

## 第 6 章

### 情報の伝達精度

#### Accuracy in Transmission of Data

## 6.1 緒言

前章までに説明してきたデータ・センシュアライゼーション、すなわち多感覚を用いた能動的データ提示方法では、従来のデータ・ビジュアライゼーションでは考えられなかった幾つかの効果と考えられる。5.6節では、データ・センシュアライゼーションに期待される効果として

- a) 情報の伝達精度の向上
- b) ボリュームデータの認識の向上

という2つの点をあげた。本章以降の第6章と第7章では、これらの2つの項目について詳しく検討を進めていくことにする。

本章ではまず、データ提示における計算機から人間への情報の伝達精度という問題について検討を行う [Ogi92b]。データ・センシュアライゼーションでは前述したように、視覚、聴覚、触覚等の各種感覚における感覚刺激を用いてデータ提示を行う。このような感覚刺激を媒体とした情報伝達では、精度という点から見た場合に、伝達される情報の中にあいまいさが含まれてくことは無視できない。そのため、感覚ディスプレイを用いたデータ提示では、伝達される情報に含まれる誤差の問題について十分な議論を行っておく必要がある。すなわち、感覚ディスプレイで用いる感覚刺激が、数値データの伝達手段として利用できるものなのかどうか。また、従来のデータ・ビジュアライゼーションに比べて、精度という点でどれだけ違いがあるのだろうかという問題である。

しかしながらデータ・センシュアライゼーションでは、多感覚を同時に利用したデータ提示という方法を行うことができるため、計算機から提示される情報量自体を増加させ、人間に対して精度の高い情報伝達を行えることが期待できる。本章では、このような多感覚を利用したデータ提示方法の効果について、データの提示精度という面から実験的な検証を行う。

以下の節では、まず感覚ディスプレイを用いたデータ提示において、人間の知覚に与える誤差要因について分析を行う。データの知覚における誤差要因としては、データを提示するディスプレイ側の要因と、それを受ける人間側の要因とが存在する。これらの誤差要因を減少する方法として、ディスプレイ側の要因に関しては、尺度構成方法等が重要な問題となる。また人間側の要因に関しては、多感覚を利用したデータ提示方法等が有効な方法となる。以下、これらの点について実験的に検討を加えていく。

## 6.2 知覚に与える誤差要因

データ・センシユアライゼーションで用いられる感覚ディスプレイでは、数値データを視覚、聴覚、風覚等の人間に対する感覚刺激として提示する。そのため、数値データを数字として提示する場合に比べて、人間に伝達される情報に誤差が含まれることは避けることができない。しかしながら、これらの各種感覚ディスプレイの設計、あるいはデータの提示方法の開発にあたっては、計算機内の情報をできるだけ正確に人間に伝達できる方法を確立することが必要である。ここで言う正確な情報伝達とは、正しい情報が計算機から出力されるだけでなく、人間にとって正しく知覚されることであり、計算機と人間とを含めた系として情報伝達の精度を考える必要がある。

感覚ディスプレイを用いたデータ提示において、伝達される情報に含まれる誤差要因としては、次のような項目を考えることができる。

- a) ハードウェア精度
- b) 弁別閾
- c) 刺激パラメータの選択
- d) 刺激-感覚量の非線形性
- e) 判断のばらつき
- f) 錯覚

ここで、a) のハードウェア精度とは、感覚ディスプレイ装置のハードウェアとしての精度である。例えば、CRTにおける画面上の色のちらつき、あるいは風覚ディスプレイにおけるファンの回転数の安定性等がこれにあたる。

またb) の弁別閾とは、人間が刺激の違いを感じ取れる感覚の限界であり、ディスプレイが弁別閾よりも小さい分解能を持っていても人間はその差を知覚することができない。この弁別閾は人間の知覚精度の限界となっている。

c) の刺激パラメータの選択とは、データを提示する際に何の感覚刺激に対してデータをマッピングさせるかという感覚刺激の選び方である。使用する感覚刺激としては、データ値を何の感覚刺激で提示しているかがはっきりするように、なるべく独立な感覚刺激パラメータを選択する必要がある。この感覚刺激の選び方を誤ると刺激そのものの中に誤差要因が含まれることになる。

また、d) の刺激-感覚量の非線形性とは、提示される刺激と人間がそれを受け取る際の感覚量との間の関係であり、両者は一般に線形にはならないことが知られている。そのため、データが感覚量として正しく知覚されるためには、この刺激-感覚量の間の関係を明らかにした上でデータの提示を行う必要がある。

また、e) 判断のばらつきとは、提示された刺激を人間が感覚量として知覚する際のばらつきであり、個人差、あるいは同一人物内での状況による判断のばらつき等が含まれる。この判断のばらつきは、使用する感覚刺激が本質的に持つ誤差要因として考えられるため、利用する各感覚刺激の精度としてその大きさを把握しておくことが必要である。

また、最後にあげたf) の錯覚とは、提示されるデータの刺激が相互に影響し合うことによって、知覚に及ぼされる誤差である。例えば視覚における錯視等の現象がこれにあたる。データ・センシュアライゼーションでは、いろいろな感覚を利用したデータ提示を行うため、従来のビジュアルライゼーション以上にさまざまな錯覚の影響が現われることが考えられる。

正確なデータ提示を行うためには、あるデータを強調する等の特別なデータ提示を行う場合を除き、上であげた誤差要因をできるだけ排除しなければならない。これらの項目の中で、a) のハードウェア精度は使用するディスプレイとしての限界であり、b) の弁別閾は人間側の限界である。そのため、使用するハードウェアとその利用者が決められた以上、これらは避けることができない誤差である。ここでは、これら2つの要因を除いた残りのc) ~ f) の各項目について、データの提示方法という面から、伝達精度の向上についての検討を行なっていくことにする。



### 6.3 感覚ディスプレイの尺度構成

本節では、まずディスプレイ側の誤差要因について検討を行う。ディスプレイ側の誤差要因としては、刺激パラメータの選択、刺激-感覚量の非線形性があげられる。ここでは、ディスプレイの構成方法として、これらの要因を軽減する方法について考える。

#### 6.3.1 刺激パラメータの選択

まず刺激パラメータの選択という問題について考える。これは、提示すべき数値データを何の感覚刺激に対してマッピングを行うかという問題である。データの提示に利用可能な感覚刺激としては3.1節で述べたように、視覚における色相、明度、彩度等、聴覚における音の大きさ、高さ、リズム等、あるいは風覚における風の強さ、方向等の感覚刺激パラメータが存在する。これらの感覚刺激を利用するにあたって注意すべき問題としては、独立なパラメータを使用するという点をあげることができる。データ値のある感覚刺激パラメータを用いて提示するためには、その他の感覚刺激パラメータは全て一定に保たなければならない。データの値によって複数のパラメータが同時に変化してしまつては、何によってデータ値を表しているのかわからなくなり、提示される感覚刺激自体にあいまいさが含まれることになる。

しかしながら、従来のビジュアライゼーション手法では、データのマッピングに対してこの点があいまいにされている場合が多い。例えば、人間が感じる色の独立なパラメータとしては、色相、明度、彩度があげられる。ところが、通常のビジュアライゼーションで用いられるRGB、HSV等のカラーモデルは、色を作る側に立ったモデルであるため、人間が受ける感覚量とは直接的に対応していない。

色の独立なパラメータである色相、明度、彩度に相当するカラーモデルとしては、Munsell HVC表色系がある。このカラーモデルでは、Munsell Hue、Munsell Value、Munsell Chromaの各パラメータがそれぞれ色相、明度、彩度に対応し、感覚的に等間隔になるように配置されている。ここではRGB、HSVの各カラーモデルとMunsell HVCとの関係を調べ、RGB、HSVの各パラメータの独立性について検討を行う。

Figure 6.3.1 ~ Figure 6.3.3 は、RGB カラーモデルの色の变化に対する Munsell HVC の各パラメータの変化を示したものである。RGB データと Munsell HVC データとの変換に関しては、種々の近似式が提案されているが、ここでは Adam 色空間を利用した変換方法を用いている [Shikisai80, Miyahara89]。図では RGB カラーモデルの G~R、B~G、B~R の色変化に対する Munsell HVC の変化が示されている。色の变化の方法としては、例えば G~R の場合、RGB の各値の和が一定に

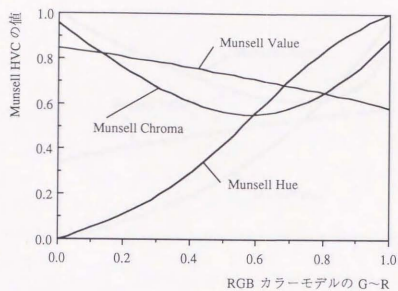


Figure 6.3.1 RGB カラーモデルの G~R の変化に対する Munsell HVC の値

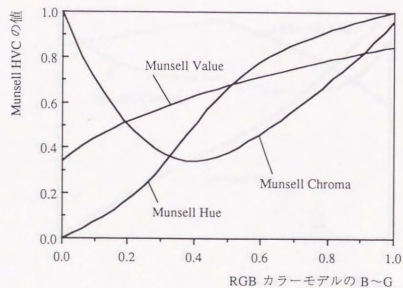


Figure 6.3.2 RGB カラーモデルの B~G の変化に対する Munsell HVC の値

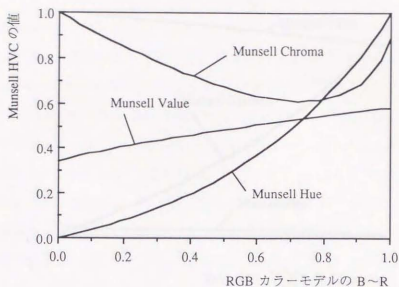


Figure 6.3.3 RGB カラーモデルの B~R の変化に対する Munsell HVC の値

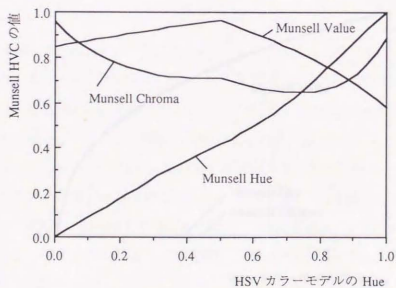


Figure 6.3.4 HSV カラーモデルの Hue の変化に対する Munsell HVC の値

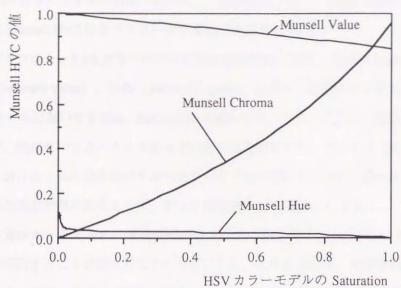


Figure 6.3.5 Munsell HVC カラーモデルでの色相だけの変化

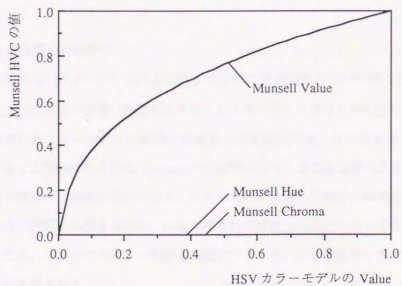


Figure 6.3.6 HSV カラーモデルに対する Munsell HVC の変化

なるように、 $RGB = (0,1,0)$  から  $RGB = (1,0,0)$  へと線形に変化させている。また Figure 6.3.4 ~ Figure 6.3.6 は、HSV カラーモデルから Munsell HVC への対応を示したものである [Harrington87]。この図では、HSV カラーモデルの Hue (緑～赤)、Saturation (緑)、Value (灰色) の各パラメータ変化に対する Munsell HVC の各パラメータの変化が示されている。

これらのグラフから、RGB カラーモデルに従った色の変化では、色相 (Munsell Hue) だけではなく、明度 (Munsell Value)、彩度 (Munsell Chroma) も同時に変化していることがわかる。また HSV カラーモデルにおいても Hue、Saturation、Value の各パラメータは、正確には色相、彩度、明度に対応せず、独立なパラメータとはなっていないことがわかる。すなわちこれらのカラーモデルでは、感覚における1つの独立なパラメータとしてデータ提示が行われておらず、色相、明度、彩度の複合された感覚刺激の変化として、データが表されていることになる。

このような意味から考えると、感覚刺激パラメータの独立性という点では、Munsell HVC のカラーモデルを使用することが最も望ましいことになる。しかしながら、例えば Munsell HVC の色相によってデータを提示する場合に明度、彩度を一定にすると、利用できる色の範囲が限られてしまうため、全てがくすんだ色になってしまう等の問題点も生じる。そのため、実際の利用にあたっては RGB、HSV 等のカラーモデルのを用いた方が有利な場合も多い。しかしながらこの場合には、次節で述べる刺激と感覚量との非線形性等を十分に考慮した利用方法を行うことが必要であると考えられる。

### 6.3.2 刺激と感覚量の非線形性

次に、各感覚刺激パラメータにおける刺激と感覚量の非線形性について考える。3.2節で説明を行ったように、物理的な刺激量 (刺激の大きさ) と人間がそれを受けた時に感じる感覚量との間には、非線形性が存在している。この刺激と感覚量との非線形性は、色の明るさ、音の大きさ等の“大きさ”に関する刺激については、Stevens の法則等によってある程度調べられている。しかしながら、本研究で使用する感覚刺激としては、これらの“大きさ”に関する刺激だけではなく、色相や音の高さ等の“種類”に関する刺激、あるいは前節で指摘したような複合的な感覚刺激等も用いられる。そのため、これらの利用する各感覚刺激については、事前に刺激と感覚量の間の関係を調べておくことが必要である。

ところで、実際の感覚ディスプレイの利用にあたっては、このような刺激-感覚量の関係だけではなく、ディスプレイの持つハードウェア特性という問題も考慮しなければならない。ディスプレイから出力される物理的な刺激量は、ディスプレイの制御量とは比例せず、ディスプレイのハードウェアの特性を影響として受けている。そのため、ディスプレイから出力される刺激量を正確に制



御するためには、このハードウェア特性を把握した上で制御を行わなければならない。

このような問題に対して、ここではディスプレイのハードウェア特性をブラックボックスとして扱う方法を用いている。すなわち、ディスプレイから提示される刺激量と人間が受ける感覚量の関係を計測するのではなく、ディスプレイに対する刺激の制御量と人間が受ける感覚量との関係を計測するという方法をとっている。従って、計測される両者の関係の中には、刺激と感覚量の非線形性だけではなく、ディスプレイのハードウェア特性が含まれることになる。しかしながら、この目的は刺激-感覚間の心理学的な関係を調べるのではなく、計測された結果をディスプレイ制御の補正として利用することであるため、このような方法で十分であると考えられる。Figure 6.3.7は、以上の実験における計測の関係を模式的に示したものである。以下、ここで行った実験方法と各感覚刺激パラメータについての結果を説明する。

実験方法としては、0と100の数値に対する標準刺激をあらかじめ与えておき、提示された刺激に対する感覚量の大きさを数値で答えてもらうという方法で行った。この方法は、先述のマグニチュード推定法を拡張したものであるが、この種の方法は一般の感覚量の計測に対しても、十分に有効であると考えられる [Sobagaki82]。Figure 6.3.8は、実験で用いられたCRT画面を示したものである。実験が開始されるとCRTには3つの正方形が表示され、これらの正方形間をキー操作によって移動することができる。左の正方形が選択されると0の数値に対する標準刺激、右の正方形が選択されると100の数値に対する標準刺激を参照することができる。また、中央の正方形が選ばれと計測の対象となる感覚刺激が提示される。

刺激の提示方法としては、色の視覚刺激の場合には、各正方形がそれぞれの数値に対応した色で塗りつぶされる。また聴覚刺激、風覚刺激の場合には、選択された正方形の数値に対応する感覚刺激が、それぞれ聴覚ディスプレイ、風覚ディスプレイから提示される。計測データとしては、視覚におけるRGBカラーモデルのG~R、B~G、B~Rの色変化、HSVカラーモデルのHue（緑~赤）、Saturation（緑）、Value（灰色）、Munsell HVCカラーモデルのMunsell Hue（緑~赤）、Munsell Value（灰色）、Munsell Chroma（緑）、あるいは聴覚における音の大きさ、高さ、リズム、風覚における風の強さの各パラメータについて計測を行った。感覚刺激パラメータとしては、この他にも音の音色等の感覚パラメータが考えられるが、1次元的な尺度で表すことが困難であるため、ここでは取り上げていない。

Figure 6.3.9~Figure 6.3.21は、以上の実験結果を示したものである。Figure 6.3.9~Figure 6.3.11は色のRGBカラーモデル、Figure 6.3.12~Figure 6.3.14はHSVカラーモデル、Figure 6.3.15~Figure 6.3.17はMunsell HVCカラーモデルに関する感覚尺度である。またFigure 6.3.18~Figure 6.3.20は音の各パラメータ、Figure 6.3.21は風の強さに関する感覚尺度である。グラフでは、個々の計測



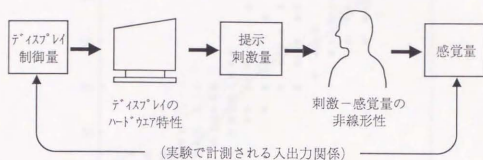


Figure 6.3.7 刺激-感覚量の計測実験の概念図

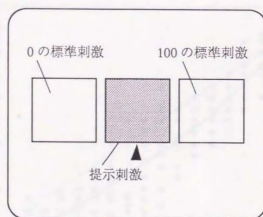


Figure 6.3.8 刺激-感覚量の計測実験で用いられる CRT 画面

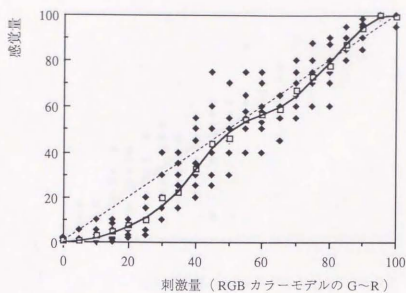


Figure 6.3.9 RGB カラーモデル (G~R) の刺激-感覚量の関係

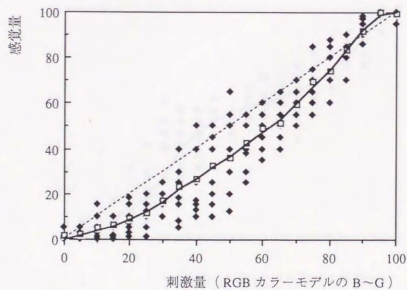


Figure 6.3.10 RGB カラーモデル (B~G) の刺激-感覚量の関係

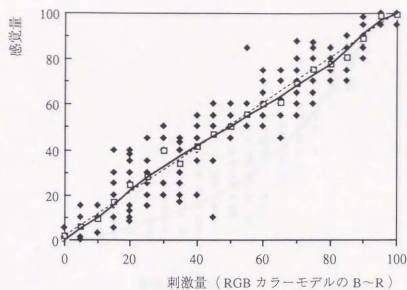


Figure 6.3.11 RGB カラーモデル (B~R) の刺激-感覚量の関係

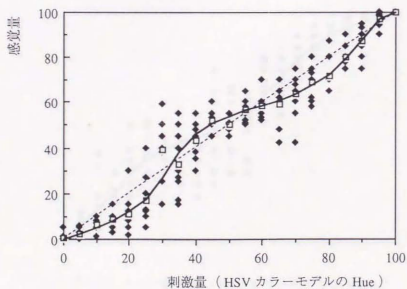


Figure 6.3.12 HSV カラーモデル (Hue) の刺激-感覚量の関係

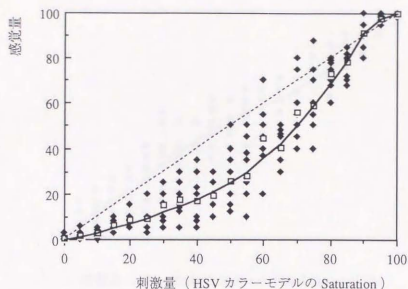


Figure 6.3.13 HSV カラーモデル (Saturation) の刺激-感覚量の関係

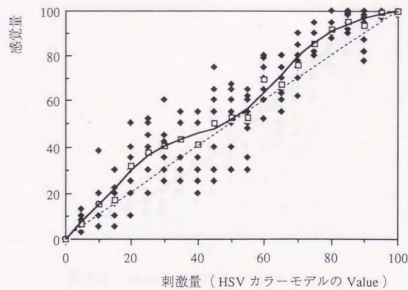


Figure 6.3.14 HSV カラーモデル (Value) の刺激-感覚量の関係

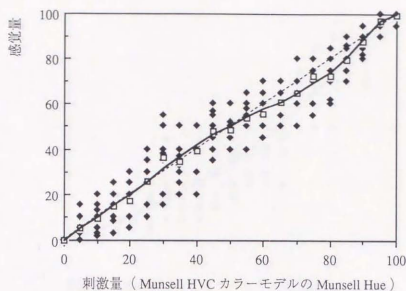


Figure 6.3.15 Munsell HVC カラーモデル (Munsell Hue) の刺激-感覚量の関係

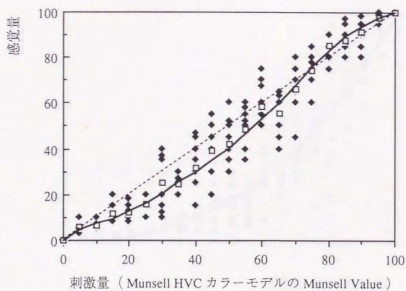


Figure 6.3.16 Munsell HVC カラーモデル (Munsell Value) の刺激-感覚量の関係

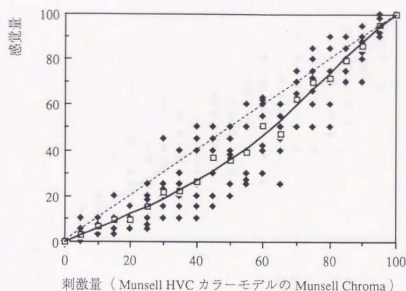


Figure 6.3.17 Munsell HVC カラーモデル (Munsell Chroma) の刺激-感覚量の関係

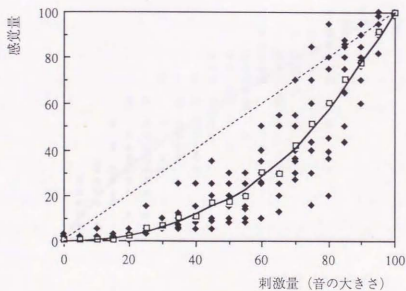


Figure 6.3.18 音の大きさの刺激-感覚量の関係



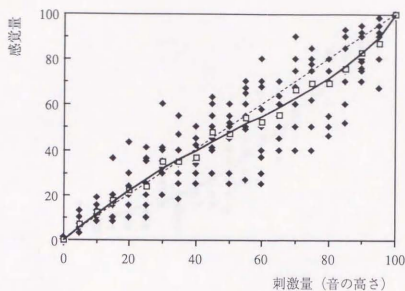


Figure 6.3.19 音の高さの刺激-感覚量の関係

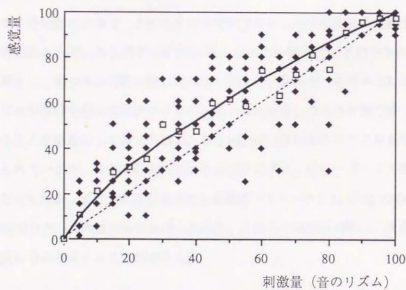


Figure 6.3.20 音のリズムの刺激-感覚量の関係

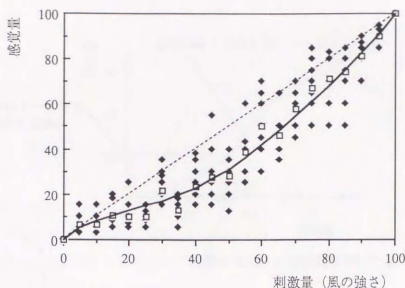


Figure 6.3.21 風の強さの刺激-感覚量の関係

データを黒点で、平均値を白点で、またこれらの平均点を結んだ近似曲線を実線で示してある。各実験とも被験者数は5人で、各2回ずつ計測を行った合計10個のデータが示されている。

これらの結果から、幾つの特徴が読み取れる。例えば、各カラーモデルとも緑～赤の色相の変化では、中央に水平部分を持つ階段状のグラフとなっているが、これは中間で黄～赤の色の存在が意識されていることが原因として考えられる。またMunsell HVC カラーモデルを用いた場合にも、非線形性が見られているが、これは前述したようにディスプレイのハードウェア特性が影響として表れたものと考えられる。また、非線形性の大きな感覚パラメータとしては、HSV カラーモデルの Saturation、音の大きさ、風の強さ等があげられるが、これらの場合には特に、次節で述べる感覚尺度の補正が重要になると考えることができる。

### 6.3.3 感覚量による尺度補正

前節では、各種の感覚ディスプレイに対して、刺激と感覚量の間の非線形性（ディスプレイのハードウェア特性を含む）の計測を行ったが、データ提示においてはこれらが誤差要因として影響を与えることになる。そのため、情報伝達に含まれる誤差を減少させるためには、これらの誤差要

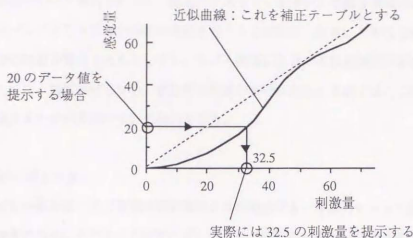


Figure 6.3.22 刺激-感覚量の関係を用いた補正方法

因を軽減することが必要である。

このような刺激と感覚量の非線形性に起因する誤差要因を軽減するための基本的な方法としては、感覚量によるデータ提示を行うという方法が考えられる。すなわち、提示すべきデータ値を刺激量に対してマッピングするのではなく、人間が受ける感覚量に対してマッピングするという方法である。提示されるデータ値と人間が受ける感覚量とが線形になるように補正を行うことができれば、刺激-感覚量の間の非線形性をキャンセルさせることができる。本研究では具体的な補正方法として、Figure 6.3.9～Figure 6.3.21の実験結果から得られた近似曲線を補正テーブルとしてシステム内に持ち、これを参照することによって提示データを補正するという方法を行っている。Figure 6.3.22は、このような補正の方法を図示したものである。提示すべきデータ値が与えられると（図では20の数値）、そのデータ値が感覚量となるような刺激量の大きさをグラフから算出し（図では32.5）、その値を刺激量として提示するという方法である。

本研究で利用する各種の感覚ディスプレイでは、以上のような補正方法に従って、感覚量によるデータ提示を行っている。

## 6.4 データ提示における感覚統合

前節では、刺激パラメータの選択、刺激-感覚量の非線形性等の、主にディスプレイ側に原因がある誤差要因について検討を行った。感覚ディスプレイを用いて正確な情報伝達を行うためには、まずディスプレイとして正しい情報の提示を行うことが前提になる。しかしながら、これらのディスプレイ側の問題が解決されたとしても、まだ人間側に含まれる誤差要因が存在する。人間側の誤差要因としては、判断のばらつき、錯覚等の問題があげられる。本節では、これらの人間側の誤差要因を軽減するための方法について検討を行う。

## 6.4.1 判断のばらつき

判断のばらつきとは、同じ感覚刺激が提示された場合でも、各試行によって起こり得る判断の違いによる誤差である。このような判断のばらつきは、個人差、あるいは個人の中での状況による判断の変化が表れたものであるが、その本質的な原因は、感覚刺激そのものが持つあいまい性に依存していると考えることができる。そのため、利用する各感覚刺激パラメータについては、これらの判断に関する誤差の大きさを調べておく必要がある。

ここでは、各感覚刺激パラメータについて、前節で行った実験データをもとに判断のばらつきの大きさの推定を行った。実験データとしては、刺激-感覚量の計測実験における回答のばらつきの大きさをを用いることにした。すなわちこの実験では、平均値の近似曲線が刺激-感覚量の非線形性を表しているのに対し、個々のデータのちらばりが判断のばらつきを表している。Table 6.4.1 は、視覚、聴覚、風覚の各パラメータに対する判断のばらつきの大きさを比較したものである。判断のばらつきの大きさを示す数値としては、各提示刺激値に対する回答の標準偏差を平均した値で表している。この場合、回答のばらつきの程度は提示データの値によって一定ではない。例えば、提示データが0、100の標準刺激に近い場合には標準偏差は比較的小さいが、標準刺激から遠い場合には回答のばらつき、すなわち標準偏差の値は大きくなる。そのためここでは、感覚量に対して均等になるように、10 間隔の感覚量で取った 11 点の刺激値に対する標準偏差の平均を求めている。

この表から、各感覚刺激に関する判断のばらつきの値を比較すると、以下のようなことがわかる。視覚の色に関する判断のばらつきの値は、各カラーモデルの間であまり大きな差はなかった。また HSV カラーモデル、Munsell HVC カラーモデルについて、パラメータの種類による誤差の大きさを比較すると、色相 (Hue, Munsell Hue) によるデータ提示が最も誤差が小さく、明度 (Value, Munsell Value)、彩度 (Saturation, Munsell Chroma) の順に誤差が大きくなっていることがわかる。また、聴覚に関するパラメータを比較すると、音の高さは視覚と同程度の誤差の大きさであ

Table 6.4.1 各感覚刺激パラメータに対する判断のばらつきの比較

感覚刺激パラメータ	判断のばらつき
RGB カラーモデル (G~R)	7.63
RGB カラーモデル (B~G)	7.73
RGB カラーモデル (B~R)	6.87
HSV カラーモデル (Hue)	6.63
HSV カラーモデル (Saturation)	7.51
HSV カラーモデル (Value)	7.07
Munsell HVC カラーモデル (Munsell Hue)	6.70
Munsell HVC カラーモデル (Munsell Value)	6.75
Munsell HVC カラーモデル (Munsell Chroma)	7.70
音の大きさ	9.85
音の高さ	7.86
音のリズム	10.15
風の強さ	6.60

るが、音の大きさ、リズムについては視覚に比べてかなり誤差が大きいことがわかる。また、風覚の風の強さに関しては、視覚と同程度の誤差の大きさであった。

各感覚刺激の利用にあたっては、これらの判断のばらつきの大きさを、刺激自体が持つあいまいさ、すなわち誤差の要因として認識しておく必要がある。

#### 6.4.2 錯覚

人間側の誤差要因としては、判断のばらつきの他に錯覚という要因があげられる。錯覚というのは、データが相互に影響を及ぼし合うことによって、異なった知覚を引き起こす現象である。例えば、データ提示と関係が深い錯覚の例としては、マッホバンドと呼ばれる現象があげられる。これは Figure 6.4.1 に示すように、光強度の変化が強調して知覚される現象である。この図では、実際の光強度の変化は点線で示されたものであるが、境界上では明るい部分がより明るく、暗い部分はより暗く知覚されるため、結果として実線のように感じられることが知られている。またその他、



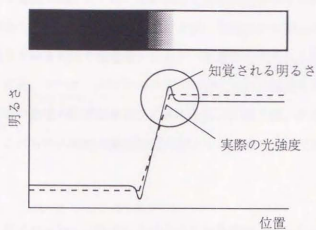


Figure 6.4.1 マッハバンドの例

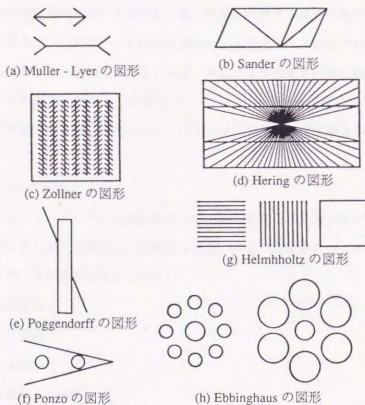


Figure 6.4.2 代表的な幾何学的錯視の例 [Hiwatashi87]



視覚に関する錯覚の現象としては、Figure 6.4.2 に示すような幾何学的な錯視の例がいくつか知られている [Hiwatashi87]。このような錯覚の現象は視覚だけではなく、その他の感覚についても存在する。例えば聴覚における錯覚の例としては、音の高さと音像定位位置等の例が知られている。これは同じ位置から音を発生しても、音の高さが高いほど高い位置に音が聞こえるという現象である。

このような錯覚が生じている状態で感覚量によるデータ提示を行うことは、非常に大きな誤差を生じる可能性がある。また、データ・センシュアライゼーションでは多くの感覚を利用するため、気を付けなければならない錯覚の影響はさらに大きくなる。次節では、多感覚を同時に用いる感覚統合の効果によって、これらの人間側の誤差要因を減少する方法について検討を行う。

#### 6.4.3 感覚統合

データ・センシュアライゼーション手法における大きな特徴の一つとして、多感覚を同時に利用したデータ提示方法をあげることができる。例えば、あるデータを視覚的に表示しながら、そこに手をもっていくとデータ値に応じた音が聴覚情報として聞こえ、かつ手のひらには風覚による触覚的な情報提示が行われるというような方法である。このようなデータ提示方法は、一つのデータ値に対してたくさんの感覚情報を利用するため、単一感覚を利用する場合に比べて伝達される情報量が増大する。またさらに、人間にとっては感覚統合という効果が引き起こされるため、伝達される情報の精度が向上されることが期待される。以下、本節では多感覚を同時に利用したデータ提示方法が、人間のデータ知覚精度に与える影響について、心理物理的な実験を行った。実験としては、スカラーデータに対する知覚実験とベクトルデータに対する知覚実験を行った。

##### (1) スカラーデータの知覚

ここではまず、スカラーデータの知覚実験について説明を行う。実験方法としては、帯状の1次元的なスカラーデータの変化を提示し、被験者は視覚、聴覚、風覚を用いてデータ値の変化を判断する。このとき、データの提示方法としては、

- a) 視覚による提示
- b) 聴覚による提示
- c) 風覚による提示
- d) 視覚+聴覚による提示
- e) 視覚+風覚による提示
- f) 聴覚+風覚による提示
- g) 視覚+聴覚+風覚による提示

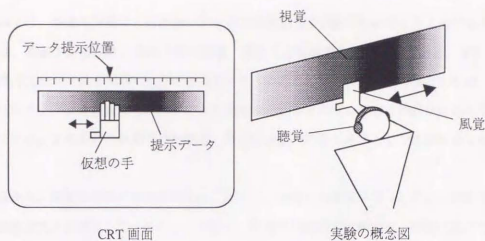


Figure 6.4.3 スカラーデータの知覚実験における CRT 画面と実験の概念図

の7通りの方法で提示を行った。

Figure 6.4.3は実験に用いた CRT の画面と、実験方法の概念図を示したものである。画面には横に長い帯状の四角形が表示され、ここにデータが提示される。データは0.0～10.0の値を取りながら、1次元的に変化する。視覚による提示の場合には、この四角形の中がデータ値に応じた色の变化で塗りつぶされる。色の使い方は、データ値の0.0～10.0に対してRGBカラーモデルの緑～赤の色の变化を用いている。また聴覚による提示では、四角形の上（CRT上に描かれた四角形の前方）に手をもっていくことで、手の位置のデータ値に応じた音がヘッドフォンから提示される。提示データの位置は、仮想の手が表示されることで確認することができる。音の使い方は、シンセサイザーのオルガン音で2オクターブ間の音の高さを用いている。また風覚による提示では、聴覚と同様に四角形の前方に手を持っていくことで、手の位置のデータ値に応じた風の強さが風覚ディスプレイから提示される。この場合、利用する感覚量は、どれも提示データと感覚量とが線形になるように補正を加えてある。

実験方法としては、被験者が知覚したデータの変化をグラフとして描いてもらうことによって、提示データと知覚されたデータ変化との比較を行った。提示データは、階段状の変化、折れ線変化、曲線変化の3通りのデータパタンの提示を行った。被験者数は5人で、各方法に対して3題ず

つの同一課題の提示を行った。また a) ~ g) の各データ提示方法の順番は、被験者によってランダムにしている。

Figure 6.4.4 は、各提示方法による誤差の平均値と標準偏差を課題ごとに示したものである。このグラフでは、課題 1 が階段状、課題 2 が折れ線、課題 3 が曲線変化のデータである。また、Table 6.4.2 は各提示方法による全課題の誤差の平均値をまとめたものである。誤差の値としては、正解のデータ変化のグラフと被験者が回答したデータ変化のグラフとの間にできる誤差を全体で平均した値で示している。また表中の括弧内の数値は、視覚の場合の誤差を基準とした比率を表したものである。

この結果から、感覚を単体で使用する場合に比べて、利用する感覚を 2 つ、3 つと併用することによって誤差が大きく減少していることがわかる。単体での誤差の比較では、視覚に比べて聴覚は同程度の誤差の大きさであるが、聴覚はやや大きい値を示している。しかしながら、複数の感覚を同時に利用することで、それぞれの感覚を単体で用いた場合よりも誤差が減少していることがわかる。2 つの感覚の組み合わせとしては、視覚+聴覚が最も誤差が小さくなり、視覚+風覚、聴覚+風覚は同程度であった。また視覚+聴覚+風覚という 3 つの感覚の組み合わせでは、どの場合に比べても最も誤差が小さくなった。誤差の減少率は、感覚 2 つの場合では約 22 ~ 26 %、感覚 3 つでは約 33 % の誤差減少率であった。

このように、多感覚を同時に用いることでデータの知覚精度は大きく向上することがわかる。この具体的な原因としては、次のような理由を考えることができる。

人間側の誤差要因である判断のばらつきは、前述したように感覚刺激そのものの中に含まれるあいまい性に依存していると考えられる。しかしながら、複数の感覚情報を同時に用いる方法では、提示されるデータに関する情報量が増える。そのため、情報量の増大によって提示刺激の中に含まれるあいまい性が減少し、判断のばらつきの誤差要因が軽減されていることが考えられる。

また、もう一つの人間側の誤差要因である錯覚について考えると、これはデータに関する感覚刺激が相互に影響を及ぼし合うことによって起こる誤差であり、それぞれの感覚に固有の影響である。しかしながら、複数の感覚を同時に用いる方法では、例えば視覚が錯覚の影響を受けている場合でも別の感覚が影響を受けないために、全体として錯覚の影響が軽減されることが考えられる。

Figure 6.4.5 は、例として階段状のデータ変化に対する、視覚、風覚、視覚+風覚による知覚結果を示したものである。この図では、視覚だけの場合には明らかに前述のマッハバンドと思われる錯視の影響が表れているが、風覚ではこの影響を受けないため、視覚+風覚の場合にも錯視の影響が消えていることがわかる。実験データの全体を調べると、この例に見られるようなマッハバンドの

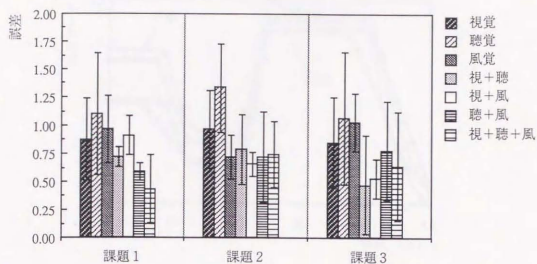


Figure 6.4.4 スカラーデータの知覚実験における誤差の比較

Table 6.4.2 スカラーデータの知覚実験の結果

データ提示方法	誤差 (比率)
a) 視覚	0.891 (1.00)
b) 聴覚	1.197 (1.34)
c) 風覚	0.897 (1.01)
d) 視覚+聴覚	0.658 (0.74)
e) 視覚+風覚	0.694 (0.78)
f) 聴覚+風覚	0.686 (0.77)
g) 視覚+聴覚+風覚	0.600 (0.67)

(誤差: 0.0 ~ 10.0)

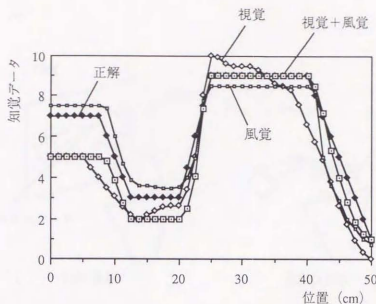


Figure 6.4.5 実験結果の一例 (階段状のデータ変化)

錯視の発生率は、視覚だけの場合には60%存在していたが、視覚+聴覚、視覚+風覚の場合には1つも存在していなかった。

## (2) ベクトルデータの知覚

次に、ベクトルデータの知覚実験について説明する。この実験では、3次元空間内のベクトル量に対して次のような方法で提示を行った。

- a) 視覚 (CRT) による提示
- b) 視覚 (CRT) による提示+仮想の手の表示
- c) 視覚 (CRT) + 風覚による提示
- d) 視覚 (HMD) による提示
- e) 視覚 (HMD) による提示+仮想の手の表示
- f) 視覚 (HMD) + 風覚による提示

ここで仮想の手の表示とは、視覚の中に自分の手の動きに対応した仮想の手を表示する方法である。風覚ディスプレイを用いる場合には、視覚的なフィードバックとして仮想の手が表示され、仮想空間と現実空間との対応づけが行われている。そのため、感覚情報としての風覚の影響だけを取



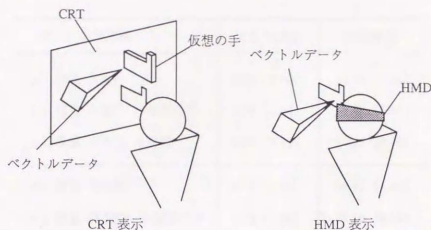


Figure 6.4.6 ベクトルデータの知覚実験の様子

り出すために、中間的な方法として視覚的なフィードバックだけを行ったものが、仮想の手の表示の方法である。また視覚による表示方法としては、それぞれ通常の CRT ディスプレイと HMD との比較を行っている。視覚によるベクトルデータの表示方法としては、3次元の四角錐矢印で表している。CRTの使用時には立体視を行っていないため、直線表示の矢印では奥行き情報を得ることができない。しかしながら、3次元の四角錐で表すことによって、見かけの形状からある程度奥行きの手掛かりを得ることができる。スカラーデータの実験では視覚の感覚量として、色を用いていたが、この実験では矢印の長さ、あるいは角度という幾何学的な情報を用いてデータの提示を行っている。またここで用いる風覚ディスプレイは、2次元平面内のベクトルの表現力しか持っていないため、比較実験として風覚だけを用いた提示は行っておらず、あくまでも補助的な手段として用いている。

Figure 6.4.6 は、このような実験の様子を示したものである。被験者の回答方法は、ベクトルの大きさに関しては0.0～10.0の数値を口頭で答えてもらうことによって行った。またベクトルの方向に関しては、ベクトルデータに対して手のひらを垂直に向けて示してもらい、風覚ディスプレイ上の空間位置センサで手で方向を計測することによって行った。また、手の向きによる回答という条件を一定にするため、風覚を使用しない場合にも、風覚ディスプレイを手に持ち、同様の方法



Table 6.4.3 ベクトルデータの知覚実験の結果

データ提示方法	大きさ誤差	角度誤差
a) 視覚 (CRT)	0.75 (1.00)	21.92 (1.00)
b) 視覚 (CRT) + 仮想の手	0.78 (1.04)	13.57 (0.62)
c) 視覚 (CRT) + 風覚	0.76 (1.01)	10.15 (0.46)
d) 視覚 (HMD)	0.72 (1.00)	18.85 (1.00)
e) 視覚 (HMD) + 仮想の手	0.78 (1.08)	12.16 (0.65)
f) 視覚 (HMD) + 風覚	0.64 (0.88)	9.97 (0.53)

(大きさ: 0.0 ~ 10.0、角度: 度、括弧内: 視覚に対する比率)

で方向の計測を行った。被験者数は5人であり、課題は大きさ、方向ともにランダムに設定されたベクトルデータについて20問ずつの提示を行った。

Table 6.4.3 は以上の実験結果を示したものである。この表ではベクトルデータに対する知覚結果を、大きさに関する知覚と方向に関する知覚に分けて示してある。また表中の括弧内の数値は、CRT、HMDともに視覚だけの場合に比べた誤差の比率を表している。この結果から、以下のことがわかる。

大きさの知覚に関する誤差は、CRTの使用時には各提示方法であり差が見られないが、HMDを使用した場合には、視覚+風覚の提示で明らかな誤差の減少が見られている。また、視覚+風覚による提示以外では、CRTとHMDの差がほとんど見られていない。この原因としては、次のような理由が考えられる。HMDを用いる場合には、両眼視差、運動視差、あるいは回り込んで横から見る等の効果を利用することができるが、対象との距離によって見かけの大きさが変わるため、正確な距離感をもたない正しい判断ができなくなる。視覚だけの提示でCRTとHMDに大きな差が見られないのは、このような理由によるものと考えられる。しかしながら、視覚+風覚の多感覚を同時に利用した場合には、このようなHMDの効果も有効に働いているものと考えることができ

る。HMD 使用時の視覚だけの場合に比べて、視覚+風覚による大きさの誤差の減少率は、約 11 % であった。

角度の知覚に関しては、CRT と HMD のいずれを使用した場合も、視覚だけの提示に比べて、仮想の手の表示、さらに風覚の利用を行うことによって、明確な誤差の減少が表れている。仮想の手の表示を行うことは、データの提示空間と自分の身体との関係が認識され、深部感覚を有効に使ったデータの知覚が可能になる。またさらに風覚を利用することは、情報量の増大、感覚統合の効果等によって、データの知覚精度の向上につながっている。この風覚ディスプレイは、2次元ベクトルの表現力しか持っていないが、視覚と併用することによって大きな効果が表れていることがわかる。視覚+風覚を用いた場合の、視覚に対する方向の誤差の減少率は、CRT で 54 %、HMD で 47 % であった。また、CRT 表示と HMD の比較では、HMD を使用した場合の方が全体的にやや成績が良かった。

以上の実験結果より、データ・センシュアライゼーションにおける多感覚を用いたデータ提示方法では、スカラーデータ、ベクトルデータともに情報の伝達精度が向上されることが確認された。また、このような多感覚を用いたデータ提示方法は、表面的には情報量の増大を意味しているが、人間の側にとっては感覚統合の効果により、判断のばらつき、錯覚等の誤差要因が減少されたものと考えることができる。

## 6.5 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期待される効果として、情報の伝達精度の向上について検討を行った。ここでは、データ・センシュアライゼーション手法の特徴の中で、多感覚の利用という点に注目して議論を行っている。

データ・センシュアライゼーションでは、各種の感覚ディスプレイを用いてデータ提示を行うが、これらのディスプレイでは数値データを感覚量に割り当てることでデータの提示を行う。このようなデータ提示方法では、人間に対して伝達される情報の中に、ある程度の誤差が含まれることが避けられない。この誤差要因について分析を行うと、a) ハードウェア精度、b) 弁別閾、c) 刺激パラメータの選択、d) 刺激-感覚量の非線形性、e) 判断のばらつき、f) 錯覚等の項目をあげることができる。ここで、a) ハードウェア精度、b) 弁別閾等に関しては、避けることができない誤差要因であるが、その他の要因に関してはデータの提示方法によって軽減させることが可能である。

c) 刺激パラメータの選択、d) 刺激-感覚量の非線形性は、ディスプレイ側の誤差要因である。特に、刺激-感覚量の非線形性に関しては、両者の関係を計測し、提示データと人間が受ける感覚量とが線形になるような補正を加えることによって、ある程度誤差を減少することができる。ここでは、本研究で利用している各種の感覚刺激パラメータに対して、刺激と感覚量の間の関係を実験的に計測し、この結果を補正テーブルとして利用する方法を示した。

また、e) 判断のばらつき、f) 錯覚は人間側の誤差要因である。これらの誤差要因に関しては、データ・センシュアライゼーションにおける多感覚を同時に利用したデータ提示方法によって減少できることが期待される。ここでは、スカラーデータの知覚とベクトルデータの知覚に関して、多感覚を用いたデータの知覚実験を行った。スカラーデータの知覚に関しては、単一の感覚による提示に比べて、2つの感覚、あるいは3つの感覚を同時に利用することで、明らかな誤差の減少が確認された。また、ベクトルデータに関しても、視覚+風覚の利用によって大きさ、方向ともに知覚精度の向上が確認された。多感覚を利用したこれらの効果は、単に計算機から人間への情報伝達量の増大だけではなく、人間にとっての感覚統合の効果が表れているものと考えることができる。

## 第 7 章

### ボリュームデータの認識

#### Recognition of Volume Data

## 7.1 緒言

前章では、データを認識する際の、単一のデータ値に関する伝達精度について議論を行った。しかしながら、実際に科学技術データの提示を行う場合には、一つのデータ値を認識するだけではなく、空間的なデータの変化、すなわちデータパターンとしての認識を行うことが要求される。本章では、このようなデータパターンの認識、特に3次元空間内におけるポリウムデータの認識について議論を行う [Ogi93b]。

ポリウムデータとは、3次元空間上に分布する離散的な数値データのことである。例えば、空間内の温度分布、圧力分布等のデータはポリウムデータとして表される。数値シミュレーションや実験計測等から得られる科学技術データは、本来、現実の3次元世界を対象としているため、空間的なポリウムデータとして表現されることが多い。これらのデータは、以前は計算機ハードウェアの能力不足等の理由から2次元モデルに限定して扱われることが多く、ポリウムデータの提示はそれほど大きな問題ではなかった。しかしながら現在は、スーパーコンピュータを始めとする計算機ハードウェアの発達や計測機器の進歩によって、3次元モデルとしての計算やデータの取り扱いが実用的なレベルで可能になってきた。そのため、ポリウムデータの提示に対する価値と重要性が認識されるようになり、その効果的なデータ提示方法の実現が望まれるようになってきた。このような研究は、ポリウム・ビジュアライゼーションとして近年注目を集めている [Herr89, Kaufman91, Fujishiro93]。

ポリウムデータの提示は、幾何学的な形状データに比べて提示すべき対象の抽象性が高いため、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法ではデータの認識を行うことが容易ではない。本研究では、人工現実感技術を応用したデータ・センシュアライゼーション手法として、このようなポリウムデータを、いかにわかりやすく提示できるかという問題について検討を行う。すなわち、ポリウムデータの認識にとって重要な役割を果たす要因を明らかにし、効果的なデータ提示方法を実現することが本章での目的である。基本的な考え方としては、3次元空間の中での身体的な深部感覚の利用、すなわちデータ・センシュアライゼーションの持つ能動的なデータ提示の側面がポリウムデータの認識にとって有効であると考えている。以下本章では、ポリウムデータに対する人間の認識モデルから、ポリウムデータの認識と深部感覚の利用との関係について考察を行う。また、ユーザとデータ空間との関係を内界データと外界データとに分け、それぞれについて深部感覚を利用したデータ提示方法の提案を行い、その有効性について実験的な検証を行った。特に、外界データの提示に関しては、視覚に基づいた深部感覚の利用だけではなく、聴覚情報に基づいた深部感覚の利用方法についても検討を行っている。



## 7.2 ポリウムデータの認識モデル

ポリウムデータに対するデータ・ビジュアライゼーション手法としては、これまでにスライス面、等値面、ポリウムレンダリング等幾つかの方法が提案されている。しかし、これらの方法によって、3次元ボタン等のデータに対する空間的な認識を行うことは容易ではない。この理由としては、ポリウムデータに対する表現手法というモデル化の困難さもあるが、そもそも人間の視覚が網膜という2次元的な感覚器を利用しているというところに、本質的な原因が考えられる。すなわち、視覚化という手段を用いることによって、3次元データは2次元のフィルターを通して提示されることになる。

このような人間の視覚上の限界を補うためには、3次元のデータ空間に対する人間の探索的な行動を積極的に利用することが必要であると考えられる。すなわち、視覚から得られる2次元化された情報を積み重ねていくことによって、3次元構造を理解しようとする考え方である。しかしながら従来のビジュアライゼーション手法は、人間にとって受け身の形でデータの提示が行われていたとすることができる。提示すべき対象が幾何学的な形状データの場合には、直線、面等の幾何学的知識に基づいた推論を行うことによって、提示されている情報から、ある程度全体の3次元構造を認識することが可能である。しかしながら、ポリウムデータの場合には、データ空間内の各点がそれぞれ独立な情報を持ち得るため、一面的な情報だけでは全体の認識を行うことはほとんど不可能である。そのため、3次元ポリウムデータを提示するためには、人間にとって受動的なデータ提示を行うのではなく、人間がデータ空間内を探索するような、能動的なデータ提示方法を実現することが必要であると考えられる。

ところで能動的なデータ提示を行う場合には、データに関する全ての情報が一度に提示されるのではなく、探索的行動を通して情報が逐次的に提示されてくることに注意する必要がある。このことは、空間的な情報であるポリウムデータが、時間的な情報として提示されることを意味している。従って、3次元的なポリウムデータを認識するためには、この時間的な情報を、再び空間的な情報へと変換し直すことが要求される。しかしながら、このような情報の再構成を頭の中だけで行うことは、人間にとって非常に大きな負荷が必要とされる。そのため、ポリウムデータに対する有効なデータ提示方法としては、このような情報形態の変換を効率的に支援するようなデータ提示方法を考える必要がある。

本研究では、このような情報形態の変換に対して、深部感覚を利用したデータ提示方法が有効であると考えている。ここで言う深部感覚としては、主に関節や筋肉の動きを通して得られる位置覚、運動覚等を指している。このような深部感覚を利用することによって、身体的な行動をもとに



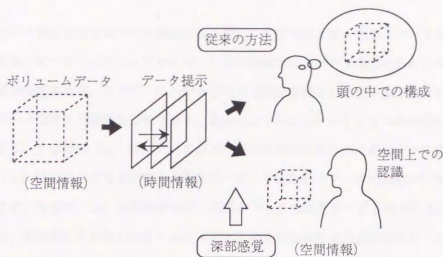


Figure 7.2.1 ボリュームデータの認識過程のモデル

した空間的位置情報を得ることができる。そのため、提示される時間的な情報を、身体行動から得られる位置情報と逐次結び付けていくことによって、直接空間的な情報として認識することが可能になると考えられる。Figure 7.2.1は、このようなボリュームデータの認識過程のモデルを図示したものである。以下本章では、これらの考察をもとに、深部感覚を利用した能動的データ提示に関する具体的な方法について検討を行っていく。

## 7.3 データ提示空間

具体的なデータ提示方法についての議論に入る前に、本節ではまず、人間とデータ空間との関係について考える。データ・センシュアライゼーション環境では、データ提示のためにユーザを含めた3次元空間が利用される。ここで、ユーザを含めた3次元空間という表現を用いたが、このときのユーザとデータ空間との関係を分類すると、Figure 7.3.1に示したような2つの状況に分けて考えることができる。すなわち (a) は、データがユーザの目の前の限られた領域の中に提示される場合であり、(b) は、ユーザ自身がデータ空間の中に入り込む形でデータの提示が行われる場合である。ここでは、前者の (a) を内界データ、後者の (b) を外界データと呼ぶことにする。

本研究では、深部感覚を利用したボリュームデータの提示方法を考えるにあたり、これらの2つの場合を分けて考えることにする。もちろん、ユーザとデータ空間に関するこれらの2つの状況は、データの提示方法として明確に分離できるものではない。例えば、内界データとしてデータ提示を行っている場合でも、データに対してユーザが近づいたり、あるいはデータの一部を詳しく調べようとしてデータ空間の拡大等を行うと、ユーザのまわりには外界データとしての要素が現われてくる。また、外界データとして提示を行っている場合でも、ユーザの目の前の限られた領域に限っては内界データとして扱うことができる。すなわち、データ空間を探索していく過程の中で、状況に応じて両者の影響を考慮していく必要がある。

次節以降では、人間とデータ空間との関係を内界データと外界データとに分けて、それぞれの状況において深部感覚の利用とボリュームデータの認識の問題について検討を行っていく。

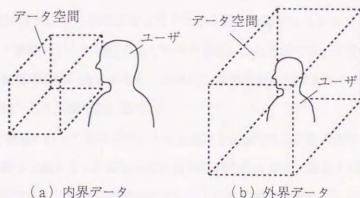


Figure 7.3.1 ユーザとデータ空間との関係

## 7.4 内界データの認識

本節では、まず内界データの認識について考える。ここでは、データ・センシュアライゼーション環境の上で実現されている幾つかのデータ提示方法について、ボリュームデータの認識実験を行った。この比較実験を通して、データ提示における深部感覚の利用方法とボリュームデータの認識効率との関係について検討を行った。

### 7.4.1 データ提示方法

まず、内界データの提示方法として、実験に用いた幾つかのデータ提示方法について説明する。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は、スライス面表示による方法を取り上げた。スライス面表示とは、3次元のボリュームデータがある平面で切ったときにできる、断面上の2次元のデータパターンを色の変化で表現するデータ提示方法である。このスライス面表示は画像の生成速度が遅いために、リアルタイムに画像を生成することができる。そのため、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法においても、インタラクティブなデータの提示方法として利用されている [Spray90]。ここでは、スライス面表示を応用した、能動的なデータ提示方法の実現を行っている。

以下、スライス面表示を基本とした幾つかのデータ提示方法を取り上げて、実験的な比較を行った。比較を行ったデータ提示方法は次の4通りである。

#### (1) 方法1：キー操作による方法

これは、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法に相当する方法である。スライス面上の断面画像はCRTに表示され、キー操作によってスライス面を移動することができる。また、視点に関しても同様のキー操作によって移動することができる。この方法では、スライス面や視点の移動と身体的動作との直接的な結び付きはなく、身体的な深部感覚は利用されていない。

#### (2) 方法2：仮想スライス面を用いる方法

これは、5.2節で説明を行ったデータプレートを用いる方法である。この方法では、データプレートを手に持ち実空間上で動かすことによって、仮想空間内のスライス面を手の動きに連動させて直接的に動かすことができる。実空間で動かすプレートには、空間位置センサが取付けられており、このセンサによってプレートの位置と方向が計測される。またユーザの頭にも同様のセンサが取付けられ、視点の移動に応じた画像が前方のCRTに表示される。Figure 7.4.1はデータ提示の様子を示したものである。この方法は、仮想スライス面を用いることによって、見たいデータに直接手を

伸ばすような探索を行うことができる。そのためデータ提示方法としては、腕の動きによる深部感覚を利用した方法と言うことができる。しかしながら視覚表示のためのディスプレイとしてCRTを使用しているため、視線の方向と表示される画像の位置とは一致せず、頭の動きによる深部感覚は利用されてていない。

### (3) 方法3：仮想スライス面+HMDを用いる方法

これは前述の仮想スライス面を使用しながら、表示用のディスプレイとしてHMDを用いる方法である。HMDは、ユーザの視線に応じた立体画像を視線位置に表示することができるため、実空間上実際にプレートが存在する位置に、断面画像を見ることができる。Figure 7.4.2はデータ提示の様子を示したものである。この方法では、腕の動きによる深部感覚と同時に、HMDを用いることで、頭の動きによる深部感覚も利用したデータ提示を行うことができる。

### (4) 方法4：ハンディモニタを用いる方法

これは、ディスプレイ装置としてハンディモニタを用いる方法である。この方法では、ハンディモニタによってできるディスプレイ平面を、仮想スライス面として利用することによってデータ提示を行う。そのためハンディモニタによって切り取られる断面画像は、直接ハンディモニタの面上に表示することができる。この方法は、HMDのように視覚的には仮想空間を利用していない。そのため実空間上で、実際に視線方向と一致した画像を提示することができる。Figure 7.4.3は、この方法によるデータ提示の様子を示したものである。この方法は、方法3と同様に腕の動きによる深部感覚と頭の動きによる深部感覚を、同時に利用したデータ提示を行うことができる。

以上の方法をまとめると、方法1は身体的な深部感覚を利用しない方法、方法2は腕の動きによる深部感覚を利用した方法、方法3と方法4は腕の動きと頭の動きによる深部感覚を利用した方法ということができる。腕の動きによる深部感覚を使うということは、ポリウムデータに対する探索意志を直接的に手で表現できるということである。そのため、データ空間内の提示されている断面位置を知識としてではなく、身体的な感覚として認識することができる。また、頭の動きによる深部感覚を使うということは、頭を向けている方向のデータをその位置に見ることができるということである。そのため、ユーザは頭の中でデータの3次元構造を再構築するのではなく、空間上に貼り付けるような形で、直接3次元構造を認識することが可能であると考えられる。

また腕と頭の深部感覚を利用している方法3と方法4の違いとしては、方法3が視覚的に完全な仮想世界の中でデータ提示を行っているのに対して、方法4は視覚的には実空間の上でデータ提示を行っている。そのため方法3では、仮想空間特有の時間遅れの影響等を強く受けることになるが、方法4ではこの種の影響をある程度解消することができる。また方法3は、HMDの持つ液晶

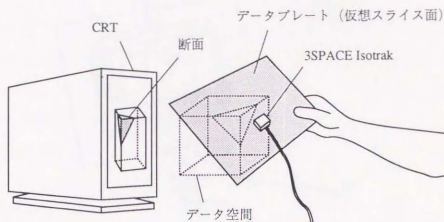


Figure 7.4.1 仮想スライス面を用いる方法 (方法2)

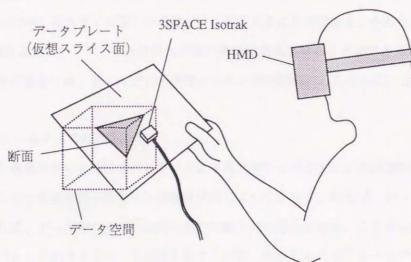


Figure 7.4.2 仮想スライス面+HMDを用いる方法 (方法3)



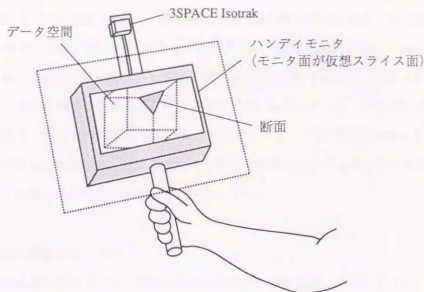


Figure 7.4.3 ハンディモニタを用いる方法 (方法4)

解像度（画素数 $360 \times 240$ ）を視野全体に用いているのに対し、方法4ではモニタの持つ液晶解像度（画素数 $480 \times 240$ ）をスライス面上の画像だけに利用することができる。そのため提示データに関しては、HMDよりもハンディモニタの方が高い解像度を実現することができる。しかしながらハンディモニタの場合には、ディスプレイ面積が小さい等の問題点も存在している。

#### 7.4.2 ポリウムデータの認識実験

上にあげた各種のデータ提示方法を用いて、3次元ポリウムデータの認識実験を行った。一般に提示されたデータから読み取るべき情報は状況によって異なる。例えば、データの最大値を求める場合もあれば、データのボタンから何らかの判断を行う場合もある。ここでは最も単純に、3次元のデータボタンを認識するという課題を取り上げた。提示されたポリウムデータから、3次元のデータ値の変化がどのようになっているかを読み取ることがここでの課題である。以下、実験方法について説明する。

##### (1) データの提示条件

実験方法としては、立方体状のデータ空間を定義して、その中に3次元のポリウムデータのバ



タンを作成し、被験者に提示した。データの提示方法は、前節で述べた方法1～方法4の4通りである。Figure 7.4.4 は提示データの一例を示したものである。表示される情報は、緑色のワイヤフレームで描かれたデータ空間の輪郭と、色の変化で表された断面画像である。色の表示方法としては、0.0～1.0のデータ値に対してRGB カラーモデルのG～Rの色変化で表してある。またデータ空間の大きさは、方法1～方法3に関しては1辺25cmの立方体であるが、方法4に関しては1辺5cmの立方体に全体を縮小してある。これは方法4で用いるハンディモニタのディスプレイ面積が小さいためであり、データ空間を小さくすることによってデータ空間全体の表示を可能にしている。従って、方法4では方法1～方法3に比べてデータ空間の大きさは小さくなるが、提示される情報の手掛かりは統一されていると考えることができる。

## (2) 認識結果の回答方法

データの提示は以上の方法によって行ったが、実験としては認識したデータボタンを被験者に回答してもらうことが必要である。しかしながら、一般に3次元のポリウムデータを表現することは容易ではなく、口頭等の方法では認識結果を調べるのが不可能である。そのため、本実験では3次元ポリウムボタンを作成するためのエディタを開発し、この上で被験者が認識したポリウムデータのボタンを直接的に作成してもらう方法を行った。

エディタによるポリウムデータの作成方法は、以下の通りである。まず、一様なデータ値をもつデータ空間を初期状態として、この空間上のデータを変化させていく。データを変化させる方法は、変化を加える作用点とそこでのデータの変化勾配を指定して、データ値を大小に変化させる。1回の操作で作用点のデータ値は0.1だけ上昇、または下降させることができる。この操作を繰り返していくことによって、任意の3次元ポリウムデータを作成することができる。Figure 7.4.5 は、このようなポリウムデータの作成方法を図示したものである。

この操作でデータ値の変化が及ぶ範囲は、作用点を中心とする球状の範囲である。また、データ値の変化は指定された変化勾配に従って直線状に変化する。従って、作用点  $P_0(x_0, y_0, z_0)$  に変化勾配  $k$ 、変化量  $inc$  の操作を加えたときの各点のデータ値の変化量  $\Delta val(x, y, z)$  は次式で表される。

$$\Delta val(x, y, z) = inc \cdot (dia - length) / dia \quad (length < dia) \quad (7.4.1)$$

$$dia = inc / k \quad (7.4.2)$$

$$length = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2)^{1/2} \quad (7.4.3)$$

ここで、 $dia$  は変化が及ぶ球状の領域の半径、 $length$  は作用点からの距離を表している。データボタンの作成方法としては、作用点を移動しながら、あるいはデータの変化勾配を変えながら変化を指定していくことで、全体としてはかなり複雑なデータボタンを容易に作成することができる。これ

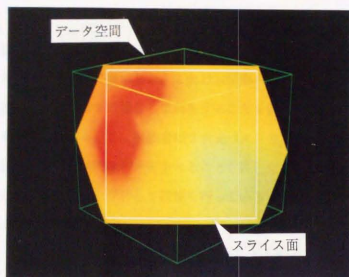


Figure 7.4.4 提示したポリウムデータの一例

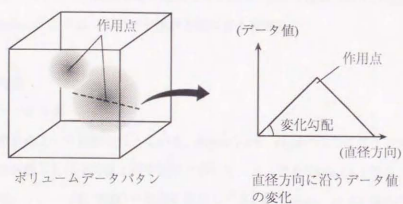


Figure 7.4.5 ポリウムデータの作成方法

らの入力にはキーボードからの数値入力で行っており、データ作成時の視覚的なフィードバックは、前述の方法1のキー操作による方法でデータパタンの確認を行うことができる。

### (3) 課題の提示

課題としては、認識したデータパタンに対して90度のメンタルローテーションを頭の中で行い、その結果を作成するように被験者に要求した。これは被験者が、ある一方向から見た2次元的な断面だけでデータを認識し、そのまま断面として再生することを防ぐためである。頭の中でのメンタルローテーションを行うことによって、被験者は3次元パタンとしての認識が要求されることになる。またデータの認識時には、被験者がメモをとることを許した。このメモとして描かれた図は、被験者が頭の中でのようなイメージとして認識を行っているかというイメージ化方法の評価に利用することができる。

被験者数は全部で16人であり、各データ提示方法ごとに4人ずつのグループに分けて、それぞれ3問の同一課題を行った。また、提示データとして使われたデータパタンも、前述のポリウムデータ作成用のエディタ上で作られたものである。提示データの複雑度としては、初期状態から25個の作用点を指定して作成された程度の複雑さを持つデータとした。

## 7.4.3 実験結果および考察

以上のポリウムデータの認識実験の結果を示したものが、Figure 7.4.6、Figure 7.4.7、およびTable 7.4.1である。ここでは、各データ提示方法による結果を、

- a) 誤差
- b) 認識時間
- c) イメージ化方法

の3つの評価項目によって比較を行っている。Figure 7.4.6、Figure 7.4.7のグラフでは、誤差と認識時間の比較を各課題ごとに平均値と標準偏差で示している。またTable 7.4.1では、全課題に対する誤差、認識時間、イメージ化方法の平均値を表にしてまとめている。表中の括弧内の数字は、方法1の場合を基準とした比率を示したものである。これらの結果から、以下のようなことがわかる。

### (1) 誤差

誤差は、提示された3次元パタンと被験者が作成した3次元パタンとの差である。誤差の値としては、各点における両者のデータ値の差を、データ空間全体で平均した数値で示してある。この誤差の値からは、被験者がどれだけ正確に3次元ポリウムパタンの認識を行うことができたかを知

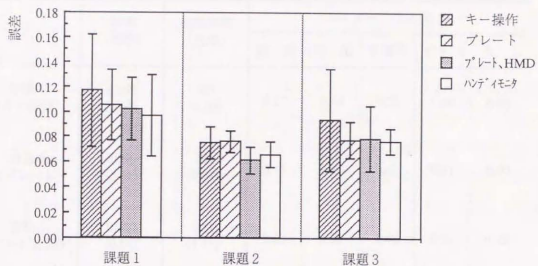


Figure 7.4.6 内界データの認識実験における誤差の比較

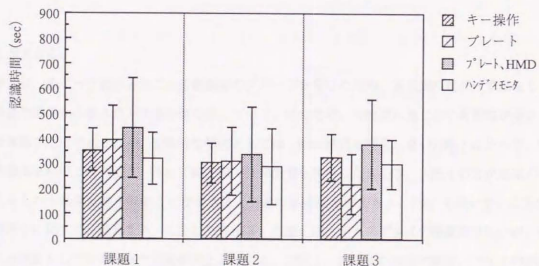


Figure 7.4.7 内界データの認識実験における認識時間の比較

Table 7.4.1 内界データの認識実験結果

	誤差 (比率)	認識時間 (比率)	イメージ化方法				
			断 面	構 造	等値面	ポリウム	な し
方法 1 (キー操作)	0.095 (1.00)	325 (1.00)	0.27	0.40	0.33	0.00	0.00
方法 2 (プレート)	0.086 (0.91)	305 (0.94)	0.15	0.11	0.63	0.11	0.00
方法 3 (プレート, HMD)	0.080 (0.84)	381 (1.17)	0.00	0.08	0.46	0.31	0.15
方法 4 (ヘッドイモント)	0.080 (0.84)	300 (0.92)	0.25	0.00	0.58	0.17	0.00

(誤差: 0.00~1.00、認識時間: sec、イメージ化方法: 内訳比率)

ることができる。

実験では、各データ提示方法ごとに被験者のグループを分けたため、方法間の差だけではなく、標準偏差で示される個人差が大きな値を示している。そのため、方法間の差として有意性が示されたのは課題2だけであったが、全体的な傾向としては、深部感覚を利用しない方法1に比べて、腕の深部感覚を利用した方法2、さらに腕と頭の深部感覚を利用した方法3、方法4の方が誤差が小さくなるという傾向を読み取ることができる。画像の解像度を考えると、CRTを用いている方法1、方法2に比べて、液晶をベースとした方法3、方法4は、ディスプレイの解像度は低いのが、認識される誤差としてはかえって精度が向上している。方法3、方法4の誤差の値は、方法1の誤差に比べて全体の平均では16%の減少を示している。

この結果から、身体的な深部感覚の利用がポリウムデータの認識にとって有効に機能していると考えることができる。



## (2) 認識時間

認識時間は、被験者が認識を完了し、データ提示を自発的に終了するまでの時間である。認識時間では、被験者がどれだけ容易にポリウムボタンを認識することができたかを知ることができる。

実験結果のグラフからは、個人差や課題による差は多少あるが、全体的な傾向としてHMDを用いている方法3が、他の方法に比べて多くの時間がかかっていることがわかる。これはHMDを用いる場合には、視覚的に完全な仮想空間の中でデータ提示が行われるため、時間遅れ等の影響を大きく受けていることが原因として考えられる。これに対して、方法2、方法4では、視覚的には実空間上でデータ提示が行われているため、時間遅れ等の影響は少なく、認識が容易に行われていることがわかる。ハンディモニタを用いる方法4に関しては、データ空間の大きさが他の方法と異なるため、厳密にはスライス面の移動にかかる時間の差が存在する。しかしながら、方法3との認識時間の差（平均値で約80sec）がかなり大きく表れていることから、スライス面の移動時間だけではなく、データボタンの認識効率としても大きな差が存在していると考えられる。

ここでは時間遅れの影響について、もう少し詳しく考えてみる。時間遅れの原因としては画像の生成時間の他に、データプレート、HMD、ハンディモニタ等で使用している空間位置センサ3SPACE Isotrakの影響によるところが大きい。そのため、データの提示中にはセンサで計測を行う、腕の動きに関する時間遅れと頭の動きに関する時間遅れが存在する。腕の動きに関する時間遅れはどの方法も平等に受けているが、頭の動きに関する時間遅れは方法3が最も大きく受けている。方法2では、頭の動きを利用しているが深部感覚と切り離されているため、受ける影響は小さい。方法4では、頭の動きを計測していないため、この影響はない。

また一般に時間遅れの表れ方としては、実空間と仮想空間との間の時間的なずれ（Transmission lag time）と、移動中の対象に起こる空間的なずれと（Position lag）とが存在する [Bryson90]。ポリウムデータの提示に関しては、さらに空間的なずれとして2つの要素が考えられる。すなわち、スライス面の位置に関するずれと、スライス面上のデータに関するずれである。Figure 7.4.8はこれらの違いを図示したものである。データに関するずれは認識精度に影響を与えるが、スライス面すなわち手の位置に関するずれは人間の深部感覚に影響を与える。方法2と方法3では、全ての視覚情報がディスプレイ上に表示されるため、時間遅れとしてこれらの影響を全て受けている。これに対して方法4の場合には、スライス面は実空間に存在し、スライス面上のデータのみがディスプレイに表示されるため、時間遅れの影響としてはデータのずれだけで済むことになる。

これらの時間遅れが与える影響としては、空間的な失調を起こしたり、作業パフォーマンスが低下すること等が知られている。また手の動きに比べて頭の動きの方が大きく影響を受けること等



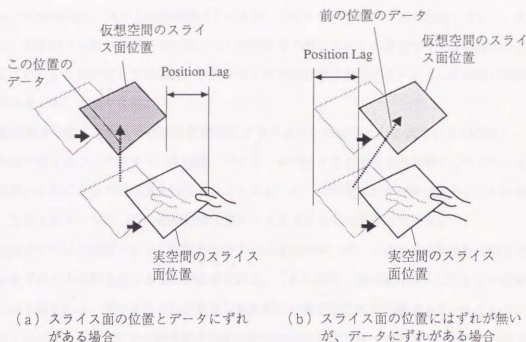


Figure 7.4.8 時間遅れによる空間的なずれの現れ方

も、実験的にも確かめられている [Kijima91a, MacKenzie93]。

### (3) イメージ化方法

イメージ化方法は、実験中に被験者がとったメモ上に描かれた図を分類したものである。イメージ化方法による評価は、誤差や認識時間等の定量的な評価方法に対して、各方法間の定性的な傾向を調べることが目的である。ここではメモ上の図を、断面、構造、等値面、ポリウム、メモなしの5つに分類してある。断面は、ある瞬間のスライス面上に見られる2次元的な断面図を描いたものである。構造は、データパタンの骨組みやデータパタンから読み取った特徴を記入したものである。等値面は、3次元の等値面を鳥瞰図的に描いたものである。またポリウムは、ポリウムレンダリングのイメージを描いたものである。表中の数値は、これらの各イメージ化方法の内訳を比率で示したものである。

対象を認識する場合に、人間は何かの方法で頭の中に符号化する必要がある。この符号化の方法としては、命題として符号化する場合と感覚イメージとしての符号化する場合が考えられる。命

題的な符号化とは、ある対象を別な対象で表現するという方法であるが、この方法だけでは一般に循環論に陥る。そのため、最終的には感覚イメージとしての符号化が必要であると考えられている[Lindsay77, Spoehr82]。メモ上の図を調べることは、これらの符号化の方法を推定しようとしたものである。断面のメモは2次元イメージとしての符号化を表しており、構造のメモは命題的な符号化を表している。これに対して等値面、ポリウム等のメモは3次元イメージとしての符号化を表していると考えることができる。

実験結果からは、方法1では断面や構造によるイメージ化が多く行われているのに対し、方法2、あるいは方法3、方法4では等値面、ポリウム等によるイメージ化が多く行われていることがわかる。このことは深部感覚を利用することによって、2次元イメージや命題としての認識方法から、3次元イメージとしての認識方法に変わってきていることを示している。

2次元イメージや命題としての認識を行っている場合には、データの3次元構造を理解するために頭の中でデータを再構成することが要求される。これに対して3次元イメージとしての認識が行われている場合には、データの3次元構造を直接的に理解することが可能である。すなわち、深部感覚によるポリウムデータの認識効率の変化が定性的にも示されていることになる。方法3に関しては、メモをとらずに直接、頭の中だけで認識を行っている例も見られている。

以上、誤差、認識時間、イメージ化方法によって各データ提示方法に関する評価を行った。これらの結果から、ポリウムデータの認識に対して、深部感覚を利用したデータ提示が有効な方法であることがわかる。内界データの提示において利用できる深部感覚としては、仮想スライス面の使用等による腕の動きに基づいた深部感覚と、空間上での視覚表示による頭の動きに基づいた深部感覚を利用することができる。深部感覚を用いた具体的なデータ提示方法としては、仮想スライス面を利用したデータ提示、あるいはHMDやハンディモニタ等を用いたデータ提示を行うことができる。

実験を行った方法1～方法4の各データ提示方法の比較としては、ハンディモニタを用いた方法4が、誤差、認識時間、イメージ化方法ともに最も成績が良かった。しかしながらハンディモニタに関しては、ディスプレイ面積が小さい等の問題点も残されており、これらは今後の課題として解決していかなければならない。また、仮想スライス面+HMDを用いる方法3は、誤差とイメージ化方法に関しては優れているが、HMDという視覚ディスプレイを用いているために、認識時間という点で問題があることがわかった。この問題は、HMDが持つ時間遅れの課題として解決されていくことが必要である。

## 7.5 外界データの認識

### 7.5.1 外界データの認識における問題点

#### (1) 内界データと外界データの比較

次に外界データの認識について考える。外界データの提示では、ユーザが身体ごとデータ空間の中に入り込む形でデータの提示が行われる。このようなユーザとデータ空間との関係は、ポリウムデータの認識効率に対して大きな影響を及ぼすことが考えられる。ここではまず、内界データと外界データによるポリウムデータの認識の違いについて、実験的な比較を行った。

実験方法としては、内界データと外界データのそれぞれの状態で、被験者に対して同一のポリウムデータの提示を行い、両者の認識結果の比較を行った。データの提示方法としては、前節の内界データの認識実験において最も成績が良かったハンディモニタによる方法を用いた。データ空間としては、内界データでは被験者の目の前に5 cm四方の立方体状の領域を設定した。また外界データの場合には、被験者を取り囲む1 m四方の立方体状のデータ空間を設定した。認識結果を調べる方法としては、前節の実験と同様にポリウムデータ作成用のエディタを用いて、認識したデータボタンを直接作成してもらう方法を行った。被験者数は合計8人で、内界データと外界データに対してそれぞれ4人ずつのグループに分け、同一の課題の提示を行った。提示した課題数は2問である。

Figure 7.5.1、Figure 7.5.2およびTable 7.5.1は、これらの実験結果を示したものである。ここでは認識結果について、誤差と認識時間によって評価を行っている。Figure 7.5.1、Figure 7.5.2のグラフでは、各課題ごとに平均値と標準偏差を示している。またTable 7.5.1では、全課題に対する平均値を表にしてまとめている。表中の括弧内の数値は、内界データを基準にした比率を示したものである。

これらの結果から、内界データの場合に比べて外界データの場合には、誤差、認識時間ともに、大きく認識の効率が低下していることがわかる。

#### (2) 外界データの認識と位置情報の取得

上の実験から、外界データではポリウムデータの認識がさらに困難になることが示された。この原因としては、外界データの提示では、自分が今このデータを見ているのかという位置に関する情報を獲得することが困難になることが理由の一つとしてあげられる。

内界データの場合には、利用する深部感覚が主に腕から先、あるいは首から上の動きに限られている。そのため、ユーザは自分自身の身体に固定された座標系をもとにして、位置情報の取得を行

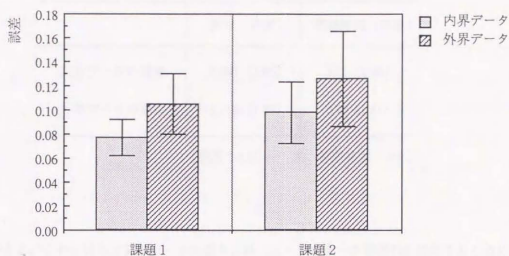


Figure 7.5.1 内界データと外界データの認識実験における誤差

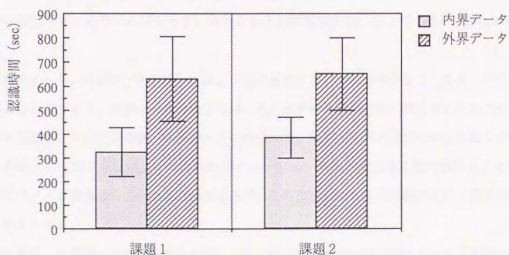


Figure 7.5.2 内界データと外界データの認識実験における認識時間

Table 7.5.1 内界データと外界データの認識結果の比較

	誤差 (比率)	認識時間 (比率)
内界データの認識	0.087 (1.00)	352 (1.00)
外界データの認識	0.116 (1.33)	639 (1.81)

(誤差: 0.00 ~ 1.00、認識時間: sec)

ことができる。これに対して外界データの場合には、ユーザはデータ空間内を探索するために、身体全体での移動を必要とする。この場合ユーザは、身体座標計ではなく、データ空間上に固定された座標系に対して、身体全体の深部感覚を利用した位置情報の取得を行わなければならない。これは身体座標系に対する位置情報の認識に比べて、非常に困難であると考えられる。さらに、データ空間の大きさが大きくなり、身体的な移動だけではデータ空間内を探索できなくなる場合には、ジェスチャ等の記号的な手段によるウォークスルーが必要となる。このような場合には、移動の履歴を命題的に記憶していかなければならず、歩行という深部感覚も無くなってしまう [Brooks86, Iwata93b]。

また別な理由として、外界データの場合には、一度に見渡せるデータ領域が小さくなるという問題もあげることができる。内界データの場合には、視点がデータ空間の外に存在するためにデータ分布全体を見渡すことができるが、外界データの場合には、視点がデータ空間の中に存在しデータの一部しか見ることができない。そのため外界データでは、局所的な認識を積み重ねることによって全体のイメージを構築していかなければならず、このことから位置情報の取得は重要な問題になると考えられる。

以上のことから、外界データの提示を効果的に行うためには、補助的な手段によって位置情報を補い、深部感覚をより有効に活用したデータ提示方法を実現することが必要になる。しかしながらポリウムデータの提示では、視覚が提示データによって覆われてしまうことが多く、これ以上の情報提示に利用することには限界がある。そのため本研究では、このような問題に対する一つのアプローチとして、聴覚情報の利用について考えている。聴覚情報では、空間的な音像の定位を行う



ことによって、位置に関する情報を得ることができる。また聴覚は、視覚のような指向性がなく、全方位的な情報提示を行うことができることも、位置情報の提示には効果的であると考えられる。以下、本節ではこのような考えから聴覚に基づいた深部感覚の利用方法について検討を行う。

### 7.5.2 音源配置による位置情報の提示

聴覚による位置情報の提示としては、空間の中に目印となるような音源を置くという方法が考えられる。空間の中に置かれた音源に対して正確な音像定位を行うことができれば、音源位置を基準として、自分が今どこにいるのかという位置を認識することができる。すなわち、背景音の利用である。しかしながら、データ提示方法の中でこのような背景音を利用するためには、音源による位置情報の提示精度、あるいは最適な音源配置方法等の問題について調べておく必要がある。そのため、まずここでは予備的な実験として、音源の配置方法による位置情報の提示精度に関する実験を行った。

#### (1) 実験方法

実験方法としては、仮想音源が配置された1m四方の正方形の空間の中で、目隠しをした被験者に、次々とランダムに指定した座標位置へ歩いて移動してもらうという課題を行った。指定した位置座標と被験者が実際に移動した位置座標との距離を誤差として計測することで、配置された音源から取得される位置情報の精度を評価することができる。

座標系としては、正方形の空間の2つの辺にそってx軸、y軸を設定し、正方形の1辺の長さの1mを座標値の10として正規化してある。従って、実験に利用した空間は、座標値では(0, 0) (10, 0) (0, 10) (10, 10)の4点で囲まれた正方形領域である。移動に対する座標位置の指定は、この座標系に従った。

配置された音源を基準にして位置情報を決定するためには、最低2つの音源が必要である。2つ以上の音源に対して、正確な音像の定位を行うことができれば、音源位置をもとに自分の存在する位置を決定することができる。Figure 7.5.3はこのような音源配置による位置情報の決定の原理を示したものである。ここでは、音源の配置方法による位置情報の提示精度を調べるために、次のような4通りの方法に従って仮想音源の配置を行い、実験的な比較を行った。

- a) 音源無し
- b) 正方形の1辺の両端に2つの音源を配置
- c) 正方形の各コーナーに4つの音源を配置
- d) 正方形の各コーナーに4つの音源を用意し、被験者に最も近い音源だけを提示



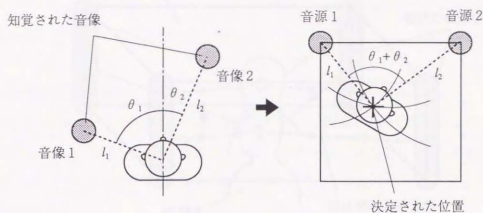


Figure 7.5.3 音源配置による位置の決定方法の原理

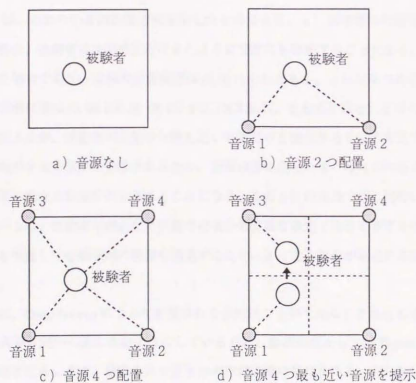


Figure 7.5.4 比較実験を行った各種の音源配置方法

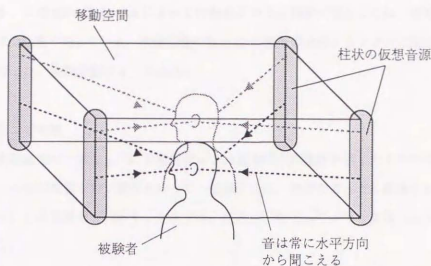


Figure 7.5.5 配置音源の柱状の音源形状

Figure 7.5.4 は、これらの音源配置方法を示したものである。a) は音源の配置を行わない場合であり、この場合、被験者は深部感覚だけをたよりに空間内を移動することになる。b) は2つの音源を配置した場合であり、音源の位置座標は  $(0, 0)$   $(10, 0)$  である。c) は4つの音源を配置する方法であり、座標位置は  $(0, 0)$   $(10, 0)$   $(0, 10)$   $(10, 10)$  である。また d) は c) と同じ位置に4つの音源を用意しているが、被験者の位置から最も近い音源だけを提示するという方法である。この場合、実際には利用する空間が正方形であるため、空間は図に示したような4つの領域に分割され、それぞれの領域で異なる音源が提示されることになる。この d) の方法では、同時に1つの音源しか提示されないため、被験者が静止した状態では自分の位置を決定することができない。しかしながら、空間内を移動して音源領域の境界を通過することによって、自分が存在する位置を決定することができる。

また各音源は、Concolvotronによって配置される仮想的な音源である。これらの音源は、被験者からみて常に水平方向から聞こえるようにしているため、音源形状としては Figure 7.5.5 に示すような柱状の音源となる。また、設定された正方形の空間領域の外に出ると、どの音源も聞こえないようになっている。音源の種類としては、各音源内容を識別できるように、音源1～音源4に対してそれぞれ、シンセサイザーのドラム音、音楽、英会話のテープ、水の流れの音という4つの音源を選択した。これらの音源は4.3節で実験を行った複数音源に対する画像定位実験に用いたものと

同一である。被験者の頭の位置は、ヘッドフォン上の空間位置センサ3SPACE Isotrakによって常に計測されており、被験者の頭の位置と方向に従った音源の提示が行われる。また、被験者の移動位置に対する計測も、この3SPACE Isotrakによって行われている。誤差の値としては、指定位置と移動位置の水平面での距離で表している。移動位置の指定は10箇所の座標をランダムに決定し、次々と連続に指定を行った。被験者数は4人である。

## (2) 実験結果および考察

Figure 7.5.6は実験結果の一例として、移動回数による距離誤差の履歴を示したものである。このグラフから、a)の深部感覚だけで移動を行っている場合には、誤差がどんどん累積されて大きくなるが、b)～d)の音源配置を利用する方法では、誤差は平均化しており、累積がおさえられていることがわかる。

またFigure 7.5.7は、同じく実験結果の一例として、移動回数による方向誤差の履歴を示したものである。方向誤差とは、各移動時において現在位置から次の移動位置への移動方向の誤差を角度で示したものである。このグラフからは、a)の音源情報を利用しない場合には、やや誤差が大きいが全体的に平均化されていることがわかる。これに対して、音源情報を利用したc)等の場合には、全体的な誤差は小さいものの各移動ごとのばらつきは大きく、しばしば大きな誤差の値を示している。

この原因としては、音源情報を利用する場合と利用しない場合での、移動方法に関する違いが考えられる。すなわち、音源情報を利用しない場合には、歩行による深部感覚だけをたよりにしているため、現在位置と次に指定された位置との差から、移動の方向と距離を決定し、移動を行う。実際にこのような移動方法を行う場合には、現在位置は移動の履歴として決定されるため、現在位置を知るためには、それまでの履歴を記憶しておかなければならないことになる。これに対して、音源情報を利用する場合には、現在位置と移動位置の差だけではなく、指定された位置を直接的な目標とした移動を行うことができる。そのため、各移動時には、移動位置の修正等のためにしばしば大きな誤差が現れるが、結果として正確な移動が実現されている。

Table 7.5.2は、各方法による平均誤差の比較を示したものである。誤差の数値としては、距離誤差と方向誤差について平均値と最大値を示してある。平均値は被験者、移動回数全体の平均値であり、最大値は各被験者についての最大値の平均で示してある。また、括弧内の数値は、a)の音源無しの場合を基準とした比率を示したものである。

この結果から、各音源配置方法による位置情報の提示精度に関して、次のようなことがわかる。まず、b)の音源2個とc)の音源4個との比較では、音源の数による距離誤差の平均値には、大

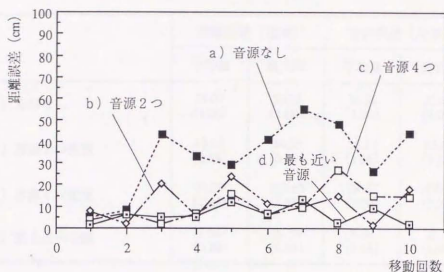


Figure 7.5.6 移動回数による距離誤差の履歴の一例

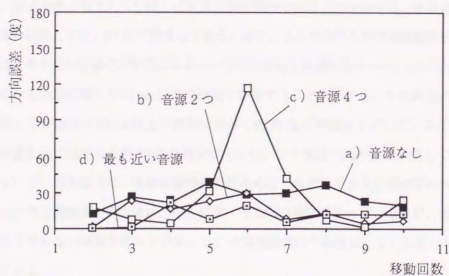


Figure 7.5.7 移動回数による方向誤差の履歴の一例

Table 7.5.2 音源配置方法による位置情報の提示実験結果

	距離誤差 (比率)		方向誤差 (比率)	
	平均値	最大値	平均値	最大値
a) 音源なし	33.07 (1.00)	56.35 (1.00)	14.31 (1.00)	32.43 (1.00)
b) 音源 2 つ配置	19.05 (0.58)	44.35 (0.79)	15.11 (1.06)	43.44 (1.34)
c) 音源 4 つ配置	20.39 (0.62)	109.67 (1.95)	28.67 (2.00)	109.97 (3.39)
d) 最も近い音源	9.56 (0.29)	24.59 (0.44)	8.30 (0.58)	22.14 (1.00)

(距離誤差: cm、方向誤差: 度)

きな違いはなかった。この原因としては、音源の数が増えることで位置情報を得る手掛かりは増加するが、逆に各音源に対する音像の定位精度が低下していることが考えられる。そのため音源 4 個の場合には、誤差の最大値としてしばしば大きな値が表れていることがわかる。音源の数と音像の定位精度の違いに関しては、4.3 節で詳述してある。また、ここであげた各音源配置方法の中では、d) の被験者に最も近い音源だけを提示するという方法が最も成績が良かった。この方法では、1 m 四方の空間の中を位置に関して 10 cm 以下の誤差で移動することができる。この誤差の値は、a) の音源を利用しない場合の 30 cm 以上の誤差に比べて約 70 % の減少を示している。また、b) c) の音源配置方法に比べても約 50 % の減少であった。また移動方向の誤差に関しては、前述したように、b) c) の方法では、移動位置の修正のためにときどき大きな誤差が現われている。そのため b) c) の方向誤差の平均値は、a) に比べて良い結果にはなっていないが、d) の方法に関しては、ここでも良い結果を表している。d) の方向誤差の平均値は、a) に比べて約 40 % の減少を示している。

以上の結果をまとめると、身体移動による深部感覚だけでは、正確な位置情報を得ることは難しいが、聴覚情報を利用することによって、より正確な位置情報の取得が行えることがわかった。また、音源の配置方法に関しては、音源数をむやみに増やしてもあまり効果はないことがわかった。比較した方法の中では、被験者に最も近い音源だけを提示するという d) の方法が最も有効であっ



た。しかしながらこの場合、最適な音源の配置位置に関しては、移動空間の大きさや形によって、影響を受けることが予想されるため、それぞれのデータ空間に対して十分な検討を行うことが必要である。

以上のことから、音源配置によってある程度の位置情報提示を行えることが確認できたが、これは言葉を換えて言うと、聴覚と深部感覚との感覚統合の効果と考えることができる。すなわち、身体全体での移動が伴う場合、深部感覚だけでは位置情報の取得を行うことは困難で誤差も大きい。聴覚と深部感覚とを統合することによって、より正確かつ容易に位置情報の取得を行うことができる。このことから、音源配置による方法は、外界データの提示においても有効な手段として利用することができると考えられる。

### 7.5.3 外界データの認識実験

上で行った予備実験の結果を踏まえ、外界データの認識に関する実験を行った。ここでは、音源配置による位置情報の提示が外界データの認識に与える効果を調べるのが目的である。

#### (1) 実験方法

実験方法としては、7.5.1節で行った内界データと外界データの比較実験と同一のポリウムデータの提示を行い、音源配置のある環境で認識を行った。ここでの課題も、ポリウムデータに関する3次元ボタンを認識することである。データ空間は被験者を取り囲む1m四方の立方体であり、データ提示方法としてはハンディモニタを用いている。

実験としては、次の2通りの方法で仮想音源の配置を行い、音源の無い場合との認識結果の比較を行った。

- a) データ空間の4つのコーナーに音源を用意し、被験者に最も近い音源だけを提示する
  - b) データ分布の極大極小点に音源を用意し、被験者に最も近い音源だけを提示する
- a) は、7.5.2節の予備実験で最も成績が良かった音源の配置方法である。この方法では、音源配置によって位置情報の提示だけを行っている。これに対してb) は、音源配置によって位置情報の提示だけではなく、データ値そのものも提示しようとする方法である。この場合の音源配置方法としては、データ分布の中の極大点、あるいは極小点にデータ値に応じた音源を置くという方法を行った。Figure 7.5.8 は、このような方法の概念図を示したものである。a) では常に水平方向から音が聞こえてくるため、柱状の音源形状であるが、b) の場合は3次元空間内の点音源である。
- b) の音によるデータ値の表現方法としては、0.0～1.0のデータ値を2オクターブ間の音の高さにマッピングする方法でデータ提示を行った。

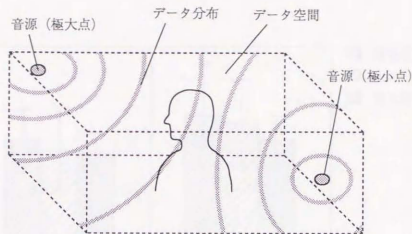


Table 7.5.8 極大極小点の音源配置方法

各方法による3次元パタンの認識結果は、内界データの場合と同様の方法で評価を行った。被験者数はそれぞれ4人ずつで、提示した課題は2問である。また提示データとしては、a)とb)の条件を描えるために、極大点、極小点の数が合計4つとなるようなデータパタンを使用している。また、この実験ではデータの提示中に特にメモをとることを指定していない。これは、外界データとして認識されたイメージが、メモとして絵に描くことで、内界データのイメージに変換されてしまうことを避けるためである。

## (2) 実験結果および考察

Figure 7.5.9、Figure 7.5.10 および Table 7.5.3 は、以上の実験結果を示したものである。認識結果は、誤差と認識時間によって評価を行っている。Figure 7.5.9、Figure 7.5.10 のグラフでは各課題ごとの平均値と標準偏差を、Table 7.5.3 では全課題に対する平均値を表に示してまとめている。また、これらのグラフや表では、視覚だけの場合の認識結果と比較するために、7.5.1 節で行った外界データの認識結果を併記してある。表中の括弧内の数値は、視覚だけの場合を基準にした比率である。

この結果から外界データの認識では、視覚だけの提示に比べて、音源配置による位置情報の提示を行うことで、誤差、認識時間ともに成績が向上していることがわかる。a)とb)の比較としては、データ値に関する情報が提示される分だけ、b)の方が誤差の値が小さくなっている。このこ

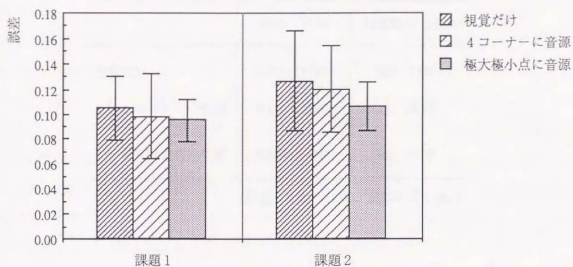


Figure 7.5.9 外界データの認識実験における誤差の比較

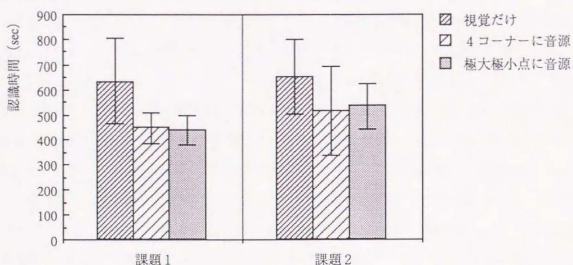


Figure 7.5.10 外界データの認識実験における認識時間の比較

Table 7.5.3 外界データの認識実験結果

	誤差 (比率)	認識時間 (比率)
視覚だけ	0.116 (1.00)	639 (1.00)
a) 4 コーナーに音源	0.110 (0.95)	481 (0.75)
b) 極大極小点に音源	0.102 (0.88)	488 (0.76)

(誤差 : 0.00 ~ 1.00、認識時間 : sec)

とから、音源配置等の補助的な手段によって位置情報の提示を行うことで、身体的な移動に係わる深部感覚を補い、有効なデータ提示を行うことができると考えることができる。また、このようなデータの提示方法は、視覚だけではなく、聴覚情報に基づいた深部感覚の利用方法として考えることができる。

## 7.6 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手法による、3次元ポリウムデータの認識について検討を行った。まず、ポリウムデータに対する人間の認識モデルから、深部感覚を利用した能動的なデータ提示方法が果たす役割について議論を行った。空間的な3次元データを認識するためには、探索的なデータの提示とその際の深部感覚の利用が有効であると考えられる。次に、ユーザとデータ空間との関係を、内界データと外界データとに分け、それぞれの場合について深部感覚を利用した具体的なデータ提示方法の提案を行い、その効果についての検証を行った。

内界データは、ユーザの目の前の領域にデータが提示される場合である。この場合の深部感覚の利用としては、探索という身体的な行動が直接的に視覚情報等の提示データの変化として反映されることが必要である。具体的には、腕の動きによる深部感覚、あるいは頭の動きによる深部感覚等を利用することができる。ここでは、これらの深部感覚を利用したデータ提示方法について、基礎的なポリウムデータの認識実験を行い、その有効性について確認を行った。

また外界データは、ユーザ自身がデータ空間の中に入り込んでデータ提示が行われる場合である。この場合は、データ空間の中での位置情報の取得が困難になるため、効率的なデータ提示を行うためには、補助的な手段による位置情報提示を行うことが必要になる。ここでは、音源配置による聴覚情報を利用した位置情報提示の方法について検討を行った。音源配置による方法とは、身体的な動きに対応した聴覚情報を提示することであり、これは聴覚に基づいた深部感覚の利用と考えることができる。ここではまず、音源配置方法についての基礎的な実験を行った。また、その結果に基づいて外界データの認識実験を行い、聴覚情報の利用の有効性について確認を行った。

以上の結果から、3次元ポリウムデータの認識においては、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ことが示された。深部感覚を利用したデータ提示では、データが存在する位置にデータが見え、データが存在する位置からデータが聞こえ、データが存在する位置でデータに触れるということが必要である。本章では感覚情報として視覚と聴覚しか扱わなかったが、このような意味から、触覚の利用も有効な手段になり得ると考えられる。触覚情報は基本的に点情報であるため、データ分布の提示には適していない。しかしながら、能動的な役割を果たす手がそのまま感覚器になるという構造から、深部感覚と直接結び付いた感覚であり、空間情報の提示に対して重要な役割を果たすことが考えられる。



## 第 8 章

### 多感覚へのデータ振り分け方法

#### Guideline on Multisensory Data Sensualization

## 8.1 緒言

データ・センシュアライゼーションでは、視覚、聴覚、触覚、あるいは深部感覚等の多感覚を利用した能動的データ提示を行う。このようなデータ提示方法は、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、幾つかの効果が期待される。これらの効果については、第6章と第7章で詳しく検討を行った。しかしながらこの方法は、利用する感覚あるいはデータ提示方法が多様になるため、その利用方法もまた難しくなる。データ提示に関するこれらの利用方法を誤ってしまえば、データ・センシュアライゼーションとしての効果は十分に期待できず、場合によっては逆効果を起こしてしまう危険性もある。そのため有効なデータ提示を行うためには、その利用方法についても十分な検討を行っておくことが必要である。

本章では、このようなデータ・センシュアライゼーションの利用方法について検討を行うが、その中でも特に、多感覚へのデータの振り分け方法という問題を取り上げる。これは、複数のデータ項目を提示する際に、それぞれのデータを何の感覚パラメータを用いて提示すべきかという問題である。このようなデータの振り分けを行う場合に、指針となるべき指標を提案することが本章での目的である。

データを振り分ける際に考慮すべき条件としては大きく、感覚の特性と、データと感覚との関係という2つの項目が考えられる。感覚の特性とは、提示データの内容は考慮に入れずに、感覚として認識しやすい組み合わせを選択するということである。例えば、2つの感覚を同時に利用したデータ提示を行う場合に、2つの感覚が相互に干渉を起こしてしまえば正しい情報伝達を行うことはできない。

また、データと感覚との関係とは、提示すべきデータの意味内容までを考慮に入れて、利用する感覚を選択するということである。例えば、温度データを視覚で提示する場合には、温度の高い部分は赤色で、温度の低い部分は青色でという色の選択方法は、直観的な理解を容易にしている。また、気体の流速データ等を提示する場合には、視覚で表現するよりも、直接風覚で提示した方が直感的に理解しやすい。このように、データの意味内容を考えると、提示データと感覚とはできるだけ物理的な相似性を保つことが重要であると考えられる。しかしながら、このようなデータの意味内容に関しては、それぞれの提示データごとに検討を行う必要があるため、ここでは特に扱わない。本章では、主に感覚の特性、すなわち感覚間の干渉という点から、データの振り分け方法についての検討を行う。

次節以降では、まず多感覚を利用するデータ提示の目的について整理を行い、各利用目的ごとに感覚間の干渉という点からデータ振り分け方法に対する指標について検討を行う。

## 8.2 多感覚の利用方法

多感覚へのデータの振り分け方法についての検討を行う前に、本節ではまず、多感覚の利用方法について整理を行っておく。多感覚を利用したデータ提示を行う場合には、幾つかの異なる利用目的が考えられる。その主な目的としては、

- a) データ相互間の関係を提示する場合
- b) 感覚統合を利用した提示を行う場合
- c) 複合イメージを利用した提示を行う場合

等を考えることができる。以下、これらの各利用方法について説明を行う。

## 8.2.1 データ相互間の関係の提示

まず、多感覚の利用方法として、データ相互間の関係を提示する場合が考えられる。これは、複数のデータ項目から構成される現象において、2つ以上のデータを同時に提示することで、データ相互間の関係を読み取ろうという場合である。例えば、温度データ、圧力データ等を含むデータ空間の中で、温度データの変化と圧力データの変化がどのような関係になっているか等の提示を行う場合が考えられる。

このようなデータ提示を行う場合に、従来のデータ・ビジュアライゼーション手法では視覚内のパラメータを用いるしか方法はなかった。例えば、矢印等のアイコンを利用した表現では、矢印の長さや色等のパラメータ選択が考えられるが、色によるボリュームデータの表現では、色の中のパラメータを使い分けなければならない。しかしながら、多感覚を用いたデータ・センシユアライゼーションでは、複数のデータを視覚情報と聴覚情報等というように、別々の感覚に振り分けることができる。このような感覚の振り分けを行うことで、データに対する表現力は非常に豊かになることが期待されるが、その際に、どのような感覚の組み合わせを用いるべきかという問題については、十分な検討を行っておく必要がある。

## 8.2.2 感覚統合を利用したデータ提示

次に、多感覚の利用方法としては、感覚統合の効果を利用したデータ提示方法があげられる。これは1つのデータ項目に対して、複数の感覚を同時に利用したデータ提示を行う方法である。このような利用方法では、多感覚を用いることによって感覚統合の効果を期待することができる。例えば、流体の速度データを提示する場合に、矢印等の視覚情報によって表示を行うだけでなく、同時に速度の大きさを音の大きさと、あるいは速度ベクトルを風覚で提示する等の方法を行うことが

できる。このようなデータ提示方法は、多感覚を利用したデータ・センシュアライゼーション環境において始めて可能になる方法である。この場合の感覚統合の効果については、6.4節で実験的な検討を行っている。

このような感覚統合の効果を利用する場合には、単に利用する感覚、あるいはデータ提示方法を増やせば良いという訳ではない。複数のデータ提示方法が相互に干渉し合うような場合には、互いに影響を及ぼし合い、提示精度を下げてしまうという状況も予想される。そのため、同時に利用する感覚として、どのような感覚が効果的で、どのような感覚が悪影響を及ぼすかという問題について、十分に検討を行っておく必要がある。

### 8.2.3 複合イメージを利用したデータ提示

また3つ目の利用方法としては、複合イメージを利用したデータ提示方法が考えられる。これは、幾つかのデータ項目によって構成されている状態を提示する場合に、多感覚のパラメータにデータを振り分けることで、複合イメージとしての提示を行う方法である。この方法は、ある条件を満たす状態を探したり、監視したりする場合等に利用することができる。例えば、データ空間の中で温度データと圧力データがそれぞれある条件を満たしている部分を探したい場合に、各データを個々に判断するよりは、2つの条件を満たす複合イメージとして判断できる方が効率的である。また、複数のデータ項目を含むシステムに異常が発生していないかどうか等の監視を行う場合にも、個々のデータ値をそれぞれ調べるよりは、全体のデータから構成される複合イメージとして判断できる方がはるかに効果的である。

このような目的に対して音のパラメータを利用した方法等は幾つか研究例が見られるが[Smith90, Gaver91]、多感覚を利用することによって、さらにいろいろな組み合わせの複合イメージを考えることができる。この場合にも、どのような感覚パラメータを用いるのが有効であるか、あるいは利用する感覚パラメータの中でどのような複合イメージを構築するべきか等の問題について、十分に検討を行う必要がある。

以上、多感覚を用いたデータ提示方法として、3つの異なる利用目的について説明した。これらの各方法では、どれも複数の感覚を利用しているが、それぞれ利用目的が異なるために、効果的な感覚振り分け方法も異なることが予想される。次節では、これらの各利用目的に対して、それぞれ効果的な多感覚の振り分け方法について検討を行う。

## 8.3 感覚間の干渉

本節では、多感覚へのデータの振り分け方法に対する指針として、感覚間の干渉の問題について検討を行う。ここでは、感覚間の干渉に関する基礎的な実験を行い、ここで得られた結果をもとに、多感覚へのデータ振り分け方法に対する指標の導入を行う。

## 8.3.1 感覚間の干渉実験

基本的な感覚間の干渉問題として、2つのデータを2つの感覚パラメータに振り分ける場合の知覚に及ぼす影響について、実験的な検討を行った。以下、ここで行った感覚間の干渉に関する実験について説明する。

実験方法としては、0～100の数値で表される2種類のデータを、2種類の感覚パラメータ（これを感覚パラメータ1、感覚パラメータ2とする）に振り分けて、被験者に対して複合的な感覚刺激の提示を行った。被験者は、知覚した複合刺激から2つの感覚パラメータを分離し、それぞれに対する2つの数値データを回答する。このとき、感覚パラメータの振り分け方法としては、次の9通りについて実験を行った。

- a) 視覚の色相と明度
- b) 視覚の色相と彩度
- c) 視覚の明度と彩度
- d) 聴覚の音の大きさと音の高さ
- e) 視覚の色と聴覚の音の大きさ
- f) 視覚の色と聴覚の音の高さ
- g) 視覚の色と風覚の風の強さ
- h) 聴覚の音の大きさと風覚の風の強さ
- i) 聴覚の音の高さと風覚の風の強さ

a)～c)は視覚内のパラメータ、d)は聴覚内のパラメータにデータを振り分けた場合であり、これらは同一感覚内の複数パラメータを用いている。これに対してe)～i)は、複数のデータを複数の感覚に分けて、データの振り分けを行った場合である。

実験方法としては、Figure 8.3.1に示すようなCRTのディスプレイ画面を用いてデータの提示を行った。画面には1つの大きい四角形と4つの小さい四角形が表示される。被験者は、キー操作によってこれらの四角形の中の1つを選択することができる。大きい四角形を選択した場合には、2つのデータ値を含んだ複合刺激が提示される。また小さい四角形を選択した場合には、使用してい



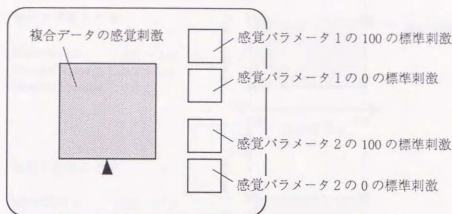


Figure 8.3.1 感覚間の干渉実験に用いた CRT 画面

る2つの感覚パラメータに対する標準刺激を参照することができる。標準刺激としては、それぞれの感覚パラメータについて、0と100のデータ値に対する刺激を別々に参照することができる。すなわち、感覚パラメータ1に対する標準刺激を参照する場合には、感覚パラメータ2の刺激は提示されず、逆に感覚パラメータ2の標準刺激を参照する場合には感覚パラメータ1の刺激は提示されない。感覚刺激の提示方法としては、視覚刺激の場合には、これらの四角形が提示データの色で塗りつぶされる。また聴覚刺激の場合には、ヘッドフォンを用いて音が提示され、風覚刺激の場合には、風覚ディスプレイを用いて風の提示が行われる。この実験方法は、6.3節で行ったマグニチュード推定法を複合感覚の知覚に拡張したものである。

また使用する視覚パラメータに関しては、a)～c)で用いる色相、明度、彩度としては、Munsell HVC カラーモデルの Munsell Hue、Munsell Value、Munsell Chroma を用いている。実験では2つの感覚パラメータ間の干渉を調べるため、残りの感覚パラメータに関しては一定値に保つ必要がある。例えば、色相と明度の干渉実験では彩度を一定値にし、明度と彩度の干渉実験では色相を一定値にする。しかしながら、視覚上の各パラメータは相互に影響し合うため、それぞれの値が取り得る範囲は互いに制限を受ける。例えば、彩度0の灰色では黒から白までの明度を取り得るが、彩度の値を大きくすると取り得る明度の範囲は小さくなる。またこの明度の範囲は、どの色相を選ぶかによっても影響を受ける。そのため、これらの視覚パラメータについては、利用する2つのパラメータができるだけ広い値の範囲を使用できるように、残りのパラメータ値を設定する必要

## a) 色相と明度の干渉

Munsell Hue : 0.0 ~ 1.0  
 Munsell Value : 0.2 ~ 0.8  
 Munsell Chroma : 0.2

## b) 色相と彩度の干渉

Munsell Hue : 0.0 ~ 1.0  
 Munsell Value : 0.2  
 Munsell Chroma : 0.2 ~ 0.54

## c) 明度と彩度の干渉

Munsell Hue : 0.0  
 Munsell Value : 0.4 ~ 0.9  
 Munsell Chroma : 0.2 ~ 0.5

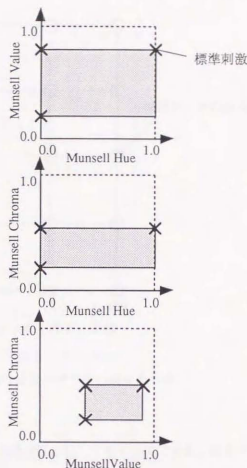


Figure 8.3.2 視覚パラメータで利用できる感覚刺激範囲

がある。Figure 8.3.2は、a) ~ c) で利用している各視覚パラメータの範囲を示したものである。また図中の×印で示した点は、標準刺激として参照される値である。実験では、これらの各パラメータの利用範囲を0~100のデータ値に対応させて使用している。

これに対してe) ~ g) の場合には、視覚刺激として1つのパラメータしか利用しないため、最も一般的な視覚パラメータであるRGBカラーモデルを用いている。色の範囲としては、G~Rの色の変化を使用している。先のMunsell HVC カラーモデルを使用した場合には、使用できるパラメータの範囲が小さいために、全体的にくすんだ色しか使用することができなかったが、このRGBカラーモデルを用いる場合には明瞭な色を使用することができる。このようなパラメータの使用範囲の大きさは、色に対する感覚の分解能にも影響を与えていると考えることができる。

また、使用する各感覚パラメータについては、6.3節で行ったマグニチュード推定法による個人ごとの計測データを用いて補正を加えてある。従って、提示するデータの値は、刺激量に対してでは

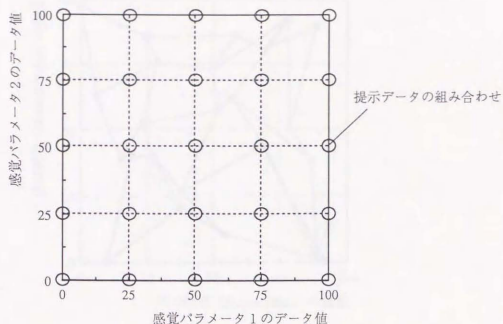


Figure 8.3.3 感覚干渉実験における提示データの組み合わせ

なく、各被験者が各感覚刺激を単独で受けた場合の感覚量に対して割り当てである。補正データとして6.3節で求めた平均値データの近似曲線ではなく、各個人ごとの計測データを用いたのは、干渉による知覚の歪みが個人差のばらつきの中に埋もれてしまわないようにするためである。

また、この実験で提示を行った2つのデータ値の組み合わせとしては、各データがそれぞれ0、25、50、75、100の5つの値を取る合計25個のデータ値の組み合わせについて提示を行った。Figure 8.3.3は、これらのデータ値の組み合わせを示したものである。横軸は感覚パラメータ1に対するデータ値、縦軸は感覚パラメータ2に対するデータ値を表している。このグラフ上の各メッシュ交点が、提示データ値の組み合わせである。実験では、これらのデータ値の組み合わせを、被験者に対してランダムに提示した。被験者数は4人で、それぞれa)～i)の各感覚パラメータの組み合わせについて、2回ずつの計測を行った。

### 8.3.2 実験結果

Figure 8.3.4～Figure 8.3.21は、以上の実験結果を示したものである。これらの図では、各感覚パラメータの組み合わせに対して、それぞれ知覚された複合データの平均値と標準偏差が示されている。各グラフとも横軸は感覚パラメータ1から知覚された値、縦軸は感覚パラメータ2から知覚さ

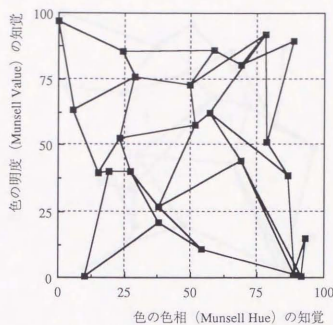


Figure 8.3.4 色の色相と明度の干渉 (平均値)

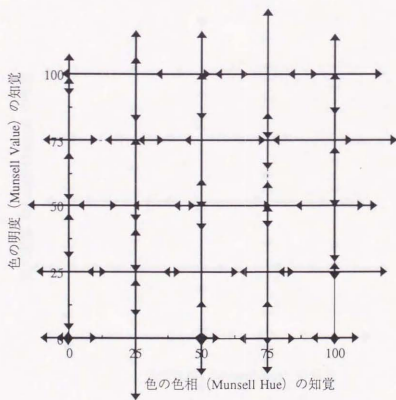


Figure 8.3.5 色の色相と明度の干渉 (標準偏差)

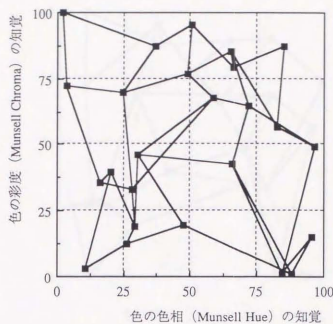


Figure 8.3.6 色の色相と彩度の干渉 (平均値)

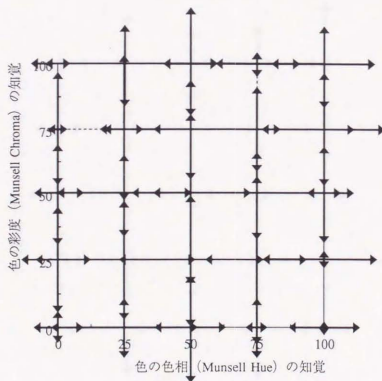


Figure 8.3.7 色の色相と彩度の干渉 (標準偏差)



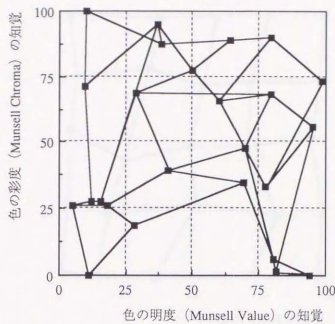


Figure 8.3.8 色の明度と彩度の干渉 (平均値)

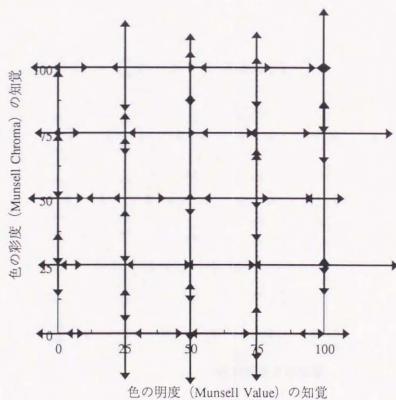


Figure 8.3.9 色の明度と彩度の干渉 (標準偏差)

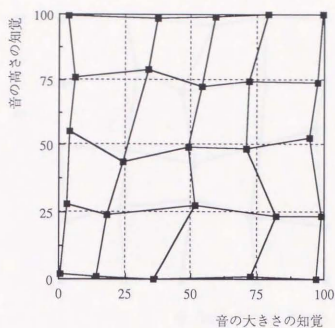


Figure 8.3.10 音の大きさと高さの干渉 (平均値)

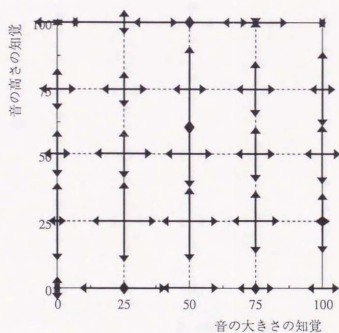


Figure 8.3.11 音の大きさと高さの干渉 (標準偏差)

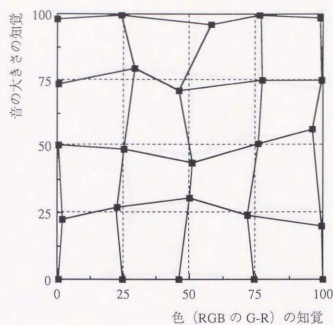


Figure 8.3.12 色 (RGB の G-R) と音の大きさの干渉 (平均値)

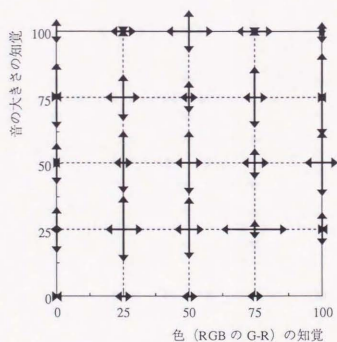


Figure 8.3.13 色 (RGB の G-R) と音の大きさの干渉 (標準偏差)

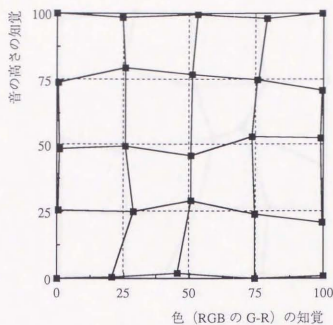


Figure 8.3.14 色 (RGB の G-R) と音の高さの干渉 (平均値)

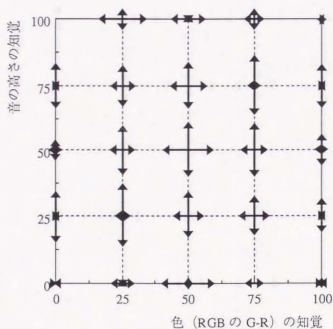


Figure 8.3.15 色 (RGB の G-R) と音の高さの干渉 (標準偏差)

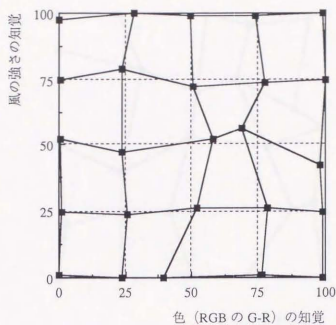


Figure 8.3.16 色 (RGB の G-R) と風圧の干渉 (平均値)

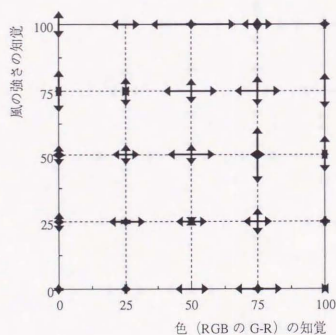


Figure 8.3.17 色 (RGB の G-R) と風圧の干渉 (標準偏差)



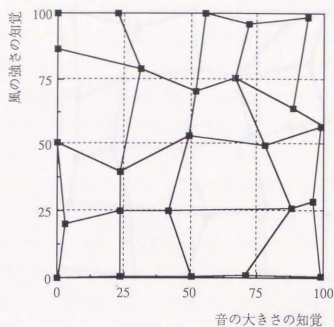


Figure 8.3.18 音の大きさと風圧の干渉 (平均値)

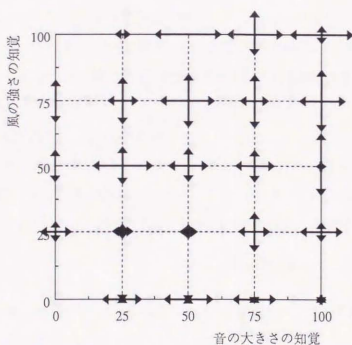


Figure 8.3.19 音の大きさと風圧の干渉 (標準偏差)

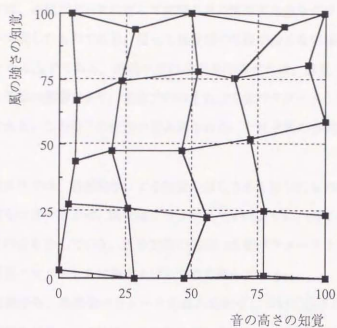


Figure 8.3.20 音の高さと風圧の干渉 (平均値)

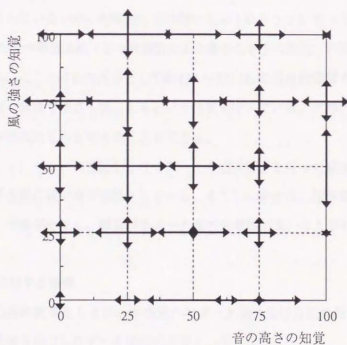


Figure 8.3.21 音の高さと風圧の干渉 (標準偏差)

れた値を示している。

平均値のグラフは、各提示データに対して知覚された値の平均値をグラフ上にプロットし、これらを格子でつないで表したものである。従って感覚間の干渉が全くない場合には、グラフはきれいな正方形の格子となるはずである。各格子点の水平方向のずれは、感覚パラメータ2が感覚パラメータ1に与えた干渉の影響であり、垂直方向のずれは感覚パラメータ1が感覚パラメータ2に与えた干渉の影響である。この格子の変形や歪み具合から、それぞれの感覚間の干渉の程度を知ることができる。

また標準偏差のグラフは、各被験者による知覚のばらつきを示したものである。標準偏差の値は平均値まわりのばらつきであるが、図ではグラフが見やすいように、格子上の提示データの位置に両矢印で標準偏差の値を示している。水平方向の矢印は感覚パラメータ1に関するばらつきを、垂直方向の矢印は感覚パラメータ2に関するばらつきを表している。

これらの実験結果から、各感覚パラメータの組み合わせについて以下のようなことがわかる。

a) ~ c) の視覚内のパラメータにデータを振り分けた場合には、平均値グラフは大きく変形している。またこの場合には、データのばらつきも大きく、標準偏差のグラフは隣合う矢印が相互に重なり合ってしまうている。すなわち、干渉が大きく、感覚パラメータを相互に分離することが困難であることを示している。d) の聴覚内のパラメータに振り分けた場合には、平均値グラフの格子形状はあまり乱れていないが、全体的に右に傾いたようなグラフになっている。この理由としては、3.1節で述べた音の等感曲線（音の周波数による音の大きさの変化）の影響として考えることができる。すなわち、ここでは音の高さとして約130 ~ 523 Hzの周波数領域の音を使用しているが、この範囲の音は低い音ほど小さく聞こえるという性質を持っている。このグラフ上の傾きは、このような音の特性が表れたものと考えることができる。

これに対して、e) ~ i) の感覚を分けてデータの振り分けを行った場合には、平均値グラフの変形は少なく、正方形に近い格子形状をしている。またこの場合は、標準偏差の値も小さくなっている。すなわち、干渉が小さく、感覚パラメータ間の分離性が良いことがわかる。

### 8.3.3 利用方法に対する指標

次に、これらの実験結果をもとに、多感覚へのデータ振り分け方法に対する指標について考える。前節では多感覚を利用したデータ提示の目的として、

- a) データ相互間の関係を提示する場合
- b) 感覚統合を利用した提示を行う場合
- c) 複合イメージを利用した提示を行う場合

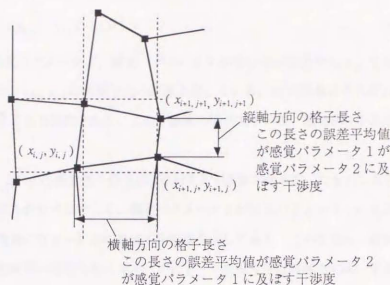


Figure 8.3.22 感覚間の干渉度を表す指標

という3通りの利用方法について述べた。ここではこれらの各利用目的に応じて、多感覚へのデータの振り分け方法をどのように行うべきかという問題について検討を行う。

#### (1) データ相互間の関係を提示する場合

まず、データ相互間の関係を提示する場合について考える。この利用方法の場合には、複数のデータを複数の感覚パラメータに振り分けることによってデータ提示を行う。このときに感覚の利用方法として注意すべき点は、できるだけ感覚間の干渉が小さく、感覚相互の分離性を良くすることである。感覚間の干渉が大きいと、それぞれの感覚尺度に歪みや変形が引き起こされる。そのため、1つのデータだけを提示する場合に比べて、他のデータを同時に提示することで、情報の伝達精度を著しく低下させてしまうということが考えられる。このような問題を生じないためには、感覚としてなるべく干渉の小さい組み合わせを選択することが必要である。

前述の実験結果では、このような感覚間の干渉が平均値グラフの変形として表された。そのため、ここでは感覚間の干渉の大きさを表す指標として、Figure 8.3.22 に示すようなグラフの変形量の値を干渉度として導入する。すなわち、感覚パラメータ 2 が感覚パラメータ 1 に及ぼす干渉度は、平均値グラフの横軸方向に関する格子長さの誤差の平均値で表す。また感覚パラメータ 1 が感覚パラメータ 2 に及ぼす干渉度は、縦軸方向に関する格子長さの誤差の平均値で表している。これ

を数式で表現すると、次のようになる。

$$I_1 = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 | (x_{i+1,j} - x_{i,j}) - 25.0 | \quad (8.3.1)$$

$$I_2 = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 | (y_{i,j+1} - y_{i,j}) - 25.0 | \quad (8.3.2)$$

$I_1$ 、 $I_2$ が、それぞれ感覚パラメータ1、感覚パラメータ2が受ける干渉度である。また、 $i$ 、 $j$ は格子点を数える番号であり、 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ は各格子点の座標を表している。20の数値はそれぞれ横軸方向、縦軸方向に分けた格子の辺の総数である。この干渉度の値が大きい程、感覚間の干渉が大きいことを表している。

Table 8.3.1はa)～i)の各感覚振り分け方法に対する干渉度の値を示したものである。表では、各感覚パラメータの組み合わせに対して、感覚パラメータ2が感覚パラメータ1に及ぼす干渉度と感覚パラメータ1が感覚パラメータ2に及ぼす干渉度を示してある。この表から一般的傾向としては、色相、明度、彩度等の視覚内のパラメータにデータを振り分ける場合には、干渉が大きく、ほとんど感覚パラメータ間の分離ができていないことがわかる。これに対して視覚、聴覚、風覚と感覚を分けてデータを振り分ける場合には、干渉度は小さい値を示している。また聴覚内のパラメータに振り分ける場合には、音の高さに関しては干渉が小さいが、音の大きさに関しては前述の等感曲線の理由から、やや大きい干渉の値を示している。

感覚を分ける場合の感覚パラメータの組み合わせとしては、色（RGBのG→R）と音の高さの組み合わせが最も干渉が小さく、音の大きさと風の強さという組み合わせが最も干渉が大きいことがわかる。この原因としては、音の大きさと風の強さという感覚パラメータがともに“大きさ”に関する感覚量でありながら、別々な情報を表しているというところに原因が考えられる。人間の感覚には、前述したように大きさに関する感覚と種類に関する感覚とが存在する。例えばここで用いている感覚では、色や音の高さは種類に関する感覚であるが、音の大きさ、風の強さは大きさに関する感覚である。種類に関する感覚の場合には、色と音の高さでは全く別の感覚の種類を表しているため、干渉は起こらない。しかし大きさに関する感覚の場合には、音の大きさと風の強さは別の感覚であっても同じ大きさを表現しているため、相互に干渉が起きていると考えることができる。

以上の結果をまとめると、データ相互間の関係を提示する場合には、できるだけ干渉度が小さい感覚パラメータの組み合わせを選択するべきであると言えることができる。例えば、色と音の高さ等の組み合わせは好ましいが、音の大きさと風の強さ等の組み合わせはあまり好ましくない。Table 8.3.2は各感覚パラメータについて、同時に利用する感覚を干渉度の小さいものから順に並べて表したものである。データ相互間の関係を提示するという目的で多感覚を利用する場合には、この表に示されたマップをもとに、利用感覚を選択することができる。



Table 8.3.1 各感覚振り分け方法による干渉度

	感覚パラメータ1	感覚パラメータ2	感覚パラメータ2が 感覚パラメータ1に 及ぼす干渉度	感覚パラメータ1が 感覚パラメータ2に 及ぼす干渉度
a)	色相	明度	10.91	12.06
b)	色相	彩度	9.69	11.72
c)	明度	彩度	10.21	15.80
d)	音の大きさ	音の高さ	5.24	2.90
e)	色	音の大きさ	3.40	3.61
f)	色	音の高さ	1.58	3.33
g)	色	風の強さ	3.95	2.91
h)	音の大きさ	風の強さ	5.86	5.98
i)	音の高さ	風の強さ	4.89	3.70

Table 8.3.2 各感覚パラメータに対する干渉度のマップ

感覚パラメータ	同時に用いる感覚パラメータ (干渉度)		
色相	彩度 (9.69)	明度 (10.91)	
明度	彩度 (10.21)	色相 (12.06)	
彩度	色相 (11.72)	明度 (15.80)	
色	音の高さ (1.58)	音の大きさ (3.40)	風の強さ (3.95)
音の大きさ	色 (3.61)	音の高さ (5.24)	風の強さ (5.86)
音の高さ	音の大きさ (2.90)	色 (3.33)	風の強さ (4.89)
風の強さ	色 (2.91)	音の高さ (3.70)	音の大きさ (5.98)

( ) は干渉の小さい組み合わせ)

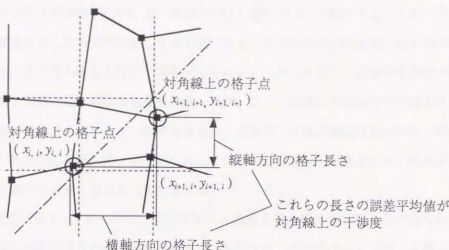


Figure 8.3.23 感覚間の統合性を表す指標

(2) 感覚統合を利用した提示を行う場合

次に、感覚統合を利用した提示を行う場合について考える。これは、単一のデータに対して複数の感覚パラメータを同時に利用することで、より精度の高いデータ提示を行おうとする利用方法である。この場合の感覚パラメータの選び方としては、利用する感覚間の干渉によって、それぞれの感覚パラメータから知覚される値にずれが生じたり、複合感覚としての感覚尺度に歪みが生じたりしないことが必要である。このような利用方法を行う場合には、2つの感覚パラメータは常に同一のデータ値を提示するため、前述の平均値グラフでは対角線上の干渉だけを考えれば良いことになる。

ここでは、感覚間の統合性を表すための指標として、Figure 8.3.23 に示すような対角線上の干渉度を用いることにする。対角線上の干渉度としては、図に示したように対角線上の格子点について、横軸方向、縦軸方向の格子長さとの誤差平均値で表すことにする。これを数式で表すと、次のようになる。

$$I_d = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^4 (| (x_{i+1,i+1} - x_{i,i}) - 25.0 | + | (y_{i+1,i+1} - y_{i,i}) - 25.0 |) \quad (8.3.3)$$

ここで、8 は平均値を求めるための対角線上の格子辺の総数であり、 $I_d$  が対角線上の干渉度である。従って、この値が小さい程、感覚間の統合性は良いことになる。

Table 8.3.3 は、a) ~ i) の各感覚振り分け方法に関する、対角線上の干渉度の値を示したものの

である。この表から、a)～c)の視覚内のパラメータに対するデータ振り分け方法では、干渉が大きく統合性も良くないことがわかる。これに対して、音の大きさと高さという聴覚内のパラメータの場合には、干渉は小さく統合性が良い。また感覚を分ける使い方は、一般に干渉が小さいために統合性も良く、感覚統合としての利用に対してでも有効であることがわかる。例えば、色と音の高さという組み合わせは、ここでも最も小さい干渉を示している。しかしながら、全体の干渉度が最も大きかった音の大きさと風の強さの組み合わせに関しては、ここでは逆に非常に小さい値を示している。これは、前述の考え方からすると、両者はともに“大きさ”を表す感覚であるため、異なるデータに対しては干渉を起こすが、同一データに対して2つの感覚を用いる場合には、それぞれが統合し合い効果的に働いていると考えることができる。

Table 8.3.4は、各感覚パラメータについて、同時に用いる感覚を統合性の良い順に並べたものである。この表から、例えば色によるデータ提示を行っている場合に、音の高さによるデータ提示を加えることは効果的であるが、音の大きさによるデータ提示を加えることはあまり効果的ではないことがわかる。あるいは風の強さによるデータ提示を行っている場合に、音の大きさのデータ提示を加えることは効果的であるが、色や音の高さによるデータ提示を加えることはあまり効果的ではないことがわかる。このように感覚統合を利用した提示を行う場合には、この表に示されたマップを統合性に関する指標として利用することができる。

### (3) 複合イメージを利用した提示を行う場合

多感覚を利用したデータの提示方法としては、もう一つ複合イメージを利用した提示を行う場合がある。これは、複数のデータを複数の感覚パラメータに振り分けることによって、全体の複合感覚から得られる複合イメージとしてデータ提示を行う方法である。このような目的で複数の感覚パラメータを用いる場合には、感覚間の干渉や分離性の悪さはそれほど大きな問題ではない。多感覚による複合イメージを与えるためには、むしろ感覚間の分離性は低い方が望ましいと考えられる。感覚間の干渉が小さく分離性が高い場合には、複合刺激としてではなく、別々の複数の感覚刺激として感じられてしまうが、感覚間の干渉が大きく分離性が低い場合には、刺激は1つの感覚として複合イメージを作りやすい。

そのため、利用する感覚パラメータとしては、基本的には感覚を分けるよりも同一感覚内のパラメータを用いる方が有効であると考えられる。例えば、視覚内の複数のパラメータを用いる場合には、全体として融合された1つの色として認識を行うことができる。また聴覚内の複数のパラメータを用いる場合にも、全体として融合された1つの音としての認識を行うことができる。これに対して複数の感覚に分ける場合には、2つの感覚刺激の融合性は低く、別々の2つの刺激として感じら

Table 8.3.3 各感覚振り分け方法による対角線上の干渉度

	感覚パラメータ1	感覚パラメータ2	対角線上の干渉度
a)	色相	明度	8.56
b)	色相	彩度	12.16
c)	明度	彩度	13.70
d)	音の大きさ	音の高さ	2.81
e)	色	音の大きさ	3.56
f)	色	音の高さ	2.15
g)	色	風の強さ	3.56
h)	音の大きさ	風の強さ	2.53
i)	音の高さ	風の強さ	3.63

Table 8.3.4 各感覚パラメータに対する統合性のマップ

感覚パラメータ	統合に用いる感覚パラメータ (対角線上の干渉度)		
色相	明度 (8.56)	彩度 (12.16)	
	色相 (8.56)	彩度 (13.70)	
	色相 (12.16)	明度 (13.70)	
色	音の高さ (2.15)	音の大きさ (3.56)	風の強さ (3.56)
音の大きさ	風の強さ (2.53)	音の高さ (2.81)	色 (3.56)
音の高さ	色 (2.15)	音の大きさ (2.81)	風の強さ (3.63)
風の強さ	音の大きさ (2.53)	色 (3.56)	音の高さ (3.63)

( は統合効果の高い組み合わせ)

れてしまう可能性が高くなる。しかしながら、このような感覚を分ける場合でも、感覚パラメータの使い方によっては、複合イメージの構築を行うことは可能である。例えば、「音色」という言葉が存在するように、音と色とは非常に関係の深い感覚である。また風と音という組み合わせに関しても、実際の風の音等をイメージすることによって、複合イメージを構築することは可能である。しかしながらこれらの利用方法では、多分に人間側の感性や提示データに関する意味等が関与してることが考えられる。

ここでは、複合イメージを利用する場合に、感覚間の干渉としてどのような点に注意するべきかという問題について考えることにする。一般に、複合イメージを利用する目的は、複合刺激の中から個々の感覚パラメータの値を読み取るのではなく、複数のデータから構成される状態を他の状態と識別することが目的とされる場合が多い。例えば、複数のデータ項目を含むデータ空間の中から、ある条件を満たす部分を探索したり、どれかのデータ値に異常が発生しないかどうか監視を行う等の場合には、複合イメージとしての識別や変化の認識が要求される。このような利用目的の場合には、各感覚パラメータの分離性は低くても構わないが、複合データとして他の状態と明確に分離できることが必要である。すなわち、前述の平均値グラフ上で考えると、格子形状は変形していても構わないが、格子がつぶれずに大きな面積を保っていることが必要であると考えられる。格子がつぶれ面積が小さいということは、各データ値が大きく変化しても複合イメージとしての変化が小さいことを意味している。反対に格子が大きい面積を保っていれば、各データ値の変化が複合イメージとしても大きな変化として認識されることを意味している。従って、複合イメージを利用した提示を行う場合には、探索や監視用の複合イメージとして、できるだけ格子面積が大きい部分を利用するべきであると言うことができる。

Figure 8.3.24 ~ Figure 8.3.27 は、視覚あるいは聴覚内の感覚パラメータを用いた場合について、格子面積が大きい部分を示したものである。この図から聴覚を用いる場合には、格子形状がしっかりしているため、どの部分を用いてもあまり問題はない。しかしながら視覚を用いる場合には、格子形状がかなり乱れているため、複合イメージとして利用できる部分はかなり制限を受けることが示されている。例えば Figure 8.3.25 の色相と彩度を用いる場合には、色相が赤に近く彩度が小さい部分、あるいは色相が緑に近く彩度が大きい部分では格子面積が大きい。反対に、色相が赤に近く彩度が大きい部分、あるいは色相が緑に近く彩度が小さい部分では格子がつぶれて格子面積は小さくなっている。そのため複合イメージとして利用可能な部分は、この中の格子面積が大きい部分に制限される。

そのため、色相と彩度を用いて複合イメージの提示を行う場合に、一方が大きい値で他方が小さい値という場合には、このままで利用することができるが、両方とも大きい値あるいは両方とも小



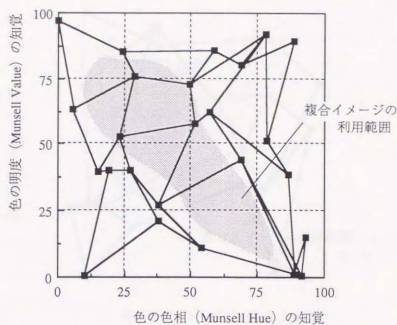


Figure 8.3.24 色の色相と明度による複合イメージの利用範囲

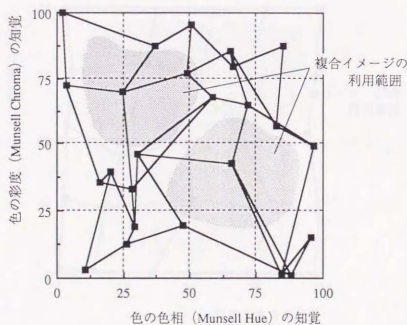


Figure 8.3.25 色の色相と彩度による複合イメージの利用範囲

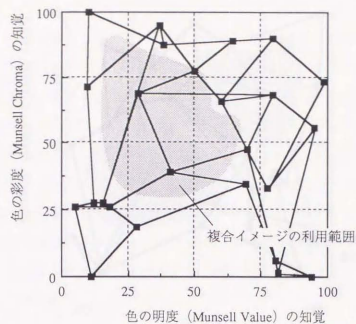


Figure 8.3.26 色の明度と彩度による複合イメージの利用範囲

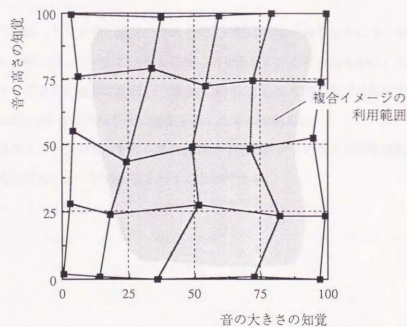


Figure 8.3.27 音の大きさと高さによる複合イメージの利用範囲

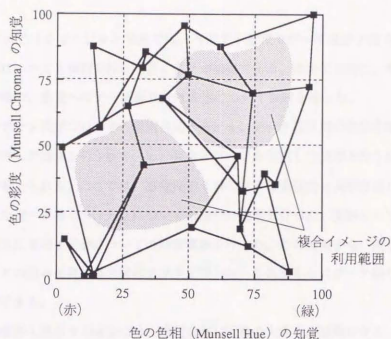


Figure 8.3.28 色相を反転させた場合の色の色相と彩度による複合イメージの利用領域

さい値を表す場合には、データ値と感覚パラメータとの対応スケールを変えたり、反転させる等の工夫が必要になる。例えば、データと色相との使い方を覚えて、小さい値を赤に、大きい値を緑に対応させることで、グラフの形状は反転し、複合イメージとしても逆の部分を利用できることになる。Figure 8.3.28 はこのような反転させた様子を示したものである。

このように、複合イメージの提示を行う場合には、平均値グラフの格子面積を指標として利用することで、効果的な複合イメージの選択を行うことができる。

## 8.4 本章のまとめ

データ・センシュアライゼーション手法では、利用する感覚やデータ提示方法が多様になるため、その利用方法についても検討を行っておく必要がある。本章では特に、多感覚を用いたデータ提示を行う際の、感覚へのデータ振り分け方法について検討を行った。

多感覚を用いたデータ提示では、その利用目的から、a) データ相互間の関係を提示する場合、b) 感覚統合を利用した提示を行う場合、c) 複合イメージを利用した提示を行う場合、という3通りの利用方法が考えられる。ここでは、感覚間の干渉に関する基礎的な実験を通して、これらの各利用目的に応じたデータ振り分け方法についての指標の提案を行った。実験としては、2つの感覚パラメータが相互に及ぼす干渉についての計測実験を行った。この結果から、提示されたデータと知覚されたデータの歪みを表す格子状のグラフが得られ、これをもとにデータ振り分け方法の指標を考えることができる。

データ相互間の関係を提示する場合には、感覚全体の干渉の大きさが問題になる。この場合は、格子グラフ全体の歪み量を感覚間の干渉度として利用することができる。ここでは計測結果をもとに、感覚間の干渉度を表すマップの作成を行った。一般的な傾向としては、視覚内のパラメータ等にデータを振り分ける場合には干渉が大きいのが、感覚を分けてデータを振り分ける場合には干渉が小さいことが等が定量的に示された。

また、感覚統合を利用したデータ提示を行う場合には、複数の感覚パラメータによって同一のデータを提示する。この場合は、格子グラフの対角線上の干渉度を統合性の指標として利用することができる。ここでも前述の計測結果をもとに、感覚間の統合性を表すマップの作成を行った。感覚としては、大きさを表す感覚と種類を表す感覚が存在するが、大きさを表す感覚どうしを別のデータ提示に利用すると干渉が大きく好ましくないが、同一のデータ提示に利用する場合には統合性が良く、有効な方法であることが等がわかった。

また、複合イメージを利用したデータ提示では、1つの感覚イメージとして認識しやすいように、基本的には感覚を分けずに、視覚内、あるいは聴覚内のパラメータにデータを振り分ける方が望ましい。この場合、データの変化が複合イメージの変化として認識されるためには、格子グラフ上で面積が大きい部分のデータを利用するべきである。このことから、複合イメージの利用に対しては、格子グラフの面積を1つの指標として利用できることが示された。

## 展望および考察



以上、本研究では、多感覚を用いた能動的データ提示手法であるデータ・センシュアライゼーションの提案を行い、プロトタイプ作成、およびその効果と利用方法についての検討を行った。本章では最後に展望および考察として、データ・センシュアライゼーションの今後の発展の方向性等について考えられることを述べておく。

## 9.1 データ・センシュアライゼーションの利用レベル

本研究では、データ・センシュアライゼーションのプロトタイプとして、視覚、聴覚、触覚の基本的な感覚を利用したデータ提示環境の実現を行ったが、データ・センシュアライゼーションの利用方法としては幾つかの利用レベルが考えられる。以下、各利用レベルについて説明する。

### (1) 数値データの提示ツール

まず最も基礎的な利用方法として、数値データを提示するためのツールとして利用する方法がある。これは、対象とする数値データを視覚や聴覚等の感覚を用いて提示する方法であり、あくまでも数値としてのデータの値や変化を提示することを目的とし、提示データの内容に関しては考慮していない場合である。従って、データの物理的内容と利用感覚との間には特別な意味は存在していない。このような提示方法は、例えば流体における流れ関数、渦度関数等のように、感覚としての実体がない抽象的なデータを提示する場合には避けることができない。このような目的で利用する場合には、視覚、聴覚、触覚等の基本的なディスプレイ装置が装備されていれば十分であると考えられる。

### (2) 仮想現象シミュレーション

次に(1)の利用方法とは対極をなすものとして、現象そのものを完全にシミュレートしようとする方向が考えられる。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のプロトタイプでは、ディスプレイとして視覚、聴覚、触覚(風覚)という基本的な感覚ディスプレイしか備えていないが、これを人間の全ての感覚に拡張していこうという考え方である。人間の持つその他の感覚としては、3.1節で整理を行ったように、例えば温覚、冷覚、力覚、平衡感覚等の利用があげられる。ディスプレイとしてこれら全ての感覚を利用することができれば、シミュレーションとしては現象そのものを完全に仮想化して提示することができる。このような真の“仮想現象シミュレーション”を実現することは、従来の実験的手法を完全に計算機上で再現することを意味している。

### (3) 物理的メタファの利用

また3つめの方向としては、上記2つの中間的な利用方法が考えられる。シミュレーション技術

としては、(2)のように物理的な現象を完全に再現することは、究極のシミュレーションとして非常に大きな価値がある。しかしながら、実際の問題では、例えば航空機まわりの空気の流れのように、データの値をそのままのスケールで人間に提示することは不可能な場合が多い。しかしこのような場合においても、データを現象とは無関係な感覚で提示するよりは、空気の流れは風覚でというように物理的なメタファを利用したデータの提示を行う方がはるかに現象の理解は容易になることが考えられる。当然、上記のような例では、スケールの人間が知覚可能な大きさにデータ値をスケールダウンすること等が必要になるが、このような物理的なメタファを利用したデータの認識を行えることが、データ・センシュアライゼーションの持つ大きな利点として考えることができる。

## 9.2 CAD/CAEへの応用

本論文の中では、データ・センシュアライゼーションとして、主に数値シミュレーション結果として得られるデータ提示の問題に限って議論を行ってきた。本節では、データ・センシュアライゼーションの応用として、CAD/CAEを用いた設計工程への応用について考える。

設計を行う場合、その工程では、形状の決定や解析シミュレーション等が繰り返し行われるが、これらの各工程では現在、CAD (Computer Aided Design)、CAE (Computer Aided Engineering) 等の計算機の利用が行われている。このような計算機の利用環境は、ビジュアルライゼーション技術に基づいた統合化を行うことによって、ビジュアル CAE としての発達が進められている [Matsunaga-92]。さらに、本研究で提案を行うデータ・センシュアライゼーションを応用すると、このような設計作業は、全て3次元的な仮想環境の中で実行されることが期待される [Ogi92c]。

解析シミュレーション結果の提示に関しては、本論文で示したデータ提示方法を利用することができ、形状の決定や解析モデルの作成段階等においては、幾何学的な形状データに対するディスプレイ装置が必要とされる。このような形状データに対する触覚装置としては、2.2節でサーベイを行ったように、現在種々の方法が提案されている。そのため、これらの触覚ディスプレイ装置等を組み合わせることによって、データ・センシュアライゼーションを応用した統合化されたCAD/CAE環境を実現することが可能になる。

ここでは、例として広田等によって開発された触覚ディスプレイ [Hirota92] を取り入れた統合化環境について示す。この触覚ディスプレイは、接触板を利用する方式によって、3次元形状を自由に触ることを可能にしている。また、このディスプレイ環境では仮想的な電子粘土の要領で、3次

元的な形状の変形、作成を行うことも可能である [Hirose93b]。Figure 9.2.1、Figure 9.2.2 は、例として翼の設計という一連の作業工程への応用を示したものである。Figure 9.2.1 では、設計中の翼の形状を触覚ディスプレイを用いて触って確かめているところである。翼形状等の微妙な曲線の変化は視覚だけでは違いが分かりにくい、触覚を同時に用いることで形状の変化等が容易に認識されることが期待される。また Figure 9.2.2 は、決定された翼形状まわりの空気の流れを風覚ディスプレイを用いて確認しているところである。このような解析計算によって得られる数値データに対しては、本研究で示しているデータ・センシュアライゼーション手法をそのまま利用することができる。

このように、人工現実感技術を応用したデータ・センシュアライゼーション環境を設計工程へ応用することによって、形状の決定、解析シミュレーション、計算結果の提示等の一連の設計作業を統合化された仮想環境の中で実現することができる。この仮想環境の中では、設計されたモデルに対して、3次元空間の中で見て、触り、確かめるという多感覚を利用した能動的作業が実現されることが期待される。

### 9.3 プレゼンテーションとしての利用

本節では最後に、データ・センシュアライゼーションの目的について考える。現在行われているデータ・ビジュアルライゼーションは、大きく2つの利用目的で使われている。1つは現象理解のための利用であり、もう1つはプレゼンテーションのための利用である [Tamura89]。現象理解のためのデータ提示は、研究者自身がよくわかっていない現象を理解するために行う提示である。これに対して、プレゼンテーションのためのデータ提示は、すでに明らかなデータや現象を他人に説明するために行う提示である。

本論文でこれまでに行ってきたデータ・センシュアライゼーションは、主に現象理解のための利用方法について検討を行ってきた。ここでは、もう1つの利用方法であるプレゼンテーションとしての利用可能性について検討を行う。

データ・センシュアライゼーション手法を用いたプレゼンテーションでは、まず個人利用であるという点の特徴としてあげられる。視覚化だけによるデータ・ビジュアルライゼーションの場合には、一度に大勢の人間に対して情報の提示を行うことができる。しかしながら、データ・センシュアライゼーションの場合には、HMD、ヘッドフォン、あるいは風覚ディスプレイ等の特殊なデバイスの利用が前提となるため、大勢の人間が同時に利用することはできない。しかしながら、このよ



Figure 9.2.1 触覚ディスプレイを用いた翼の形状設計

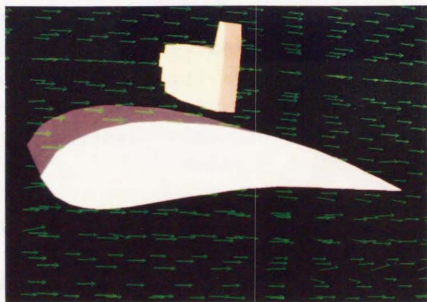


Figure 9.2.2 風覚ディスプレイによる翼まわりのデータ提示



うな個人利用であることは、逆に利用者の自由な探索が可能であるという利点としても考えられる。

またプレゼンテーションにおいては、何を提示するかという内容の設定が問題になる。従来のデータ・ビジュアライゼーションでは、画像を作成する側の意思によって、視点の設定や情報の強調等を行うことができた。しかしながら、データ・センシュアライゼーションでは、利用者の自由な探索行動が基本となるため、提示される内容は利用者の行動によって決められる。またこのような自由がないと、データ・センシュアライゼーションとしての効果も期待することはできない。データ・センシュアライゼーションをプレゼンテーションに利用するためには、このような矛盾した問題を解決することが必要になる。

このような問題に対する解決方法としては、シナリオの設定という考え方があげられる[Laure91]。すなわち、各場面では利用者の能動性や自由な探索行動を保ちながらも、全体的な流れとしてのシナリオを設計するという方法である。このような考え方は、ゲームの分野におけるロール・プレイング・ゲームの手法等を参考にすることができる。データ提示におけるシナリオの設定としては、例えば、利用感覚の選択、データ提示方法の選択、あるいはデータ空間内の移動、データの拡大／縮小等の動作をあらかじめ決めておくことが考えられる。

従来のデータ・ビジュアライゼーションでは、どのような画像を作成するかによってプレゼンテーション効果が決められたが、データ・センシュアライゼーションの場合には、どのようなシナリオを作成するかがプレゼンテーションの効果を定めることが予想される。そのため、データ・センシュアライゼーションをプレゼンテーションに利用するためには、このようなシナリオの設計が重要な問題となる。データ提示におけるシナリオと利用者の能動的探索とがうまく噛み合うことによって、データ・センシュアライゼーションはプレゼンテーション・ツールとしても非常に強力な道具になり得ることが期待される。

## 9.4 ビジュアライゼーションのあり方

本節では最後に、ビジュアライゼーションのあり方について、考えをまとめておく。本研究では、データ・センシュアライゼーションと称して、多感覚を用いた能動的データ提示手法の提案を行ってきた。このようなデータ提示方法は、従来のデータ・ビジュアライゼーションと比較すると、人間と計算機との関係において大きな違いが見られる。

これまでに行われてきたビジュアライゼーションでは、情報の提示は、計算機から人間へという

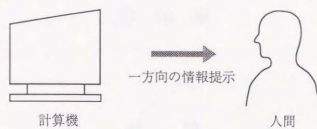


一方向的な流れで行われていた。すなわち、情報の発信はもっぱら計算機の役割であり、人間は受動的にそれを受けとめるという形態である。このような情報提示の形態では、効果的なデータ提示を行うためには、どのような画像を生成するかということに全ての関心が払われる。またこの場合、計算機から人間に伝達される情報量、あるいは情報の精度は、提示される情報自体によって固定的に決められているという考え方が行われる。

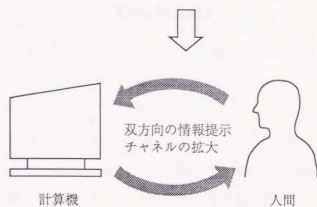
これに対して、本研究で提案を行っているデータ提示方法では、まず人間と計算機との間の双方向的なインタラクションを情報伝達の基本的な形態として考えている。すなわち、情報は計算機から人間に対して一方的に提示されるのではなく、人間から計算機への働きかけ等の相互のインタラクションを通して情報の提示が行われるという考え方である。先述したデータ・センシュアライゼーションの持つ特徴としては、能動的なデータ提示という側面がこれにあたる。この場合、提示される情報は、人間の状態や反応に応じて柔軟な変化を加えることができ、人間の認識、理解にとって効果的な情報の提示が行われることが期待される。またこの場合は、伝達される情報量、情報の精度に関しても、情報自体に依存する固定的なものではなく、人間と計算機との相互作用によって決定されるという考え方ができる。

またさらに、本研究で提案を行うデータ提示方法では、情報伝達のチャネルそのものを拡大しようという考え方をとっている。これは、データ・センシュアライゼーションの持つ多感覚という側面である。すなわち、視覚だけを用了データ提示ではなく、視覚、聴覚、触覚等の多感覚を用いてデータの提示を行う。また、人間から計算機に対する働きかけにおいても、深部感覚等を利用した方法により、情報伝達のチャネルを拡大しようという方法である。

Figure 9.4.1 は、以上のビジュアルイゼーションの形態を概念的に図示したものである。(a) は従来のビジュアルイゼーションを示したものであり、計算機から人間へと一方向的に情報が提示されている。これに対して (b) は本研究で提案を行っているビジュアルイゼーションのあり方、すなわちデータ・センシュアライゼーションの形態を示したものであり、人間と計算機とが双方向的なインタラクションを持ち、かつ幅広いチャネルを通した情報の提示が行われることを示している。すなわち本研究では、今後のビジュアルイゼーションのあり方として、(b) に示す形態のデータ提示が必要であり、かつ有効であるということを主張するものであるが、前章までの内容により、以上の目的は達成されたと考えられる。



(a) 従来のビジュアライゼーションの形態



(b) 本研究で提案するビジュアライゼーションのあり方

Figure 9.4.1 ビジュアライゼーションの形態

「本邦の政治は、憲法に於てその根本を有し、憲法に於てその精神を有する」との原則が示されてゐる。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。

「憲法に於ては、人民の権利を保障するの目的を有する」との原則が示されてゐる。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。

## 第 10 章

## 結 論

## Conclusions

「第一、憲法は、国家の根本法である」との原則が示されてゐる。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。

「第二、憲法は、人民の権利を保障するの目的を有する」との原則が示されてゐる。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。

「第三、憲法は、国家の根本法である」との原則が示されてゐる。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。この原則が、この憲法の根本をなす。この原則が、この憲法の精神をなす。

本研究では、科学技術データの提示に対して、多感覚を用いた能動的データ提示手法であるデータ・センシュアライゼーションの提案を行い、プロトタイプを試作、あるいはデータ提示効果や利用方法についての検討を行った。以下、本研究で得られた知見について総括を行う。

第2章では、人工現実感技術を応用したデータ・センシュアライゼーションの提案を行った。データ・センシュアライゼーションでは、1) 多感覚を利用したデータ提示、2) 3次元空間の中での能動的データ提示、を行うことが特徴としてあげられる。すなわちこの方法では、従来の視覚だけをを用いたデータ提示ではなく、視覚、聴覚、触覚等の多感覚を利用し、3次元空間の中でのインタラクティブな能動的データ提示を行うことを目指している。

第3章では、人間の感覚について整理を行い、データ・センシュアライゼーションに対する各感覚パラメータの利用可能性についての検討を行った。その結果、本研究では人間の感覚の中で最も基本的な感覚である、視覚、聴覚、触覚を利用したデータ提示を行うことにした。また、各感覚の利用にあたっては、刺激量ではなく感覚量によるデータ提示が必要なこと、あるいは立体視、音像定位等の3次元感覚情報の利用が必要であること等を指摘した。

第4章では、本研究で利用する各種感覚ディスプレイ装置について説明を行った。各種感覚ディスプレイとしては、3次元空間の中でのデータ提示が可能であることが要求される。視覚ディスプレイとしては、HMDや、手で持つことで空間内を移動できる試作したハンディモニタ等を用いている。聴覚ディスプレイとしては、3次元空間内での音像定位が可能なConvolutronを利用している。このシステムは頭部伝達関数を利用した音像定位を実現しており、定位精度に関してもある程度の精度が確認された。また触覚ディスプレイとしては、風を利用して触覚的なデータ提示を行う風覚ディスプレイの開発を行った。風覚ディスプレイは風の大きさ、方向を利用することによって、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。また、データの知覚実験を行った結果、データ提示用のディスプレイ装置として十分に利用可能であると判断された。

第5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った。このデータ・センシュアライゼーション環境で実行できる各種のデータ提示方法は、データ・センシュアライゼーション・ツールのソフトウェア機能として実現されている。ここでは、データ・センシュアライゼーション特有の各種のデータ提示方法について説明を行い、具体的な応用例として、構造解析データ、流体解析データの提示に

対する利用方法を示した。

第6章と第7章では、本研究で提案を行ったデータ・センシュアライゼーション手法の効果について検討を行った。まず第6章は、情報の伝達精度の問題を取り上げた。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させる方法について検討を行った。ディスプレイ側の誤差要因としては、刺激パラメータの選択、刺激-感覚量の非線形性等があげられる。これらの要因については、ディスプレイの尺度補正を行うことによってある程度減少させることができる。具体的な方法としては、提示される刺激と人間が受ける感覚量の関係を実験的に計測し、その結果を補正テーブルとして利用する方法を用いている。また、人間側の誤差としては、判断のばらつき、錯覚等が存在する。これらの誤差要因については、多感覚を同時に用いたデータ提示方法を行うことによって、誤差が減少されることが実験によって示された。すなわち、視覚、聴覚、風覚等を単体で用いる場合に比べて、視覚+聴覚、視覚+風覚、聴覚+風覚と2つの感覚を同時に用いる方法、さらに視覚+聴覚+風覚と3つの感覚を同時に用いる方法の方が、情報の伝達精度が向上されることが確認された。このような多感覚を用いたデータ提示方法は、単に情報量を増大するだけではなく、人間にとって感覚統合の効果を引き起こすことが期待される。

第7章では、データ・センシュアライゼーションの2つめの効果として、3次元的なポリウムデータの認識効率について検討を行った。3次元ポリウムデータの認識にとっては、3次元空間の中での深部感覚を利用した能動的データ提示方法が有効であると考えられる。ここでは、人間とデータ空間との関係を内界データと外界データとに分けて、それぞれ幾つかの能動的データ提示方法の提案を行い、その有効性について検証を行った。内界データの場合には、腕の動き、あるいは頭の動きに基づいた深部感覚の利用が考えられる。このような深部感覚を利用したデータ提示方法としては、データプレート、ハンディモニタ等の利用が考えられる。ここでは、これらの方法を用いたデータの認識実験を行い、その有効性を確認した。また外界データの場合には、補助的な手段によって位置情報の提示を行うことが必要である。ここでは、音源配置による位置情報提示という、聴覚に基づいた深部感覚の利用方法について実験を行い、その有効性を確認した。

第8章では、データ・センシュアライゼーションの利用方法について検討を行った。ここでは特に、複数のデータをどの感覚に振り分けて提示を行うべきかという、多感覚へのデータ振り分け方法に対する指標の提案を行った。多感覚の利用方法としては、1) データ相互間の関係の提示、2) 感覚統合を利用した提示、3) 複合イメージを利用した提示、等の目的が考えられる。ここで



は、これらの各利用目的に対して、感覚間の干渉をもとに指標の導入を行った。具体的には、感覚間の干渉に関する基礎実験を行い、その結果から感覚間の干渉度を表すマップの作成を行った。このマップを利用することによって、多感覚への最適なデータの振り分けを行うことができる。

第9章では、本研究で提案を行ったデータ・センシュアライゼーションの今後の発展の方向性等について考察を行った。

## 参考文献

- [Aiba70] 相場：Stevens の新精神物理学，講座心理学第4巻知覚（大山編），第8章，東京大学出版会，pp.261-287, 1970
- [Akamatsu91] 赤松，佐藤：マルチモーダル統合型マウスの開発－触覚・力覚情報表示装置を内蔵したマウス型装置，第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集，pp.397-400, 1991
- [Akamatsu92] 赤松，佐藤，高橋：マルチモーダルマウスを用いた触覚テキストチャ－表示，第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集，pp.101-104, 1992
- [Amari91] 甘利，名井，小池，廣瀬，石井：仮想現実感環境を利用した制御用ソフトウェアの設計・解析支援，第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集，pp.215-220, 1991
- [Bajura92] M. Bajura, H. Fuchs, R. Ohbuchi：Merging Virtual Objects with the Real World - Seeing Ultra-sound Imagery within the Patient, *Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.203-210, 1992
- [Blauert86] J. Blauert, 森本，後藤：空間音響，鹿島出版会，1986
- [Brooks86] F. P. Brooks：Walkthrough - A Dynamic Graphics System for Simulating Virtual Building, *Proc. of 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, pp.9-21, 1986
- [Brooks90] F. P. Brooks, M. Ouh-Young, J. J. Batter, P. J. Kilpatrick：Project GROPE - Haptic Displays for Scientific Visualization, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.177-185, 1990
- [Bryson90] S. Bryson, S. S. Fisher：Defining, Modeling, and Measuring System Lag in Virtual Environments, *Proc. of SPIE Conference on Stereoscopic Display and Applications*, pp.98-109, 1990
- [Bryson91] S. Bryson, C. Levit：A Virtual Environment for the Exploration of Three Dimensional Steady Flows, *International Conference on Artificial Reality and Tele-existence (ICAT'91)*, pp.15-23, 1991
- [Bryson92a] S. Bryson, C. Levit：The Virtual Wind Tunnel, *IEEE Computer Graphics and Applications*, July, pp.25-34, 1992
- [Bryson92b] S. Bryson：Virtual Environments in Scientific Visualization, *International Conference on Artificial Reality and Tele-existence (ICAT'92)*, pp.99-116, 1992
- [Bryson93] S. Bryson：The Virtual Windtunnel - A High-Performance Virtual Reality Application, *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'93)*, pp.20-26, 1993
- [Crystal90] Crystal River Engineering Inc.：The Convolvotron Documentation Release 1.2, 1990
- [Ellis91] S. R. Ellis, S. Smith, A. Grunwald, M. W. McGreevy：Direction Judgement Error in Computer Generated Display and Actual Scenes, *Pictorial Communication in Virtual and Real Environments*

- (Edited by S. R. Ellis), Taylor & Francis, pp.504-526, 1991
- [Enomoto91] 榎本, 澤田, 野村: 3次元位置計測システムの誤差補正による仮想世界と実世界の一致, 第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.191-197, 1991
- [Feiner90] S. Feiner, C. Beshers: Visualizing n-Dimensional Virtual Worlds with n-Vision, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.37-38, 1990
- [Fisher86] S. Fisher, M. McGreevy, J. Humphries, W. Robinett: Virtual Environment Display System, *ACM 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*, pp.23-34, 1986
- [Fujii92] 藤井: 科学技術におけるビジュアライゼーションの動向, *PIXEL*, No.116, pp.21-27, 1992
- [Fujishiro93] 藤代, 茅, 國井: ボクセル指向3次元データ表現とその表示技術, 情報処理, Vol.34, No.3, pp.285-297, 1993
- [Fukui90] 福井, 下条: なぞり動作による仮想形状のうねり検出特性, 第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.31-34, 1990
- [Gaver91] W. W. Gaver, R. B. Smith, T. O'Shea: Effective Sounds in Complex Systems - The ARKola Simulation, *Human Factors in Computing Systems (CHI 91 Conference Proc.)*, pp.85-90, 1991
- [Harrington87] S. Harrington: *Computer Graphics - A Programming Approach*, McGraw-Hill Inc., 1987  
(邦訳) 郡山: アルゴリズムとプログラムによるコンピュータグラフィックス, マグロウヒル出版, 1988
- [Hatori91] 服部: 人工現実感の世界, 工業調査会, 1991
- [Helsel91] S. K. Helsel, J. P. Roth: *Virtual Reality - Theory, Practice, and Promise*, Meckler Publishing, 1991 (邦訳) 廣瀬: パーチャル・リアリティー理論、実践、展望, 海文堂, 1992
- [Herr89] L. Herr: Volume Visualization - State of the Art, *ACM SIGGRAPH Video Review Issue 44*, 1989
- [Hirata90] 平田, 佐藤, 河原田: 仮想空間における直接操作のための知覚サイクルの形成, 第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.15-19, 1990
- [Hirose90a] M. Hirose, T. Myoi, K. Inamura, L. Stark: Visual 3D Virtual Environment for Control Software, *Proc. of Engineering Foundation Conf. on Human Interface for Teleoperator and Virtual Environments*, pp.120-124, 1990
- [Hirose90b] 廣瀬, 木島, 佐藤, 石井: シースルー型HMDを用いた仮想空間による実世界の修飾の研究, 第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.1-8, 1990
- [Hirose93a] 廣瀬: パーチャル・リアリティ, 産業図書, 1993
- [Hirose93b] 廣瀬, 齋藤, 広田: 触覚ディスプレイの立体形状作成への応用, 第3回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.930-27, pp.285-288, 1993

- [Hirota92] 広田, 廣瀬: 仮想触覚環境の開発, 第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.17-22, 1992
- [Hirota93] 広田, 廣瀬: 面提示型デバイスを利用した触覚表現手法, 第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.447-452, 1993
- [Hiwatashi87] 樋渡: 視聴覚情報概論, 昭晃堂, 1987
- [Iwata90] H. Iwata: Artificial Reality with Force-feedback - Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.165-170, 1990
- [Iwata93a] H. Iwata, H. Noma: Volume Haptization, *Proc. of IEEE Visualization 93*, 1993
- [Iwata93b] 岩田, 藤尾, ウォークスルー・シミュレータにおける動歩行の実現と解析, *Human Interface News and Report*, Vol.8, No.2, pp.199-204, 1993
- [Kalawsky93] R. S. Kalawsky: *The Science of Virtual Reality and Virtual Environments*, Addison-Wesley Publishing Company, 1993
- [Katayama90] 片山, 川人: 視覚、体性感覚と運動司令を統合する神経回路モデル, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.6, pp.757-765, 1990
- [Kaufman90] A. Kaufman, R. Yagel, R. Bakalash: Direct Interaction with a 3D Volumetric Environment, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.33-34, 1990
- [Kaufman91] A. Kaufman: Introduction to Volume Visualization, *Volume Visualization (Ed. A. Kaufman)*, Ch.1, IEEE Computer Science Press, 1991 (邦訳) 藤代: ボリューム・ビジュアライゼーション概論, *PIXEL*, No.116, pp.146-157, 1992
- [Kijima91a] 木島, 廣瀬: 空間生成精度の Virtual Science - 仮想空間が持つ時間遅れの影響を中心として, *Human Interface News and Report*, Vol.6, No.2, pp.140-145, 1991
- [Kijima91b] 木島, 廣瀬: 人工現実感の研究 - 仮想空間エディタ Vis-Edit の開発, 第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.187-190, 1991
- [Krueger90] M. W. Krueger, *Artificial Reality II*, Addison Wesley, 1990 (邦訳) 下野: 人工現実 - インタラクティブ・メディアの展開, トッパン, 1991
- [Laurel91] B. Laurel: *Computers as Theatre*, Addison-Wesley, 1991 (邦訳) 遠山: 劇場としてのコンピュータ, トッパン, 1992
- [Lindsay77] P. H. Lindsay, D. A. Norman: *Human Information Processing - An Introduction to Psychology*, Academic Press, 1977 (邦訳) 中溝, 箱田, 近藤: 情報処理心理学入門 I, II, III, サイエンス社, 1984
- [MacKenzie93] I. S. MacKenzie, C. Ware: Lag as a Determinant of Human Performance in Interactive Sys-

- tems, *Human Factors in Computing Systems (INTERCHI'93 Conference Proc.)*, pp.488-493, 1993
- [Marr82] D. Marr : *Vision*, W. H. Freeman and Company, 1982 (邦訳) 乾, 安藤 : ビジョン, 産業図書, 1987
- [Majima92] 馬島, 今井, 南, 菊本 : 2CHによる3次元立体録音方式(RSS方式)について, 日本音響学会平成4年度春季研究発表会講演論文集, Vol.1, pp.481-482, 1992
- [Masuda90] 増田 : 3次元ディスプレイ, 産業図書, 1990
- [Matsunaga92] 松永 : 航空機エンジン開発とビジュアルCAE, *PIXEL*, No.116, pp.44-48, 1992
- [Minsky90] M. Minsky, M. Ouh-Young, O. Steele, F. P. Brooks, M. Behensky : Feeling and Seeing - Issues in Force Display, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.235-243, 1990
- [Misuzu91] 三鈴エリー : *MIDI Processing Unit EMU-98 ver 2.0 / EMU-IPC Guide Book*, 1991
- [Mitsuishi92] 光石, 小林, 制澤 : 聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システム, *Human Interface News and Report*, Vol.7, No.2, pp.307-312, 1992
- [Miyahara89] 宮原, 吉田 : 色データ(R,G,B)→(H,V,C)数学的変換方法, *テレビジョン学会誌*, Vol.43, No.10, pp.1129-1136, 1989
- [Myoi91] 名井, 甘利, 稲村, 小池, 葛岡, 廣瀬, 石井, 林 : 視覚表現を活用した大規模制御システムの一設計法, *電気学会論文誌C*, No.5, pp.194-201, 1991
- [Nagata77] 長田 : 視覚の奥行距離情報とその奥行感度, *テレビジョン学会誌*, Vol.31, No.8, pp.649-655, 1977
- [Nakamura79] 中村 : 共通感覚論—知の組みかえのために, 岩波現代選書27, 岩波書店, 1979
- [Nielson90] G. M. Nielson, B. Shriver : *Visualization in Scientific Computing*, IEEE Computer Society Press, 1990
- [Noma93] 野間, 岩田 : フォースディスプレイを用いた高次元ボリウムデータの力覚表現, 第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.121-128, 1993
- [Ogi92a] 小木, 廣瀬 : 風覚ディスプレイによるデータの提示, 第8回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.413-418, 1992
- [Ogi92b] 小木, 高田, 廣瀬 : 感覚ディスプレイにおけるデータの知覚精度, 第2回設計工学・システム部門講演会講演論文集, No.920-103, pp.224-229, 1992
- [Ogi92c] T. Ogi, K. Hirota, M. Hirose : Sensualization of Multi-Dimensional Data, *Computational Mechanics 92 (Proc. of ICES'92)*, pp.458, 1992
- [Ogi93a] 小木, 廣瀬 : データ・センシュアライゼーション環境の開発, *Human Interface News and Report*, Vol.8, No.2, pp.139-144, 1993



- [Ogi93b] 小本, 廣瀬: 体性感覚に基づいた能動的データ提示, 第9回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.531-538, 1993
- [Reuter90] L. H. Reuter, P. Tukey, L. T. Maloney, J. R. Pani, S. Smith: Human Perception and Visualization, *Proc. of IEEE Visualization 90*, pp.401-406, 1990
- [Rheingold91] H. Rheingold: *Virtual Reality*, Simon & Schuster, 1991 (邦訳) 沢田: バーチャル・リアリティー幻想と現実の境界が消える日, ソフトバンク, 1992
- [Robinet92] W. Robinett, J. P. Rolland: A Computational Model for the Stereoscopic Optics of a Head-Mounted Display, *PRESENCE*, Vol.1, No.1, pp.45-62, 1992
- [Robinson56] D. W. Robinson, R. S. Dadson: A Redetermination of Equal-Loudness Relations for Pure Tones, *British Journal of Applied Physics*, No.7, pp.166-181, 1956
- [Roland88] Roland: *Multi Timbral Linear Synthesizer Multi Task Sequencer D-20* オーナーズ・マニュアル, 1988
- [Saito82] 齋藤: 心理物理学的スケーリング, 現代基礎心理学第2巻知覚I(相場編), 第6章, 東京大学出版会, pp.189-230, 1982
- [Sato89] 佐藤, 平田, 河原田: 仮想作業空間のためのインタフェース・デバイス-SPIDAR, 信学技報, PRU89-88, pp.51-58, 1989
- [Shikisai80] 日本色彩学会: 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 1980
- [Shimojo90] 下條, 植村, 一ノ瀬, G. Berkeley: 視覚新論, 勁草書房, 1990
- [Shinomiya91] 四宮, M. Taiyori, 柴野, 澤田, 野村: 人工現実感技術に応用した3次元音場疑似体験システムについて, 日本機械学会ダイナミクスとデザインにおけるコンピュータと計算力学シンポジウム講演論文集, No.910-39(II), pp.49-52, 1991
- [Shinomiya93] 四宮, 澤田, 野村: 住空間音場疑似体験システムの開発, 日本音響学会誌, Vol.49, No.7, pp.515-521, 1993
- [Silicon91] Silicon Graphics Inc.: *Graphics Library Programming Guide*, Document Number 007-1210-040, 1991
- [Smith89] J. Smith: *Senses and Sensibilities*, John Wiley & Sons, 1989 (邦訳) 中村: 五感の科学, オーム社, 1991
- [Smith90] S. Smith, R. D. Bergeron, G. G. Grinstein: Stereophonic and Surface Sound Generation for Exploratory Data Analysis, *Human Factors in Computing Systems (CHI'90 Conference Proc.)*, pp.125-132, 1990
- [Sobagaki82] 剣垣: マグニチュード評定法による見えの色の測定-実験データの信頼性の向上, 電

- 子技術総合研究所彙報、Vol.46, No.11, pp.585-598, 1982
- [Speray90] D. Speray, S. Kennon : Volume Probes - Interactive Data Exploration on Arbitrary Grids, *Computer Graphics*, Vol.24, No.5, pp.5-12, 1990
- [Spoehr82] K. T. Spoehr, S. W. Lehmkuhle : *Visual Information Processing*, W. H. Freeman and Company, 1982 (邦訳) 学販 : 視覚の情報処理—<見ること>のソフトウェア, サイエンス社, 1986
- [Stevens60] S. S. Stevens : The Psychophysical Law, *Psychology Review*, No.64, pp.153-181, 1960
- [Sutherland65] J. Sutherland : The Ultimate Display, *Proc. IFIP Congress*, pp.506-508, 1965
- [Sutherland68] J. Sutherland : A Head-Mounted Three Dimensional Display, *Proc. Fall Joint Computer Conference*, Vol.33, pp.757-764, 1968
- [Suzuki72] 鈴木, 田崎, 中浜 : 生理学通論II, 共立出版, 1972
- [Tachi92] 館, 廣瀬 : パーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, 1992
- [Tamura89] 田村, 藤井 : 流体解析におけるサイエンティフィック・ビジュアライゼーション, *PIXEL*, No.87, pp.80-84, 1989
- [Tasaki89] 田崎, 小川 : 感覚の生理学, 新生理科学大系第9巻, 医学書院, 1989
- [VPL89a] VPL Research Inc. : *Eyephone Operation Manual*, 1989
- [VPL89b] VPL Research Inc. : *Data Glove Model2 Operation Manual*, 1989
- [Watt88] R. Watt : *Visual Processing - Computational, Psychophysical, and Cognitive Research*, Lawrence Erlbaum Associates, 1988 (邦訳) 乾 : 視覚情報処理モデル入門—計算論的アプローチ, サイエンス社, 1989
- [Wenzel90a] E. M. Wenzel, P. K. Stone, S. S. Fisher, S. H. Foster : A System for Three-Dimensional Acoustic Visualization in a Virtual Environment Workstation, *Proc. of IEEE Visualization 90*, pp.329-337, 1990
- [Wenzel90b] E. M. Wenzel, S. H. Foster : Realtime Digital Synthesis of Virtual Acoustic Environments, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp.139-140, 1990
- [Wenzel91] E. M. Wenzel, F. L. Wightman, D. J. Kistler : Localization with Non-individualized Virtual Acoustic Display Cues, *Human Factors in Computing Systems (CHI91 Conference Proc.)*, pp.351-359, 1991
- [Wenzel92] E. M. Wenzel : Localization in Virtual Acoustic Displays, *PRESENCE*, Vol.1, No.1, pp.80-107, 1992
- [Wightman89a] F. L. Wightman, D. J. Kistler : Headphone Simulation of Free-Field Listening I - Stimulus Synthesis, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.85, No.2, pp.858-867, 1989
- [Wightman89b] F. L. Wightman, D. J. Kistler : Headphone Simulation of Free-Field Listening II - Psycho-

- physical Validation, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.85, No.2, pp.868-878, 1989
- [Yamasaki92] 山崎, 石川: センサフュージョン—実世界の能動的理解と知的再構成, コロナ社, 1992
- [Yokoyama92] 横山, 廣瀬, 及川, 一丸: 空間認知に影響を与える因子について, *Human Interface News and Report*, Vol.7, No.2, pp.203-208, 1992
- [Zeltzer92] D. Zeltzer: Autonomy, Interaction, and Presence, *PRESENCE*, Vol.1, No.1, pp.127-132, 1992
- [Zimmerman87] T. G. Zimmerman, J. Lanier: A Hand Gesture Interface Device, *Proc. of CHI+GI 1987*, pp.189-192, 1987

## 謝 辞

本論文は、筆者の東京大学大学院博士課程における3年間の研究成果をまとめたものである。この間、指導教官として懇切丁寧に御指導頂いた廣瀬通孝助教には、心から感謝致します。

また東京大学名誉教授、慶應義塾大学教授、株式会社三菱総合研究所理事である石井威望教授には、大学院修士課程時代から適切な御指導を頂き、筆者の研究者としての基礎を築いて頂きました。ここに深く感謝致します。

東京大学工学部の吉澤修治教授、中島尚正教授、月尾嘉男教授、村上存助教授には、本論文をまとめるにあたり、貴重な御意見、御助言を頂きました。深く感謝致します。

研究室の中垣好之技官、田中雅行技官には、実験機材の購入から研究室での生活全般に至るまで、非常に幅広くお世話になりました。現在、東京大学工学部助手の于冬氏、筑波大学構造工学系講師の葛岡英明氏、電気通信大学電子情報学科講師の小池英樹氏には、研究室在籍時からその後を含めて貴重な助言を頂きました。また、大学院博士課程での研究生活を一緒に過ごした広田光一氏、木島竜吾氏には、幾度となく筆者の議論の相手をして頂きました。大学院修士課程の里見充則氏、小森信也氏、学部4年生の斎藤淳氏、高田将年氏には研究および実験の一部を手伝って頂きました。また研究室での生活を一緒に過ごした大学院、学部、研究生の皆さんには、実験の被験者を快く引き受けて頂く等の研究への協力を感謝すると同時に、楽しい研究生活を送ることができたことを感謝致します。

株式会社三菱総合研究所シミュレーション技術部の三輪建夫氏、営業開発推進本部の野竹正義氏には、研究についての数々の御意見、御助言を頂きました。また株式会社三菱総合研究所先進科学部ソフトサイエンス室の矢部泰博氏、木村英明氏には解析データの提供や解析現場としての貴重な意見を頂きました。

最後になりましたが、筆者の3年間の研究生活を励まし支えてくれた父、母、そして妻、寿美枝には心から感謝します。

1993年12月 小木 哲朗

