



アバターの腕の移動速度の変化による疑似触覚の生起を利用した 風速知覚の操作

鷹薮慧¹⁾, 伊東健一²⁾, 子系卓²⁾, 伴祐樹²⁾, 割澤伸一²⁾

Kei TAKANOHASHI, Kenichi ITO, Takashi KOITO, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 工学部 機械工学科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, takanohashi_kei@lelab.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, itokenichi@lelab.t.u-tokyo.ac.jp, koiotakashi@lelab.t.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: クロスモーダル効果による風速知覚の操作に関し、従来の研究では実際より強い風速を知覚させる効果は確認されていない。また、疑似触覚等の身体知覚の操作による風速知覚の変化を検証した研究は少ない。本研究では、アバターの腕の移動速度の操作から生じる疑似触力覚と風から受ける力を組み合わせることで強風感の生起を含めた風速知覚の操作が可能か検証した。その結果、実風速が知覚できる風速の絶対閾に比べ十分大きいときには、風と同方向の疑似触力覚によって風速知覚を強められる可能性が示唆された。

キーワード: 風速知覚, Pseudo-haptics, クロスモーダル

1. はじめに

風の刺激を提示する装置(風覚ディスプレイ)は、災害体験教育の効果向上 [1] や VR 映像の臨場感の向上 [2] などに活用されている。特に、竜巻等の災害に関する体験教育 [1] などの場面では利用者に強風を提示することが有効である。

しかし、実際の強風を提示する場合には大規模な設備が必要となり、多量のエネルギーや安全性の確保も求められる。この問題点の解決のためのアプローチとして、安全性の確保が容易な簡易的なデバイスにより生じる風を、クロスモーダル効果を用いて実際より強い風として知覚させる方法が考えられる。クロスモーダル効果とは、ある感覚刺激による知覚が別の感覚刺激の影響を受け変化する現象であり、様々な感覚提示インターフェースに応用されてきた [3]。

クロスモーダル効果による風速知覚の変化に関連して、先行研究では観察者の周囲を取り巻くように移動する落ち葉の VR 映像によって観察者が感じる風の強さを変化させられることが確認されている [4]。しかし、この研究で視覚刺激とともに提示されたときに感じられた風の知覚強度は、風のみで提示されたときに比べ弱く、実際よりも強い風を知覚させることはできていない。

クロスモーダル効果の一種として、視覚情報や聴覚情報の操作により触覚錯覚が生み出される現象である pseudo-haptics(疑似触覚)が存在する。pseudo-haptics は、重量感や摩擦力などの触力覚を簡易なシステムを用いて提示する方法として研究が行われている [5]。

pseudo-haptics と流体の流れに関連した研究として、pseudo-haptics によって実際には存在しない流体による力を知覚させる研究 [6] や、pseudo-haptics を利用して VR 空間内で

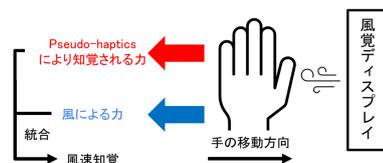


図 1: Pseudo-haptics を用いた風速知覚操作

水中を流れに逆らって泳いでいるような感覚を生起させる研究 [7] が行われている。しかし、これまでの研究では、pseudo-haptics と実際の流体を組み合わせた議論は行われていない。

これらの先行研究を受け、pseudo-haptics による疑似的な力(疑似触力覚)を知覚させることで、実際の風から受ける力の知覚に影響を与え、実際よりも強い風の知覚を含めた風速知覚の操作ができるのではないかと考えた。本研究では、pseudo-haptics の利用により実際の風の風速知覚を操作することが可能かについて検証を行う。特に、強風感の生起に着目する。具体的には、実験参加者に風を提示し、同時に風と同方向または逆方向に pseudo-haptics による疑似的な力を提示した時に知覚する風速に変化が現れるか検証する。

2. 実験

2.1 概要

実験参加者の腕に風を提示し、同時に腕に VR 映像を用いて pseudo-haptics により疑似的な力を知覚させることで、知覚する風速に変化が現れるかについて検証する(図 1)。

pseudo-haptics による疑似的な力の提示には、現実の身

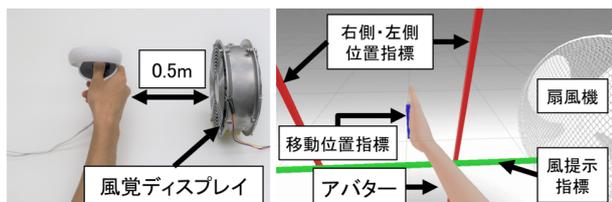


図 2: 風覚ディスプレイの配置と VR 映像

体の移動距離と視覚的に提示された移動距離の比率の操作を利用する。Samad らは、おもりを持った手を上下する動作の際に、現実の手の移動距離 (Control) と視覚的に提示した移動距離 (Display) の比率を変化させることで重量知覚が変化することを示した [8]。この比率のことを C/D 比と呼ぶ。本研究では、

$$R = \frac{\text{Display}}{\text{Control}} \quad (1)$$

を C/D 比と定義する。 $R < 1$ のとき、身体の動きと逆方向に pseudo-haptics による力が錯覚され、 $R > 1$ のとき、身体の動きと同方向に pseudo-haptics による力が錯覚される。

提示する風の速度および pseudo-haptics による疑似的な力の強さをそれぞれ変化させ、各条件について実験参加者が感じた風速を口頭の回答によって測定する。

2.2 実験装置

風を提示するための風覚ディスプレイとして 1 台のファン (山洋電機株式会社, San Ace 172 109E1712M50) を用いた。風覚ディスプレイは着席した実験参加者の右方 0.5m, 前方約 0.4m の位置に設置した (図 2 左)。風覚ディスプレイの前方の位置については、後述する VR 映像に合わせて各実験参加者毎に微調整を行った。風覚ディスプレイはマイクロコントローラ (Arduino UNO R3) を用いてパルス幅変調 (PWM) 制御した。あらかじめ風速計 (日本カノマックス株式会社, 6006-BT) を用いて複数のデューティ比について風覚ディスプレイの正面 0.5m の位置での平均風速を測定した。実験条件として、使用した風覚ディスプレイで提示可能な最大風速である 1.74m/s と、指先で感じることのできる風速の上昇系列の絶対閾である 0.5 ~ 0.6 m/s [9] に近い 0.55m/s, 両者のおおよそ中間の風速である 1.10m/s の 3 条件を採用した。

実験参加者はヘッドマウントディスプレイ (HMD / Meta Platforms, Inc., Meta Quest2) を装着し、制御用 PC (mouse G-Tune H5) を利用して Unity (ゲームエンジン) で作成した VR 映像を提示された。また、実験参加者はノイズキャンセリングヘッドホン (SONY 社, WH-1000X M3) を着用し、後述する扇風機の駆動音を提示され、USB マイクロホン (サンワサプライ社, MM-MCU02BK) を通じ実験者からの指示を受けた。

2.3 VR 映像

実験参加者は HMD に付属のコントローラを両手に持つように指示された。HMD 本体とコントローラから取得した位置情報を用い、両肩から両手の指先までの腕部のみが存在

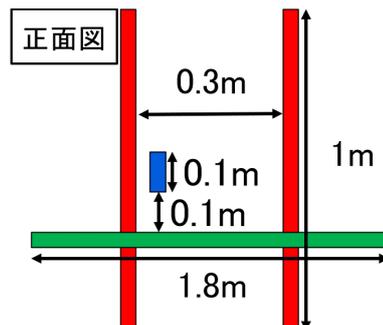


図 3: VR 映像の模式図

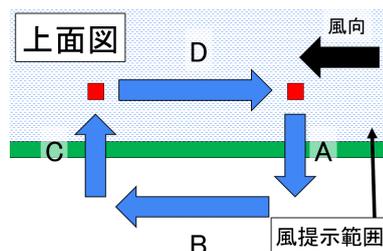


図 4: 移動位置指標の動きの模式図

するアバターを用い、実験参加者の腕部の動きを VR 映像中に表示した (図 2 右)。扇風機は Unity の「Oscillating Pedestal Fan」アセットを利用した。風覚ディスプレイの駆動音から風速が推測されないよう、ヘッドホンを通じて扇風機の駆動音を流すことで VR 空間外の音を遮断した。

VR 映像として、実験参加者の前方に長さ 1.8m の緑色の棒 (風覚提示指標) 1 本、長さ 1m の赤色の棒 (右側位置指標, 左側位置指標) 2 本、長さ 0.1m の青色の棒 (移動位置指標) 1 本、扇風機 1 台を表示した。風覚提示指標は、実験参加者の正面前方約 0.1m の位置に水平に設置した。実験参加者から見て風覚提示指標の後方で風が提示されるように風覚ディスプレイの位置を調節した。また、右側位置指標, 左側位置指標は実験参加者から見て風覚提示指標の後方 0.05m, 風覚提示指標の中心の左右 0.15m の位置に垂直に設置した (図 2 右, 図 3)。

また、移動位置指標は垂直に設置し、風覚提示指標の上方 0.1m の高さで、図 4 のように動かした。移動にかける時間は、図 4 の A で 0.5 秒、B で 1 秒、C で 0.5 秒、D で 3 秒に設定した。実験参加者は、常に右手の甲を右側に向け、上記の移動位置指標に手のひらの中央が重なるように合わせて手を動かすように指示された。

実験参加者の手が風覚提示指標の後方の範囲に侵入している間、侵入したときの位置を原点として左右方向の移動量に倍率をかけることで C/D 比を操作し、pseudo-haptics による疑似的な力を提示した。VR 映像中の移動位置指標の動きを一定にすることで、VR 空間内での実験参加者の腕の移動距離と速度を統制した。実験参加者の実際の腕の移動距離、速度は C/D 比によって変化した。手を風覚提示指標の手前に戻す際の C/D 比の変化が実験参加者に気づかれないうよう、C/D 比が 1 に戻る際に画面を短時間暗転させた。

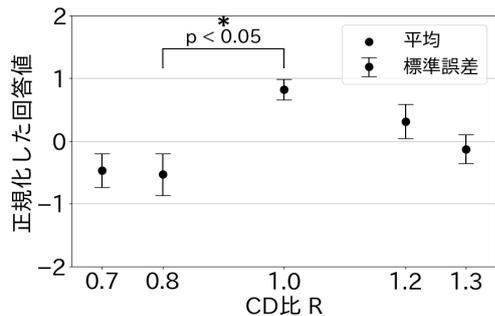


図 5: 知覚された風速の z-score 実風速 0.55m/s

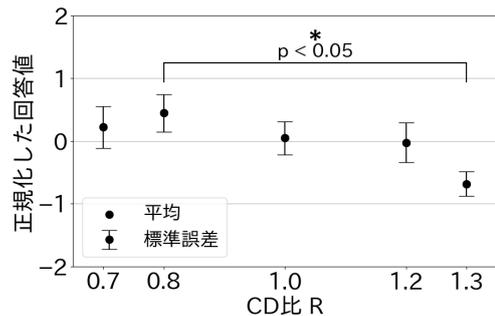


図 6: 知覚された風速の z-score 実風速 1.10m/s

2.4 実験条件

C/D 比は 0.7, 0.8, 1, 1.2, 1.3 の 5 条件, 実風速は 0.550m/s, 1.10m/s, 1.74m/s の 3 条件を用意し, これらを組み合わせた合計 15 条件について実験を行った。

2.5 実験手順

実験参加者の右手が 3 回右側位置指標に接触するまでを 1 セットとする。

実験条件 15 条件のそれぞれについて 2 セットの提示を行った。1 セット目では共通して基準となる刺激 (C/D 比 1, 実風速 1.10m/s) を提示し, 2 セット目は各実験条件ごとに C/D 比, 実風速を変化させた。2 セット目の条件は実験参加者毎にランダムな順番で提示した。実験参加者の前方に, 右手が何回右側位置指標まで到達したかを示す数字と, 現在が 1 セット目と 2 セット目のどちらであるかを示す文字列 (1 セット目なら Basis, 2 セット目なら Answer) を表示した。

1 セット目の開始前には画面を暗転させておき, ブザー音を合図に暗転を解除した。1 セット目と 2 セット目の間の時間は 5.5 秒であり, この間も画面を暗転させ, ブザー音を合図に暗転を解除させた。2 セット目が終了した後も画面を暗転させた。1 セット目と 2 セット目の間および 2 セット目終了後には風覚ディスプレイの前に衝立を置き, 実験参加者に風が当たらないようにした。

2 セット目が終了した後に, 実験参加者に口頭で 2 セット目の風速を回答するように指示した。基準となる 1 セット目で感じた風速を 100 とした際に, 2 セット目の風速がどの程度の強さを感じたかを, 整数値で回答するように指示した。基準の倍の強さの風を感じた場合を 200 とするなど, 風速を強く感じたときほど大きな値を回答するよう指示した。また, 風速以外に感じたことや気づいた違和感などがあるかについても口頭で聞き取りを行った。

初めに練習として 2 セットの刺激を提示し, 口頭での回答を行った後に, 実験本番として上記に示した 15 条件について実験を行った。

3. 実験結果

20 代の男性 9 名 (右利き 8 名, 左利き 1 名) が実験に参加した。実験開始前に VR 経験の度合いについて四段階でアンケートを行ったところ, 「なし」が 3 名, 「展示やイベン

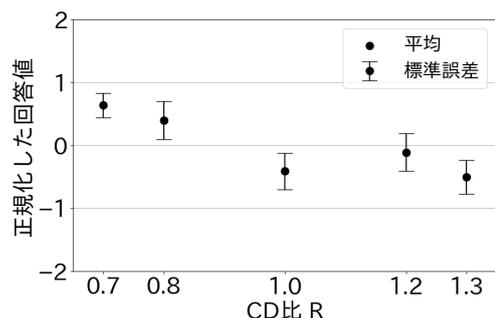


図 7: 知覚された風速の z-score 実風速 1.74m/s

ト等で数回経験した」が 4 名, 「ときどき利用する」が 2 名, 「日常的に利用する」が 0 名だった。

分析では, 各実験参加者ごとにそれぞれの風速について回答値の平均と標準偏差を求め, 以下の式に従って各回答値の z-score を求め, 正規化した。

$$y = \log_{10} x \quad (2)$$

$$z = \frac{y - \bar{y}}{\sigma} \quad (3)$$

ただし, z は z-score, x は回答値, y は回答値の常用対数をとった値, \bar{y} と σ はそれぞれ各実験参加者, 各風速ごとの y の平均値, 標準偏差である。

各風速条件ごとに C/D 比と z-score の平均値, 標準誤差を現したグラフを図 5, 図 6, 図 7 に示す。

実風速 3 水準, C/D 比 5 水準について 2 元配置分散分析を行った結果, 実風速の主効果が 5%水準で有意だった ($p = 0.0390$)。一方, C/D 比の主効果は有意でなかった ($p = 0.1314$)。また, 実風速と C/D 比の変化による交互作用がみられた ($p = 0.0054$)。実風速 1.1m/s, 1.74m/s では $R < 1$ の時知覚する風速が強まり, $R > 1$ の時知覚する風速が弱まる傾向がみられたのに対し, 実風速 0.55m/s では $R < 1$ の場合に知覚する風速が弱くなる傾向がみられた。

各風速条件ごとに Benjamini/Hochberg 補正を用いた t 検定により多重比較検定を行ったところ, 実風速 0.55m/s では $R = 0.8$ と $R = 1$ の条件間でのみ有意差がみられ, $R = 1$ の時のほうが知覚された風速が大きかった。また, 実風速 1.10m/s では $R = 0.8$ と $R = 1.3$ の条件間でのみ有意差がみられ, $R = 0.8$ の時のほうが知覚された風速が大きかった。実風速 1.74m/s では有意差がみられなかった。

4. 考察

実風速 1.10m/s では、 $R = 0.8$ のときに $R = 1.3$ の時と比べ知覚する風速が有意に増加した。これは、実験参加者が $R = 0.8$ の場合は風と同方向に、 $R = 1.3$ の場合は風と逆方向に pseudo-haptics による力が知覚されたことで、前者の場合に風から受ける力を強く感じたためであると考えられる。この結果は仮説を支持している。

一方、実風速 0.55m/s では、 $R = 0.8$ の場合に $R = 1$ の場合と比べ知覚する風速が仮説に反して減少した。指先で感じることでできる風速の最低値である絶対閾は上昇系列で 0.5 ~ 0.6 m/s であり [9]、実風速 0.55m/s の条件では実験参加者が風を感じる事ができていなかった可能性がある。pseudo-haptics により実験参加者に提示された疑似的な力と実際の風により受ける力の間に大きな乖離が生じ、両者が風速知覚として統合されなかったことが知覚する風速が減少した要因であると考えられる。

5. 今後の展望

今回の実験系の問題点として、実験参加者に提示される実風速が、実風速に関する実験条件が同じであっても厳密に一定でなかったことがあげられる。今回の実験では、実験参加者が実験中に手を動かすことで、風覚ディスプレイと実験参加者の手との間の距離が変化し、それに伴って手に当たる風の風速も変化していた。C/D 比を変化させると実空間での手の移動距離も変化するため、実験参加者の手には実風速に関する条件が同じであっても C/D 比の各条件ごとに異なる風速の風が提示されていた。

解決法としては、風覚ディスプレイにチューブを取り付けることで簡易的な風洞のようなデバイスを用意し、チューブの先端を腕に括り付けるなどして常に腕と等距離になるようにする方法や、風覚ディスプレイ自体を腕の動きに合わせて移動させる方法、風覚ディスプレイからの風を速度を動的に変化させる方法が考えられる。

今回の実験からは、C/D 比の変化によって風速知覚を変化させられる場合があることや、実風速によって C/D 比と風速知覚の関係が変化することが示唆された。

しかし、C/D 比の変化による風速知覚の変化の有意差が確認できた条件は 2 組のみと少なく、また実風速の変化によって C/D 比と風速知覚の関係に具体的にどのような変化が現れるのかについては不明である。今後の研究では、風速知覚をより確実に変化させるための条件や風速知覚と C/D 比や実風速の関係をより詳細に調査したいと考えている。

6. まとめ

本研究では、風と同方向もしくは逆方向に pseudo-haptics による疑似的な力を生起させることにより、風速知覚を操作できるか検証するため、実風速 3 条件、C/D 比 5 条件について 9 人の実験参加者に対し実験を行った。

その結果、C/D 比操作によって風速知覚が変化し、pseudo-haptics による疑似的な力が風と同方向のときに知覚する風

速が強まり、逆方向の時に知覚する風速が弱まる傾向が示唆された。ただし、実風速が風速の絶対閾程度に弱い場合には、風速を実際より強く知覚する傾向がみられなかった。

本研究で得られた知見の応用としては、簡易な装置により広い範囲の強さの風を提示可能なシステムの制作や、そのようなシステムによる VR、AR 体験の効果向上などが期待される。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 (JP21H03478, JP21J21363, JP22K19805, JP22KJ0625) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Hiroyuki Mitsuhara and Masami Shishibori. Comparative experiments on simulated tornado experience via virtual reality and augmented reality. *The Journal of Information and Systems in Education*, Vol. 19, No. 1, pp. 21–31, 2020.
- [2] Masato Kurosawa, Ken Ito, Yasushi Ikei, Koichi Hirota, and Michiteru Kitazaki. Evaluation of airflow effect on a VR walk. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 283–284, 2017.
- [3] 大野雅貴, 横澤一彦, 鳴海拓志. 多感覚の統合的認知の基礎と感覚提示インタフェースへの応用可能性. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 27, No. 1, pp. 18–28, 2022.
- [4] 西牧侑哉, 郷田直一, 蒲池みゆき. VR 環境下での風の強さ知覚における視触覚統合. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 26, No. 1, pp. 14–21, 2021.
- [5] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, 2021.
- [6] Andreas Pusch, Olivier Martin, and Sabine Coquillart. HEMP—hand-displacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application and a behavioural analysis. *International journal of human-computer studies*, Vol. 67, No. 3, pp. 256–268, 2009.
- [7] Hriooki Aoki. Study on pseudo-haptics during swimming motion in a virtual reality space. In *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, pp. 333–336. IEEE, 2020.
- [8] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2019.
- [9] 橋本渉, 今枝良司. 人間の指先における微風の知覚特性に関する研究. *信学技報, MVE*, Vol. 106, No. 91, pp. 35–40, 2006.