

風を用いたインタフェース実現に向けた 風に関する知覚の定量的調査

竹ノ内 朝陽^{1,a)} 矢谷 浩司^{2,b)}

概要：風は新たなユーザインタフェースの情報提示手法として近年注目されている。しかし、先行研究ではインタフェースとして利用可能な風を起こすシステムを実現することが主な目的となっており、風による刺激と人間の知覚の関係性においては明らかになっていないことも多い。本研究では、人間の知覚を考慮した風を用いたユーザインタフェースを実現するために、扇風機を用いた風に対する知覚を定量的に評価する実験システムを構築した。そのシステムを用いて、ユーザが風の変化に気づくのに必要な強さの変化量を調査した。さらに、調査した結果から風と人間の知覚に関する知見をまとめることで風によるユーザインタフェースの設計のガイドラインを提案する。

1. はじめに

世の中には様々な情報提示手法を用いたユーザインタフェースが存在する。現在のインタフェースの情報提示手法としては、液晶ディスプレイなどの視覚を用いたインタフェース、スピーカーなどの聴覚を用いたインタフェースが一般的である。同様に、モバイル端末を中心に触覚を用いたインタフェースも幅広く普及しており、HCIの分野において触覚インタフェースの研究が盛んである。例えば、バイブレーションを用いたもの [9, 11, 15]、圧力を用いたもの [3, 5, 6, 16]、温度変化を用いたもの [12, 21] などが挙げられる。これらの触覚インタフェースは触覚刺激を伝達するためにデバイスとユーザが密着する必要があるという点で共通している。一方でデバイスとユーザが密着する必要のない触覚インタフェースも開発されている。そのようなインタフェースでは、超音波 [2, 13, 14] のほか、風も情報提示手法として活用されている [1, 4, 7, 8, 18]。

風を情報提示手法として用いたインタフェースは多く開発されている。例えば、頭に装着してユーザに風による触覚刺激を与えるシステム [1, 7]、空気砲を用いて空気渦による触覚刺激を発生させるシステム [4, 18]、小型のファン

を用いて風を発生させるウェアラブルなシステム [8] などが挙げられる。一方で、先行研究ではインタフェースとして利用可能な風を起こすシステムを実現することが主な目的となっており、風による触覚刺激と人間の知覚の関係の調査は、システムの実現または評価のために必要な範囲に留まっている。そのため、風を用いたインタフェースの構築に広く利用できる風と人間の知覚の関係に関する一般的な知見は十分に明らかになっていない。したがって、風の強さや風の温度など風に関する特性を変化させたとき、人間はどのような風の変化を知覚可能か、あるいは知覚しやすいかを明らかにすることで、風を用いた様々なインタフェースの構築に役立てることができる。

本研究では、特に風の強さの変化と知覚の関係を定量的に評価することを目的とする。そのために、風の温度や変化前の風の強さといったパラメータに対し、その状態から風を強くまたは弱くしていった場合に人間が知覚可能な風の変化量を定量的に評価する実験を行った。結果、変化前の風が強いほど人間が知覚するのに必要な風の変化量は大きくなること、涼風のときより温風のときのほうが風の強さの変化量は小さくなることがわかった。さらに、このような知見が蓄積されることによって扇風機など一般的な風を発生させるシステムを活用したインタフェースの構築が可能になることを、アプリケーションシナリオの提案を通じて示す。

2. 関連研究

本研究では、風を用いたインタフェースを設計する際に考慮すべきガイドラインを提示するために、風の温度や

¹ 東京大学 工学部
Interactive Intelligent Systems Laboratory,
Faculty of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

² 東京大学大学院 工学系研究科
Interactive Intelligent Systems Laboratory,
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

a) asahi@iis-lab.org

b) koji@iis-lab.org

変化前の風の強さといったパラメータに対し、その状態から風を強くまたは弱くしていった場合に人間が知覚可能な風の変化量を定量的に評価することを目的とする。そこで本節では、最初に風を用いたユーザインタフェースの研究事例を述べ、続いて風による触覚刺激と人間の知覚の関係を定量的に評価した研究の事例を挙げる。

2.1 風を用いたユーザインタフェース

風を情報提示手法としたインタフェースを開発した研究事例は数多く存在する。例えば Cardin ら [1] は、頭に装着して頭部周辺に風による触覚刺激を発生させるディスプレイを開発した。また Kojima ら [7] は、Cardin らのシステムが巨大で重量があるという問題を指摘し、よりコンパクトで軽いシステムの開発を目指した。彼らは風による刺激に対して最も敏感な体の部位は耳であることを明らかにし、頭部に装着して耳に局所的な風を当てる触覚ディスプレイを開発した。

このような体に装着するシステムのほかに、体に身につけないシステムの研究事例も存在する。Gupta ら [4] は、空気砲によって発生させる空気渦を利用して離れた場所から触覚フィードバックを与えるシステムの開発を行った。バイブレーションのような従来の手法では離れた場所から触覚フィードバックを与えることができず、体にシステムを身につけなければならないという問題に対して、彼らは空気砲によって発生させる空気渦を触覚フィードバックに利用することを提案した。そのために、空気渦形成に関する理論を調査し、離れた場所からの触覚フィードバックを実現するための空気砲の設計パラメータを詳細に検討して、システムのプロトタイプを作成した。Sodhi ら [18] も同様の観点から、複数のスピーカーと偏向ノズルを用いた空気砲を設計し、離れた場所からリッチな触覚フィードバックを提供するシステムを開発した。また開発した空気砲を用いたインタラクティブなシステムのプロトタイプを作成した。

さらに、風を用いたインタフェースの研究の中には小型でウェアラブルなシステムも存在する。Lee [8] は風を用いたウェアラブルな触覚ディスプレイを開発した。Lee は、既存のウェアラブルな触覚ディスプレイはシステムと肌が密着する必要があるため、システムの位置が制限されたりユーザが不快な気分を抱いたりするという問題を指摘した。そこで、そのような問題を解決するために、風を用いて触覚フィードバックを与えるシステムを提案した。加えて、システムを実現するために必要となる人間が風による刺激の差異を知覚できるしきい値などを調査する実験を実施した。さらに、風を用いたウェアラブルな小型の触覚ディスプレイを実装し、バイブレーションなど従来の手法を用いた触覚ディスプレイと比べて情報伝達の観点から十分な性能を示すことを明らかにした。

このように風を情報提示手法として用いたインタフェースを実現する研究は幅広く行われている。しかし先行研究では、風による触覚刺激を与えるシステムを実現することが主な目的となっており、風と人間の知覚の関係を調査する実験は、そのシステムの実現または評価のために必要な範囲に留まっている。一方、本研究の目的は、風を用いたインタフェースを設計する際に一般的に考慮すべき風による触覚刺激と人間の知覚の関係、特に風の強さの変化量に対する知覚に関する定量的な理解を得ることにある。

2.2 風による触覚刺激と人間の知覚の関係の調査

風を用いたインタフェースを実現するために風による触覚刺激と人間の知覚の関係を調査した研究もいくつか存在する。Tsalamlal ら [19] は、エアジェットを用いた触覚デバイスを実現するために、ノズルから出力されるエアジェットと手のひらの知覚の関係を調査する2つの心理物理学実験を行った。1つ目の実験では、ノズルと手のひらの距離によって人間が知覚するのに必要な最小のエアジェットの強さがどのように変化するかを調査し、これらに線形な関係があることが明らかになった。2つ目の実験では、3個の基準となるエアジェットに対して人間が知覚するのに必要な最小のエアジェットの強さの変化量を調査し、これらに線形な関係があることや、エアジェットによる刺激と人間の知覚の関係が Weber の法則に従うことを示した。さらに Tsalamlal らは、研究を発展させてエアジェットによる刺激とそれに対して人間が抱く感情の関係を調査する実験も行った [20]。

ノズルから出力されるエアジェットでなく、空気砲によって生成される空気渦に対する人間の知覚の関係を調査した研究も存在する。Sato ら [17] は、人間の頬において、空気砲で発生させる空気渦による刺激と人間の知覚の関係を調査する実験を行った。実験によって人間の頬が空気砲による空気渦の刺激に対して十分に敏感であることを明らかにし、人間の頬に刺激を与えることによる触覚ディスプレイを実装した。

また、小型のファンによって生成される風と人間の知覚の関係を調査した研究も存在する。Lee ら [10] は、バイブレーションなど従来の手法による触覚刺激と風による触覚刺激では感覚器の観点から知覚に相違が存在し、従来の設計のガイドラインをそのまま適用することができないという問題を指摘した。また風を用いたウェアラブルな小型の触覚デバイスを設計するにあたって実験に基づく設計パラメータが不足していることを指摘した。そこでノズルを用いた実験システムを構築し、人間が風による刺激の差異を知覚できるしきい値などを調査し、風に対する人間の知覚特性を明らかにする実験を行った。

このように風による触覚刺激と人間の知覚の関係を調査する実験は、エアジェットや空気砲による空気渦など様々

表 1: パラメータとして設定する風の特性. これらの風の特性は人間が風の変化を知覚するのに必要な強さの変化量を変えると予想される. これらのパラメータの組み合わせを変化させて実験参加者に風を当て, 風の強さを変化させる実験を行う. ただし実験システムの都合上, 無風の状態から風を弱くしたり最大風速の状態から風を強くしたりすることはできない. よって開始時の風速 (6 通り) と風速変化の方向 (2 通り) の組み合わせの個数は 10 通りとなり, 全てのパラメータの組み合わせは 60 通りとなる.

パラメータ	パラメータの設定方法
開始時の風速	無風・5 段階の風速
風速変化の方向	強くする方向・弱くする方向
風の温度	涼風・温風
風を当てる体の部位	正面・背面・側面 (図 1 参照)

な種類の風において行われている. また, 風の特性を変化させることで風による刺激に対する人間の知覚が変化することや, バイブレーションなど他の手法による触覚刺激と風による触覚刺激では人間の知覚が異なることが明らかになった. 本研究では先行研究の手法を参考にし, 風の特性を変化させると風の強さの変化に対する人間の知覚が一般的にどのように変化するかを明らかにする.

2.3 まとめ

本節では, 本研究が着目する風を用いたインタフェースの実現に関する研究事例について述べ, 風を用いたインタフェースを設計する際に一般的に考慮すべきガイドラインを提示することを目的とする本研究に新規性が存在することを示した. 続いて, 風による触覚刺激と人間の知覚の関係を調査する研究事例について述べ, 触覚刺激に関する特性を変化させることで人間の知覚を変化させることが可能であることを紹介し, 本研究において設計のガイドラインを提示するために風と人間の知覚の関係を明らかにする必要があることを示した.

3. 実験で変化させる風の特性

本研究の最も重要な目的は, 様々な風の特性を変化させたとき人間が知覚することのできる風の強さの変化量を明らかにすることである. そのため, この変化量を変えようと予想される風の特性を実験のパラメータとして設定した. 表 1 に実験のパラメータとして設定する風の特性を示す. 実験ではこれらのパラメータの組み合わせ (60 通り) を変化させて風を実験参加者に当て, 風の強さを変化させる実験を行う. 具体的には, 最初に風速と風の温度を設定し, 実験参加者の特定の体の部位に風が当たるようにする. 続いて風速を変化させ, 実験参加者は風速の変化に気づいたときに合図する. 風の変化の開始時と変化に気づいた時点での風速を記録することで, 実験参加者が知覚することのできた風の強さの変化量を明らかにすることができる.

実験において記録する内容は以下である. これらの内容



(a) 正面に当てる場合 (b) 背面に当てる場合



(c) 横 (右) に当てる場合 (d) 横 (左) に当てる場合

図 1: 風を当てる場所の一覧. 体の正面, 背面, 側面にそれぞれ風を当てる. 側面の場合, 左右のうち実験参加者によって定められた方に風を当てる.

から人間が知覚するのに必要な風の強さの変化量を評価することができる.

- 風の変化の知覚の有無
- 風の変化を開始する時点の風速 (開始時の風速)
- 風の変化を知覚した時点の風速 (終了時の風速)

4. 実験システムの構築

本実験で用いるシステムには, 前節で述べた風の特性を変化させることができること, 記録内容を適切なタイミングで自動で記録できること, 各実験参加者において同じ実験条件を再現できることが求められる. 本節では, 最初に実験システムを構築するにあたって用いた機材について述べ, 続いて構築した実験システムの設計について説明する.

4.1 扇風機

本実験システムでは, 風を発生させる装置として市販の扇風機を用いる. 市販の扇風機を用いることで, 風の特性を安定して変化させることができ, 実験参加者によって条件を統一することができる. 本研究では dyson 製扇風機 AM09 *1 を用いて, 実験システムを構築することにした. この扇風機は 10 段階に風の強さを変更可能で, 通常の扇風機の機能に加えて温風を出力する機能などを持つ. また風の形状をワイドモード (広範囲にわたる風を送るモード), フォーカスモード (一定の場所に集中した風を送るモード) に変化させることができ, フォーカスモードを用いることでサーキュレータのように離れた場所にまとまった風を送ることができる.

この扇風機の風速に関する特性, すなわち 10 段階の風の

*1 <https://www.dyson.co.jp/fans-and-heaters/fan-heaters.aspx>

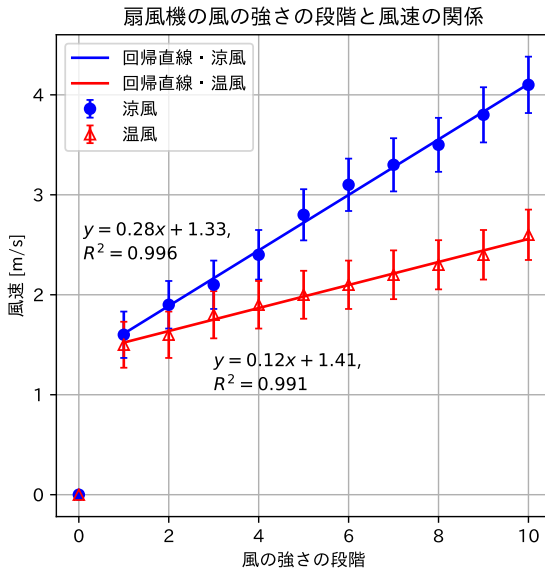


図 2: dyson 製扇風機 AM09 の 10 段階（レベル）の風の強さと風速の実測値の関係。レベル 0 は電源が切られた状態（無風）を表す。風速の測定条件は実験と同様になっており、実験参加者の体に当たる直前の風の風速が計測されている。涼風、温風に関わらず無風の状態を除いて扇風機の各段階の風の強さと風速には比例関係があることがわかる。エラーバーは測定器のデータシートが示す測定誤差の範囲を表す。

強さと実際の風速の関係は、図 2 のようになっている。レベル 0 は、扇風機の電源を切った状態（無風の状態）である。測定には信頼性を担保するため testo 製ペーン式風速計 410-2 *2 を用いた（本風速計は本番の実験でも用いた）。なお、風速の測定条件は後述する実験と同様になっており、実験において実験参加者の体に当たる直前の風の風速が計測されている。エラーバーは測定器のデータシートが示す測定誤差の範囲 *3 を表す。測定の結果、無風の状態を除いて扇風機の段階と風速にはほぼ比例の関係があることがわかった。

また、風の温度を同様の条件で測定すると、実験参加者の直前の位置において、涼風モードでは室温である 24℃ から 27℃ 程度の風が流れ、温風モードでは 33℃ から 35℃ 程度の風が流れることがわかった。

4.2 実験システムの実装

実験に用いる扇風機である AM09 は付属する赤外線を用いたりモコンによって機能を制御することができる。しかし、付属するリモコンを用いて手で扇風機を制御すると風速を変化させる間隔などの実験の条件を実験参加者の間で統一することができない。そこで、PC から扇風機を操作できるように赤外線 LED 等を用いたりモコンを作成し

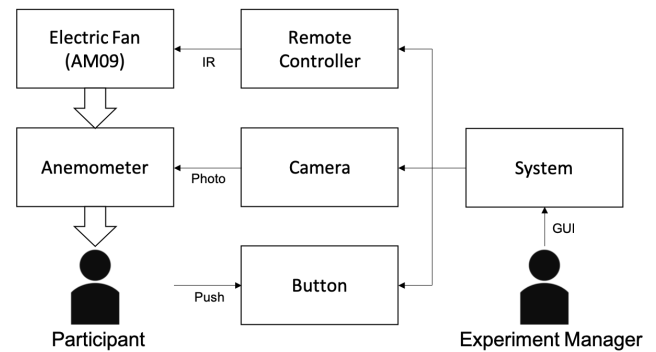


図 3: 実験システムの構成図。

た。リモコンは、Raspberry Pi、赤外線受信モジュール、赤外線 LED など構成されている。

風速の測定には、前述した testo 製ペーン式風速計 410-2 を用いる。測定される風速は測定する位置によって値が変化し、測定位置を統一する工夫が必要であるため、スタンドを用いて風速計を固定することにした。また、この風速計は PC などに値を出力する機能を持たないため、カメラを用いて表示部を撮影することによって風速計の値を記録するようにした。

実験参加者が風の強さの変化に気づいたタイミングを記録する手段としてはボタンを用いた。Arduino を用いることで実験参加者がボタンを押したタイミングを PC 上で記録することができる。

以上で述べた機材を図 3 のように組み合わせ、実験システムの要件を満たす実験システムを構築した。なお風の変化の開始時と参加者が風の変化を知覚してボタンを押すとき、風速を自動で記録するように実験システムを設定した。

5. 実験

前節で述べた実験システムの構築が完了した後、実験を実施した。実験参加者は大学生 9 名（男性 6 名、女性 3 名）である。

5.1 実験の手順

ここでは具体的な実験の手順について述べる。3 節で述べたように実験で変化させるパラメータの組み合わせは 60 通り存在する。そこで、60 通りの組み合わせをランダムに分割し、2 個のグループ（グループ A、B）とした。そして半数の参加者（男性 3 名、女性 2 名）をグループ A に割り当て、残りの参加者（男性 3 名、女性 1 名）をグループ B に割り当てた。また、それぞれのグループにおいて、半数の参加者は体の側面に風を当てるときには右側に当て、残りの参加者には左側に当てるようにした。

図 4 に実験の様子を示す。実験室には位置が固定された扇風機、風速計、座席が順に並んでいる。座席の位置は、扇風機の真正面かつ座席を回転させたとき背もたれが机に触れる位置に固定してある。なお座席の背もたれは固定さ

*2 <https://www.testo.com/ja-JP/testo-410-2/p/0560-4102>

*3 $\pm(0.2 \text{ m/s} + \text{測定値の } 2\%)$



図 4: 実験の様子。扇風機と風速計が設置され、実験参加者がボタンを持って座席に着座している。実験参加者は、視覚と聴覚の影響を可能な限り排除するため目隠しとイヤーマフを装着している。座席の位置は、扇風機の真正面かつ座席を回転させたとき背もたれが机に触れる位置に固定してある。背もたれは固定され、風を当てる体の部位を変えるために回転できるようになっている。風速計は、扇風機と実験参加者を結ぶ直線上で、体に当たる直前の風の風速が計測できるように実験参加者の直前に設置されている。

れている。また座席は回転できるようになっており、これを用いて図 1 に示すように風を当てる体の部位を変えることができる。風速計は扇風機と座席を結ぶ直線上で、体に当たる直前の風速を計測できるように実験参加者の直前に設置されている。

実験参加者は座席に座り、視覚と聴覚の影響を可能な限り排除するため、目隠しおよびイヤーマフを装着した。また手にボタンを保持して、風の変化に気づいたタイミングで押すことができるようにした。

実験において実験参加者は、以下に示すタスクを 60 回繰り返した。実験参加者は 20 回ごとに小休憩をとった。休憩も含めて実験時間は 90 分から 120 分程度であった。60 回のタスクの順序は以下の手順で決定された。

- (1) 実験参加者に割り当てられた 30 通りのパラメータの組み合わせをそれぞれ 1 タスクとする (30 タスク)。
- (2) それぞれのパラメータの組み合わせにつき 2 回の実験を行うように全てのタスクを 2 倍にする (60 タスク)。
- (3) タスクの順序による影響を可能な限り排除するため、全てのタスクを参加者ごとにランダムに並び替える。

続いて 1 回のタスクの流れを以下に示す。実験システムによりほとんどの流れは自動化されており、実験実施者は次のタスクに移行するとき、風の変化を開始するときのみ操作を行った。一方、実験参加者が行う操作は風の変化を感じたときにボタンを押すだけであった。

- (1) 実験参加者の座席を回転させて風を当てる体の部位に風が当たるようにし、扇風機をタスクによって定められた状態に設定する。

- (2) 前回のタスクから風の温度が変化する場合、1 分程度時間をとって温度が十分変化するまで待機する。
- (3) 実験参加者に肩を 1 回叩くことにより実験開始の合図を出し、風の変化を開始する。実験システムは扇風機の風速を一定時間ごとに 1 段階ずつ変化させる。
- (4) 実験参加者は風の変化を「はっきり」と感じたときにボタンを押す。
- (5) 実験参加者がボタンを押したとき、または実験参加者が風の強さの変化を知覚せず一定時間が経過したとき参加者の肩を 2 回叩いて実験終了の合図を出す。
- (6) 扇風機をリセットして、次のタスクに移行する。

6. 結果

6.1 得られたデータの前処理

実験で得られたデータから風の変化が知覚されたタスクのデータを抽出した。このデータには以下の情報が含まれている。

- V_0 : 開始時の風速
- V_1 : 終了時の風速
- $\Delta V (= V_1 - V_0)$: 風速の変化量
- D : 風速の変化方向を表す二値 (弱くするとき 0, 強くするとき 1)
- T : 温度モードを表す二値 (涼風のとき 0, 温風のとき 1)

データを検査したところ、開始時の風速 V_0 が 0.0 m/s のもの、すなわち扇風機の電源を切った状態から開始したタスクのデータは、明らかに他のデータと傾向が異なることがわかった。これは図 2 に示すように、扇風機の電源を切った状態と電源のついた他の状態で風速が大きく異なるためである。よって、電源を切った状態から開始したタスクのデータを後の分析から取り除くことにした。また、データの中には風速の変化量 ΔV が 0.0 m/s であるにもかかわらず、「知覚された」と記録されているデータなど明らかに信頼性に乏しいデータも存在したため、このようなデータも取り除いた。その結果として、444 個のデータを以下の分析で用いることとした。

続いて、皮膚に当たって人間が知覚する刺激は風速ではなく風圧であることに着目して風速と風圧の変換を行った。開始時の風速 V_0 、終了時の風速 V_1 をそれぞれ風圧に変換し、開始時の風圧 P_0 、終了時の風圧 P_1 、風圧の変化量 $\Delta P = P_1 - P_0$ を計算した。変換式は式 (1) で与えられる^{*4}。ただし、 P は風圧、 ρ は空気密度 (1.2 kg/m³ ^{*5})、 v は風速である。

^{*4} https://www.engineeringtoolbox.com/wind-load-d_1775.html

^{*5} <http://www.mterm-pro.com/machine-yougo/fluid-dynamics/water-air-bussei.html>

表 2: 回帰分析の結果. 5% の有意水準において目的変数 ΔP は, 3 つの説明変数 P_0 , T , D による有意差が見られた.

説明変数	推定された係数	標準偏差	p 値
(切片)	1.95	0.13	$< 2 \times 10^{-16}$
P_0	0.13	0.02	1.3×10^{-9}
T	-1.06	0.10	$< 2 \times 10^{-16}$
D	0.24	0.08	0.0034

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

6.2 分析結果

前処理を行ったデータを分析するために回帰分析を実施した. 回帰分析の目的変数を風圧の変化量 ΔP とし, 説明変数を以下のように設定した.

- P_0 : 開始時の風圧
- D : 風速の変化方向を表す二値 (弱くするとき 0, 強くするとき 1)
- T : 温度モードを表す二値 (涼風のとき 0, 温風のとき 1)

表 2 に回帰分析の結果を示す. 回帰分析の結果, 5% の有意水準において風圧の変化量 ΔP は, 開始時の風圧 P_0 , 風速変化の方向 D , 風の温度 T による有意差が認められた. なお, 決定係数は $R^2 = 0.4542$ であった.

よって, 開始時の風圧 P_0 が大きいほど, 人間が知覚するのに必要な風圧の変化量 ΔP は大きくなることがわかった. 同様に, 涼風のときより温風のときのほうが ΔP は小さくなり, 風を弱くするときより強くするときのほうが ΔP は大きくなることがわかった.

7. 考察

7.1 開始時の風圧と風圧の変化量の関係

回帰分析において開始時の風圧 P_0 の係数は約 0.13 (標準偏差 0.02) で, P_0 が大きいほど ΔP が大きくなることがわかった. 図 5 に示した開始時の風圧と風圧の変化量の関係から同様の傾向が読み取れる. よって, 風を用いたインタフェースを設計する際は, 風の強さを変化させる前の風圧を考慮し, その風圧が大きいほど風圧の変化量を大きくする必要があると考えられる.

このような傾向を示す要因としては, P_0 と ΔP が Weber の法則に従っていることが挙げられる. Weber の法則によれば, 刺激の変化を知覚できる最小の差異 (丁度可知差異) は, 基準となる変化前の刺激の強度に比例する. 風による触覚刺激に関しても他の刺激と同様に Weber の法則は成立すると予想でき, 風圧の変化量は開始時の風圧に比例して増加するという結果に一致する.

一方で, ばらつきが大きい要因としては, Weber の法則において Weber 比 ($\Delta P/P_0$) に個人差がある可能性があることが挙げられる. 本研究では実験参加者ごとの個人差

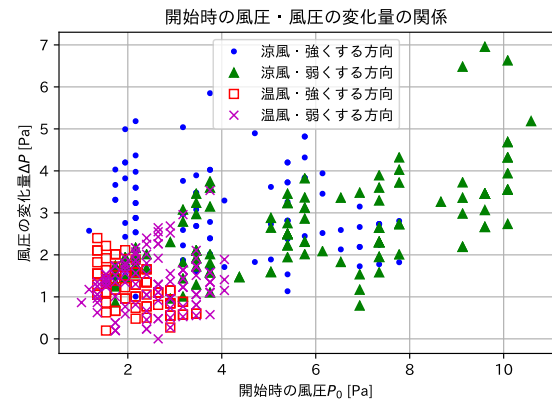


図 5: 開始時の風圧と風圧の変化量の関係. 開始時の風圧が大きくなるほど風圧の変化量が大きくなっていることがわかる.

を考慮せず, 実験参加者ごとにタスクの順序などの条件を変化させて実験を実施したが, 実験参加者ごとに条件を統一して実験を行うことで, Weber 比に個人差があるかを明らかにすることができると考えられる.

7.2 風の温度による風圧の変化量の差異

回帰分析において風の温度 T の係数は -1.06 (標準偏差 0.10) と推定され, 涼風のときより温風のときのほうが ΔP が小さくなるということがわかった. 図 6 に風の温度による人間の知覚に必要な風圧の変化量の差異を示した. 回帰分析の結果と同様に, 温風と比べて涼風では人間の知覚に必要な風圧の変化量が大きいことが読み取れる. よって, 風を用いたインタフェースを設計する際は, 風の温度を考慮し, 温風のときより涼風のときのほうが風圧の変化量を大きくする必要があると考えられる.

この結果の要因として, 温覚による触覚の抑制が考えられる. 本実験と同様に伊福部 [22] もまた, 触覚に関する知覚能力と対象物の温度の関係性を明らかにするための実験を行っている. 伊福部の実験では指先における物体のずれの検出能力と物体の温度の関係性の分析が行われた. その結果, 物体の温度が指先の温度 (約 32°C) と一致している際に, 指先の検出能力が最も高くなることがわかった. この原因は, 物体と指先の温度が同一である場合, 指先の触覚が温覚に抑制されないからである. 本実験でも同様に, 人体の温度とより近い温風の条件下において, 風圧の変化量が小さくなることが確認された.

7.3 風速変化の方向による風圧の変化量の差異

回帰分析において風速変化の方向 D の係数は 0.24 (標準偏差 0.08) と推定され, 風を弱くするときより風を強くするときのほうが ΔP は大きくなるということがわかった. 図 7 に風速変化の方向による人間の知覚に必要な風圧の変化量の差異を示した.

本実験と同様に沖野ら [23] もまた, 触覚刺激の変化の

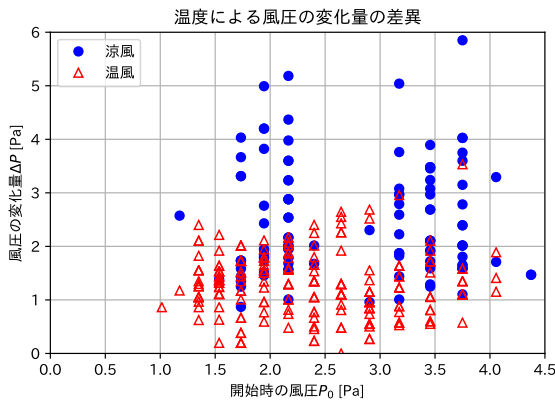


図 6: 風の温度による風圧の変化量の差異. 温風と比べて涼風では人間の知覚に必要な風圧の変化量が大きいことがわかる.

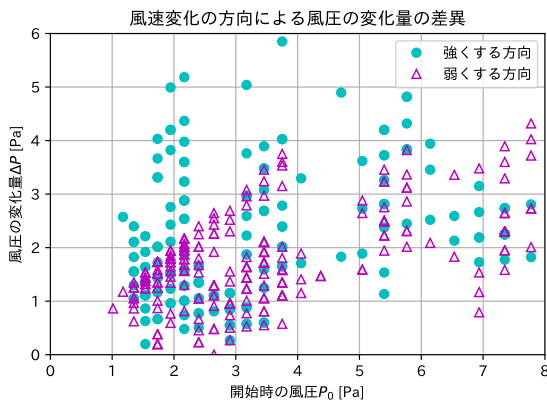


図 7: 風速変化の方向による風圧の変化量の差異. 風を弱くするときより風を強くするときのほうが人間の知覚に必要な風圧の変化量が若干大きい, 大きな差異があることは読み取りづらい.

方向(強くするか, 弱くするか)によって知覚がどう変化するか調査する実験を実施した. 沖田らの実験では, 振動による刺激と知覚するまでの反応時間の関係性を調査したものの, 振動の方向と反応時間に大きな関係性が見られなかったため, インタフェース設計の際には補助的に用いるのが良いと結論づけている. 本研究でも同様に, 風速変化の方向による風圧の変化量の差異は, 温度によるものに比べて非常に小さく, 図 7 から風圧の変化量に大きな差異があることは読み取りづらい. よって風速変化の方向による影響はあるものの, インタフェース設計においては補助的な効果しかもたないと結論付けられる.

7.4 まとめ

以下に本実験から得られた知見をまとめる. 風を用いたインタフェースを設計する際は以下のガイドラインを考慮するべきである.

- 変化させる前の風圧が大きいほど, 人間が知覚するのに必要な風圧の変化量は大きくなる.
- 涼風のときより温風のときのほうが, 人間が知覚する

のに必要な風圧の変化量は小さくなる.

- 風を弱くするときより強くするときのほうが, 人間が知覚するのに必要な風圧の変化量が大きくなるが, 風速変化の方向はインタフェース設計において補助的な効果しかもたない.

8. アプリケーションシナリオ

本研究の成果を用いて実現できることが想定されるアプリケーションの一例として, 風を用いた通知システムを提案する. 現行のスマートフォンの通知システムは通知音やバイブレーションから成る. このような通知システムが発する音は, ユーザに確実に通知を送るために大きめに設定されており, 通知を受け取るユーザ以外の付近の人にとって非常に煩わしい. 特に静かな環境では, 通知音やバイブレーションが出す音のような大きな音を発することが好まれず通知システムを利用することができない. そこで, そのような環境内に設置されている市販の扇風機に通知システムを搭載することを提案する. 本研究の成果として得られた風と人間の知覚の関係を用いることで, ユーザに通知を送るのに最適な風の変化を決定し, 特定の人に対して選択的に通知を送ることのできる通知システムを実現することができる.

9. おわりに

本研究では, 風の強さの変化と知覚の關係に着目し, 風の温度, 変化前の風の強さ, 風の強さの変化の方向といったパラメータを変化させたとき, 人間が知覚するのに必要な風の強さの変化量がどのように変化するかを定量的に評価する実験を行った. また実験で得られたデータを分析して得た結果から, 風を用いたインタフェースを設計する際に一般的に考慮すべきガイドラインを提示した. さらに, このような知見が蓄積されることによって扇風機など一般的な風を発生させるシステムを活用したインタフェースを構築することが可能になることを, アプリケーションシナリオの提案を通じて示した.

謝辞 本研究, および本論文に助言を頂いた, 研究室のメンバーである柴藤大介さん, 坂口達彦さん, 正木博明さん, 松井秀憲さんに感謝申し上げます. また実験参加者の皆様に感謝申し上げます.

参考文献

- [1] Cardin, S., Thalmann, D. and Vexo, F.: Head Mounted Wind, *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, pp. 101–108 (online), available from <http://infoscience.epfl.ch/record/104359> (2007).
- [2] Carter, T., Seah, S. A., Long, B., Drinkwater, B. and Subramanian, S.: UltraHaptics: Multi-point Mid-air Haptic Feedback for Touch Surfaces, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User*

- Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 505–514 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502018 (2013).
- [3] Gupta, A., Irudayaraj, A. A. R. and Balakrishnan, R.: HapticClench: Investigating Squeeze Sensations Using Memory Alloys, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 109–117 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126598 (2017).
- [4] Gupta, S., Morris, D., Patel, S. N. and Tan, D.: AirWave: Non-contact Haptic Feedback Using Air Vortex Rings, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 419–428 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493463 (2013).
- [5] He, L., Xu, C., Xu, D. and Brill, R.: PneuHaptic: Delivering Haptic Cues with a Pneumatic Armband, *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 47–48 (online), DOI: 10.1145/2802083.2802091 (2015).
- [6] Kim, Y., Oakley, I. and Ryu, J.: Design and Psychophysical Evaluation of Pneumatic Tactile Display, *2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, pp. 1933–1938 (online), DOI: 10.1109/SICE.2006.315347 (2006).
- [7] Kojima, Y., Hashimoto, Y. and Kajimoto, H.: A Novel Wearable Device to Present Localized Sensation of Wind, *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '09, New York, NY, USA, ACM, pp. 61–65 (online), DOI: 10.1145/1690388.1690399 (2009).
- [8] Lee, J.: Wind Tactor: An Airflow-based Wearable Tactile Display, *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 91–94 (online), DOI: 10.1145/3131785.3131838 (2017).
- [9] Lee, J., Han, J. and Lee, G.: Investigating the Information Transfer Efficiency of a 3x3 Watch-back Tactile Display, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 1229–1232 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702530 (2015).
- [10] Lee, J. and Lee, G.: Designing a Non-contact Wearable Tactile Display Using Airflows, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 183–194 (online), DOI: 10.1145/2984511.2984583 (2016).
- [11] Lee, S. C. and Starner, T.: BuzzWear: Alert Perception in Wearable Tactile Displays on the Wrist, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 433–442 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753392 (2010).
- [12] Lee, W. and Lim, Y.-k.: Thermo-message: Exploring the Potential of Heat As a Modality of Peripheral Expression, *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 4231–4236 (online), DOI: 10.1145/1753846.1754131 (2010).
- [13] Monnai, Y., Hasegawa, K., Fujiwara, M., Yoshino, K., Inoue, S. and Shinoda, H.: HaptoMime: Mid-air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen, *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 663–667 (online), DOI: 10.1145/2642918.2647407 (2014).
- [14] Obrist, M., Seah, S. A. and Subramanian, S.: Talking About Tactile Experiences, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 1659–1668 (online), DOI: 10.1145/2470654.2466220 (2013).
- [15] Piatetski, E. and Jones, L.: Vibrotactile pattern recognition on the arm and torso, *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics Conference*, pp. 90–95 (online), DOI: 10.1109/WHC.2005.143 (2005).
- [16] Pohl, H., Brandes, P., Ngo Quang, H. and Rohs, M.: Squeezedback: Pneumatic Compression for Notifications, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 5318–5330 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025526 (2017).
- [17] Sato, Y. and Ueoka, R.: Investigating Haptic Perception of and Physiological Responses to Air Vortex Rings on a User's Cheek, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 3083–3094 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025501 (2017).
- [18] Sodhi, R., Poupyrev, I., Glisson, M. and Israr, A.: AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, pp. 134:1–134:10 (online), DOI: 10.1145/2461912.2462007 (2013).
- [19] Tsamlal, M. Y., Ouarti, N. and Ammi, M.: Psychophysical study of air jet based tactile stimulation, *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 639–644 (online), DOI: 10.1109/WHC.2013.6548483 (2013).
- [20] Tsamlal, M. Y., Ouarti, N., Martin, J.-C. and Ammi, M.: Haptic communication of dimensions of emotions using air jet based tactile stimulation, *Journal on Multimodal User Interfaces*, Vol. 9, No. 1, pp. 69–77 (online), DOI: 10.1007/s12193-014-0162-3 (2015).
- [21] Wilson, G., Halvey, M., Brewster, S. A. and Hughes, S. A.: Some Like It Hot: Thermal Feedback for Mobile Devices, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 2555–2564 (online), DOI: 10.1145/1978942.1979316 (2011).
- [22] 伊福部 達: 生体工学を基礎とする人工現実感, *テレビジョン学会誌*, Vol. 46, No. 6, pp. 718–726 (online), DOI: 10.3169/itej1978.46.718 (1992).
- [23] 沖野 将司, 寺田 努, 塚本 昌彦, 義久 智樹: ユーザの状況を考慮した触覚情報によるウェアラブル入出力支援システム, Technical Report 18(2008-MBL-044), 神戸大学大学院自然科学研究科, 神戸大学大学院工学研究科, 神戸大学大学院工学研究科, 大阪大学サイバーメディアセンター (2008).