

共感覚を用いた疑似ハプタイゼーション

杉本 美香 藤代 一成[†]

お茶の水女子大学 大学院 人間文化研究科

[†] お茶の水女子大学 理学部 情報科学科

〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

mika@imv.is.ocha.ac.jp, [†]fuji@is.ocha.ac.jp

疑似力覚を用いて2次元のマルチスカラー/ベクタデータを表示する疑似ハプタイゼーションシステムを開発した。本システムは、共感覚現象を用いて疑似力覚を発生させることにより、特殊なインタラクシオンデバイスを必要とせず、ハプタイゼーション(情報の力覚表現)の環境をユーザに提供する。本論文では、現行システムのアーキテクチャ、機能および実装について述べる。特に、視覚と力覚によるデータ表現の特徴を解析し、物理場の大域的な特性を視覚に委ね、それに関連する局所的な特性を理解させる補助に疑似力覚を用いる方法について説明する。さらに簡単なユーザテストによってシステムの有効性を検証する。

キーワード：サイエンティフィックビジュアライゼーション, 多変量データ,
バーチャルリアリティ, ハプタイゼーション, 力覚, 共感覚

Pseudo Haptization through Synesthesia

Mika Sugimoto Issei Fujishiro[†]

Graduate School of Humanities and Sciences

[†] Department of Information Sciences, Faculty of Science

Ochanomizu University

2-1-1 Otsuka, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

mika@imv.is.ocha.ac.jp, [†]fuji@is.ocha.ac.jp

A scientific visualization system is presented, which provides a pseudo haptization environment where the user is allowed to realize 2D multi scalar/vector fields effectively. The system takes advantage of visual-haptic synesthesia to display psuedo haptic information without any special haptic devices. Special focus is placed on feature analysis of visual/haptic information display, leading to a collaborative way of sensualization which maps global and local properties of given fields to visual and pseudo haptic primitives, respectively. The architecture, functions and implementation of the current system are described with application to the exploration of practical 2D scientific data sets. A simple user test is performed to prove the effectiveness of the present system.

Keywords : Scientific visualization, multi-variate data, virtual reality,
haptization, force sensation, synesthesia.

1 はじめに

近年、著しい進歩を遂げたコンピュータグラフィックス技術を利用して、科学技術データを可視化するサイエンティフィックビジュアライゼーション (Scientific Visualization; SV) が注目を集めている [1]. 一般に、科学技術データは 3 次元空間に分布し、互いに関連する多くのスカラやベクタなどから構成されている. このような多変量 (multi-variate) データの全てを 2 次元ディスプレイ上で視覚的に表示することは原理的に困難である. そのためバーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) の分野では、従来の視覚情報に加え、新たに力覚を用いて情報を表現する研究が行われている. このようなデータの表現方法はハプタイゼーション (haptization) とよばれている [2, 3].

現在 VR においてさまざまな特殊フィードバックデバイスの研究、開発が行われている [4]. それらのデバイスを用いて人間のさまざまな感覚器にはたらきかけることで、効果的なインタラクションが実現されている. しかし、一般のコンピュータシステムにそのような特殊デバイスを組み込むことは、主としてコストの面から容易とはいえず、一般的な普及には依然として大きな障壁が存在する.

そこで本研究では、通常のコンピュータシステム上で、心理学で研究されている共感覚 (synesthesia) 現象を利用したハプタイゼーションを実現することを目指し、科学技術データを疑似力覚で表示するシステムを開発した. これは 2 次元スカラ/ベクタデータを視覚と疑似力覚にマッピングし、対話的に可視化することにより、より多くの変量間の因果関係を表示するシステムである. その第 1 稿である本論文では、2 次元スカラ/ベクタデータを視覚と疑似力覚にマッピングし、対話的に可視化する疑似ハプタイゼーションシステムのプロトタイプを示し、その有効性について検証する.

次節で本研究の基礎となるハプタイゼーションの概念を説明し、視覚と力覚によるデータ表現の特徴を解析する. 次に第 3 節で、疑似力覚を発生させるための共感覚現象について述べ、共感覚をコンピュータシステムへ適用する関連研究を紹介する. そして第 4 節で、疑似ハプタイゼーションの概念と現行システムの構成、機能および実装について述べ、第 5 節で同システムの有

効性を検証する実験の結果を考察する. 続く第 6 節で、マルチスカラデータをそれぞれの感覚に適切にデータマッピングするために、個々のスカラフィールドのコヒーレンスを示す尺度を利用する方式を提案する. 最後に第 7 節で、本論文をまとめ、今後の課題にふれる.

2 ハプタイゼーション

本節では、ハプタイゼーションの基本概念を示し、データの視覚表現と力覚表現の特徴を比較する.

2.1 可視化とハプタイゼーションの関係

VR は、物理的な実体をもたない物体を、あたかも存在するかのような感覚でとらえさせる技術である. この技術を使えば、例えば物体の固さや質感など、これまでコンピュータ上で人間が知覚できなかった現象を感覚的に理解させることができるはずである. ここに VR を SV の領域に導入する意義がある.

多変量データを同時に表示する場合には、変量をグリフ (アイコン) で図形化するのが一般的である [1]. しかし変量数が増えるほどグリフの構成は難しくなり、視覚だけで直感的にデータを把握させることが困難になる. このような問題に対して、視覚情報に加え力覚情報を補助的に導入する方式が提案された. これがハプタイゼーションという概念である [2, 3]. ハプタイゼーションとは、皮膚感覚と筋肉や関節で感じる深部感覚の結合を意味する「ハプティクス」からとられた造語である.

ところで可視化本来の目的は、ユーザに対象の本質をイメージさせることにある [1]. そのためには、視覚による刺激だけに頼るのではなく、力覚や聴覚などを併用する VR 技術を駆使して、ユーザに対象を効果的に理解させる手法を研究、開発していくべきである. この考え方は一般にリアライゼーション (realization) とよばれている [1]. リアライゼーションの実現には、ビジュアライゼーション、聴覚化 (sonification, auralization)、ハプタイゼーションなどの方法があげられる. つまり、ハプタイゼーションは、リアライゼーションを実現するための重要な要素技術の一つであると位置づけることができる.

2.2 データの力覚表現

人間の力覚は、力に関して3自由度、トルク(ねじり)に対して3自由度の情報を検知する機能をもち、本質的には合計6自由度の情報を認識できる。したがって、力覚を用いれば、原理的には少なくとも6自由度までは変量のもつ情報を表現することが可能になると考えられる[3]。ハプタイゼーションの本質は、多変量データを効果的に力とトルクにマッピングすることである。SVでは異種のデータ、例えば速度ベクタと温度スカラを同時に表示するとき、個々に可視化した結果を視覚的に重ねあわせることがある。ハプタイゼーションでは、前者を力ベクタに、後者をトルクにマッピングすることによって、両者の間の因果関係を被験者に同時に認識させることができる。

ここで、データ表現に視覚と力覚を併用する前提として、それぞれの情報表現の特徴を解析する。視覚は他の感覚に比べて情報の精緻な表現が可能であり、しかもデータの全体像をとらえるという点において優れている。一方、力覚は全体像の表現は不得手である。しかし、視覚ほど高解像度ではないものの、局所的な情報の表現は可能である。以上のことから、大域的な情報は視覚で示し、その補助として局所的な情報の表現に力覚を用いる形でハプタイゼーション方式を用いるべきである。この観察結果は、第6節で述べるマルチスカラの同時表示問題に対して解決の基礎を与える。

3 共感覚

VRは心理学と密接な関係をもつ。そこで本研究では、通常のコンピュータデバイス環境において疑似力覚によるハプタイゼーションを実現するために、心理現象の一つである共感覚現象に着目する。本節では共感覚現象と、それをコンピュータシステムへ適用する関連研究について述べる。

3.1 共感覚

共感覚とは、刺激が与えられたときに、それに対応した本来の感覚以外の系統に属する感覚反応が引き起こされる現象である[5]。代表的な共感覚の例として、明

るい色の物体は暗い色のものよりも近くに見えることがある。これは色という刺激によって、人間が感じる距離感が異なる現象といえる(図1)[6]。図1では、2つのオブジェクトは同じ大きさであるのにも関わらず、色が明るい方が近くにあるように感じる。共感覚に関する研究では、色に関するものが多く、この例の他にも、色と大きさ、色と温度感、色と重さなどが報告されている。

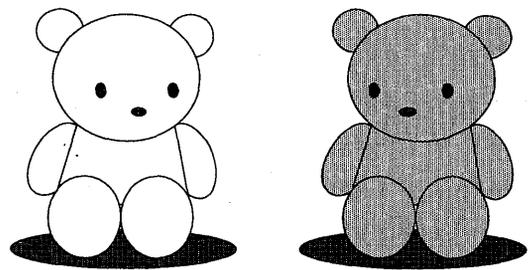


図1: 色による共感覚の例

また共感覚と似た現象として、共鳴(consonance)や通様相性(intermodality phenomenon)という現象が知られている。前者は与えられた刺激に呼応して感覚の働きが増すことをいい、後者は異なる感覚の様相間に共通する心理質が認められる現象をさす。共鳴は、共感覚とほぼ似た概念であるが、異なる感覚像を随伴しない点で共感覚から区別される。共鳴の例としては、高い音が与えられると色の輝きが増すように感じられることがあげられる。通様相性については、明暗の一方を選ぶように訓練された魚は、光の刺激から匂いに代わっても、光での訓練を匂いに移調することができたという例があげられる。本研究では、ある感覚に刺激を与えて全く異なる感覚を生み出す点から、共感覚現象に注目する。

3.2 コンピュータシステムへの適用: 関連研究

共感覚のコンピュータシステムへの適用は、文献[7]によって既に研究され始めている。この先駆的研究では、特殊な力覚フィードバックデバイスが付属しない通常のコンピュータシステム上で、仮想空間における疑似力覚表現に関する調査が進められている。この調査で

は、仮想物体の持ち上げ操作に関するいくつかの基礎実験が行われ、仮想空間における効果的な疑似力覚表現要素として、以下の2つをあげている：

- 仮想物体の移動速度
- 仮想バネの伸長率

また視覚を用いる共感覚からだけでなく、操作に伴う感覚が経験的なものと異なる場合に被験者が疑似力覚を感じやすいことも指摘している。

4 疑似ハプタイゼーションシステム

本研究では、前節で述べた共感覚現象を利用した疑似ハプタイゼーションシステムのプロトタイプを開発した。ここでは、2次元スカラ/ベクタデータの大きさを従来の可視化方法とマウスポインタの移動速度で制御する方法を用いて対話的に表示する機能を説明する。なお、実装環境は Hewlett-Packard 社製 HP9000/700 システム (CPU: C110, Clock: 120MHz, RAM: 64MB)、用いたライブラリは Xlib(X11R6) である。

4.1 システム概要

本システムは、データの標準的な可視化機能に加え、疑似的に「データの重さ」を表現するための疑似力覚発生機能を備えている。疑似力覚発生機能には、図2のように、ディスプレイを見る動作(視覚)とマウス操作(操作感覚)に、マウスポインタの移動速度変化という刺激を与えて疑似力覚を生む共感覚現象を用いる。それぞれの機能については以下に続く各項で説明する。

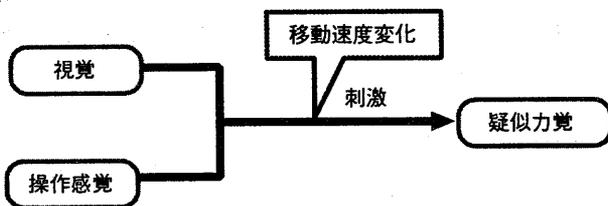


図2: 疑似力覚発生のプロセス

簡単な例として、2次元キャビティフローの計算データを用いる。キャビティフローとは、正方形断面の溝を

もつ平板上に空気が流れるとき、それに引きずられて溝の内部の空気が渦状の流れを起こす現象である [8]。この現象は、数値流体力学の例題としてよく用いられている。今回の数値データは、40×40の格子点に定義された流速ベクタであり、予めそれから流速の大きさのスカラ情報を導出しておく。

4.2 可視化機能

表1にあげる4つの可視化機能を実装した。

表1: 可視化機能の情報表示能力

可視化機能	表示対象	大域	局所
カラーマッピング機能	スカラ	○	×
プローブ表示機能	スカラ	×	○
数値表示機能	スカラ	×	○
矢印グリフ表示機能	ベクタ	○	○

カラーマッピング機能は、各格子点におけるスカラ値の大きさを色にマッピングして表示する。プローブ表示機能と数値表示機能は、各格子点がマウスでクリックされるたびに、対応する点のもつ情報を対話的に表示する。プローブ表示機能は、各格子点の正規化されたスカラ値をバンドの長さで表示する。数値表示機能は、スカラ値を数値で表示する。矢印グリフ表示機能は、各格子点における流速方向を矢印で表示する。なお、各機能の効果は重ねて表示することができる。

表1に各可視化機能における情報表示能力の有効範囲を分類する。カラーマッピング機能は大域的なデータの傾向の表示に適切であり、プローブ表示機能と数値表示機能は、厳密なデータ値の対話的な表示に適している。矢印グリフ表示機能は、データの局所的な表示だけでなく、テクスチャとして全体像もつかめることから大域的な表示法としての役割も果たしている。システムインターフェースの基本画面を図3に示す。各可視化機能の結果が重ねて表示されている。矢印グリフから溝の中の流れが渦状になる様子が、また、色から流速が溝の上部では大きく、中心では小さくなっていく様子がそれぞれ表示されている。

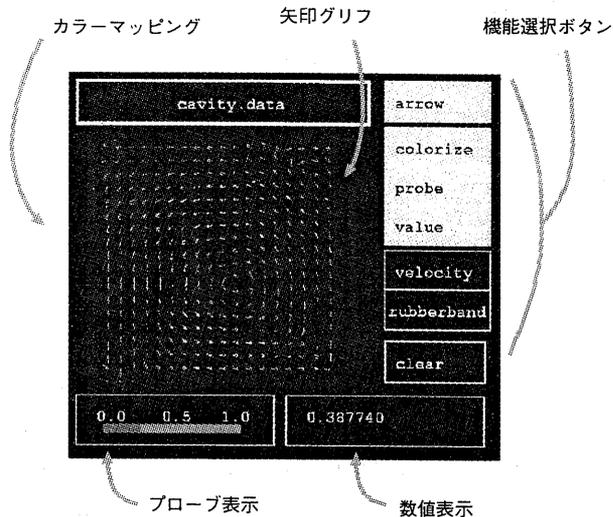


図 3: システムインターフェースの画面

4.3 疑似力覚発生機能

3.2 項で概説した文献 [7] の結果を参考にして実装した疑似力覚発生機能は、次の 2 種類である：

- 移動速度変化機能
- ラバーバンド表示機能

移動速度変化機能は、格子点をドラッグする際、はじめにクリックされた格子点のスカラー値に対応してマウスポインタの移動速度を変化させる。その際、スカラー値が大きいほど「データが重い」、「スカラー値が大きい」とユーザに感じさせるため、スカラー値に応じて移動速度を小さくしている。なお、2.2 項で示したように、人間の力の大きさの解像度が疑似力覚の場合も同様であると仮定した上で、移動速度変化には 3 段階の差を用意した。

ラバーバンド表示機能は、視覚的に移動速度変化を分かりやすくするためにラバーバンドを発生させる機能である (図 4)。ラバーバンドを発生させることで「点を引き上げる」という疑似動作感覚をユーザに与えている。このラバーバンドのかたさをデータの重さのメタファとして利用している。また、流速ベクタに沿う方向へはラバーバンドをより伸ばしやすくしており、流速ベクタの方向を伝える能力も備えている。実際の機能画面の例を図 4 に示す。左右の図からラバーバンドが伸びるほど幅が小さくなる形状の変化が確認できる。

これら 2 つの疑似力覚発生機能の情報表現能力を考えると、2.2 項でも述べたように、データの局所的な表現に向いているといえる。

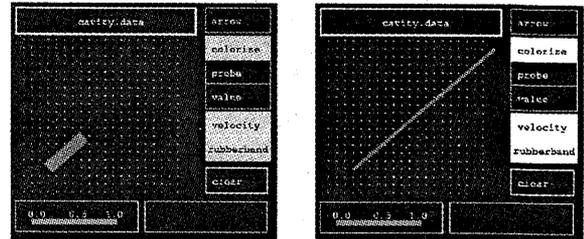


図 4: ラバーバンド表示による疑似力覚発生機能

5 実験

前節で述べた疑似力覚発生機能について簡単な実験を行った。本節ではまず実験方法について説明し、その結果を考察する。

5.1 実験方法

今回は疑似力覚発生可能性の検証に限って実験を行った。格子点間の視覚的な差をなくすために、システムインターフェースを、図 5 で示すようにカラーマッピング機能を使用しない状態で、30 人の被験者に操作させ、その後アンケート調査を実施した。被験者は、マウス操作に慣れている人として、本学理学部情報科学科の学生を対象とした。

疑似力覚発生機能として移動速度変化とラバーバンド表示の 2 つの機能を用意し、図 5 中の点 A~C に 3 段階の移動速度変化をつけた。被験者にはそれぞれの疑似力覚機能を動作させた状態で、指定された 3 つの格子点上からそれぞれドラッグさせ、3 つの点で「データに重みがある」と思われる順序を報告させた。

5.2 実験結果

実験後に集めたアンケートの内容を以下に示す。また、順序付け、およびアンケートの集計結果は表 2 のようになった。

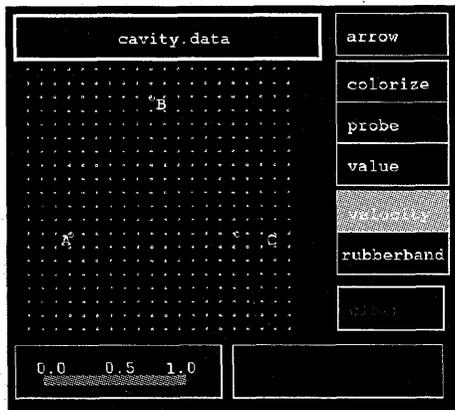


図 5: 実験用インターフェース

設問 1: 動作速度が遅いほど「重い」と感じるか。

設問 2: ラバーバンドによって点を「引き上げている」と感じるか。

設問 3: どちらが効果的な疑似力覚表示法と思うか。

設問 4: 疑似ハプタイゼーションは効果的な情報表示法と思うか。

表 2: アンケート集計結果

正当率	移動速度変化	30 人 (100%)
	ラバーバンド表示	29 人 (96.8%)
設問 1	感じる	28 人 (93.3%)
	感じない	1 人 (3.3%)
	どちらともいえない	1 人 (3.3%)
設問 2	感じる	23 人 (76.7%)
	感じない	6 人 (20.0%)
	分からない	1 人 (3.3%)
設問 3	移動速度変化	12 人 (40.0%)
	ラバーバンド表示	18 人 (60.0%)
設問 4	思う	28 人 (93.3%)
	思わない	1 人 (3.3%)
	分からない	1 人 (3.3%)

5.3 考察

本項では前項のアンケートの結果を考察する。

設問 1 から、マウスポインタの動作速度の遅れから「重さ」という疑似力覚が発生していると考えられる。被験者からは、web でページがなかなか表示されない

ときにページが重いと感じるなどの共感の声があげられた。また順序付けの正当率より、人間は「重さという」疑似力覚を少なくとも 3 段階までは認識することができるといえる。

設問 2 から、ラバーバンドにより、点を持ち上げるという疑似動作感覚を視覚的に高める効果もほほあると考えられる。特にラバーバンド表示機能による操作の際、被験者からは、引き上げるというよりゴムで引っ張る感じがするという声が高かった。設問 3 では回答が大きく分かれたため、どちらの疑似力覚発生機能の方が効果が高いかは判断できない。設問 4 から、疑似ハプタイゼーションは有効であると判断できる。

6 応用例：マルチスカラデータの可視化

複数の異なるスカラフィールドを、視覚だけを用いて同時に表示する方式は、組合せに限界があり、直観的に把握させることも難しく、効果的であるとはいえない。そこで視覚に疑似力覚を加え、多感覚で表示することにより複数のスカラフィールドの同時表示可能と考えられる。本システムでは、一方のスカラフィールドが視覚的に表示された場合、他方のスカラフィールドを疑似力覚を用いて知ることができる。

6.1 マルチスカラデータの適応的マッピング

ここで複数のスカラフィールドを視覚と疑似力覚にマッピングする際に、どのスカラフィールドをどの感覚で表示すべきかを判断する問題を取り上げる。スカラフィールド間に存在する因果関係の認識に大きく関係するため、マッピング方法の適切な判断は重要である。実際には、ユーザ自身が個々の目的に合致したものを選択できればよいが、エンドユーザ向けに、システム側がまず複数スカラフィールド間のマッピングに関する適切な組合せを示す必要がある。

2.2 項で述べたように、力覚は情報の詳細な表現が困難であることから、より複雑な構造的特徴をもつ、換言すると、コヒーレンス (相関性) が小さいスカラフィールドの表示は、視覚へのマッピングに頼るべきである。そこで、各々のスカラフィールドのコヒーレ

ンスを測り、コヒーレンスの小さい方を視覚に、大きい方を疑似力覚にマッピングする機能を実現する。

本システムでは、コヒーレンスを計測する際に、Takeshimaら [10] が提案した尺度を活用している。これは、Haralickらの同時生起行列を用いた2次元テクスチャ特徴量抽出法を拡張したものである。この尺度をここでは、FCM(Field Coherence Measure) とよぶことにする。

FCMの計算方法を簡単に説明する。まずフィールドの乱雑さを抽出するために、与えられたフィールドデータ値を0から255に正規化し、フィールドデータ値*i*の点から一定変位 $\delta = (r, \theta)$ (ただし、 $0^\circ < \theta < 180^\circ$) だけ離れた点の値が*j*である確率 $P_\delta(i, j)$ を要素とする同時生起行列を求める。次に、行列の値のちらばり具合に隣接フィールド値の勾配を重みづけとして用いたエントロピー FCM を計算する。FCMは値が大きいほどデータが複雑な構造をもつことを示す。

$$FCM \equiv - \sum_{i=0}^{n_i-1} \sum_{j=0}^{n_i-1} \frac{(i-j)^2}{n_i^2} P(i, j) \log_{10} P(i, j)$$

(n_i : データ値のレベル数, $0 \leq FCM < \infty$)

本システムでは、まずデフォルトとして、FCM値が大きい方のスカラフィールドが視覚(色)にマッピングされ、他方が疑似力覚にマッピングされて表示される(図6a)。また、ユーザがマッピングの組合せを変更する場合、マッピング選択機能ウインドウを立ち上げる(図6b) ウインドウの左下に表示されたそれぞれのスカラフィールドのFCM値を参考に、マッピング方法を選択することもできる。

6.2 実験と考察

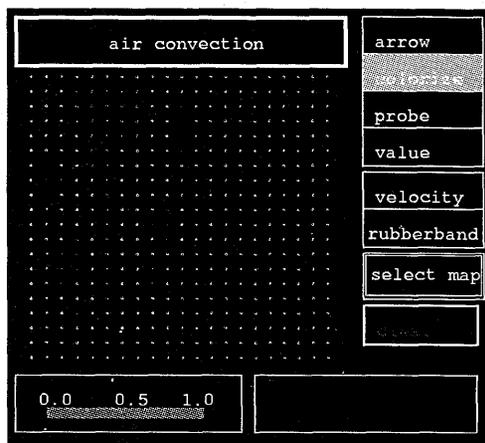
FCMを利用したマルチスカラデータの適応的マッピングの有効性を試す実験を行った。データ例として、2種類のスカラフィールドをもつ室内対流(room convection)のシミュレーションデータを用いた。今回使用したデータは、冬季の室内における過渡的な熱対流を計算した2次元モデルである [9]。ここでは、壁際にストーブが置かれている部屋が想定され

ている。数値データは20×20の格子点上に、流速スカラ、温度スカラの情報をもつ。

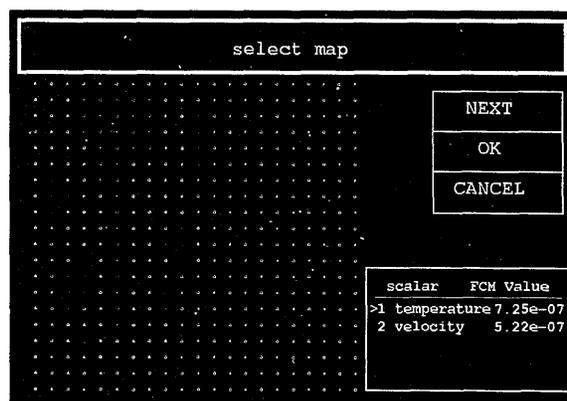
各スカラフィールドのFCM値は表3のようになった。この値から判断すると、わずかではあるが温度スカラフィールドの方がコヒーレンスが小さいため、精緻な情報を表現できる視覚へマッピングする方が適切であると判断できる。

表3: マルチスカラデータにおけるスカラフィールドのFCM値

	スカラフィールド	FCM値
室内対流	流速値	7.25e-07
	温度	5.22e-07



(a) マルチスカラデータ用システム画面



(b) マッピング選択画面

図6: マッピング選択機能

7 まとめと今後の課題

本論文では、視覚と疑似力覚を適応的に用いて、2次元多変量データをより効果的に解析するシステムを構築した。特に、スカラフィールドのコヒーレンスを考慮することで、マルチスカラデータの多感覚への適切なマッピングを可能にした。視覚だけに頼らないデータ表現を可能にしている点で、本システムをデータリアライザ [1] と評価することができる。

今後の課題としては以下の3点があげられる:

◇ 3次元データへのシステムの拡張:

今回は2次元データを対象としたが、現在主流となっている科学技術データの多くは3次元である。そこで、3次元データの解析を可能とするようにシステムを拡張する。

◇ 適応的マッピング法の有効性:

第6節で、FCMを用いてスカラフィールドの特徴量を測ることでマルチスカラデータの適応的マッピングを実現したが、実際にユーザにシステムを操作させ、本マッピング法の有効性に関する検証実験を行う必要がある。

◇ 共感覚の適用可能性:

今回は「動作速度の遅れ」から「重み」という疑似力覚を発生させたが、その他の共感覚現象のコンピュータシステムへの適用可能性の調査が必要である。現時点で考えられる適用例として以下の4ケースがあげられる。

● 重さ: 聴覚 → 力覚

仮想物体落下時の着地音を変化させることで物体の疑似重量を発生させる。

● 空間的広がり: 触覚 → 視覚

仮想空間において視点制御入力デバイスの感度を悪化させることで、なかなか進めないと感じさせ、空間の広さを感じさせる。

● 明るさ: 聴覚 → 視覚

現在のグラフィックディスプレイではまぶしいと感じるほどの明るさを出すことができない。そこで、暗色から明色へのモーフィングと同時に低音から高音へ変調することによってまぶしいと感じさせる。

● 重要性: 視覚 → 力覚 → 観念

ハイパーテキストなどにおいて、重要な情報をもつページにいく際のボタンのレスポンスを微妙に遅らせてそのページのもつ情報が重要だと感じさせる。

また共感覚以外にも3.1項で述べた共鳴や通様相性などの現象を調べ、コンピュータシステムに新しい操作感覚を導入することを目指したい。

謝辞

6.2項で用いた室内対流データを提供して頂いた(株)ケイ・ジー・ティー プロジェクト開発室の宮地 英生氏、並びに流体の可視化の立場から有益なコメントを頂いた山梨大学工学部コンピュータメディア工学科の茅 暁陽助教授、最後に、共感覚を用いた力覚表現に対して貴重なご教示を頂いた富山大学工学部知能情報工学科の中山 剛教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] 藤代 一成: サイエンティフィックビジュアルイゼーション, シュミレーション学会誌, Vol. 14, No. 3, pp. 4-11, 1995年9月
- [2] Hiroo Iwata and Haruo Noma: "Volume Haptization," In Proc. *IEEE Symposium on Research Frontier in Virtual Reality*, October 1993, pp. 16-23.
- [3] 岩田 洋夫: ハプタイゼーション, 計算工学, Vol. 2, No. 1, pp. 10-16, 1997年
- [4] 広瀬 通考: バーチャルリアリティ, 産業図書, 1993年
- [5] 荻原 良二: 感覚-講座心理学3-, 東京大学出版会, 1969年
- [6] 小林 重順: カラーリスト-色彩心理ハンドブック-, 講談社, 1997年
- [7] 郭 立新, 中山 剛, 北林 行雄, 川田 勉: 仮想現実感における共感覚に基づく力学表現法の基礎検討, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J-81-D-II, No.10, pp. 2376-2384, 1998年10月
- [8] 河村 哲也: 流体解析 I-応用数値計算ライブラリ-, 朝倉書店, 1996年
- [9] 宮地英生, 石井克哉: 室内気流の非常数値計算, 日本建築学会大会学術講演集, 1987年10月, pp. 767-768
- [10] Takeshima, Y. and Fujishiro, I.: "Measuring Volumetric Coherence," In *Conference Abstracts and Applications ACM SIGGRAPH'98 (Sketches)*, Orlando, July 1998, p.260.