



歩行の移動量操作による Pseudo-haptics を用いた風速知覚の 増強

Enhancement of Perceived Wind Strength by Pseudo-Haptics Induced by Manipulation of Walking Movement

鷹嘴慧¹, 伊東健一², 細井十楽¹, 伴祐樹¹, 割澤伸一¹

Kei TAKANOHASHI, Kenichi ITO, Juro HOSOI, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

- 1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, takanohashi_kei@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, hosoijuro@lelab.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)
2) Diver-X 株式会社 (〒 102-0082 東京都千代田区一番町 4-42 一番町 II ビル 3F, k.ito@diver-x.jp)

概要: ファン等により全身への強い風を提示する場合, 使用者の安全の確保や装置の大型化が問題となる. 本研究ではこの課題に対し, Pseudo-haptics を用いることで実際の風より風を強く知覚させることを提案する. 検証のため, VR 環境中の実験参加者に小型ファンによる風を提示し, 風速と pseudo-haptics の大きさを変化させた. 参加者による回答からは, 一部の風速条件において, 風と同方向の力錯覚によって知覚された風速が増加する傾向がみられた. この結果からは, 風による抗力が力錯覚により実際より強く知覚されたと推測される.

キーワード: 風知覚, Pseudo-haptics, クロスモーダル

1. はじめに

Virtual Reality (VR) 体験における風の提示は, 災害体験の教育等に活用され, 需要が大きい [1]. 火災のような強い風が吹くことが想定される場面の体験教育においては, 利用者に強風を知覚させることが望ましいと考えられる.

しかし, ファンなどにより風速や風量が大きい風を物理的に再現しようとする場合, 装置の大型化や使用者の安全性を確保するために必要なコストが増加する点が課題となる.

本研究の目的は, 簡易的なデバイスにより生じる風を実際よりも強く知覚させることで, 大型で複雑な装置により実際に強風を生み出すことなく強風体験を生み出し, 上述の課題を解決することである.

そのために, クロスモーダル効果による pseudo-haptics の利用を検討する. 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 [2], 直接的な再現による提示が難しい感覚を提示するためのインターフェースに応用されてきた. pseudo-haptics とはクロスモーダル効果の一種であり, 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を指す. 先行研究において, pseudo-haptics を用いることで, 重量感や摩擦感などの触力覚を簡易なシステムで提示できることが明らかとなっている [3].

本研究では, pseudo-haptics による力錯覚を用いて風による抗力の知覚に影響を与え, 実際よりも強い風を知覚させることについて検証を行う. 具体的には, 実験参加者に風を提示し, 同時に風と同方向に力錯覚を生起させた場合に知覚する風の強さに変化が現れるか検証する.

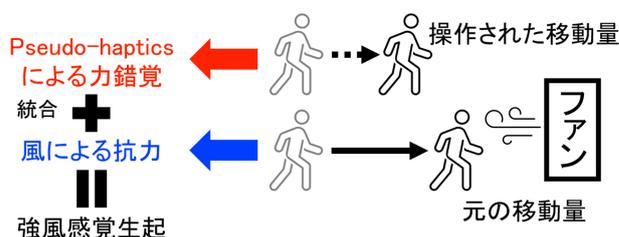


図 1: pseudo-haptics を用いた風速知覚操作のアプローチ

力錯覚の提示には, 実際の移動量と VR 空間中で体験者が知覚する移動量の比率の操作を利用する. Samad らは, おもりの持った手を上下する動作の際, 実際の移動距離と視覚的に提示した移動距離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 [4]. 本研究では, 歩行時の VR 空間中での移動量を操作することで力錯覚を生起させる (図 1).

VR 空間中での歩行について, 実際の移動量に比べ VR 空間中での移動量が多い場合に自然な移動量に感じられるということが知られている [5]. そのため, 本研究では VR 空間中での歩行が自然に感じるように実験参加者が移動量の比率を事前に調節しておき, この比率を基準に移動距離を操作して力錯覚を提示する.

2. 関連研究

視覚刺激を利用したクロスモーダル効果による風速知覚の操作に関する先行研究として, 風に飛ばされる落ち葉などの風速に関する視覚の手がかりを与える VR 映像を用い, 観察者が知覚する風速を変化させる研究 [6] が存在する. こ

の研究では、映像中の風速に連動する形で知覚される風速が変化した。また、VR 映像と同時に提示された風の知覚強度は風のみが提示された場合に比べ弱く、風を実際より強く知覚させる効果はみられなかった。

筆者らは実験参加者の手背部に風と pseudo-haptics による力錯覚を提示し、腕部を動かした際に生じる力錯覚が風速知覚に与える影響を検証した [7]。この研究では、実風速 1.10m/s の場合に力錯覚による風速知覚の変化がみられたが、より大きな実風速やより小さな実風速では風速知覚の変化はみられなかった。本研究では、全身を用いた動きを利用した力錯覚を利用し、より大きな実風速の風に対し知覚される風の強さを操作することを目標とする。

3. 実験

3.1 概要

本実験の目的は、pseudo-haptics による力錯覚の提示が風の強さ知覚に与える影響を検証することである。風は実験参加者の顔に前方から後方に向かって提示し、同時に前方に歩行するよう指示をする。歩行中に力錯覚を生起させ、知覚する風速に変化が現れるかについて検証する。力錯覚の提示には、実際の移動量と VR 空間中で体験者が知覚する移動量の比率の操作を利用する。

各条件での移動量の操作の大きさを表す値として、参加者が自然に感じるよう調整した移動量の比率を X 、各条件における実際の移動量に対する VR 空間中での移動量の比率を Y としたときに、

$$R = \frac{Y}{X} \quad (1)$$

で表される操作倍率 R を用いる。 $R < 1$ の場合は身体の動きと逆方向、 $R > 1$ の場合は同方向に力錯覚が錯覚される。操作倍率 R 及び力錯覚と同時に提示する風の速度をそれぞれ変化させ、各条件について実験参加者が知覚した風の強さを VR 映像中に表示される UI を用いて回答させる。

3.2 システムの構成

実験システムの概要図を図 2 に示す。風提示用の装置（風覚ディスプレイ）として直径 60 mm の 1 台のファン（山洋電機株式会社, San Ace 60 9GA0612P7G01）を用い、フィンガード（山洋電機株式会社, 109-139E）を取り付けた。

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。予め風速計（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吹き出し口の位置での平均風速を測定した。デューティ比と風速について線形近似を行ったところ、デューティ比を x 、風速を y として

$$y = 0.022x + 1.58 \quad (2)$$

の関係がみられた。

風覚ディスプレイは 3D プリンタで作成した治具によりヘッドマウントディスプレイ（HMD / Meta Platforms, Inc., Meta Quest2）に装着した（図 2 右上, 右下）。実験参加者



図 2: 左 システムの全体図, 右上 風覚ディスプレイ固定用治具の概形, 右下 風覚ディスプレイと治具

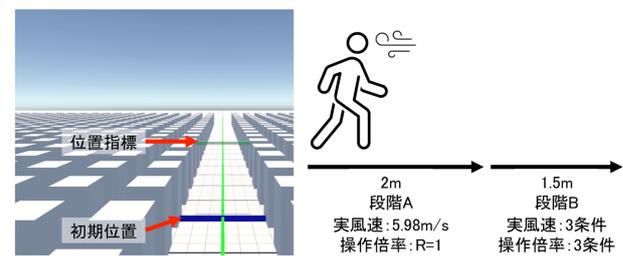


図 3: 左 VR 映像, 右 参加者の動きと提示刺激の模式図

は HMD 付属のコントローラを両手に持つように指示された。HMD には制御用 PC(mouse G-Tune H5) を利用して Unity(ゲームエンジン) で作成した VR 映像が提示された。また、実験参加者はノイズキャンセリングイヤホン（ボーズ合同会社, Bose QuietComfort Earbuds II）を着用し、USB マイクロホン（サンワサプライ社, MM-MCU02BK）を通じ実験実施者からの指示を受けた。

実験参加者は長袖の上着を着るよう指示され、上腕中心部に振動子（株式会社アクーヴ・ラボ, Vp210）を装着した。また、実験参加者はトラッカー（HTC Corporation, VIVE トラッカー (3.0)）を付けたスリッパを履くよう指示された。

3.3 実験手順

HMD 本体とコントローラ及びトラッカーから取得した位置情報を用い、実験参加者の全身の動きをアバターにより VR 映像中に表示した。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、イヤホンを通じてホワイトノイズを流すことで VR 空間外の音を遮断した。

VR 映像として 0.25 m 四方の細線および 1 m 四方の太線のグリッド模様の床面を表示した。実験参加者の初期位置の床面には参加者に対し横向きの青線を設置し、初期位置の目印とした。初期位置を示す線と直行する方向（前後方向）の床面に緑線を設置した。また、VR 空間中での移動量を参加者が認識しやすくするため、実験参加者の初期位置と前後方向を除き、床面に縦横 1 m 間隔で縦横 0.5 m、高さ 1 m の直方体を設置した。初期位置の床面から前方 0.3 m、上方 1.324 m の位置には縦横 0.5 m、長さ 1 m の緑色で半透明の棒（位置指標）を設置した（図 3 左）。

実験開始時に参加者に前後方向に自由に歩くよう指示し、VR 空間中での移動が自然に感じられる大きさになるまで実際の移動量に対する VR 空間中での移動量の比率 X を調節させた。調節の際は、VR 空間中で参加者の前方にパネルを設置し、パネル上に HMD のコントローラで操作可能なスライダを設置した。スライダを右方に動かすほど比率 X が大きくなった (最小 0.1-最大 3 倍)。比率の正確な大きさは参加者には知らされなかった。

比率 X の調整が終了した後、実験の練習及び実験本番を実施した。実験時は、初めに参加者が初期位置に移動するとピープ音が 3 回鳴り、位置指標が前方に移動した。実験参加者は位置指標を追いかけて同じ速度で前方に移動するよう指示された。位置指標は一定の距離を移動すると停止した。位置指標が移動を開始してから停止するまでの時間は 5.15 秒で一定であった。VR 空間中で位置指標が停止する位置は、常に実空間中で実験参加者の初期位置の 3.5 m 前方の位置と対応するように比率 X に応じて調整された。

実空間中における移動の初めの 2 m では操作倍率は $R = 1$ で一定であった。また、風速 5.98 m/s の風が参加者に提示された。この段階を段階 A とする。段階 A における VR 空間中での位置指標の移動速度に対応した実空間中での参加者の歩行速度は、上述の位置指標の停止位置の調整によって約 0.68 m/s で一定となった。

移動の残りの 1.5 m では操作倍率 R は実験条件毎に異なる値に変化し、実験参加者に力錯覚が提示された。また、実験条件毎に異なる風速の風が提示された。この段階を段階 B とする。段階 B では、衣服の振動により強風感を生起させる研究 [8] を参考とし、強風感の手掛かりとなる刺激として、上腕部の振動子からホワイトノイズによる振動が提示された (図 3 右)。

実験参加者が合計 3.5 m 歩行すると、ピープ音が 3 回鳴り、風速回答用の UI が実験参加者の前方に出現した。

実験参加者は段階 A で知覚した風の強さを 100、無風を 0 とした場合の段階 B の風の強さを数値で回答するよう指示された。回答にはコントローラを用いて操作可能なスライダが用いられ、回答値は参加者が確認可能であった。スライダの初期値は 100 に設定された。

回答終了後、参加者は HMD のコントローラを用いて UI の右下にあるボタンを押すよう指示された。ボタンを押すと VR 映像が 3 秒間暗転した。暗転解除後、位置指標が初期位置に出現した。実験参加者が初期位置に移動すると、ピープ音が 3 回鳴り自動的に新たな条件での実験が開始した。

3.4 実験条件

操作倍率に関する実験条件として、 $R = 0.3, 0.5, 1$ の 3 条件を用意した。また、段階 B で参加者に提示する実風速として 5.48 m/s, 5.98 m/s (段階 A で提示される風速と同一)、7.08 m/s の 3 条件を用意した (図 3 右)。これらを組み合わせた合計 9 条件について、各条件毎に 2 回の試行を行った。

条件の順番は Unity 上の研究フレームワーク bmlTUX [9] を利用し無作為化した。また、10 回目の試行のうち、3 分

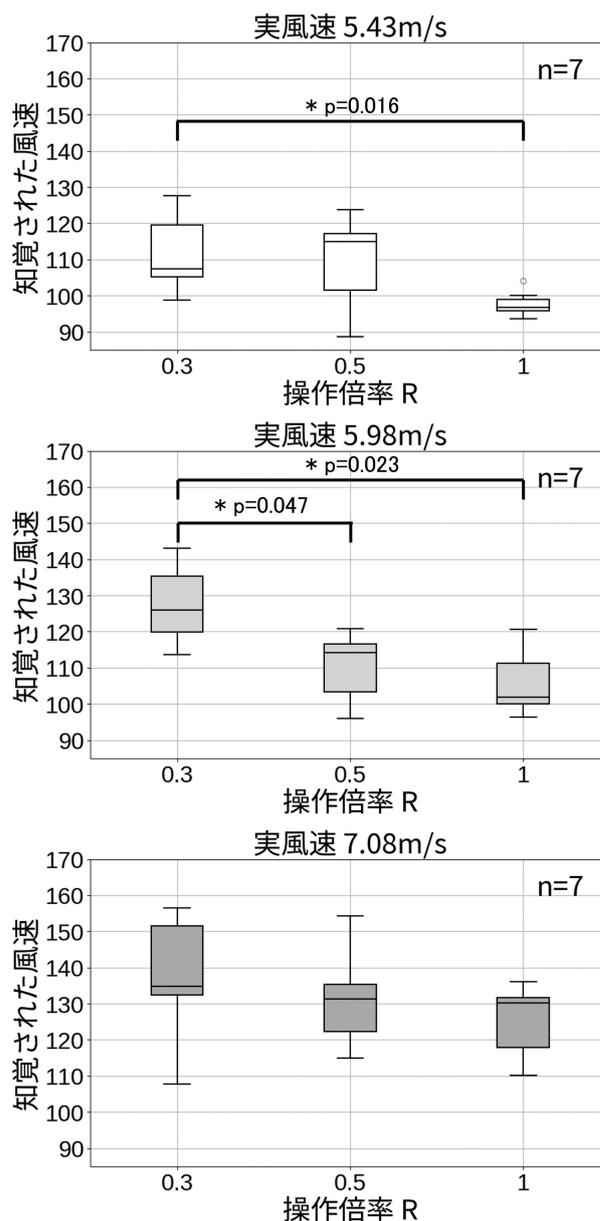


図 4: 知覚された風の強さ 上段 実風速 5.43 m/s, 中段 実風速 5.98 m/s, 下段 実風速 7.08 m/s

間の休憩を設けた。

4. 実験結果

22 歳から 25 歳の男性 5 人、女性 2 人 (平均 23.86 歳) 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 0 名、「展示やイベント等で数回経験した」が 5 名、「ときどき利用する」が 1 名、「日常的に利用する」が 1 名だった。

4.1 知覚された風速

参加者毎に各条件 2 回分の回答値について平均値を算出したものをデータとして使用した。箱ひげ図を図 4 に示す。

シャピロウィルク検定の結果、実風速 5.98 m/s, $R = 1$ の条件を除く全条件で正規性がみられた。ルビーン検定の結果、各条件間に等分散性はみられなかった ($p = 0.011$)。

整列ランク変換 (Aligned Rank Transform) [10] を用いた ANOVA 解析を行った結果、実風速と操作倍率 R による有意な主効果が確認された (それぞれ $p < .001$, $p < .001$). また、有意な交互作用はみられなかった ($p = 0.55$).

各風速条件について、 R が異なる条件間で Steel-Dwass 法による多重比較検定を行った。実風速 5.43 m/s の条件について、 $R = 0.3$ と $R = 1$ の条件間 ($p = 0.016$) に有意差がみられた。また、実風速 5.98 m/s の条件について、 $R = 0.3$ と $R = 0.5$ の条件間 ($p = 0.047$) および $R = 0.3$ と $R = 1$ の条件間 ($p = 0.023$) に有意差がみられた。実風速 7.08 m/s の条件については、有意差はみられなかった。

5. 考察

実風速 5.43 m/s では、 $R = 0.3$ のとき、 $R = 1$ の場合に比べ知覚された風の強さが有意に増加した。また、実風速 5.98 m/s では、 $R = 0.3$ のとき、 $R = 0.5$ や $R = 1$ の場合に比べ知覚された風の強さが有意に増加した。これらは、風による抗力の知覚と力錯覚が統合されたことで、風による抗力が実際より強く知覚されたためであると考えられる。

一方、実風速 7.08 m/s では R の変化による知覚された風の強さが増加する傾向はみられなかった。視覚刺激を利用したクロスモーダル効果による風速知覚の変化について検証した研究 [6, 7] では、実風速が大きい場合風速知覚の変化が生じにくくなる効果がみられている。本研究における結果はこの研究においてみられた傾向と一致する。

6. 今後の展望

本研究では、強風感の手掛かりとなる刺激として実験参加者の上腕部に振動を提示した。振動の有無が風の強さ知覚に与えた影響は未検証である。

また、本研究では風上方向への歩行時に VR 空間中での移動量を減少させる場合に関してのみ検証を行ったが、風下方向への歩行時に VR 空間中での移動量を増加させる場合にも風を実際よりも強く知覚する可能性が考えられる。

今回用いた手法の問題点として、操作倍率 R の操作により VR 体験の臨場感が低下する可能性があることが挙げられる。実験に用いた VR 環境はシンプルな平面に物体を設置したものであり、環境中に風の存在を示唆する情報は少なかったと考えられる。VR 環境中に風に揺れる木のような風の存在を示唆する情報を増やすことにより臨場感や風の強さ知覚に変化が現れるかについても検証を行いたい。

7. まとめ

本研究では、風と同方向に pseudo-haptics による力錯覚を生起させることにより、風の強さ知覚を操作できるか検証するため、実風速 3 条件、VR 空間中での移動量の操作の大きさ 3 条件の計 9 条件について 7 人の実験参加者に対し実験を行い、VR 空間中での移動量が減少した場合に知覚される風速が増加する傾向が確認された。これは、移動量の減少によって生じた力錯覚が風による抗力の知覚と統合されることで、風による抗力が実際よりも強く知覚され

たためであると考えられる。ただし、実風速が大きい条件においてはこの傾向はみられなかった。

本研究で得られた知見の応用としては、簡易な装置を用いて強い風を提示することにより、効果の高い VR, AR 体験を低いコストで体験可能になることが期待される。

参考文献

- [1] Chongsan Kwon. A study on the verification of the effect of sensory extension through cutaneous sensation on experiential learning using VR. *Virtual Reality*, Vol. 25, No. 1, pp. 19–30, 2021.
- [2] Shinsuke Shimojo and Ladan Shams. Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions. *Current opinion in neurobiology*, Vol. 11, No. 4, pp. 505–509, 2001.
- [3] 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.
- [4] Majed Samad et al. 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.
- [5] Niels Christian Nilsson et al. Establishing the range of perceptually natural visual walking speeds for virtual walking-in-place locomotion. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 569–578, 2014.
- [6] 西牧侑哉 et al. 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.
- [7] Kei Takanohashi et al. 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. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 (CD-ROM), Vol. 28, pp. 1–11, 2023.
- [8] Kenichi Ito et al. WearSway: Wearable Device to Reproduce Tactile Stimuli of Strong Wind through Swaying Clothes. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 2023.
- [9] Adam O Bebeko and Nikolaus F Troje. bmltux: Design and control of experiments in virtual reality and beyond, May 2020.
- [10] Jacob O. Wobbrock et al. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, p. 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.