

# 人間の指先における微風の知覚特性に関する研究

橋本渉\*1 今枝良司\*2

## Tactile Perception of Artificial Breezes with Human Finger

Wataru Hashimoto\*1 Ryouji Imaeda\*2

**Abstract** – In this study, we focus on wind sensation stimulated without physical contact to haptic devices. For applying the wind sensation to the information display, we examined the perception ability of the index finger by using a small cooling fan. We attempted to measure the absolute threshold of the wind sensation, the smallest perceptual difference between two stimuli varied in direction and intensity. The result of the psychological experiment shows that the absolute threshold of the wind perception on the index finger is approximately 0.6[m/s].

**Keywords** : Wind Sensation, Passive Touch, Tactile Perception, Human Finger

### 1. はじめに

人間の皮膚感覚や深部感覚に情報を呈示すると、あたかも物体に触れているような感覚を生成することができる。このような研究分野はハプティクスと呼ばれ、活発に研究されている。多くの研究では、皮膚や筋肉に刺激や外力を呈示するため、何らかの物理的変化を生み出す装置を人間に装着し、感覚器官に直接接触させるのが一般的である。

ところで、人間の触感覚を知覚レベルで分類すると、受動触と能動触という2つに分類できる。能動触とはいうまでもなく、人間の意識が働いている状態で物体を触り、知覚するというものである。一方、受動触とは、周囲の物理的な変化を受動的に知覚するというものである。自分の手を額にあわせたとき、額を熱く感じるか、手を冷たく感じるかは、それぞれ受動触、能動触の側面をよく表している。現在おこなわれている研究では、この能動触を呈示することを主眼においている。

一方、受動触に着目すると、風や温度などの接触を伴わない知覚が含まれている。無意識に熱の放射を受けたり、あるいは風を肌で受けるのは、この受動触に分類される。風や温度は人間の周囲に物理的な変化を作り出す必要があるものの、基本的には人間に非接触で皮膚に直接、情報を呈示することが可能である。本研究ではこの受動触に着目し、身体に非接触な状態で皮膚感覚に情報を呈示するものとして、風覚による感覚呈示を試みる。

### 2. 従来研究

非接触で情報を伝えることのできる手段としては、風のほかに熱や磁気によるものがある。熱の場合は、熱源から輻射されたエネルギーを受けることになる。しかし、応答性や熱エネルギーの伝達効率が悪いといった問題がある。一方、磁気によるものでは、強力な磁場を発生させて近くの磁性体にエネルギーを伝えることになる。しかし、磁場を発生させるための消費電力が大きくなる、人間が磁性体を持っていない限りならぬ、他の磁性体は近づけられないという問題がある。

風によって情報を伝達するという研究は、従来よりVRの分野でなされている。例えば、小木らの風覚ディスプレイ<sup>[1]</sup>は、視覚や聴覚と風覚を統合し、流れ場などの空間データを直感的に表現することを試みている。4つのファンから生成される風を人間の手に呈示し、流体解析データのベクトル場を表現した取り組みである。視覚や聴覚のみならず、風覚を利用することによって、データに対する知覚精度が高まることを報告している<sup>[2]</sup>。

一方、一切の装着物を操作者にさせず、バーチャル空間でオブジェクトと接触したときの感覚を送風によって呈示するという試みもある。手の距離をセンサで検出し、送風機の延長線上で1自由度の力覚提示を実現している<sup>[3]</sup>。

NTTサイバースペース研の風圧による力覚呈示システムは、風のエネルギーによって非接触で力覚を伝達できる装置である。ユーザは装置に拘束されることなく力覚を受けることが可能である。直接、皮膚に風を受けるのではなく、道具を介して効率的に風を受けよう力覚を呈示している<sup>[4]</sup>。

\*1: 大阪工業大学情報科学部

\*2: (株)三笑堂

\*1: Osaka Institute of Technology

\*2: Sanshodoh Co.,Ltd.

風覚ではないが、嗅覚呈示における匂い情報のキャリアとして風を利用しているものもある。匂いの化学物質を伝達するために、エアープンプを利用したもの<sup>[5]</sup>や、空気砲などを用いたもの<sup>[6]</sup>がある。基本的に空気を刺激伝達の媒介としているため、風によって匂いを運ぶことになる。嗅覚の呈示を目指しており、人間には風の勢いを感じさせないような工夫がされている。

本研究では皮膚感覚を積極的に利用するため、人間の皮膚感覚における風の知覚特性を調べ、風の強度や方向などの弁別能力について報告するものである。

### 3. 微風による風覚の絶対閾の推定

人間の皮膚感覚のうち、圧覚閾が最も低い箇所は顔であり、次に指先が続くとされている<sup>[8]</sup>。ここでは人間に風覚を呈示するために必要な最小エネルギーとして、人間の指先における絶対閾を調べる。小型のファンで微風を生成し、風として認識できる最小の刺激量を調べる。

#### 3.1 実験装置

微風を生成するための装置として、小型 DC ファンを用いて呈示装置を作成した。実験に利用した装置は図 1 に示すとおりである。図では 9 個のファンを取り付けているが、本研究で実際に使用するのは 1 つだけである。ファンはシコー技研の小型 DC ファン (IC-FAN,2510-5L) で、25mm 角のものを使用している。ファンの回転数を検出するため、ファンの裏側に銀色のマーカーを塗布し、フォトインタラプタを配置してパルスを検出できるようにしている。

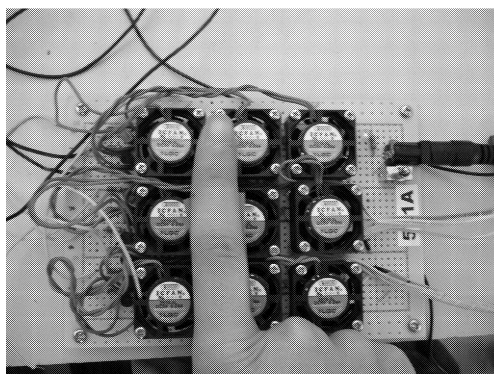


図 1 微風生成のための小型 DC ファン (25mm)  
Fig.1 Small DC Fan (25mm) for producing a breeze

ファンの回転数制御には PWM 制御を用いている。使用したファンの特性を調べてみたところ、PWM のデューティー比と回転数が比例関係になっていなかった。また、同じデューティー比でも、比率を上げていく場合と下げていく場合とで異なる回転数になっている

ことがわかった。そこで、回転数の検出によってフィードバック制御をおこなっている。

微風を定量的に計測するため、熱線式のスティック型風速計 (testo405-v1) を用いた。この計測器の測定範囲は、温度 0~50℃では 0~10m/s まで可能で、分解能は 0.01m/s である。計測精度は、温度 25℃では計測値の ± 0.1~0.3m/s である。

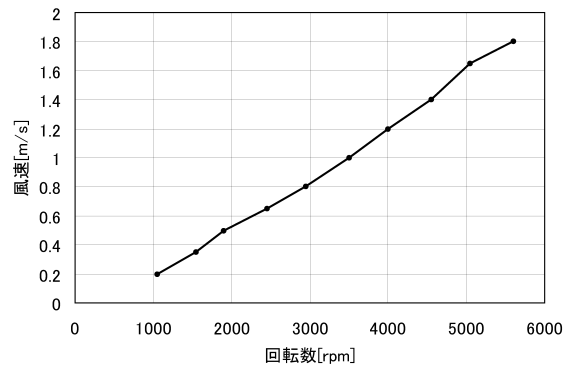


図 2 小型 DC ファン (25mm) の回転数と風速の関係

Fig.2 Relationship between rotation speed of a small DC fan(25mm) and wind speed

小型 DC ファンから発生する微風の速度を測定してみたところ、風速は 0.2m/s~1.8m/s であった。ファンの回転数制御によって発生する風速と回転数の関係を図 2 で示している。回転数と風速はほぼ線形になっており、この範囲内で 80 段階の分解能で風を生成することができる。また、風速が 0.20m/s 以下の部分については、PWM 信号を発生しているが摩擦等の理由により回転しなかった部分である。以下の実験では、実際には回転数を制御しているが、回転数が風速と図のような比例関係にあるものとして、風速を表記している。

#### 3.2 実験方法

風覚刺激の閾値を測定するにあたって、極限法を用いた。最小風速から段々風速を上げていく上昇系列と、最高風速から段々風速を下げていく下降系列の 2 種類をおこなう。上昇系列では風を感じるようになる値、下降系列では風を感じるができなくなる値を測定する。被験者は男子学生 8 名、女子学生 2 名の計 10 名で、全員右利きである。右手の上昇系列、下降系列各 10 回、左手の上昇系列、下降系列各 10 回の計 40 回をおこなう。

手順としては、右手、左手、上昇系列、下降系列をランダムな順番でおこなう。風を一定時間指にあてていると、感覚が順応してしまうため、一度計測するごとに装置から手を離してインターバルをとっている。また、ファンの回転が見えないように手元を隠すよう

にした。回転音は知覚できなかったため、被験者の聴覚はマスクしていない。なお、実験時の室温は20度～23度である。

### 3.3 実験結果

図3,4が実験結果である。▲が下降系列、●が上昇系列で、誤差棒は10試行の標準偏差を示している。被験者A～Hが男性、被験者I～Jが女性である。被験者Fのデータが上昇系列しかないのは、今回作成した微風提示装置の風速範囲で風を感じない状態から最大まで風速を上げたが、風を感じる事ができなかったためである。どのあたりから刺激を感じるかという絶対閾を上昇系列から算出すると、個人差はあるが、左手平均が0.60m/s、右手平均が0.51m/sであった。また全系列の平均は左手が約0.89m/s、右手が約0.84m/sであった。時速3kmが0.83m/sに相当するので、無風状態でゆっくり歩いたときに受ける風とほぼ同じである。男性は、上昇系列と下降系列で閾値に大きな差があり、女性は、上昇系列と下降系列で閾値に差があまりないという結果が得られた。被験者の数が十分でないため一概には言えないが、一般に女性のほうが男性より圧覚の閾値が小さいことは知られており、閾値は女性のほうが低いことが確認された。

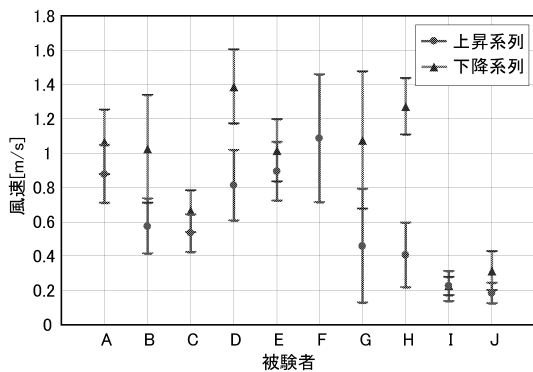


図3 微風の絶対閾実験結果(左手示指)

Fig.3 The absolute threshold of breezes on the tip of left index finger

## 4. 風覚の弁別閾推定

ここでは人間の風覚の弁別閾を調べる。弁別閾を知ることによって、風の強弱の違いを人間がどの程度知覚することができるかの目安になる。情報ディスプレイとして段階的な情報を人間の皮膚感覚に提示することが可能になる。

### 4.1 実験装置

弁別閾の推定では、二種類の刺激が同じか異なるかを区別するための実験をおこなう。絶対閾の推定実験で使用したファンで実験をおこなってみたが、人間が差を知覚できるほどのダイナミックレンジを持っていないことがわかったため、ここでは大きめのDCファ

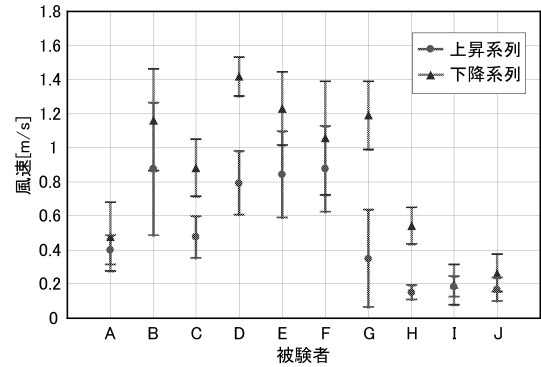


図4 微風の絶対閾実験結果(右手示指)

Fig.4 The absolute threshold of breezes on the tip of right index finger

ン(ADDA:CF-60SVR)を利用した。これはPCケース用に市販されているもので、大きさは60mm角である。このファンを制御するための環境として、USB接続によるファンコントローラ(VL system:Zephyrus)を使用した。この製品は5チャンネルのファン制御ポートを持っており、付属のソフトウェアによって5つのファンの回転数を独立に100段階で制御することが可能となっている。

ファンの大きさが変わり送風面積が増加したため、風を指だけ当てるためにアクリル板の仕切り板を設けている(図5)。アクリル板の一部分に一辺1.5cmの正方形の穴を開け、その部分だけ風が通り抜けるようにしてある。



図5 弁別閾推定のためのDCファン(60mm)

Fig.5 A DC Fan (60mm) for producing wind sensation

このDCファンの送風部分にスティック形の風速計を配置し、先の実験と同様に風の速度を測定してみたところ、風速は1.9m/s～7.2m/sであった。ファンの回転数制御によって発生する風速と回転数の関係を図6で示している。回転数と風速はほぼ線形になっており、この範囲内では約80段階の分解能で風を生成することができる。風速が1.9m/s未満の風については、摩擦等の理由によりファンが回転しなかったため、呈

示できない。

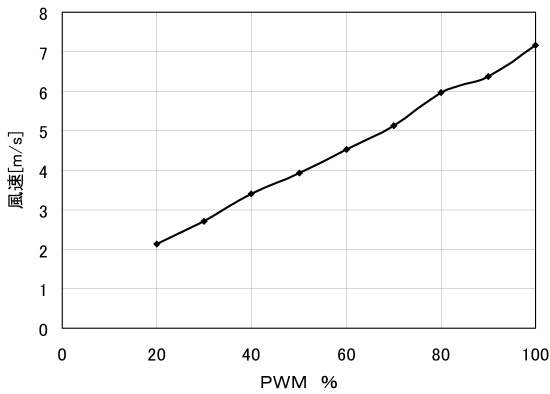


図6 DCファン(60mm)の回転数と風速の関係  
Fig.6 Relationship between rotation speed of a DC fan(60mm) and wind speed

## 4.2 実験方法

風覚の弁別閾について恒常法を用いて測定した。標準刺激は比較刺激を上下にとれるという意味でPWM40%、80% (それぞれ3.4m/s、6.0m/s) と決め、標準刺激がPWM40%では比較刺激を20%、40%、60% (それぞれ2.2m/s、4.5m/s、6.0m/s) の3段階、標準刺激がPWM80%では標準刺激を40、60、80、100% (7.2m/s) の4段階と決めた。標準刺激と比較刺激は2台のファンを利用し、被験者には片手で交互に刺激を確認できるようにしている。被験者は男子学生5名で、全員が右利きである。各標準刺激に対して比較刺激を4回ずつ行い、1人当たり28回の実験を行っていく。被験者には比較刺激の値がわからないように、ファンやモニタ画面が見えないようにする。また、被験者に回転音が聞こえないように、ヘッドフォンをつけてもらい、ホワイトノイズを流す。

手順として、標準刺激と比較刺激を一組として、右手示指に繰り返し提示し、提示の度に比較刺激の大きさはランダムに変化させる。被験者には「強い」、「変わらない」、「弱い」の3件法で答えてもらう。被験者が疲労を訴えたときには、適宜、休息時間を設けることにした。

図7,8が実験結果である。標準刺激に対する比較刺激を提示した場合の回答数をグラフ化したものである。「同じ」と回答した度数が正規分布、「強い(弱い)」と回答した度数が正規分布の累積密度関数に近似できるものとして、上弁別閾に相当する値を正規分布曲線の75%相当と考えると、標準刺激が3.4m/sの場合の上弁別閾は4.16m/s (JND=0.76m/s)、標準刺激が4.5m/sの場合の上弁別閾は5.24m/s (JND=0.74m/s)であった。標準刺激が大きくなると弁別閾が大きくなるという傾向は見られなかった。しかしこの結果は、

4.0m/s前後の風に対して0.7m/s程度の変化の違いを感じ取れることを示唆している。

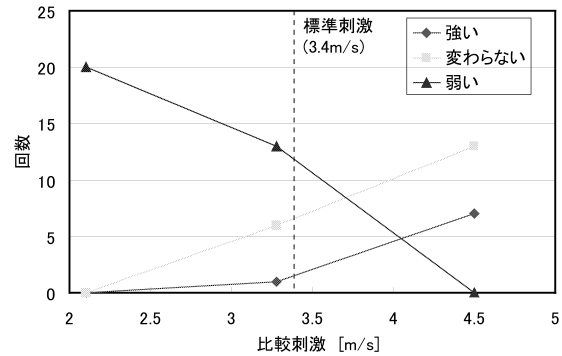


図7 右手示指における風速3.4m/sの弁別閾  
Fig.7 Threshold of the difference of standard stimulus (3.4m/s wind) on the tip of right index finger

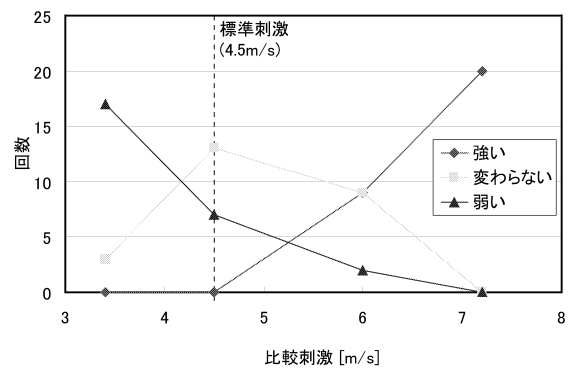


図8 右手示指における風速4.5m/sの弁別閾  
Fig.8 Threshold of the difference of standard stimulus (4.5m/s wind) on the tip of right index finger

## 5. 風覚の方向弁別閾推定

人間の風覚の方向弁別閾を調べる。方向弁別閾を知ることによって、風の出力場所の方向を特定することが可能である。

### 5.1 実験装置

ファンは弁別閾の測定の時の同じものを利用した。実験環境を図9に示す。任意の方位から風を呈示するため、丸型の板の中央に指を通すための穴を開け、ファンを固定した。また被験者からファンの位置が見えないように遮蔽板を配置した。風が呈示できる方向は、指の周囲方向のみで、指差した方向からの風は考慮していない。

### 5.2 実験方法

遮蔽板で隔てた片側に被験者が位置し、穴から右手示指だけを出す。板の反対側からは、風を被験者の指に当て、被験者にその方向を答えてもらう。このと

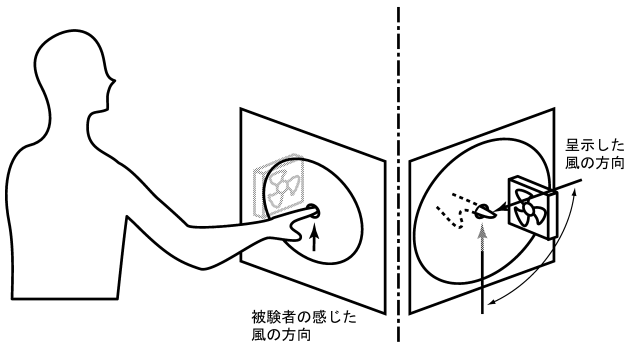


図9 風覚の方向弁別閾を調べる実験環境  
Fig.9 An environment to examine the smallest directional difference

き、指を固定した受動的な状態と、指を自由に動かして方向を探れる能動的な状態の2通りで実験を行う。風の強さは装置が呈示することのできる最も強い風速(7.2m/s)で行う。これは、被験者が確実に風を感じる事ができる値だからである。風向は20度間隔の18方向で行う。被験者は男子学生5名で全員が右利きである。

実験の手順は、実験者が18方向の中からランダムでファンを配置し、被験者が風の向きを回答するものである。回答用紙には10度おきに放射線が描かれたものを用意し、被験者が一回の試行を終えるたびに、どの方向から風を感じたかを実線で記入してもらう。実験者は、実際に呈示した方向と回答した方向とのずれを集計する。被験者が疲労を訴えたり、感覚が順応したと感じた場合は、休憩を設けることにした。実験風景を図10に示す。

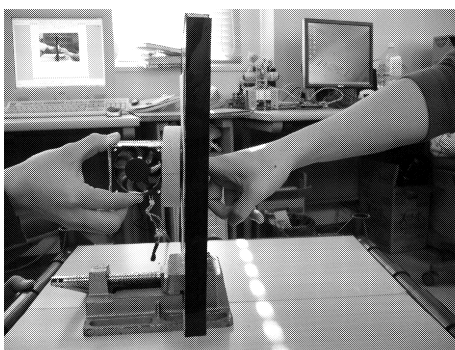


図10 風覚の方向弁別閾を調べる実験の様子  
Fig.10 An appearance to examine the smallest directional difference

### 5.3 結果

表1は指を固定した状態と回転を許した場合の、風向の知覚誤差を示している。各被験者は18回の実験を経ているので、それぞれ18回分の平均値を示している。指の回転を許した場合では、角度の知覚誤差が小さくなっていることがわかる。指を動かさない状態

では平均で約50度、指を動かした場合ではおよそ30度ぐらいまで把握することができている。

図11は指を固定した状態で、風の方角における平均誤差と誤差の標準偏差を表したものである。図の上方が指の爪側、下方が上側が指の腹側で、放射状に出ている棒が角度の知覚誤差の値を示している。●が平均、■が誤差の標準偏差を表している。これを見ると、誤差が少ない場所が下方に分布する傾向にあり、指の腹側がやや知覚誤差が小さいことを示している。上方からの知覚精度が悪いのは、風が爪に当たってしまっていることが考えられる。横方向からは、風が当たる面積が小さいことが原因として考えられる。

表1 風向の知覚誤差

Table 1 The perception error of the wind direction

	指固定	指回転
被験者 a	40	30
被験者 b	62	48
被験者 c	56	32
被験者 d	64	35
被験者 e	32	21
平均	50.8	33.2

(単位 度)

手のひら全体における風の方角弁別閾の結果<sup>[2]</sup>によれば、手のひらを固定した場合で20度、手のひらの回転を許した状態で13度の誤差という結果が得られている。この結果と比べてみると、指における方向知覚特性の精度は手のひらに比べると低くなっている。指先は人間の皮膚感覚の中でも敏感であるとされているが、刺激を受けることのできる表面積が小さいこと、風が指に回り込んでしまい方向を特定できないことが理由として考えられる。

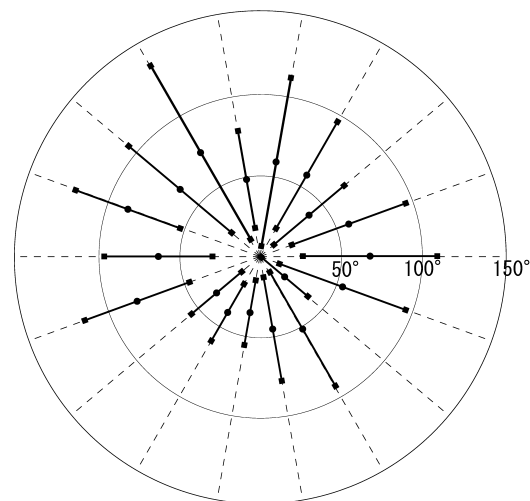


図11 風覚の方向弁別閾:指周りの方位における誤差

Fig.11 The result of the experiment measuring the smallest directional difference

## 6. 結論

本研究では、風覚を情報呈示に利用するために必要な知覚特性について調べた。今回は、人間の人差し指の絶対閾値、弁別閾、方向弁別閾を調べる研究を行った。

風覚の絶対閾値を調べることにより、人間が指先で気づくことのできる最小の刺激量がわかった。風速は約0.5~0.6m/sで、これは人間がゆっくり歩くときに指に感じる風と同じぐらいである。また、風覚の弁別閾を調べることにより、人間が知覚できる風の強さや方向がわかった。標準刺激が4.0m/s前後の風に対して、0.7m/s程度の違いをおおむね感じ取れる。また方向の知覚誤差は、指を固定した状態で平均約50度、指を自由に回転できる状態で平均約30度程度である。

以上の知見より、人間の指先に情報を呈示することが出来ることは確認できたが、深部感覚を利用した力覚などと比べると、知覚精度はあまり高くないことがわかった。実際に情報呈示に利用するためには、風覚だけの呈示によらず、視覚や聴覚など他の感覚と組み合わせた利用が望ましい。

風覚は皮膚感覚において受動触にも分類される。風が生成する受動触によって、日光浴やマッサージなどのように、リラクゼーションの効果を期待できるのではないかと考えられる。風に温度を組み合わせたり、風覚と視覚を組み合わせることによって、リラクゼーションの効果検証をおこなってみるなど、感性評価をおこなってみたい。

## 参考文献

- [1] 小木, 廣瀬: 風覚ディスプレイによるデータの提示, *Progress in Human Interface*, Vol.2, pp.13-18, 1993
- [2] 小木, 廣瀬: 科学技術データ提示における多感覚の統合効果, *日本機械学会論文集C編*, Vol.61, No.584, 1995
- [3] 井上, 加藤: 次世代マルチメディアによる遠隔制御システム, *情報処理学会第64回全国大会*, No.4, pp.689-693, 2002
- [4] 鈴木, 小林, 石橋: 無拘束なインタフェースを目指した風圧による力覚提示方式, *情報処理学会論文誌*, Vol.43, No.12, pp.3643-3652, 2002
- [5] Y.Yanagida, Projection Based Olfactory Display with Nose Tracking, *Proc.of IEEE VR*, pp.43-50, 2004
- [6] 廣瀬, 谷川, 田中, 崎川: 嗅覚ディスプレイに関する研究, *日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集*, pp.193-196, 2000
- [7] 田中: 心理学的測定法, 東京大学出版会, 1977
- [8] 大山, 今井, 和気: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, 1994