

三次元分布データの可触化による流れ場の表現

川面 健司

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻

田中 豊

法政大学工学部機械工学科

科学技術データをいかにわかりやすく人間に伝えることができるかという問題が重要になってきている。最近のコンピュータ技術の進歩で、実環境下の物理現象を表す三次元分布データの表示がコンピュータグラフィックスによって可能である。しかし、三次元分布データの理解において従来の視覚提示手法では現実感、相互作用感を表現するには限界がある。そこで、本研究ではデータの理解に、より多くの情報を直感的に理解できる新しい洞察の機会を与えることを目的とし、三次元分布データを表示する際、実物を使った視覚と人工現実感技術を使った触覚を結び付けている。本報では、人工現実感技術を応用し、空間の各座標での圧力や密度などを定義した三次元分布データによるポリウムモデルの可触化システムの構築結果について報告する。

1. はじめに

科学技術の分野では、複雑で膨大な数値データをいかにわかりやすく人間に伝えることができるかという問題が重要になってきている。物体表面の凹凸や粗さ、物体周りの流体の流れ場、圧力分布、温度分布、三次元濃度分布などの三次元分布データ^[1]を表現するために、半透明表示や等高線表示などの可視化技術^[2]を用いた、様々な視覚提示手法が考案されている。しかし、このような三次元空間内の多次元データを二次元ディスプレイによる視覚情報のみで提示する場合、従来の手法で現実感のある、インタラクティブな感覚を提示するには限界がある。

最近、こうした視覚情報に加えて触覚情報を提示することにより、より直感的に三次元分布データを理解する試みが始められた^{[1][3]}。これは、各種の触覚デバイス(Haptic interface: 触覚を利用したマンマシンインターフェース)の開発によるところが大きい。このような触覚を用いて情報表示を行う手法は、可視化に対して、可触化^[1] (Haptization)と呼ばれる。Massieら^[4]は、指先と仮想物体との相互作用が1点で行われるタイプの触覚デバイスPHANToMを開発し、微細な触覚表現を可能にしている。岩田ら^{[5][6]}は、パラレルリンク機構を用いたHapticMaster^[5]を開発し、ある程度の提示力と操作空間を実現している。また、操作者と仮想物体との接触境界が面であるタイプのHapticScreen^[6]を開発している。池井ら^[7]は、振動ピン提示形の触覚ディスプレイを開発した。そして仮想物体の微細な表面形状を提示する手法の検討を行っている。雨宮ら^[8]は、空気圧アクチュエータによる空気噴流を用いた指先装着型触覚ディスプレイを開発し、広い行動範囲を確保しつつ仮想物体の表面形状を提示可能としている。Immersion社によって開発されたImpulseEngine2000^[9]は、ジョイスティック型のフォースフィードバック装置で遠隔操作のマスターコントローラとして利用可能である。

ソフトウェアに関しては、廣瀬ら^[3]が、仮想空間のコンテンツを作成するのに必要な触覚ディスプレイのための基本ソフトウェア(HIP)の開発を行っている。

以上のように可触化に関する研究は緒についたばかり

である。今後、計算科学分野のマンマシンインターフェースとしての活用が期待される。

本研究では、三次元分布データの表示に際して人工現実感技術を応用し、情報提示に複数の感覚を使用したシステムの提案および開発を行った。本報では、流体の流れ場の三次元分布データにより表現された仮想流体の触覚情報と実物を使った視覚情報を重ね合わせて提示することで、現実感のあるインタラクティブな感覚提示を可能にするシステムの構築結果について報告する。

2. 三次元分布データ

空間を記述する方法は大きく分けると、物体表面や流体の等値面等の形状を定義するサーフェースモデル^[10]と、空間の各座標での圧力や密度などを定義するポリウムモデルの2つの方法がある。サーフェースモデルを用いた触覚提示では、ポリゴンや関数を用いて形状を定義しておき、その形状と触覚デバイスとの干渉チェックをおこなう。そしてもし干渉していれば、その形状データから計算される触覚情報を提示する。一方ポリウムモデルを用いた触覚提示では、空間内の座標が指定されるとその座標でのデータをメモリから読み込んで触覚情報を提示する。

サーフェースモデルは、表面の形状データを定義するだけなのでメモリを節約できる。しかしポリゴン等の数が増えれば干渉チェックにかかる計算量が爆発的に増加するという特徴がある。

ポリウムモデルは、干渉チェックの必要はないが、空間の密度、各座標点で定義するデータの量に応じて必要なメモリの量が増加する。また空間の密度(解像度)が低いと、等値面等の面データを性格に再現することが難しくなるという特徴がある。

ポリウムモデルに基づいて定義したデータは、任意の位置の状態量をベクトルやスカラー量で表したもので、三次元空間に分布して定義されているデータなので、ここでは三次元分布データと呼ぶ。三次元分布データには、物体周りの流体の流れ場や、圧力分布、温度分布、CT画像のような三次元濃度分布などがある。

3. 三次元分布データを使った触覚提示

三次元分布データを使った触覚提示の基本的な処理は次のような手順で実行される。

- (1) 三次元分布データをメモリ上に展開
- (2) 現在の触覚デバイスの位置取得
- (3) 三次元分布データの座標系への位置座標変換
- (4) 三次元分布データの取得
- (5) 得られた三次元分布データより触覚情報を計算し出力

(2)から(5)が実際の作業中に繰り返し実行される。

三次元分布モデルの処理においては、メモリ上にデータを展開したあとは、三次元分布データ座標系での位置を特定、その位置でのデータを検索し、指定した座標にデータが定義されていない場合はデータを補間する作業をおこなう必要がある。

三次元分布データの可触化に必要な処理は、「位置座標を三次元分布データ座標系に変換する機能(座標変換)」、「その位置での三次元分布データを検索する機能(検索と補間)」と「三次元分布データより触覚情報を計算する機能(触覚情報変換)」の3つである。

3.1 座標変換

一般に仮想空間の座標系と三次元分布データの座標系は、原点やスケールが異なる場合や X, Y, Z の直交座標系ではなく、ねじれた座標系になっている場合、各軸のデータの数が異なる場合が多い。このような座標系のデータを扱うために、与えられた X, Y, Z 軸座標の位置データから三次元分布データ空間での座標値を計算する機能が必要である。触覚提示では情報のアップデートレートが視覚系に比べて数倍から数百倍早くなる必要はないため、なるべくデータ構造は立方格子上の座標点で定義されていることが望ましい。このようなデータでは、与えられた座標値を (x, y, z) 、データの領域を $(X_{min}, Y_{min}, Z_{min})$ から $(X_{max}, Y_{max}, Z_{max})$ 、 X, Y, Z 軸方向のデータの数を N_x, N_y, N_z とすると、 (x, y, z) からデータ空間の座標値 (X, Y, Z) への座標変換は、以下の式でおこなうことができる。

$$X = \frac{(x - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} N_x$$

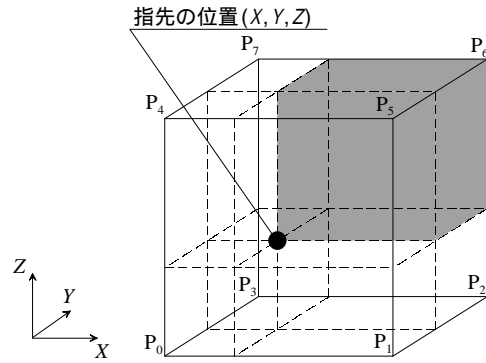
$$Y = \frac{(y - Y_{min})}{(Y_{max} - Y_{min})} N_y$$

$$Z = \frac{(z - Z_{min})}{(Z_{max} - Z_{min})} N_z$$

この式により、現在の触覚デバイスの位置座標値 (x, y, z) から、三次元分布データ座標系の位置座標値 (X, Y, Z) への位置座標変換がおこなわれる。

3.2 検索と補間

三次元分布データの構造には、大きく分けて2つの方式が考えられる。空間に離散的にデータを定義しておく離散型分布データと、現在の位置データから関数などを用いて三次元分布データを定義する関数型分布データの



2つである。三次元分布データの可触化に必要な処理の

図1. 体積補間法

「その位置での三次元分布データを検索する機能(検索と補間)」は、離散型分布データを使う方法と関数型分布データを使う方法では異なる。

3.2.1 離散型分布データ

離散型分布データを扱う場合、まずデータをメモリ上に展開する必要がある。そのデータ構造は立方格子上の座標点で定義されており、1点につき3要素のベクトルを持っているとすると、格子点密度を高くすると必要なメモリの量が爆発的に増加する。そこで、通常は空間をある程度離散化させてデータを持たせ、データの定義されていない場所については近傍のデータから補間することで三次元分布データを提示する方法が一般に採られる。補間にはさまざまな方法が考えられるが、データ構造が格子状である場合を考えると、格子内の (X, Y, Z) のデータを近傍の格子点データを用いて補間する方法として、図1に示す体積補間の式が考えられる。

$$(X, Y, Z) \text{ のデータ} = \sum (P_{i, \text{dat}} \cdot P_{i, \text{vol}})$$

ただし、 i は0から7まで、 $P_{i, \text{dat}}$ は P_i でのデータ、 $P_{i, \text{vol}}$ は頂点 P_i の対角の頂点が含まれる直方体の体積である。 (X, Y, Z) から小数点を切り捨てた値 $X0, Y0, Z0$ と、これらに1を加えた値 $X1, Y1, Z1$ を求める。これらの座標値から構成される立方体内に (X, Y, Z) は含まれる。この式では、図1の単位立方体の中で点 (X, Y, Z) を通り各軸と平行な平面によって単位立方体を8つに分割し、立方体の各頂点の対角頂点が含まれる直方体の体積比によって各頂点のデータの寄与度を決定しその合計で任意の座標のデータを求めている。

3.2.2 関数型分布データ

現在の位置情報から関数などを用いて計算によって求めることができるデータを、関数型分布データと呼ぶ。現在の指先の座標データを入力するとその位置での三次元分布データを出力する関数を定義することができれば、どのような空間であっても表現することが可能となる。関数型分布データは、離散型分布データに比べて演算にかかる時間は増えるが、離散型分布データが補間をしているのに対して、位置データから直接三次元分布データの値を計算するので精度が良くなるという利点がある。

3.3 触覚情報変換

三次元分布データには、圧力や密度、速度ベクトルなどが挙げられる。三次元分布データを触覚化するにあたり、三次元分布データを触覚デバイスに出力する前に力ベクトルに変換する必要がある。本研究では流体の流れ場の三次元分布データとして速度ベクトルを取り上げ、これを力ベクトルに変換している。変換方法としては次の流体の中にある物体が受ける抗力の式^[11]を用いた。

$$D = C_D \frac{\rho}{2} v^2 A$$

ここで、 v は流体の速度[m/s]、 ρ は流体の密度[kg/m³]、 A は物体の流れ方向の最大投影面積[m²]、 D は抗力[N]、 C_D は抗力係数である。 C_D は物体の形や物体の流れに対する向きに依存する。

4. システム構成

図2は本研究で構築した視覚、触覚情報をオペレータに提示するためのシステムの構成図である。本システムは、パーソナルコンピュータ(PC)、触覚デバイス(PHANToM)、パワーアンプ、マジックビジョン、オブジェクト(流体の流れ場)から構成されている。本システムは大きく2つに分けられる。1つはオブジェクト、PHANToMの操作部、マジックビジョンからなる視覚情報提示部、もう1つはパーソナルコンピュータ(PC)、パワーアンプ、PHANToMからなる触覚情報提示部である。

4.1 視覚情報提示部

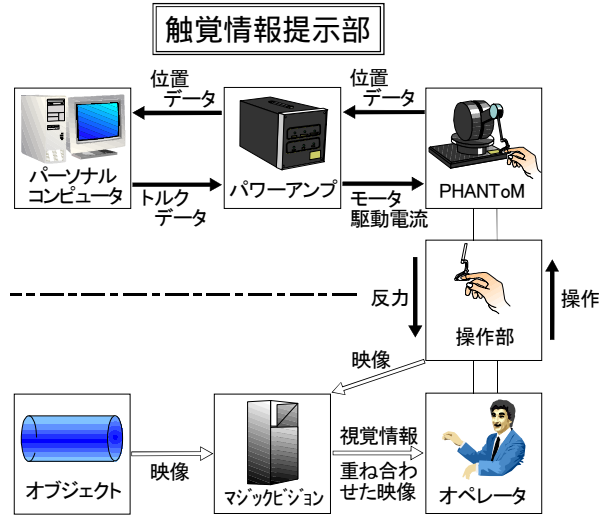
視覚情報提示部では、オブジェクトは実物を使った流体の流れ場である。本研究では透明な管路を使用した。操作部はPHANToMのアーム先端部に挿入した指先である。

図3はマジックビジョンを用いたオブジェクトと操作部の重ね合わせの原理である。視覚情報の提示にはマジックビジョンを用いて行う。マジックビジョンとは、実物を見るオペレータの眼の前に斜めにハーフミラーを置き、ハーフミラーを透過した映像と、ハーフミラーに反射させた映像を重ね合わせる方法を利用したシステムである。マジックビジョンにより、オペレータにはPHANToMの操作部に挿入した自分の指先と実際の流体の流れ場であるオブジェクトが重ね合わされた映像が提示される。この時オブジェクトの映像をミラーに一度反射させることにより、ハーフミラーに反射されたオブジェクトの映像は、実際のオブジェクトの上下左右方向が同じになる。

これよりオペレータは、あたかも自分の指先で実際には挿入することのできない円管内の流体の流れ場を直接触っているような視覚情報を得ることが出来る。図4に操作時の様子を示す。

4.2 触覚情報提示部

図5は触覚デバイス(PHANToM)の構造である。PHANToMは6自由度を持つ接続式のフィードバックア



ームである。オペレータはPHANToMのアームの先端に取り付けられた指サックの中に指先を挿入し操作する。

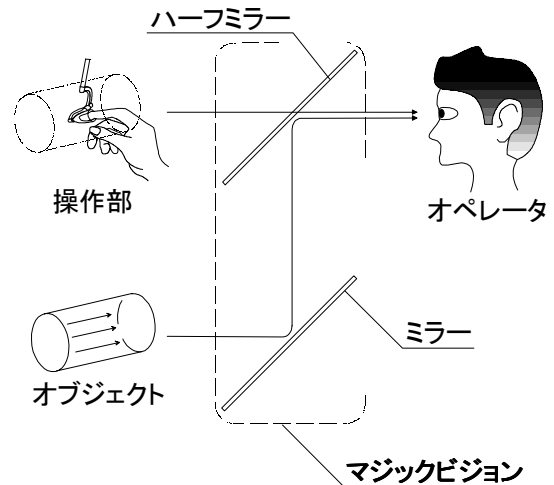


図2. システム構成

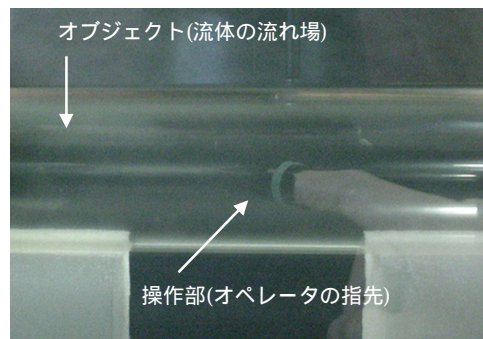


図3. マジックビジョン

図4. 視覚情報

5.2 関数型分布データを使った適用例

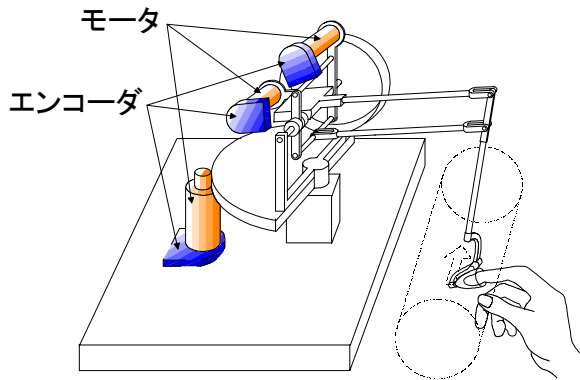


図5. 触覚デバイス(PHANTOM)

アームは3個のエンコーダ付き制御モータに直結されている。PHANTOMはオペレータの指先の位置を計測し、PCで計算された抵抗反力値をリアルタイムに指先に返す。

触覚情報提示部において、PCはPHANTOMの制御および仮想空間における流体の流れ場の構築を行う。オペレータがPHANTOMを操作すると、その指先の位置データがPCに送られ、PCはその位置における流体の流れ場の三次元分布データを検索し、それをもとに指先にかかる抵抗力を計算する。そして、その結果を反力データとしてPHANTOMへ出力する。そしてPHANTOMはオペレータに反力を提示する。

本システムを用いることにより実空間にある流体の流れ場の視覚情報と、仮想空間に構築された触覚情報が結び付けられる。オペレータには実際には触れることのできない流体の流れ場をあたかも自分の指で触れているかのような感覚を得ることができる。

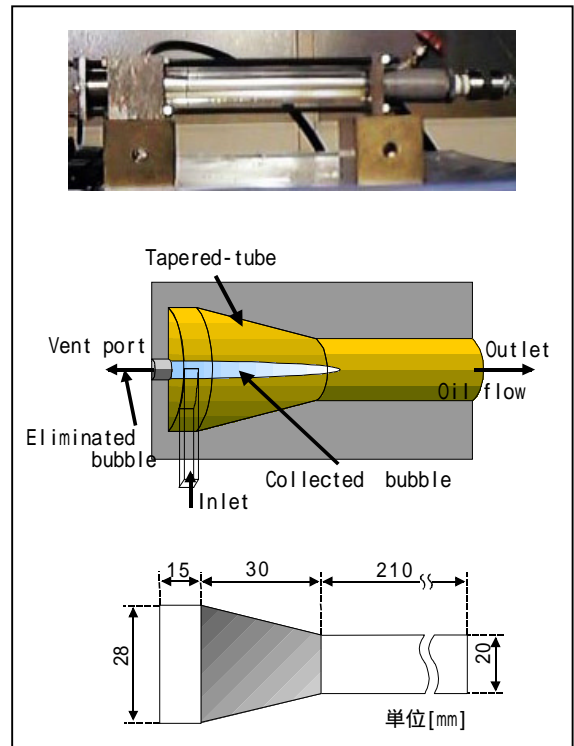
5. 適用例

本研究で提案した三次元分布データの可触化による流れ場の表現手法を離散型分布データ、関数型分布データそれぞれの場合において適用した。

5.1 離散型分布データを使った適用例

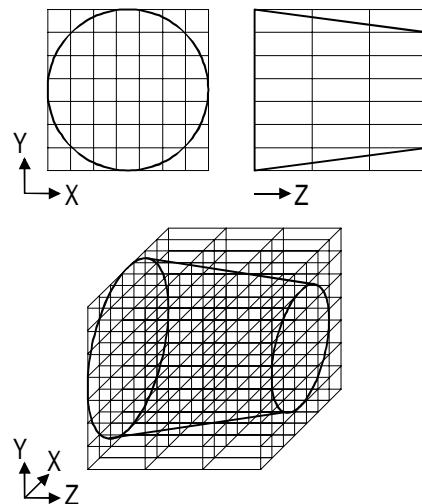
三次元分布データには、気泡除去装置内部の旋回流を汎用流体解析ソフトウェア RFLOW により数値解析した結果^[12]を使用した。図6は気泡除去装置の概要である。本研究では離散型分布データとして、ちょうど気泡除去装置のテーパ管路部のデータを取り出して使用している。図7は数値解析結果より取り出した離散型分布データである。取り出したデータは格子点数 $8 \times 8 \times 4$ の256点、各格子点上のデータ数は3つで、XYZ成分の速度ベクトルである。

上記の条件で離散型分布データを知覚したところ、気泡除去装置内部の旋回流の様子がはっきりと体感できた。各格子点間の提示においても、がたつきを感じることなく滑らかに体感することができた。



本研究では関数型分布データとして円管内の流れを

図6. 気泡除去装置



格子点： $8 \times 8 \times 4 = 256$
各格子点のデータ数：3(速度ベクトル)

図7. 離散型分布データ

想定した。ここで円管はまっすぐで滑らかであり、円管内の流れは定常層流であるとする。関数型分布データの関数として、ポアズイユの流れ^[13]の式を使用した。ポアズイユの流れの式により、円管内の触覚デバイスの位

置における円管内の流れの速度を求めている。

本システムを用いて体感したところ、管路内の流れ場の速度分布、円管内中央部では速度が最も強く、管壁に近づくにつれ弱くなっていく様子が滑らかに体感できた。

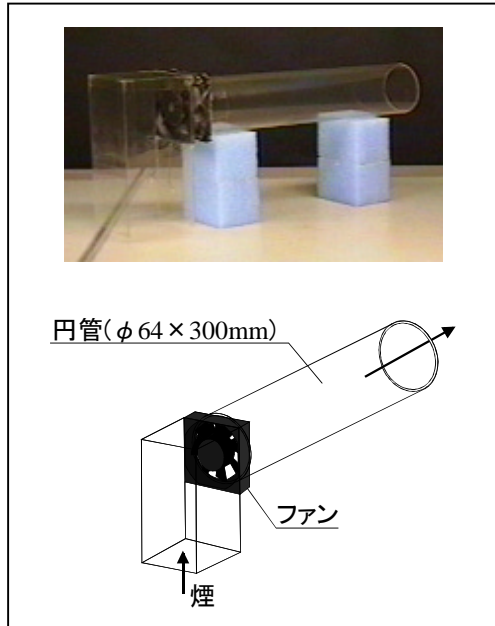


図8. オブジェクト(流体の流れ場)

6. 体感性能の評価実験

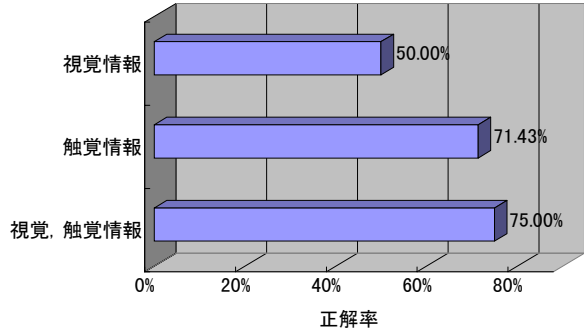
三次元分布データを表現するにはコンピュータグラフィックスを用いたものがよく使われる。しかし現実感のある感覚情報をオペレータに提示するには不十分である。本研究で構築したシステムを使用すれば、流体の流れ場を把握する際に、オペレータに実物を使った実映像の視覚情報と、三次元分布データを用いて構築した仮想的な触覚情報を重ね合わせて提示することによって、より現実感のある感覚提示、直感的な理解を行うことが可能であると考えられる。そこで本システムが有効であるかどうか体感性能の評価実験を行った。

6.1 実験条件

実験では、流体の流れ場を前節の関数型分布データと同じ円管内の流れとした。触覚情報の提示にはポアズイユ流れによる関数型分布データを使用した。図8は実験で視覚情報を提示するために使用したオブジェクト(流体の流れ場)である。オブジェクトには円管として外形70[mm]、内径64[mm]、長さ300[mm]の亚克力パイプを使い、一端にファン付きモータを取り付け、空気を流した。このとき煙により流れの可視化を行った。マジックビジョンによりオペレータは実際には挿入することのできない円管内に、自分の指先を仮想的に挿入することが可能になる。

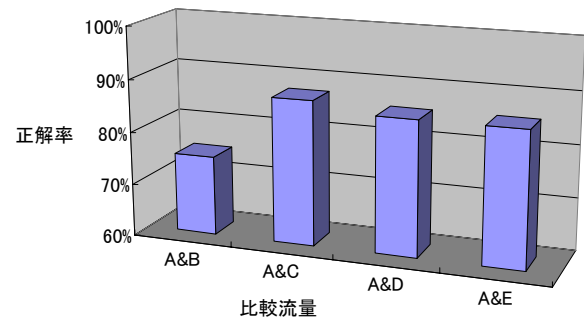
6.2 評価実験

評価実験1として、感覚提示評価実験を行った。評価方法は、流量が約1.5, 1.6, 1.7[L/s]の管内の流れ場を作り、被験者に対して視覚情報のみを提示する場合、触覚情報のみを提示する場合、視覚情報と触覚情報の両方を提示する場合について、それぞれランダムに3種類の



流量を提示する。被験者には、3種類の流量を大きいもの

図9. 感覚提示評価実験の結果



	A&B	A&C	A&D	A&E
正解率	75.00%	87.50%	85.71%	85.71%

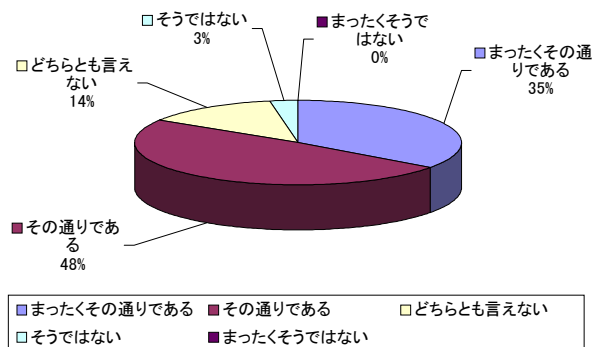


図10. 流量差認識評価実験の結果

図11. システム評価実験の結果

から順に並び替えてもらい、その正解率を調査した。被験者の数は健康な男女7~8名である。

図9は感覚提示評価実験の結果である。図9より、視覚情報のみの場合では50%の正解率であったものが、視覚情報と触覚情報の両方を提示することで正解率が75%に向上していることがわかる。このことから流量差の少ない流体の流れ場において、視覚情報のみの提示では流体の流れ場の把握は困難である。しかし視覚情報と触覚情報の両方を同時に提示することによって、流体の流れ場の把握がより確実にできることがわかる。

評価実験2として、流量差認識評価実験とシステム評価実験を行った。仮想的に作り出された、円管内の流体の流れ場を流量A:1.685[L/s], B:1.550[L/s], C:1.453[L/s], D:1.292[L/s], E:1.200[L/s]の5種類用意し、そのうち2種類の流量をA&B, A&C, A&D, A&Eの4パターンで体感してもらう。このとき視覚、触覚情報の両方を提示するも

のとする。流量差認識評価実験では、どちらの流れのほうが強かったかを2択で解答してもらい、その正解率を調査した。システム評価実験では、実際に流体の流れ場を触っているように感じたかを5段階評価で解答してもらい、その割合を調査した。被験者の数は20代~60代までの男女37名である。

図10, 図11は流量差認識評価実験およびシステム評価実験の結果である。図10より、比較流量がA&C, A&D, A&Eのパターンではほぼ同じ正解率になっているのに対し、比較流量がA&Bにおいては正解率が低下している。このことから比較流がA&Cのときの流量差以下になると流量差の把握が困難になっていくと考えられる。

図11より、「実際に流体の流れ場を触っているように感じたか」について、“まったくその通りである”と答えたのは全体の35%，“その通りである”は48%，“どちらとも言えない”は14%，“そうではない”は3%，“まったくそうではない”は0%であった。“まったくその通りである”と“その通りである”を合わせると83%となり、流体の流れ場の表現に本システムが有効であると考えられる。

7. おわりに

本研究では流体の流れ場を把握する際に、オペレータに実物を使った実映像の視覚情報と、三次元分布データを用いて構築した仮想的な流体の流れ場の触覚情報を重ね合わせて提示するシステムを構築した。三次元分布データの計算には離散型分布データと関数型分布データの両方を用いた。本システムを用いることにより、オペレータには実際には触れることのできない流体の流れ場をあたかも自分の指で触れているかのような感覚を得ることができた。

評価実験により、実映像による視覚情報に加え触覚情報を提示することで、視覚だけでは困難であった三次元分布データによる流体の流れ場の把握を、より直感的に行うことが可能であり、本システムの有効性を確認することができた。

今回、本研究では三次元分布データとして速度ベクトルを取り上げているが、速度だけでなく、力ベクトルや温度勾配ベクトルなどベクトル量として表現可能なものであれば、同様な方法で表現することが可能である。

今後の課題としては、三次元分布データがベクトル量として表現不可能な場合においても、三次元分布データ

を触覚情報に変換する際に、振動の強弱や粘性の変化を触覚デバイスへ出力するなどの工夫により表現が可能であると考えられる。また、三次元分布データに時間軸を加えデータの時間変化を可触化することなどが考えられる。

参考文献

- [1] 矢野博明, 空間分布データの可触化, 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集(), pp.254-255, 1998.
- [2] 流れのコンピュータグラフィックス, (社)可視化情報学会編, 1996.
- [3] 廣瀬通孝, 岩田洋夫, 池井寧, 小木哲朗, 広田光一, 矢野博明, 寛直之, 触覚用共通ソフトウェア(HIP)の開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.3, No.3, pp.111-119, 1998.
- [4] Thomas H. Msssie, Initial Haptic Explorations with the Phantom, Virtual Touch Through Point Interaction, Masters Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, February, 1996.
- [5] Iwata, H., Artificial Reality with Force Feed-back: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.165-170, 1990.
- [6] 岩田洋夫, 市ヶ谷敦郎, ハプティックスクリーン, 日本バーチャルリアリティ学会第1回論文集, pp.7-10, 1996.
- [7] 池井寧, 山田真理子, 福田収一, 形状計測データに基づく触覚テクスチャの表示, 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集(), pp.431-432, 1998.
- [8] 雨宮, 田中, 篠原, 空気圧噴流を用いた指先装着型触覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp.41-44, 1999.
- [9] Rosenberg, L., D. Stredney, A Haptic Interface for Virtual Simulation of Endoscopic Surgery, Health Care in the Information Age, IOS Press, pp.371-387, 1996.
- [10] 田中, 青野, 接触感覚提示装置を用いた三次元分布データの表現, 日本機械学会第8回設計工学・システム部門講演論文集, No.98_32, pp.235-237, 1998.
- [11] 森田泰司, 流体の力学計算法, 東京電機大学出版局, pp.118-119, 1996.
- [12] 田中豊, 岩本和彦, 新井和吉, 鈴木隆司, 内部流れの可視化による気泡除去装置の性能評価, 日本機械学会・山梨講演会論文集, No.990-3, pp.139-140, 1999.
- [13] 今井功, 流体力学, 岩波書店, pp.190-191, 1995.

キーワード.

三次元分布データ, 可触化, 人工現実感, 触覚デバイス, 流れ場

Summary.

Sensualization of Spatial Distribution Data in Flow Field

Kenji Kawazura
Graduate School, Hosei University

Yutaka Tanaka
Department of Mechanical Engineering, Hosei University

Recently, it has been more important problem that human comprehensibly communicate to the science and technology data. With the advance on recent computer technology, it is possible that computer graphics displays spatial distribution data for physical phenomena in a real environment. On comprehension of the spatial distribution data, however, conventional visual displaying techniques have not provided realistic image and interaction sensation for representation of the data. The purpose of this study is to give new insights to the comprehension of scientific visualization in order to intuitively understand many scientific data. We developed a prototype of haptic system for scientific visualization using virtual reality technology. The word “Haptic” means tactile and/or the sense of touch. In the developed system, visual image data of real objects is mixed to the haptic interface; PHANToM for haptization data calculated from the spatial distribution data according to the real object. A volume model is used for representation of the spatial distribution data that is determined as pressure or density in space.

Keywords.

Spatial Distribution Data, Haptization, Virtual Reality, Haptic Interface, Flow Field