクラメータ用風覚ディスプレイ
外形寸法	320×320×65 (mm)	100×105×65 (mm)
重 量	1.6 kg	250 g
ファンの数	6 個	1 個
最大風速	4.47 m/sec	4.47 m/sec

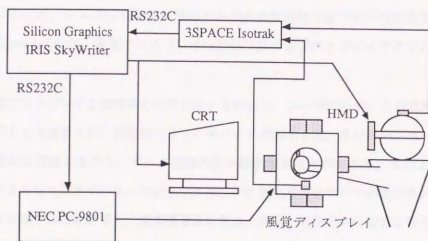


Figure 4.4.11 風覚ディスプレイを用いたシステム構成

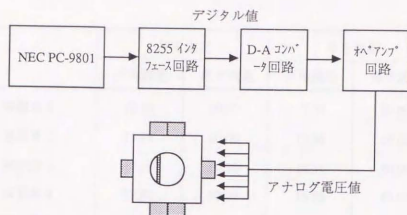


Figure 4.4.12 風覚ディスプレイ制御に関するブロックダイアグラム

路を通してデジタル値として出力される。この風圧データは、更にD-Aコンバータ、オペアンプ回路を通してDCモータにかかる電圧として出力される。D-Aコンバータとしては8ビットのDAC08を使用しているため、0～255の数値に対応する256の分解能で各ファンの風圧を制御することができる。Figure 4.4.12は、風覚ディスプレイの制御に関するブロックダイアグラムを示したものである。

また、風覚ディスプレイを視覚系と同時に用いる場合は、ユーザの手が、その位置と方向に対応した仮想の手として表示され、視覚的なフィードバックが得られる。そのため、ユーザは自分の手の動きを視覚的に確認しながら、データ空間の中を探索することができる。このような視覚的なフィードバックを行うことで、ユーザは自分が存在する現実空間とデータが提示されている仮想空間との関係を認識することができ、深部感覚等を有効に利用したデータの知覚を行うことが可能になる。

4.4.4 システムの評価

試作した風覚ディスプレイ・システムの評価としては、このディスプレイ装置を用いたデータの知覚実験を行った。実験としては、風向に関するデータの知覚実験と、2次元ベクトル量に関するデータの知覚実験を行った。

Table 4.4.4 風覚ディスプレイを用いた風向の知覚実験の結果

	手を固定		手を回転	
	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差
被験者 1	16.39	90.00	7.50	20.00
被験者 2	19.17	60.00	15.56	40.00
被験者 3	17.78	60.00	14.31	30.00
被験者 4	22.50	90.00	16.25	40.00
被験者 5	20.56	60.00	11.53	30.00
平 均	19.28	72.00	13.03	32.00

(単位:度)

(1) 風向の知覚実験

まず、風覚ディスプレイを用いた風向の知覚実験について説明する。この風覚ディスプレイにおける風の方角制御方式については前節で説明したが、このような近似的な方法でどの程度風の方角感覚を生成することができるかを調べるのがここでの目的である。従って提示データとしては、この風覚ディスプレイ装置を使って直接生成することが可能な、2次元平面内の風の方角に限って実験を行った。

実験方法としては、2次元平面内の任意の方角の風を風覚ディスプレイ上に提示し、被験者に知覚した風の方角を答えてもらうという方法で実験を行った。提示データは10度間隔の360度分のデータを、ランダムな順序で提示した。風の大きさは最大風速4.47 m/secである。このとき風覚ディスプレイ上には方向を示す360度の目盛りがつけられており、被験者は知覚した風の方角を目盛りを読むことによって回答した。また手の回転による効果を調べるため、被験者の手を固定した状態と手を自由に回転できる状態の2通りで実験を行った。被験者数は5人である。

Table 4.4.4は、実験結果をまとめたものである。表では、手を固定した場合と手を回転できる場合について、それぞれ平均誤差と最大誤差の値を示してある。この実験においても、手を固定した状態で最大誤差が90.00度等の場合があり、これは明らかな方向の誤りが生じている。しかしな

がら、手を回転させることによって、このような大きな方向の誤りはなくなっていることがわかる。平均誤差の値で見ると、手を固定した場合が19.28度であるのに対し、手を回転できる場合には13.03度となり誤差が減少している。すなわち実際の風の場合と同様に、風覚ディスプレイを用いた場合でも、手を回転させることによる、方向の確認という効果が表れていると考えることができる。

また、これらの誤差の大きさをTable 4.4.1の実際の風の場合と比較すると、風覚ディスプレイを用いた場合の方が、かえって誤差は小さい値を示していることがわかる。手の回転時の平均誤差の値で比較すると、実際の風で21.72度であるのに対し、風覚ディスプレイでは13.03度である。風覚ディスプレイを用いた場合の、このような誤差の減少の原因としては、風覚ディスプレイの風の生成方式による理由が考えられる。すなわち実際の風による実験では、被験者の手全体が風の流れの中に置かれる状態であった。そのため、例えば手のひら側に風が提示されている場合でも、手の甲の反対側にも風が回り込むため、これが方向を誤る原因になり得たと考えられる。これに対して風覚ディスプレイを用いる場合には、小型のファンの組み合わせによって風が生成されるため、手に対して上下左右の4つの象限に分けた形で風が提示される。そのため、例えば手のひら側に風が提示される場合には、手の甲側には全く風が行かず、局所的な風が生成される。このような風覚ディスプレイの風の生成方法が、誤差の減少に有効に働いていると考えることができる。

また別の原因としては、視覚的フィードバックという点を考えることができる。実際の風による提示実験では、被験者は自分の手が見えない状態で実験を行った。この場合、被験者が自分の手の方向を知るためには、位置覚や運動覚等の深部感覚に頼るため、誤差の中にはこれらの深部感覚にかかわる要素が含まれている。これに対して風覚ディスプレイを用いる実験では、ディスプレイ装置を持つ自分の手の方向は視覚的に確認されている。そのため風覚ディスプレイでは、深部感覚にかかわる誤差の要素が減少されていると考えることができる。

またFigure 4.4.13、Figure 4.4.14は、風の提示方向に対する誤差の傾向を示したものである。図では、各提示方向について被験者5人の知覚誤差の平均値と標準偏差が示してある。このグラフから、風覚ディスプレイを用いた風の提示方向に対する誤差傾向は、実際の風の場合とは異なる傾向であることが示されている。すなわち、0～90度、180～270度では主に正の誤差、90～180度、270～360度では主に負の誤差が表れており、手のひら側、甲側ともに、風はより斜めに傾いて知覚されている傾向があることがわかる。

このような誤差の傾向の原因は、風覚ディスプレイにおける風向の提示方式に起因しているものと思われる。風を圧力成分と剪断成分に分けて提示するという方法は、手のひらあるいは手の甲の上の1点における風向のモデル化である。しかしながら、実際には風の方向は、まるみを持った手

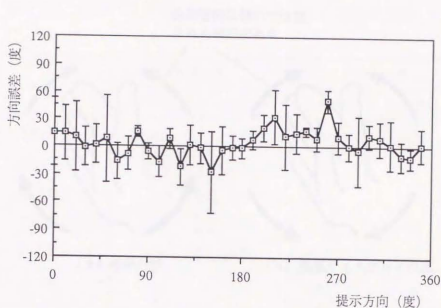


Figure 4.4.13 風覚ディスプレイを用いた風の提示方向による知覚誤差 (手を固定)

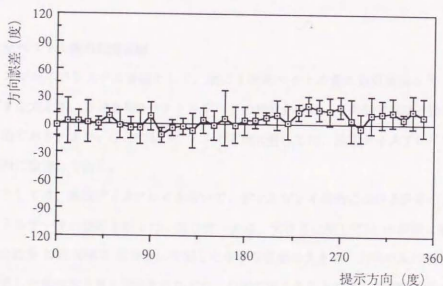


Figure 4.4.14 風覚ディスプレイを用いた風の提示方向による知覚誤差 (手を回転)

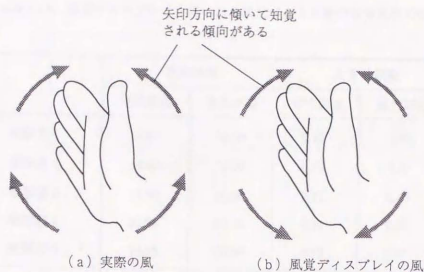


Figure 4.4.15 風覚における方向知覚の歪み

の形状全体で知覚しているため、このモデル化では剪断成分の風を強く感じ過ぎてしまい、より斜め方向に知覚されていると考えられる。Figure 4.4.15 は、実際の風と風覚ディスプレイによる風についての、知覚方向の歪みを図示したものである。

(2) 2次元ベクトル量の知覚実験

風覚ディスプレイのシステム評価として、次に2次元ベクトル量の知覚実験を行った。ここでは、さまざまな大きさ、方向を持つベクトルデータの提示を行い、その知覚精度と知覚特性を調べることが目的である。また、ここでもベクトルの方向に関しては、風覚ディスプレイで提示可能な2次元平面内に限定してある。

実験方法としては、風覚ディスプレイを用いて、ディスプレイ面内における任意の大きさ、方向をもつベクトルデータの提示を行った。提示データは、大きさに関しては10段階に分割、方向に関しては360度を10度間隔で36等分に分割した中から任意の大きさ、方向の風の提示を行った。被験者は知覚した風の大きさと方向をそれぞれ、口頭で答えることによって回答を行った。大きさに関しては0.0～1.0の数値で、また方向に関しては風覚ディスプレイ上に付けられた目盛りを読み取ることによって回答を行った。また、被験者の手に関しては、自由に回転できる状態で実験を行った。被験者数は5人である。

Table 4.4.5 は、これらの実験結果を示したものである。表では、大きさの知覚と方向の知覚に分

Table 4.4.5 風覚ディスプレイを用いた2次元ベクトル量の知覚実験の結果

	方向誤差		大きさ誤差	
	平均誤差	最大誤差	平均誤差	最大誤差
被験者 1	16.67	50.00	0.11	0.40
被験者 2	19.44	70.00	0.10	0.30
被験者 3	17.50	80.00	0.11	0.40
被験者 4	22.78	80.00	0.11	0.30
被験者 5	18.58	70.00	0.12	0.40
平均	18.98	70.00	0.11	0.36

(方向誤差：度、大きさ誤差：0.00～1.00)

けてそれぞれ平均誤差と最大誤差の値を示している。方向に関する誤差の値はTable 4.4.4の結果と比べると多少成績が悪くなっており、最大誤差の値では明らかな誤りが表れている。この原因としては、提示される風の大きさが一定ではなく、大きさの小さい風が含まれているためと考えられる。

またFigure 4.4.16～Figure 4.4.18は風の提示方向、あるいは大きさによる誤差の傾向を示したものである。風の提示方向に対するグラフでは、方向と大きさに関する誤差の平均値と標準偏差を示している。また風の大きさに対するグラフでは、方向、大きさともに絶対値誤差の平均値が示されている。提示方向に対する方向誤差のグラフでは、提示された風の大きさが一定ではないため、Figure 4.4.14に比べると全体的に誤差の値は大きい、傾向としては同様の特徴が表れている。また、この場合の大きさ誤差の傾向としては、手のひらに平行な方向、特に90度付近では小さく感じられ、手のひらに垂直な方向では大きく感じられるという傾向が表れている。この傾向も、前述したように風向をより斜めに感じてしまうという、風覚ディスプレイにおける風向のモデル化に原因があると考えられる。

また大きさに対するグラフからは、方向誤差に関しては、提示される風が小さい（弱い）ほど、やや誤差が大きく、風が大きい（強い）ほど誤差が小さいという傾向が見られる。この結果からも、Table 4.4.4に比した方向誤差の増大が、小さい風の提示に原因があったことが推測される。こ

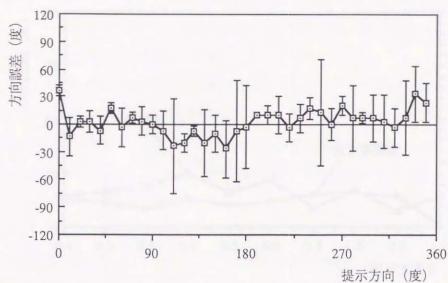


Figure 4.4.16 ベクトル量の知覚実験における風の提示方向による方向誤差の傾向

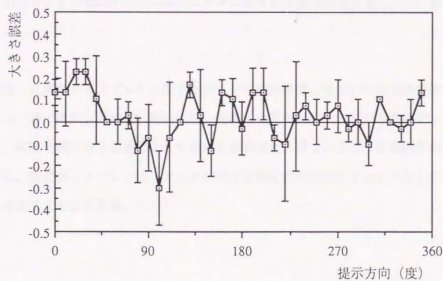


Figure 4.4.17 ベクトル量の知覚実験における風の提示方向による大きさ誤差の傾向

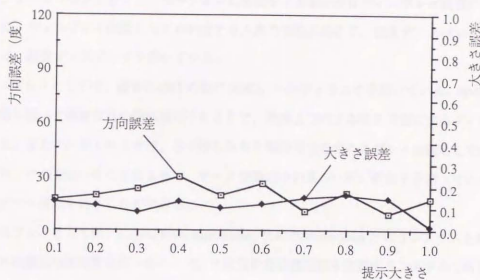


Figure 4.4.18 ベクトル量の知覚実験における風の大きさによる誤差傾向

れに対して、大きさに関する誤差は、全体的に平均化している風の大きさが0.7～0.9のあたりでは、やや誤差が大きい傾向がある。風の大きさに関する知覚の特性に関しては、第6章で詳しく検討を行う。

以上、試作した風覚ディスプレイに関するデータの提示精度、あるいは知覚特性等を調べる評価実験を行った。特に風の方向知覚に関しては、局所的な風を生成するという風覚ディスプレイの方式によって、実際の風に対する場合よりも高い知覚精度を実現できることが確認された。これらの実験結果から、風覚ディスプレイは、データに対する触覚的な提示用デバイスとして十分に利用可能であると考えることができる。

4.5 本章のまとめ

本章では、データ・センシュアライゼーションに利用する各種の感覚ディスプレイ装置について説明を行った。ディスプレイ装置としては利用する人間の感覚に応じて、視覚ディスプレイ、聴覚ディスプレイ、触覚ディスプレイを用いている。

視覚ディスプレイとしては、通常のCRTの他にHMD、ハンディモニタを用いている。HMDは、ユーザの視線に従った画像を目の前に提示することで、空間上での立体視を可能にするディスプレイ装置である。またハンディモニタは、手で持ちながら移動可能なディスプレイ装置として試作したものであり、これを用いることによって、データ空間の中の見たい所に直接手を持っていくという探索的なデータ提示を行うことができる。

聴覚ディスプレイとしては、Crystal River Engineering社のConvolutronというシステムを利用している。これは頭部伝達関数を用いることで、3次元的な音像定位を実現するシステムである。このディスプレイ装置を用いることによって、データ値に応じた音情報をデータが存在する場所から聞こえるように配置するというデータ提示方法を行うことができる。ここでは、Convolutronを利用するにあたって、単音源に対する音像定位精度、あるいは音源数による定位精度の変化等の基礎的な実験を行った。

触覚ディスプレイとしては、風を利用してデータ提示を行う風覚ディスプレイの提案を行い、プロトタイプ・システムの作成を行った。ここではまず、人間の風覚に関する基本的な特性を調べ、そこで得られた知見をもとに風覚ディスプレイの開発を行った。風の方角に対する知覚精度を向上させるためには、手の回転による方向の確認動作等が重要であることがわかった。また、開発した風覚ディスプレイについてはデータの知覚実験を行い、ディスプレイ装置の評価を行った。この風覚ディスプレイでは、風を手のひらに対する垂直成分と剪断成分に分けて提示するという方式を用いているが、この実験結果からは剪断成分が多少強めに感じられる傾向があることがわかった。しかしながら平均的な誤差としては、局所的な風を生成する等の理由によって、実際の風を用いた場合よりも、精度の高い風覚情報の提示が行えることが確認された。これらの結果から、風覚ディスプレイは、データ・センシュアライゼーションのためのディスプレイ装置として十分に利用可能であると考えられる。

第 5 章

データ・センシュアライゼーション環境の開発

Development of Data Sensualization Environment

5.1 緒言

前章では、各感覚に対してデータ提示を行うための、各種ディスプレイ装置について説明を行った。本章では、これらの感覚ディスプレイ装置を組み合わせて構築された、データ・センシュアライゼーション環境について説明を行う。

データ・センシュアライゼーション環境の開発を行うにあたって、最も考慮しなければならない問題は、どのようなデータ提示機能を実現させるかという点である。データ・センシュアライゼーションでは、特別なディスプレイ装置を使用するために、実現されるデータ提示方法は、ある程度ハードウェアに依存したものになる。しかしながら、従来のデータ・ビジュアライゼーションに比べて利用できる感覚が増えるため、データの提示方法としては非常に多様な方法を考えることができる。

また、科学技術データの提示では、単純にデータを感覚量に置き換えるだけではなく、科学的にも意味のあるデータ提示を行うことが要求される。すなわち、提示すべきデータ項目に対して物理的な意味を考慮したデータ提示方法を実現することが必要である。例えば、流体に関するデータ・ビジュアライゼーション手法として、流線表示や流路線表示等の方法が行われているが、これらは流体という物理的現象を理解した上でのデータ提示方法であると言える。データ・センシュアライゼーションの場合には、このようなデータの表現手法だけでなく、利用感覚についてもデータの物理的内容を考慮した提示方法を実現することが必要である。例えば流体のデータでは、視覚情報だけで提示するのではなく、風覚等を利用して直接手で感じ取れるようにすることによって、直観的な理解が可能になると考えられる。

本研究では、以上のような点を考慮に入れ、総合的なデータ・センシュアライゼーション環境の開発を行った[Ogi93a]。本研究の目的は、特定分野に対する専用のデータ提示環境を構築することではなく、人工現実感を用いたデータ・センシュアライゼーション手法の有効性を示すことである。そのため、ここで開発したデータ提示環境は、あくまでも基本的機能だけを備えた環境である。提示可能なデータは、スカラー量あるいはベクトル量で表されるデータであり、データ項目の内容に関しては問題にしていない。しかしながら、上述したように物理的内容を考慮したデータ・センシュアライゼーション手法を実現することは重要な問題であるため、一例として流体データの提示方法に関しては、幾つかの具体的なデータ提示方法を実現してある。

以下本章では、本研究で開発されたデータ・センシュアライゼーション環境のシステム構成、データ提示機能、利用方法、あるいは応用事例等について説明を行う。

5.2 データ・センシュアライゼーション環境のシステム構成

5.2.1 ハードウェア構成

本節では、データ・センシュアライゼーション環境のシステム構成について説明を行う。データ・センシュアライゼーション環境は、ハードウェアとしての構成と、その上で動くソフトウェアの構成から成り立っている。まずここでは、データ・センシュアライゼーション環境のハードウェア構成についての説明を行う。

Figure 5.2.1は、本研究で開発したデータ・センシュアライゼーション環境のハードウェア構成を示したものである。図に示されているように、システムは大きく視覚システム、聴覚システム、触覚システムの各ディスプレイ・サブシステムと、動作入力システムから構成されている。以下、各サブシステムの詳細について説明する。

(1) 視覚システム

視覚システムとしては、Silicon Graphics社のグラフィックス・ワークステーションIRIS SkyWriterをホスト・コンピュータとしてCRT、HMD、あるいはハンディ・モニタの各ディスプレイ装置から構成されている。ディスプレイ装置としてCRTを用いる場合には、CRT画面の前方の空間をデータ空間として利用することになる。また、HMDやハンディ・モニタを用いる場合には、前章で説明したように、CRTに表示された映像を一度CCDカメラで撮影することによって、HMDやハンディ・モニタに画像を送る方式を採用している。これらの各ディスプレイ装置は、データ提示の目的に応じて、切り替えスイッチによって、切り替えながら使い分けることができる。例えば、HMDやハンディ・モニタは、ユーザの視点や手の位置に応じた3次元的な画像の提示が可能なため、データの3次元構造を理解しようとする場合には有効な方法である。しかしながら、これらのディスプレイ装置は画像の解像度、鮮明度が低いために、正確なデータ値の認識が要求される場合には、CRTの方が有効な方法になると考えられる。

Table 5.2.1は、グラフィックス・ワークステーションIRIS SkyWriterの仕様を示したものである。この計算機では視覚データの生成、表示等を行っているが、その他にもシステム全体の中心として、提示データの管理、聴覚情報、風覚情報の生成等の機能を行っている。

(2) 聴覚システム

聴覚システムは、視覚システムと同様にIRIS SkyWriterをホスト・コンピュータとして、パーソナル・コンピュータNEC PC-9801とIBM-PC、Crystal River Engineering社のConvolvotron、音源の

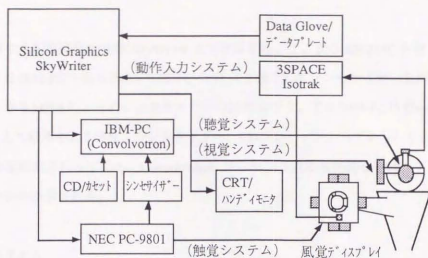


Figure 5.2.1 データ・センシュアライゼーション環境のハードウェア構成

Table 5.2.1 グラフィックス・ワークステーション IRIS SkyWriter の仕様

名 称	IRIS SkyWriter
CPU	MIPS R3000 × 4
システム演算性能	最大 143 MIPS / 最小 59 MIPS 最大 42 MFLOPS / 最小 18 MFLOPS 最大 94 SPECmark / 最小 40 SPECmark
グラフィック描画性能	2400 ポリゴン (アンチエイリアス処理) 2400 ポリゴン (アンチエイリアス処理無し)
ビジュアル描画性能	1 億ピクセル / 秒 (フルスクリーン時) 4 億ピクセル / 秒 (フルスクリーン時、テクスチャ無し)

シンセサイザー Roland D-20、CD、カセットテープ等から構成されている。Convolvotron は、前述したように音源 1～音源 4 までの 4 つの音源を利用することができるため、音源 1 にシンセサイザーを割り当て、残りの音源 2～音源 4 はそれぞれ CD やカセットテープを使用できるようにしてある。

各音源に対する制御情報は IRIS SkyWriter 上で計算され、ここから RS-232C を通して NEC PC-9801、あるいは IBM-PC へ送られる。NEC PC-9801 は音源としてシンセサイザーを用いる場合に使用され、ここから MIDI によってシンセサイザーの制御を行う。また IBM-PC は Convolvotron の制御用計算機として使用されており、シンセサイザー、CD、カセットテープから入力される音源に対して 3 次元音像配置を行っている。Convolvotron から出力される最終的な音は、アンプを通してヘッドフォンから提示される。

(3) 触覚システム

触覚システムは、ホスト・コンピュータの IRIS SkyWriter とパーソナル・コンピュータ NEC PC-9801、風覚ディスプレイから構成されている。風覚に関する情報はシンセサイザーの制御情報と同様に IRIS SkyWriter から NEC PC-9801 へ送られ、ここで風覚ディスプレイの制御が行われる。従って NEC PC-9801 は、送られる制御情報のコマンドによって、シンセサイザーの音源制御と風覚ディスプレイの制御とに使い分けられている。

(4) 動作入力システム

動作入力システムとしては、キーボード、空間位置センサ Polhemus 社の 3SPACE Isotrak、または必要に応じて VPL 社の Data Glove、試作したデータプレート等を使用することができる。

キーボードは、データ提示方法の指定やパラメータの設定等の、データ提示を実行するまでのコマンド入力に利用される。3SPACE Isotrak は、ユーザの手の位置と頭の位置の計測に対して、それぞれ使用される。頭の位置を計測するセンサは、通常 HMD やヘッドフォンに取付けられ、手の位置を計測するセンサは、利用方法に応じて手で持って使用したり、Data Glove、データプレート、風覚ディスプレイ等に取付けて使用することができる。これらの方法によって、ユーザの手や頭の位置に応じたインタラクティブなデータの提示を行うことが可能になる。

また Data Glove は細かい手指の動きを計測するためのセンサであり、これを用いることによってジェスチャを利用した動作入力を行うことができる [Zimmerman87, VPL89b]。Figure 5.2.2 は Data Glove の構造を示したものである。図に示したように、Data Glove は薄手の手袋の指の部分に樹脂製の光ファイバをはわせた構造になっており、指が曲がるとファイバ上の光の透過効率が劣化する

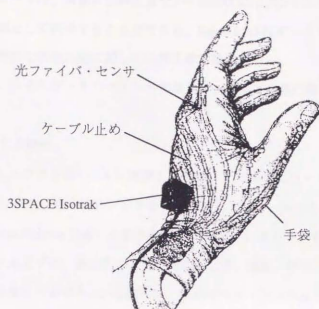


Figure 5.2.2 Data Glove の構造

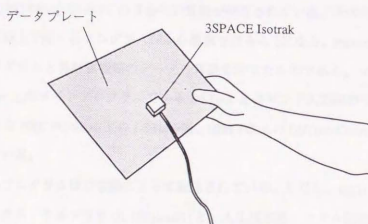


Figure 5.2.3 データプレートの構造

性質を利用して、指の曲がりを計測することができる。計測点は各指の第1、第2関節で、合計10自由度を持つジェスチャを入力として利用することができる。

またデータプレートは、薄板に空間位置センサ 3SPACE Isotrak を取付けたものであり、手で持つ移動可能な断面として利用することができる。Figure 5.2.3 はデータプレートの構造を示したものである。この具体的な利用方法に関しては第7章で後述する。

Figure 5.2.4 は、以上のデータ・センシュアライゼーション環境の様子を示したものである。

5.2.2 ソフトウェア構成

データ・センシュアライゼーション環境としては、上で述べたハードウェア構成とその上で動くソフトウェアであるデータ・センシュアライゼーション・ツールから構成される。本研究では、DSTool (Data Sensualization Tool) と称するデータ・センシュアライゼーション・ツールの開発を行った。このツール上では、提示すべきデータに対して、視覚、聴覚、触覚を用いた各種のデータ提示方法を実行することができる。本節では、このデータ・センシュアライゼーション・ツールのソフトウェア構成について説明を行う。

(1) ソフトウェアの構造

データ・センシュアライゼーション・ツールは、前述のハードウェア構成の上に構築されており、計算機としては、グラフィックス・ワークステーション IRIS SkyWriter、パーソナル・コンピュータ NEC PC-9801、IBM-PC の3台の計算機が使用されている。そのためソフトウェアは、それぞれの計算機上で動く各プログラム群から構成されることになる。Figure 5.2.5 は、これらの各計算機上のプログラムと各計算機間のデータの移動を示したものである。ソフトウェアとしては、IRIS SkyWriter 上のメインプログラムである DSTool とコマンド入力用のサブプログラム DSTool-Command、また NEC PC-9801 上の DSTool-98、IBM-PC 上の DSTool-Ctron の各サブプログラムから構成されている。

これらの各プログラムはC言語によって記述されている。ただし、DSTool は Silicon Graphics 社のグラフィックス・ライブラリ GL [Silicon91] と、人工現実感システム記述用のライブラリである Vis-age [Kijima91b] を用いて記述されている。また、DSTool-Ctron は Crystal River Engineering 社の Convolvotron 制御用のライブラリである CTRON [Crystal90] を用いて記述されている。

(2) ソフトウェアの機能分割

各プログラムはそれぞれ、次のような機能分割を行っている。IRIS SkyWriter 上で動く DSTool



Figure 5.2.4 データ・センシュアライゼーション環境の様子

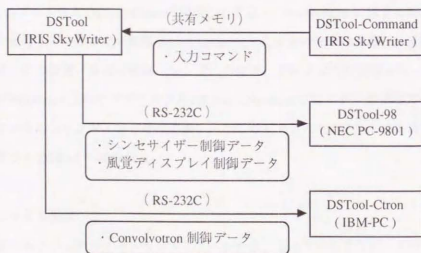


Figure 5.2.5 ソフトウェア構造とデータの移動

は、本システムのメインプログラムであり、主な機能としては、提示データの読み込みと管理、データ提示方法の管理、ユーザの動作の計測、視覚情報の生成と表示、または聴覚ディスプレイと風覚ディスプレイの制御情報の生成等を行っている。聴覚と風覚に関する実際のディスプレイ制御は、サブプログラムである DSTool-98 と DSTool-Ctron で行われているが、DSTool ではこれらに対する制御データの生成、管理を行っている。これらの制御データは RS-232C を通して DSTool-98、DSTool-Ctron へ送られる。

伝送される制御データは、各制御内容に対するコマンド名とそれに続く引数から構成されており、DSTool-98、DSTool-Ctron では、それぞれ受け取ったコマンド名に従って各機能を実行する。Table 5.2.2 と Table 5.2.3 は、それぞれ DSTool から DSTool-98、DSTool-Ctron へ送られる制御データの一覧とその機能を示したものである。DSTool-98 へ送られる制御データはシンセサイザーの制御を行う MIDI コマンド [Roland88, Misuzu91] と風覚ディスプレイの制御に関するデータであり、DSTool-Ctron へ送られる制御データは Convolvotron の制御に関するデータである。

一方、NEC PC-9801 上のプログラムである DSTool-98 の機能としては、シンセサイザーと風覚ディスプレイに関する制御データを受け取り、それぞれの制御を実行する。ここで行われる制御項目は Table 5.2.2 に示されたものであり、シンセサイザーに関しては、指定した音の発生、指定した音の停止、全ての音の停止、あるいは音の大きさ（ボリューム）の変更、音の高さ（ピッチ・ベンダー）の変更等を行う。また風覚ディスプレイに関しては、風の強さと方向の変更を行っている。

IBM-PC 上のプログラム DSTool-Ctron の機能としては、Convolvotron に関する制御データを受け取り、制御を実行する。ここでの制御項目は Table 5.2.3 に示されたものであり、音源の変更、音の大きさ（ゲイン）の変更、音源の距離（レンジ）の変更、音源方向の変更等を行っている。

また、IRIS SkyWriter 上のサブプログラム DSTool-Command では、データ提示方法の指定に関するキーボードからのコマンド入力を受けており、ここで入力されたコマンドは共有メモリを介してメインプログラム DSTool へ渡される。

(3) 入力ファイル形式

このデータ・センシュアライゼーション・ツールでは、提示すべき入力データのファイルを読み込み、各データ項目に対してそれぞれのデータ提示方法を選択することができる。入力データのファイルとしては、次の2つのファイルが必要である。

- a) 計算モデル・ファイル
- b) 出力データ・ファイル

Figure 5.2.6、Figure 5.2.7 は、それぞれ計算モデル・ファイルと出力データ・ファイルの一例を示し

Table 5.2.2 DSTool から DSTool-98 へ送られる制御データの一覧

コマンド	引 数	制 御 内 容
mode	利用感覚番号	モード（利用感覚）の設定
note_on	ノート・ナンバー、ベロシティ	指定した音の発生
note_off	ノート・ナンバー	指定した音の停止
all_note_off	—	全ての音の停止
volume	ボリューム	音の大きさ（ボリューム）の変更
bender	ビッチ・ベンダー	音の高さ（ビッチ・ベンダー）の変更
blow	風の強さ、風の方向	風の強さ、風の方向の変更
quit	—	DSTool-98 の終了

Table 5.2.3 DSTool から DSTool-Ctron へ送られる制御データの一覧

コマンド	引 数	制 御 内 容
source	音源番号（1～4）	制御音源の変更
gain	ゲイン	音の大きさ（ゲイン）の変更
range	レンジ	音源の距離（レンジ）の変更
position	音源座標（x, y, z）	頭に体する相対的な音源方向の変更
quit	—	DSTool-Ctron の終了

たものである。計算モデル・ファイルは、科学技術計算そのものに必要なデータ・ファイルであり、ファイルの内容としては、計算モデルに関する節点数、要素数、節点データ、要素データ等のデータと、計算とは直接関係ないが表示したい形状モデルのための、モデル形式、モデル節点数、モデル要素数、モデル節点データ、モデル要素データ等のデータから構成されている。また、出力データ・ファイルは、科学技術計算の結果として出力される提示データに関するファイルであり、ファイルの内容としては、データ項目数、データ項目名、データの種類、データ値等から構成されている。これらのファイルは、それぞれファイル名に付けられる“.model”、“.out”の拡張子によって識別される。

```

657 368
polygon 12 5
1 -50.00 150.00 50.00
2 -50.00 150.00 45.00
3 -50.00 150.00 40.00
4 -50.00 150.00 35.00
5 -50.00 150.00 30.00
6 -50.00 150.00 25.00
7 -50.00 150.00 20.00
8 -50.00 150.00 15.00
9 -50.00 150.00 10.00
10 -50.00 150.00 5.00
11 -50.00 150.00 0.00
...
655 0.00 100.00 -40.00
656 0.00 100.00 -45.00
657 0.00 100.00 -50.00
1 1 2 22 23 220 221 241 242
2 2 3 23 24 221 222 242 243
3 3 4 24 25 222 223 243 244
4 4 5 25 26 223 224 244 245
5 5 6 26 27 224 225 245 246
6 6 7 27 28 225 226 246 247
7 7 8 28 29 226 227 247 248
8 8 9 29 30 227 228 248 249
...

```

Figure 5.2.6 計算モデル・ファイルの一例

```

3
stream_func scalar
vorticity scalar
velocity vector
1 0.05000 652 -0.00709
2 0.05000 653 -0.02467
3 0.05000 654 -0.04113
4 0.05000 655 -0.05340
5 0.05000 656 -0.05988
6 0.05000 657 -0.05988
7 0.05000 1 0.00000 0.00000 -0.08099
8 0.05000 2 0.00000 0.00000 -0.08101
9 0.05000 3 0.00000 0.00000 -0.08198
10 0.05000 4 0.00000 0.00000 -0.08394
11 0.05000 5 0.00000 0.00000 -0.08696
12 0.05000 6 0.00000 0.00000 -0.09103
... 7 0.00000 0.00000 -0.09601
... 8 0.00000 0.00000 -0.10150
...

```

Figure 5.2.7 出力データ・ファイルの一例

5.3 データ提示機能

データ・センシュアライゼーション環境では、視覚、聴覚、触覚の各ディスプレイ装置を用いたデータ提示を行うことができる。本節では、これらの各ディスプレイ上で実行することができるデータ提示機能について説明を行う。本研究は、実際のデータ提示を行うことが目的ではなく、データ・センシュアライゼーションの方法論に関する検討を行うことが目的であるため、データ提示機能としては、ごく基本的な機能だけがインプリメントされている。

5.3.1 視覚を用いたデータ提示機能

まず、視覚を用いたデータ提示機能について説明を行う。データの視覚化については、従来からデータ・ビジュアライゼーション手法としてさまざまな方法が研究されてきている [Nielson90, Fujii92]。ここでは、データ・センシュアライゼーションとしての特徴を活かした幾つかのデータ提示方法について実現を行った。

(1) スライス面表示

スライス面表示とは、データ空間をある平面で切ったときの断面上のデータパターンを色の変化で表示する方法である。この方法は、従来のデータ・ビジュアライゼーションの方法として広く使われているが、本システムにおいても、ボリュームデータに対する基本的なデータ提示方法として利用することができる。しかしながら、本研究で行うスライス面表示の方法としては、ユーザが手に仮想のスライス面を持つ等の方法で、直接的に断面を移動する方法を実現している。また、スライス面表示の変形的な方法として、ハンディ・モニタを用いる方法等も行うことができる。これらのスライス面表示方法に関しては、改めて第7章で詳しく検討を行う。

(2) 矢印表示

これは、ベクトルデータを矢印として視覚化する方法である。ベクトルデータ等の多次元データを視覚化する方法としては、数値をそのまま表現することが困難であるため、何らかの形にアイコン化する方法がよく用いられている。この矢印表示もこのようなアイコン化の一つの方法である。ただし、ここでは仮想空間を用いることによって3次元矢印としての立体表示を行うことが可能である。

(3) 流線表示

流線表示は、流体の流れ場を表現するために従来から行われている方法であるが、ここでも仮想空間の中で3次元曲線として立体表示することが可能である。流線の表示方法としては、Data Gloveの使用、あるいは空間位置センサ 3SPACE Isotrakを直接手に持って使用する等の方法によっ

て、仮想空間の中でユーザが直接的に手で流線の始点を指定するインタラクティブな方法を行うことができる。この流線表示の方法は、基本的には Bryson 等の方法と同様のものであるが[Bryson91, Bryson92a, Bryson92b]、データ・センシュアライゼーション環境の中では、後述するように、流線上のデータの変化を聴覚を使って表現する等の多感覚を用いた複合的なデータ提示を行うことができることが特徴である。

5.3.2 聴覚を用いたデータ提示機能

次に聴覚情報を用いたデータ提示機能について説明を行う。ここでは、3次元音像定位を利用した幾つかのデータ提示方法を実現している。

(1) 指定点の音提示

これは、聴覚による最も基本的なデータ提示方法である。ユーザがデータ空間内の点を手で指定することによって、指定された位置のデータを音によって提示する方法である。データ提示を行う点としては、任意の位置を指定することができるが、指定された点のデータ値は、それを含ままわりの節点データの値から補間して求められる。データ値を音に対してマッピングする方法としては、音の高さ、音の大きさ等のパラメータを選択することができる。また、この方法では提示される音に対して3次元の音像定位が行われるため、データが存在する位置からデータに対する聴覚情報を聞くことができる。また、ユーザが空間内で手を動かすことによって空間的なデータの変化を音の変化として認識することも可能である。

(2) 指定直線の音提示

この方法は、データ空間の中に直線を指定して、直線上のデータ変化を音の変化で提示する方法である。聴覚情報は時間的な変化を認識しやすいという特徴を有しているため、このようなデータ変化の提示に対しては、非常に有効な方法であると考えられる。直線の指定方法は、流線表示の場合と同様に、ユーザの指先から直線を3次元空間の中に、直接手で指定することができる。

(3) 流線上のデータ変化の提示

これは、流体データに対する流線表示と指定直線の音提示を組み合わせた方法であり、指定した流線上のデータ値の変化を音の変化で提示する方法である。流線上のデータとしては、流速データ、渦度データ等の提示したいデータ項目を指定することができる。この方法は、視覚と聴覚という多感覚を利用できる環境ではじめて実行可能なデータ提示方法である。また、この場合も音に関しては3次元音像定位を行うことができるため、流線に沿って音情報が流れていく様子を表現することができる。Figure 5.3.1は、この方法を図で示したものである。

(4) 音像ベクトルの提示

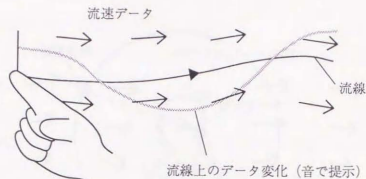


Figure 5.3.1 流線上のデータ変化の提示方法

これも、ベクトルデータに対する聴覚情報を用いた提示方法の一つである。この方法では、ユーザがデータ空間の中に身体ごと入りこんだ状態でデータの提示が行われる。データの提示方法としては、ユーザの頭の位置のデータ値に対して、ベクトル量の大きさは音の大きさ、あるいは音の高さに、またベクトル量の方向はその位置で聞こえる音像方向にマッピングすることで、データの提示を行う。仮想音源の配置位置としては、ベクトルの始点方向とし、ユーザの頭からは一定の距離に配置している。Figure 5.3.2は、この方法を図示したものである。このデータ提示方法だけで空間的なデータ分布の認識を行うことは困難であるが、視覚と組み合わせる等の補助的な手段としては十分に有効な方法であると考えることができる。

(5) 背景音の提示

音の利用方法としては、データ値を提示する目的の他に、空間的な手掛かりを提示するための利用方法が考えられる。空間の中に配置された音源に対して、正確な音像定位ができれば、音源位置を手掛かりとした空間の認識が可能になる。このような目的で配置される仮想音源を、ここでは背景音と呼ぶことにする。背景音の配置方法としては、データ空間の各コーナーに配置する方法、あるいはユーザが手で指定しながら配置する方法等を行うことができる。またこの場合、配置される仮想音源は空間的な手掛かりを与えると同時に、配置された場所のデータ値を音で提示することも可能である。背景音の数に関しては、利用する Convolution の制約から最大4つまでに限定されている。

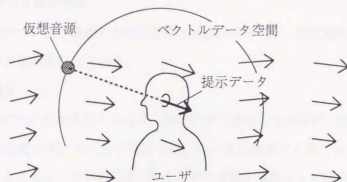


Figure 5.3.2 音像ベクトルによる提示方法

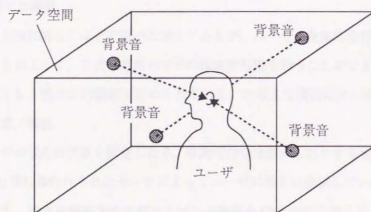


Figure 5.3.3 背景音の提示方法

る。また、配置された音源に関しては、全ての音を同時に提示する方法、あるいはユーザから最も近い音源だけを提示する方法等を選択することができる。Figure 5.3.3は背景音の提示方法を示したものである。この方法に関しては、第7章で詳しく検討を行う。

5.3.3 触覚を用いたデータ提示機能

次に、触覚を用いたデータ提示機能について説明を行う。ここでは、触覚的なデータ提示方法として風覚を用いたデータ提示を行っている。

(1) 指定点の風覚提示

風覚による基本的なデータ提示方法としては、空間の中で指定した点のデータ値を風覚情報として提示するという方法を行っている。この方法では、ユーザが風覚ディスプレイに手に装着し、データ空間の中に手を入れることで手の位置に対するデータ値が風覚として提示される。指定した点のデータ値は、聴覚を用いる場合と同様にまわりの節点データから補間して求められる。提示データとしては、スカラーデータ、ベクトルデータの提示を行うことができる。スカラーデータの場合には、データ値に応じた強さの風が手のひらに垂直に提示される。またベクトルデータの場合には、データ値の大きさと方向に応じた強さ、方向の風が提示されることになる。

5.3.4 動作に関する機能

各データ提示方法に関しては上で述べた通りであるが、ユーザは身体的な行動によるインタラクションを行うことによって、3次元空間の中での探索的行動を行うことができる。このユーザの身体的行動に関しても、幾つかの機能が定められている。この主な機能は次の通りである。

(1) 視点の固定／移動

これは、ユーザの視点の位置を固定したり、移動可能な状態にしたりする機能である。視点の位置は、通常HMD等に取付けられたセンサによってユーザの動きに追従していくが、この機能を用いることによって、視点を固定させてディスプレイ装置をCRTに切り替える等の利用方法を行うことができる。

(2) 手の固定／移動

これは、ユーザの手の動きを固定、または移動可能な状態にする機能である。ユーザの手の動きも、通常はData Glove等に取付けられているセンサによって計測され、仮想の手として実際の手の動きに追従しているが、手を固定することによって、仮想の手を実際の手の動きから切り離して固定させることができる。この機能は、手で指定した位置のデータを聴覚情報や風覚情報として提示している場合等に、指定位置を固定させてじっくり調べる等の方法に利用することができる。ま

た、スライス面表示、流線表示等の方法を行っている場合には、手に持ったスライス面や流線等の位置を固定させて表示することが可能になる。

(3) 手の拘束

これは、手の動きの自由度を減少させる方法で、Figure 5.3.4 に示すように空間の中に固定された直線や面に沿って、手の動きを拘束することができる。例えば、スライス面に手を拘束することによって、スライス面上のデータ値を視覚情報と同時に聴覚情報や風覚情報で提示する等の方法を行うことが可能になる。

(4) データ空間の拡大／縮小

これは、データ空間を拡大または縮小することによって、人間とデータ空間との間の相対的な大きさの関係を変更する機能である。大きさの変更方法としては、ユーザの頭の位置あるいは指で指定された位置を基準点としてデータ空間の拡大、縮小が行われる。Figure 5.3.5 はデータ空間の拡大／縮小の方法を図示したものである。この機能を用いることによって、データ空間を拡大して注目する部分をよく調べたり、データ空間全体を縮小して遠くから眺める等の方法を行うことができる。また、データ空間を拡大、縮小することによって、ユーザがデータ空間の中に入り込んだり、外から眺めたりというように、人間とデータ空間との関係を変更することも可能になる。

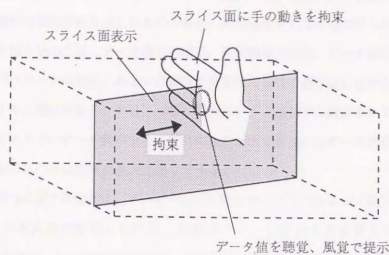


Figure 5.3.4 手の拘束の方法

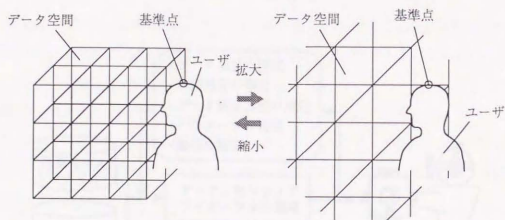


Figure 5.3.5 データ空間の拡大／縮小の方法

5.4 利用方法

5.4.1 基本操作方法

本節では、データ・センシュアライゼーション環境の利用方法について説明する。Figure 5.4.1は、基本的な操作方法の流れを示したものである。操作方法としては図に示したように、入力データのファイルを読み込んだ後、データ項目の指定、利用感覚の指定、データ提示方法の指定、提示方法に関するパラメータの指定、あるいは動作の指定等の操作を繰り返しながら、各種のデータ提示方法を実行する。提示するデータは、一般に複数のデータ項目から構成されているため、各データ項目に対してそれぞれデータ提示方法を選択することができる。各データ提示方法、あるいは動作に関する具体的な内容は前節で述べた通りである。

これらの各操作に関する指定は、キーボードからのコマンド入力によって実行される。仮想空間の中でのコマンド入力の方法としては、仮想メニューを用いる方法等も提案されているが[Bryson93]、ここでは、ユーザがデータ空間（仮想空間）の中に入る前に設定が可能のため、インタラクションの迅速さからキーボード入力を行っている。Table 5.4.1は、これらの入力コマンドと対応する機能の関係をまとめたものである。また、データの提示中に（仮想空間の中で）入力が必要なコマンドに関しては、Data Gloveを用いたジェスチャによる入力を可能にしている。Figure 5.4.2は利用可能なジェスチャの種類を示したものである。またTable 5.4.2は、データの提示状態とジェ

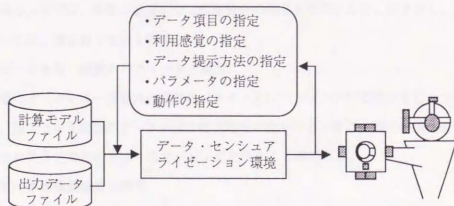


Figure 5.4.1 データ・センシュアライゼーション環境での基本的操作方法の流れ

スチャによるコマンド機能との関係を示したものである。例えば、流線表示の状態で1指グーのジェスチャを行うことで、流線上のデータ変化の音による提示を実行することができる。

5.4.2 データ提示の利用形態

一般に提示を行う物理現象は複数のデータ項目から構成されている。例えば、流体解析で扱われるデータとしては、流速、温度、圧力、流れ関数、渦度関数等のデータ項目が存在する。そのため、実際のデータ・センシュアライゼーション環境の利用においては、これらのデータ項目をそれぞれ各利用感覚に振り分けながら、データ提示を行うことになる。このとき、データと感覚の利用方法については、幾つかの形態が考えられる。これらの利用形態を分類すると、次のように分けることができる。

(1) 単一データを単一感覚で提示

これは単一のディスプレイ装置を用いて、データの一つずつ提示する方法である。例えば、圧力分布のデータを視覚を用いてスライス面で提示する、あるいは流速データを風覚で提示するというような単独の利用を行う場合である。

(2) 単一データを複数感覚で提示

これは単一のデータに対して視覚、聴覚、触覚等の複数感覚を同時に利用して提示を行う方法である。例えば、圧力データの値を提示する場合に、視覚によるスライス面表示を行ないながら、面上のデータ値を手で指定して音で聞き、かつ風覚として感じ取れるというような利用方法である。このような提示方法では、複数の感覚による感覚統合の効果を利用することができる。この具体的な効果については、第6章で検討を行う。

(3) 複数データを単一感覚のパラメータで提示

これは複数のデータを単一感覚内の複数のパラメータにマッピングして提示を行う方法である。例えば温度、圧力という複数のデータ項目を聴覚情報で提示するときに、温度の値は音の高さで、圧力の値は音の大きさでというようなマッピングを行うことができる。

(4) 複数データを複数感覚で提示

これは複数のデータをそれぞれ別々の感覚ディスプレイを用いて同時に提示する方法である。例えば、圧力データと流速データを同時に提示する場合に、圧力データは視覚的なスライス面で、流速データは風覚でというように複数の多感覚に振り分けて提示を行うことができる。このように多感覚を利用することによって、複数のデータ項目を容易に提示することができ、データ相互間の関係等を表現することができる。多感覚へのデータの振り分け方法に関しては、第8章で詳しく検討

Table 5.4.1 入力コマンドと対応する機能の一覧

種 類	コマンド	機 能
データ項目の指定	数字	データ番号の選択
利用感覚の指定	visual	視覚の選択
	sound	聴覚の選択
	wind	風覚の選択
データ提示方法の指定	section	スライス面表示
	arrow	矢印表示
	stream_line	流線表示
	note	指定点の音提示
	sound_line	指定直線の音提示
	line_value	線上のデータ変化の音提示
	note_vector	音像ベクトルの提示
	note_mark	背景音の提示の選択
	blow	指定点の風覚提示
パラメータの指定	rgb_gr (_bg, _br)	RGB カラーコード
	hsv_h (_s, _v)	HSV カラーコード
	munsell_h (_v, _c)	Munsell HVC カラーコード
	loudness	音の大きさ
	pitch	音の高さ
	rhythm	音のリズム
動作の指定	data	操作対象をデータに変更
	hand	操作対象を手に変更
	eye	操作対象を視点に変更
	fix	視点、手の固定
	move	視点、手の移動
	restrict	手の拘束
	scale	データ空間の拡大、縮小
	end	終了

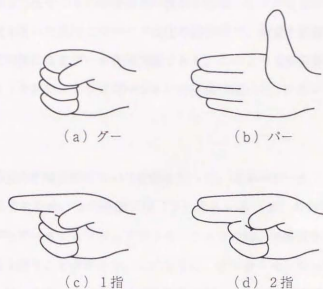


Figure 5.4.2 利用可能なジェスチャ

Table 5.4.2 ジェスチャと対応するデータ提示機能の一覧

状 態	ジェスチャ	機 能
流線表示	1 指→パー	流線上のデータ変化の音提示
背景音の提示	グー→パー	背景音の配置
操作対象が視点	グー→パー	視点の固定
操作対象が手	グー→パー	手の固定
データ空間の拡大、縮小	1 指	拡大
	2 指	縮小

を行う。

(5) 複数感覚を組み合わせたデータ提示方法

これはデータの提示方法そのものが多感覚の利用を前提としている場合である。例えば、前節で説明を行った、聴覚を用いた流線上のデータ変化の提示等は、視覚と聴覚という複数の感覚を利用することではじめて可能になるデータ提示方法である。このような多感覚を利用したデータ提示方法は、今後のデータ・センシュアライゼーションの発展に従って、いろいろな方法が考え出されることが期待される。

以上、データと感覚の利用方法について分類を行った。従来のデータ・ビジュアライゼーションでは視覚だけを利用するため、上の分類では(1)あるいは(3)の方法しか行うことができなかった。しかしながらデータ・センシュアライゼーションでは、多感覚を利用することで(1)～(5)の各利用方法を行うことができる。このように、データ・センシュアライゼーション環境を利用することによって、提示データに対する大幅な表現力の向上が期待される。

5.5 応用例

本節では、データ・センシュアライゼーション環境を具体的に利用した場合の応用例を示す。本研究で開発を行ったデータ・センシュアライゼーション環境は、提示データとしてスカラー量、あるいはベクトル量で表されるデータの提示が可能であり、そのデータ内容に関しては制限されていない。そのため応用分野としては、構造解析、流体解析、電磁気解析等のさまざまなエンジニアリング分野におけるデータ提示に利用することが可能である。例えばこれらの分野では、スカラーデータとして温度、圧力、密度、エネルギー等、あるいはベクトルデータとして流速、磁場、電流場等の物理データに関する提示が考えられる。

ここでは、応用例としては、

- a) 構造解析データ
- b) 流体解析データ

の2つを取り上げ、それぞれのデータに対する具体的な利用方法を示す。

5.5.1 構造解析データの提示

構造解析の分野は、有限要素法や境界要素法を用いた数値解析が行われている代表的な研究分野である。特に3次元モデルの解析では、結果としてボリュームデータが生成されるため、3次元的なデータバタンの認識が重要な問題となる。

Figure 5.5.1 ~ Figure 5.5.2 は、例題として平板に荷重をかけた場合の3次元応力データの提示を示したものである。Figure 5.5.1 はスライス面表示によって、応力の3次元ボリュームデータの断面を提示しているところである。ユーザは手にデータプレートを持ちこれを動かすことによって、直接的に断面を移動させることができる。またFigure 5.5.2 は、複数の感覚を用いて、同時に応力データの提示を行っているところである。この図では、視覚によるスライス面表示を行いながら、スライス面を固定し、その面上に手を拘束させて、聴覚、風覚を用いたデータ提示を同時に行っている。

5.5.2 流体解析データの提示

流体解析の分野も、大規模な数値解析が行われるため、データ・センシュアライゼーションの応用分野としては非常に重要である。特に、流体は目に見えない現象であるため、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法においても視覚化を行うためには、タフト、リボン等のデータの加工が必要であった。しかしながら、データ・センシュアライゼーションにおける風覚を用いたデータ提

示等では、特殊なデータ加工を行わずに、かなり直観的なデータ提示を行うことが可能である。またデータ・センシュアライゼーション環境では、仮想的な空間を用いたデータ提示を行うということも利点の1つとして考えられる。流体の解析方法としては、数値計算の他に実験による方法が存在するが、実験的に作られた現象では、その中に身体を入れることで流れそのものを変えてしまう。そのため、提示されている現象に対して直接的なインタラクションを行うことはできない。しかしながら、仮想空間を用いたデータ提示では、流れを変えずに身体ごと現象の中に入り込み、インタラクティブにデータを見たり感じたりすることが可能になる。

Figure 5.5.3 ~ Figure 5.5.6 は、例題として障害物を乗り越えて流れる流体解析データの提示を示したものである。Figure 5.5.3 は流速データを3次元矢印で視覚表示しながら、同時に風覚ディスプレイを用いて触覚的な提示を行っているところである。また Figure 5.5.4 は、さらに利用感覚を増やし、流速データに対して視覚（矢印、スライス面）、聴覚、風覚を全て同時に用いて提示を行っているところである。この場合、スライス面は固定され、手はスライス面上に拘束されている。また聴覚情報としては、水の流れの環境音等を利用して、音の大きさに流速データを表わしている。Figure 5.5.5 は複数のデータの相互間の関係を提示しているところであ。ここでは渦度データをスライス面で表示しながら、流速データに対しては矢印と聴覚で提示を行っている。また Figure 5.5.6 は流線表示を行っているところであり、指先で流線の始点を指定するというインタラクティブな提示を行っている。

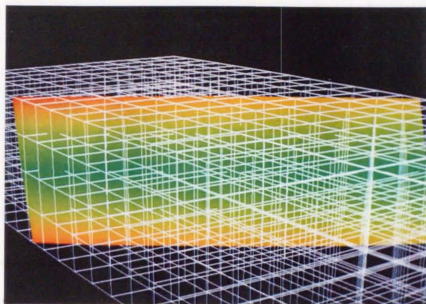


Figure 5.5.1 構造解析データの提示例（1）

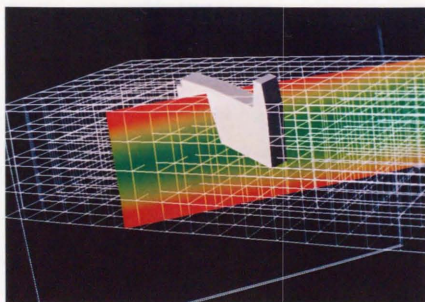


Figure 5.5.2 構造解析データの提示例（2）

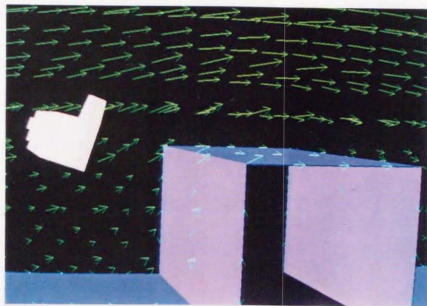


Figure 5.5.3 流体解析データの提示例（1）

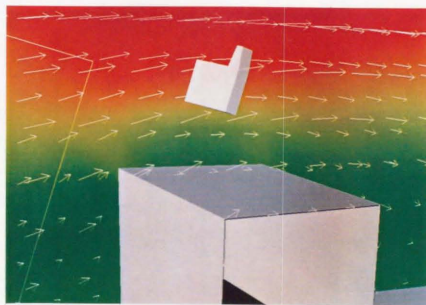


Figure 5.5.4 流体解析データの提示例（2）

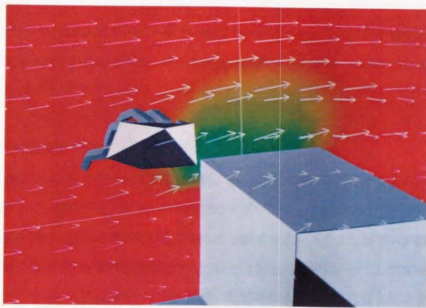


Figure 5.5.5 流体解析データの提示例（3）

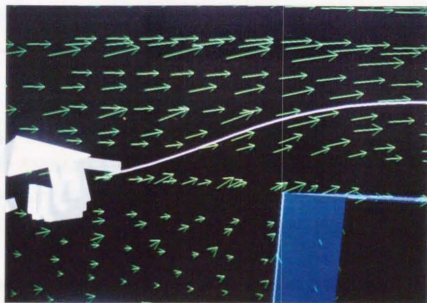


Figure 5.5.6 流体解析データの提示例（4）

5.6 情報伝達効果

以上のデータ・センシュアライゼーション環境を用いることによって、計算機から人間に対する情報伝達は大きな向上が期待される。その主な具体的効果としては、次のような点をあげることができる。

(1) 情報の伝達精度の向上

データ・センシュアライゼーション環境では、多感覚を利用することができる。そのため、一つのデータに対して、視覚だけ、あるいは聴覚だけを用了データ提示ではなく、視覚、聴覚、触覚等の複数感覚を同時に用了データ提示を行うことができる。このようなデータ提示方法では、計算機から人間に伝達される情報量が増大するだけではなく、人間にとっても感覚統合の効果等を期待することができる。人間は通常、視覚、聴覚、触覚等のさまざまな感覚を統合することで効率的な対象の認識を行っているが、データ・センシュアライゼーションではこのような感覚統合の効果を利用することによって、計算機から人間に対する情報の伝達精度を向上できることが期待される。

(2) ボリュームデータの認識の向上

3次元モデルの解析計算では、結果として3次元のボリュームデータが生成される。このようなボリュームデータの提示では、一つのデータ値を認識するだけではなく、空間的な3次元ボタンとしてデータを認識しなければならない。従来の2次元的なディスプレイでは、提示される情報から3次元ボタン等の認識を行うことは困難であったが、データ・センシュアライゼーション環境では3次元空間を利用したデータ提示を行うことができる。そのため、ボリュームデータを空間上に直接提示することができ、3次元的なデータボタンの認識を比較的容易に行えることが期待される。またこの際、受け身的なデータ提示ではなく、空間中での能動的なデータ提示が行えることも、ボリュームデータの認識にとっては有効な手段であると考えられる。

ここであげた(1)(2)のデータ提示効果については、次章以降の第6章、第7章で、改めて詳細な検討を行う。

5.7 本章のまとめ

本章では、視覚、聴覚、触覚の各種ディスプレイ装置を組み合わせ構築された、データ・センシュアライゼーション環境について説明を行った。データ・センシュアライゼーション環境は、ハードウェアとしてのシステム構成と、その上で動くソフトウェアとしてのデータ・センシュアライゼーション・ツールから構成されている。各種の感覚を利用したデータ提示方法は、データ・センシュアライゼーション・ツールの機能として実現されている。

視覚を用いたデータ提示方法としては、3次元空間上でのスライス面、矢印、流線表示等を行うことができる。この際、ユーザは手で提示データを指定する等の直接的なインタラクションを行うことができる。聴覚によるデータ提示方法としては、3次元音像定位を利用することによって、データが存在する位置からデータ値に応じた音を提示することができる。また特殊な利用方法として、流線上的データ変化を音の変化で提示する等の視覚と組み合わせた方法や、音像ベクトル、背景音等の補助的な利用方法も考えられる。触覚を用いたデータ提示方法としては、風覚ディスプレイを用いることによって直接手でデータ空間を探索する提示方法を行うことができる。

またデータ・センシュアライゼーションにおいて対象とする提示データは、一般に複数のデータ項目から構成されている。そのためデータ・センシュアライゼーション環境の利用方法としては、各データ項目ごとに、使用する感覚やデータ提示方法等を指定することになる。データ提示に関するこれらの操作は、基本的にはキーボードからのコマンド入力によって行うが、データ提示中に必要な各種の入力に関しては、Data Gloveを用いたジェスチャによって直接的な入力を行うことができる。

データ・センシュアライゼーション環境の応用に関しては、各種のエンジニアリング分野でのデータ提示が考えられるが、ここでは例として構造解析データ、流体解析データの提示を取り上げ、具体的な利用方法を示した。また、このようなデータ・センシュアライゼーション手法は、従来の視覚だけを用いたデータ・ビジュアライゼーション手法に比べて、利用する感覚が増えるため、1) 情報の伝達精度の向上、2) 3次元ボリュームデータの認識の向上、等の効果が期待される。