

感覚特性に基づいた反力と振動による流れ場の可触化

Haptization of Flow Field using Reaction Force and Vibration based on Human Perception

小俣昌樹† 石原雅巳‡ Kwok, Misa Grace§ 今宮淳美¶
Masaki Omata Masami Ishihara Misa Grace Kwok Atsumi Imamiya

1. はじめに

現在、気象の変化や航空機表面の空気の流れなど、流れ場を扱う科学データを人間に理解しやすいように表現する技術として、情報の可視化技術が研究されている。情報の可視化技術は、人間にとって見ることのできない情報や扱いにくい多量の情報を、理解しやすい視覚情報に変換する技術である[1]。たとえば、人間には直接見ることのできない航空機表面の空気の流れを、コンピュータグラフィックスによって線分や色の变化するアニメーションとして表現することができる。可視化技術は、人間の感覚器官の中で最も多くの情報を取り入れることのできる視覚の利点である、一覧性の高さや空間分解能の高さを利用している[2]。

しかし、視覚情報は光という直進性のある媒体によって表現されるため、閲覧者は物体の背後にある知覚対象を認識することができない[1]。たとえば、流れ場を矢印で表現した場合、情報の密度が高い部分での矢印同士の重なり合いによるクラッタリング (cluttering) が発生してしまい、流れの理解を困難にしてしまう[1]。

このような欠点を補う表現法のひとつとして、情報の可触化技術が研究されている。可触化技術は、力覚フィードバック装置を用いて、ユーザの指先や掌などに体感的な刺激を提供する。たとえば、管路内の流れ場の速度や圧力分布を、管路内を移動する粒子に触れているような接触感覚として表現することができる。

このような触覚による表現は、視覚による表現と比べて、光などの媒体の欠点を受けることなく、暗闇や物陰の物体の知覚を可能にする。また、触覚は、視覚と比べると一度に知覚できる範囲が狭くなるが、その範囲においては詳細な情報の知覚を可能にする。したがって、可視化技術と可触化技術をあわせると、大局的な一覧性の高さや局所的な認識性の高さをあわせつつ表現をおこなえるようになる。これを流れ場で考えると、コンテキストとして大局的な流れの方向や速さを視覚で知覚でき、フォーカスとして局所的な流れの方向や速さを触覚で知覚できると考える。

しかしながら、流れ場の可触化に関する現在の研究では、人間がどの程度正確に可触化された情報を理解しているかを考慮していない。これは、物理的および力学的なシミュレータによって計算された触覚情報を忠実に再現することを前提としているからである。たとえば、シミュレータによって流れ場の流速に 2 倍の違いが計算されたとしても、

人間にとって 2 倍の違いと感ぜないことが考えられる。また、流速と方向の理解において、流速の変化が方向の理解に影響を与えてしまう可能性も考えられる。したがって、触覚に関する人間の感覚尺度と数値計算によって求められた物理尺度との関係を明らかにし、人間に理解しやすい触覚刺激の変化量を求めることが必要である。

本稿では、人間が風の流れの表現にふさわしいと感じる触覚表現として、風力を振動の周波数変化で、また、風向を一定の反力で表現できることを示す。また、風力を表す振動と風向を表す反力が、人間の理解において、互いに影響を与えないことを示す。

2. 従来の研究

本節では、可触化技術に関する従来研究を紹介し、それぞれの問題点について考察する。

柏原らは、管路内の旋回流れ場の数値解析結果から得られるデータに基づいて、可視化と可触化をおこなう手法を提案した[3]。これは、管内の流れ場を表す視覚的效果に加えて、管内の流れ場を仮想的に移動する粒子に触れる接触感覚的效果を表現する手法である。この手法では、3次元分布データを触覚情報に変換するために、速度ベクトルや圧力ベクトルを反力に変換している。

Reimersdahlらは、局所的な流れ場など、視覚的な表現が困難な流体の特徴を触覚で表現する ViSTA FlowLib を開発した[4]。このシステムでは、触覚によってスカラー場とベクトル場を表現している。

これらの研究に共通する問題点は、これらの研究が物理的な現象を触覚で忠実に再現することを念頭に置いていることである。つまり、シミュレータによって計算された触覚の反力や振動を、人間がどの程度感覚的に理解しているかを考慮していないということが問題である。

つづいて、人間の感覚尺度に基づいて流れ場の可触化をおこなった研究を紹介する。

野間らは、フォースディスプレイと呼ばれる視覚・触覚呈示装置を開発し、人間の感覚尺度に基づいて流れ場を表現する研究をおこなった[5]。このシステムでは、両眼立体視機能をもつ Head Mounted Display の視覚表現にあわせて、パラレルマニピュレータと呼ばれる 6 自由度の触覚装置による反力とひねりトルクを表現する。この研究では、人間の感覚特性を考慮した呈示刺激の強度および方向の弁別閾を設計している。

しかし、野間らの研究では、反力とひねりトルクのメタファがユーザにどのように感じ取られるのかについての検討実験がおこなわれていないという問題がある。

矢野らは、VibroGlove という振動触覚グローブを開発し、振動による流れ場の表現を研究した[6]。VibroGlove は、CyberGlove (Virtual Technologies 社) に 17 個の振動子を取り付けた振動触覚デバイスである。この研究では、振動感覚強度を ME 法によって得られた値で補正したり、ベクトル

† 山梨大学工学部, Faculty of Engineering, University of Yamanashi

‡ 山梨大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, University of Yamanashi

§ 山梨大学大学院医学工学総合研究部, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi

ル方向の絶対精度および弁別閾を実験によって測定したりするなど、人間の感覚特性を考慮したシステムを設計している。

しかしながら、矢野らが実験した触覚の感覚特性は、CAVE[7]のような広い空間における大局的な流れ場を知覚するための特性であるため、PHANToM (SensAble Technologies 社) のような局所的な詳細を知るための特性としても利用できるかどうか不明である。

3. 感覚特性に基づいた風の可触化実験

本稿では、前節で述べた従来研究の問題を解決するために、人間の感覚特性に基づいた触覚表現を検証して、流れ場の流体の流速と方向を表現する手法を提案する。具体的には、風の風力と風向を触覚で表現するための感覚特性と感覚尺度を実験によって求めてモデル化する。

風を触覚で表現する条件として、気象情報で利用されている風力と風向 (たとえば、北の風、風力 3) を表す 2 次元のベクトル場を使用した。この理由は、風の流れ場に対する感覚特性を調べる上で、気象情報の風の表現が被験者にとって最も身近な流れ場の例であると考えたからである。

本実験では、風力の表現にふさわしい触覚刺激と、その刺激の感覚尺度を明らかにする。

3.1 実験システム

可触化の実験のために、スタイラス型の触覚フィードバック装置として PHANToM (SensAble Technologies) を使用した (図 1)。また、このスタイラスがコンピュータグラフィックス (CG) で表現した 3 次元空間に没入するように提示する装置として、ハーフミラーに映像を反射させる Reachin (ReachinTechnologies AB) を使用した (図 1)。これらの装置を使用した理由は、大局的な風の流れ場を視覚情報として表現し、局所的な風の特徴を触覚で表現するためである。

これらの装置を接続したコンピュータの仕様は、CPU: Intel Pentium III 700MHz ×2, メモリ: 512MB, グラフィックスカード: INTERGRAPH Intense3D 4105, OS: Microsoft Windows 2000 Professional である。風を表現するための触覚刺激と 3 次元空間を構築するために、Reachin API 3.0 ライブラリを使用した。

これらの装置を可触化実験に使用した場合、被験者が PHANToM のモータ音による聴覚情報によって触覚刺激の違いを理解してしまう状況が考えられる。この状況を回避するために、本実験では、被験者にホワイトノイズを流し



図 1 実験システム (PHANToM と Reachin)

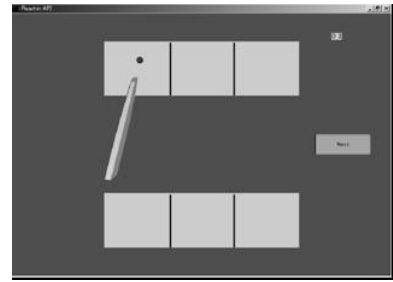


図 2 触覚刺激のふさわしさ評価実験の様子

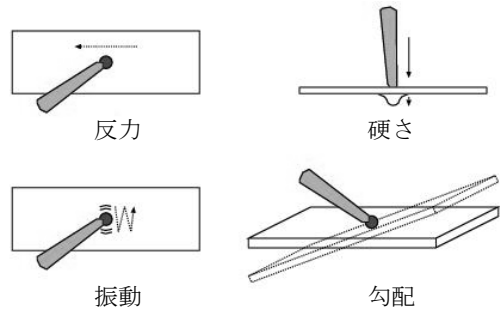


図 3 風力へのふさわしさを検証した触覚刺激

たヘッドホンを装着してもらった (図 1)。

3.2 風力における触覚刺激のふさわしさ評価

風の流れ場を触覚で表現するために、風力にふさわしい触覚刺激を人間の感覚特性に基づいて検証する。このために、Scheffé の一対比較法を用いて、反力、振動、硬さ、勾配の、4 種類の触覚刺激の中から風力の表現にふさわしいと感じる刺激を答えてもらった。この 4 種類の刺激を選択した理由は、PHANToM で呈示できる触覚刺激の中で、スタイラスを一箇所に静止して、その変化を判断できる刺激であるからである。

● 実験タスク :

被験者は、Reachin システムのハーフミラーに表示した縦 5 cm/横 6 cm の 6 枚のプレートに、PHANToM スタイラスの先端を接触させて、風力表現へのふさわしさを回答する (図 2)。図 2 において、上側 3 枚のプレートと、下側 3 枚のプレートには、それぞれ、4 種類の触覚刺激の中の 2 種類の刺激が割り当てられている。また、それぞれの触覚刺激は刺激強度の違いによって 3 段階にわけられている。被験者は、この 6 枚のプレートにそれぞれ 5 秒ほどスタイラスを接触させて、2 種類の触覚刺激のふさわしさを回答した。回答方法として、2 種類の刺激の間を+3 から-3 までの 7 段階に分け、どちらが風力の表現にふさわしいかを数値で回答する方法を用いた。

● 実験刺激 :

実験に使用した触覚刺激を図 3 に示す。反力 (0.5, 1.0, 2.0 [N]) は、プレートと平行で、プレートの横方向右から左にスタイラスを押そうとする力である。振動 (周波数: 0.5, 1.0, 1.5 [Hz], 振幅: 1.0 [N]) は、プレートの縦方向にスタイラスを動かす単振動である。そして、硬さ (50, 100, 200 [N/m]) は、プレートに触れたときのプレートの垂直方向の抗力であり、勾配 (0.5 [rad]) は、プレートを 2 分する縦方向の回転軸でのプレートの傾きである。勾配については、本実験がスタイラスを固定して接触させる方法をと

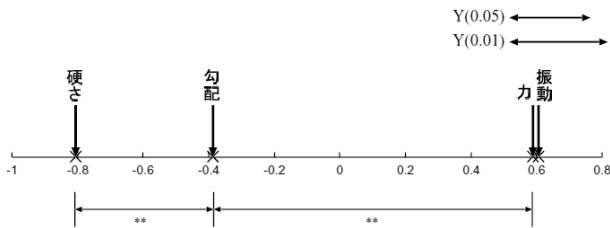


図4 風力を表す触覚刺激のふさわしさの尺度値図

っており、被験者への角度の違いによる影響は無いと考えたため、1段階の呈示刺激を設定した。なお、いずれのプレートにおいても、異なるのは触覚だけで、視覚的な見た目はすべて同じである。

● **実験結果および分析結果：**

被験者は、20歳から26歳までの大学生20名（男性14名、女性6名）であり、すべて右利きであった。

4種類の触覚刺激について、Schefféの対比較法により得られた結果を分散分析したところ、主効果に有意差が見られた ($p < 0.01$)。図4は、4つの触覚表現のふさわしさの尺度構成を示す。図4において、数値が高いほどその触覚刺激が風力の表現にふさわしいことを表す。また、Y(0.05)およびY(0.01)は、それぞれの線分の長さよりも刺激間の距離が離れている場合における有意水準を表す。

この結果、振動と反力が同程度にふさわしいことが明らかになった。すなわち、従来研究で使用されている反力のみでの表現だけでなく、振動の周波数変化も風力の表現に利用できることがわかった。これにより、反力のみでの表現では風力が弱いときに風向を識別しにくくなるという問題を解決できる。つまり、風向を従来通り反力で表し、あわせて、風力を振動で表現するという、新たな流れ場の可触化モデルを設計できるということである。

3.3 風力と振動周波数との対応付け実験

前節で述べた実験によって、風力を触覚の振動周波数の変化でも表現できることを明らかにした。本実験では、気象情報で使用されている風力の表現と振動周波数との対応を検証し、風力に対する振動の感覚尺度モデルを確立する。このために、調整法を用いて、被験者が風力に合うと感じる周波数を調整しながら決定する実験をおこなった。なお、周波数の変化量は、事前実験で求めた式(1)（寄与率：0.88）を使用した。この式において、 I は周波数の物理量を表す。また、 $k=5.20$ 、 $\alpha=1.26$ は、実験によって求めた定数である。本実験では、式(1)において、風力に対応する感覚量 S を求める。

$$I = \left(\frac{S}{k} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

● **実験タスク：**

図5のように、Reachinのハーフミラーに20cm四方のプレートを呈示した。このプレートには、風力の値とその値を説明する文章を表示した。被験者は、この表示を見ながらプレートを触り、プレートに呈示されている触覚の振動周波数を増加 (Up ボタン) させたり減少 (Dn ボタン) させたりして調整する。また、実験タスク開始時に、被験者にハーフミラー右側のプレートを呈示して、調整可能な周



図5 風力の文章と振動を呈示した様子

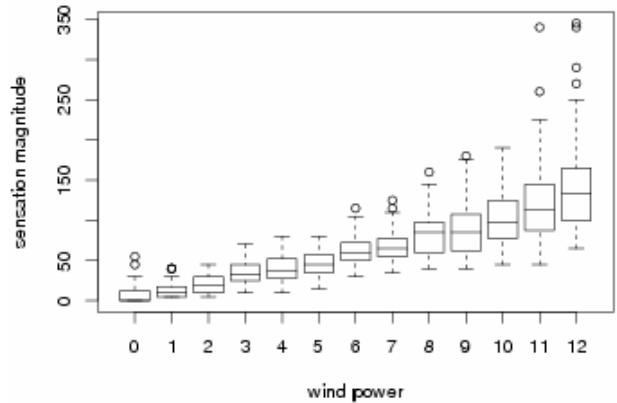


図6 風力へ対応付けた振動周波数の感覚尺度

波数の上限と下限の振動を確認してもらった。なお、実験開始時の周波数は、上限と下限との間で無作為に設定した。

● **実験刺激：**

表示する風力には、気象庁で使用されている風力階級表を用いた[8]。これは、0から12までの13階級の風力の整数値とそのときの陸上の状態を表した文章との組み合わせである。なお、振動の振幅は、事前実験で求めた、振動を識別できる下限値として0.80[N]に設定した。また、振動の方向は、3.2節と同様に、呈示した正方形の縦方向に設定した。

● **実験結果および分析結果：**

被験者は、20歳から24歳までの大学生22名（男性16名、女性6名）であり、すべて右利きであった。

図6の箱ひげ図に、風力（横軸）と振動周波数の感覚量（縦軸）との対応を示す。図6の白丸 (○) は、ひげ (1.5 × 四分偏差以内で、中央値から最も離れた値) よりも外側の値である外れ値を示す。この図から、中央値がほぼ線形に増加していることが見て取れる。そして、この結果を最小二乗法による近似直線で示すと、風力 W とその感覚量 S との関係は、式(2)のように求められる（係数： $a = 10.25$ 、 $b = -2.25$ 、寄与率：0.97）。

$$S = aW + b \quad (2)$$

3.4 振動と反力による流れ場の識別実験

前節までの実験によって、風の流れ場を反力および振動の周波数変化で表現できることを立証した。また、風力を表現するための振動の周波数変化のモデルを求めた。

本実験では、このモデルで表現された風力と合わせて、一定の反力によって風向を表現した場合における、方向の識別精度を調査する。このために、風力を表す振動がある

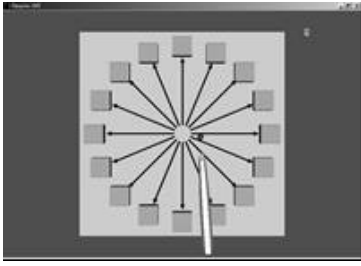


図7 風向識別実験の様子

場合と無い場合における、被験者が方向を正しく識別できた割合の平均を比較する。

● 実験タスク：

被験者は、図7に示すように、Reachinのハーフミラーに呈示された16方向の方位図を触りながら、この方位図に呈示されている1方向の反力の方向を判断する。そして、判断した方向を指し示す矢印の先のボタンを押す。

● 実験刺激：

実験条件は、振動がある場合と無い場合の2条件である。振動の振幅は、3.3節と同様に事前実験で立証した0.80[N]に設定し、振動の周波数は、3.3節での実験結果の平均値となる10[Hz]に設定した、一方、反力の方向は、気象データとして使用される一周360°を16分割した方向とした(図7)。また、反力の強さは、2.263[N]とした。この値は、事前実験において立証した、方向を識別可能な反力の下限值である。

● 実験結果および分析結果：

被験者は、21歳から24歳までの大学生9名(男性6名、女性3名)であり、すべて右利きであった。

振動がある条件での回答時間の平均(5.20[s])と振動がない条件での回答時間の平均(5.95[s])との間に有意差は見られなかった。また、振動がある条件での正答率の平均(53.56%)と振動が無い条件での正答率の平均(51.85%)との間にも有意差は見られなかった。この結果から、被験者にとって、16方向の分解能で反力の方向を識別することは困難であったことがわかった。この実験での被験者の回答データをもとに、分解能を8方向として正答率を計算すると、振動のある条件であっても90%を超える正答率となった。したがって、本システムにおける風向を高い正答率で識別できる分解能は8方向であるといえる。

4. 反力と振動による風の可触化モデル

本節では、これまでの検証結果に基づいて、人間の感覚特性に基づく風の可触化モデルを提案する。

格子状の風のベクトル場におけるそれぞれの風ベクトルを式(3)と定義する。このベクトルの v_x 成分は東西方向の風の成分を表し、 v_y 成分は南北方向の風の成分を表す

$$v = (v_x, v_y) \quad (3)$$

3.1節の実験結果に基づき、風力を振動の周波数変化で、また、風向を一定の反力で可触化する。

風力を表現するための周波数の変化量には、3.3節で調査した感覚尺度(式(2))を使用する。また、振動の力 $P=(P_x, P_y)$ が風向に影響しないように、振動を式(4)と式(5)に示す円周上の単振動とした。この2つの式において、 t は時間変化を、また、 f は周波数を表す。

$$P_x = 0.80 \sin(2\pi ft) \text{ [N]} \quad (4)$$

$$P_y = 0.80 \cos(2\pi ft) \text{ [N]} \quad (5)$$

8方向の風向を表現する反力は、風ベクトル $v=(v_x, v_y)$ を8方向に量子化した単位ベクトル $u=(\sin\theta, \cos\theta)$ と、実験によって求めた方向を識別可能な反力の下限值2.26[N]から、式(6)となる。

$$D = 2.26u \text{ [N]} \quad (6)$$

以上により、最終的に風の可触化として呈示する力 F は、式(7)となる。

$$F = P + D \text{ [N]} \quad (7)$$

5. おわりに

本研究では、人間の触覚における感覚特性に基づいた風の流れ場の表現法を実験によって検証した。この結果、風力をベキ法則に基づく振動の周波数変化で表せることを明らかにした。また、風向を一定の反力で表して、風力の振動と併用しても8方向の分解能であれば問題なく識別できることを確認した。この可触化モデルは、従来研究における人間の感覚特性を考慮していないという問題、および、反力のみでの可触化では風力が弱いときに風向を識別しにくくなるという問題を解決する。

今後の課題として、このモデルを利用した気象情報可触化システムの開発を計画する。これにより、可視化技術と可触化技術の特長を合わせた気象情報呈示システムを提供できると考える。たとえば、雲の流れや天気図などの全体的な天候の変化を視覚情報で提供し、局所的な風の変化を触覚情報で提供する。

参考文献

- [1] 中嶋正之、藤代一成: コンピュータビジュアルイゼーション、共立出版(2000)。
- [2] 大西昇、杉江昇監修: 生体情報処理、昭晃堂(2001)。
- [3] 柏原慎太郎、田中豊、鈴木隆司: 管路内旋回流れの可視化と可触化、法政大学計算科学研究センター研究報告、Vol. 15 (2002)。
- [4] Reimersdahl, T., Bley, F., Kuhlen, T. and Bischof, C. H.: Haptic Rendering Techniques for the Interactive Exploration of CFD Database in Virtual Environments, Proceedings of the workshop on Virtual environments 2003, pp. 241-246 (2003)。
- [5] 野間春生、岩田洋夫: フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現、Progress in Human Interface, Vol. 3, pp. 111-120 (1994)。
- [6] 矢野博明、廣瀬通孝、小木哲朗、田村善昭: 振動触覚グローブを用いた流れ場表現、情報処理学会論文誌、Vol. 40, No. 2, pp. 414-421 (1999)。
- [7] Cruz-Neira, C., Sandin, D. J. and DeFanti, T. A.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proceedings of SIGGRAPH '93, pp. 135-142(1993)。
- [8] 浅野祐一: 重点マスター気象予報士試験、弘文社(2000)。