

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19805

研究課題名（和文）クロスモーダル効果による風感覚提示基盤の構築と風知覚機序の解明

研究課題名（英文）Establishment of wind sensory presentation platform and wind perception mechanisms through cross-modal effects.

研究代表者

割澤 伸一（Warisawa, Shinichi）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：20262321

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：感覚のクロスモーダル効果を用いて、風感覚を変化させる手法を提案し、クロスモーダル効果により風の印象や感情といった心理状態の変化も実現可能であることを示した。風向を想起させる映像と立体音響によって風向知覚が変化し、視聴覚情報を組み合わせることで効果が最大となることを示した。衣服の揺れを想起させる装着型デバイスにより、風速が実際より速く知覚されることを示した。仮想映像のオブジェクトやアバタを温度を想起させる色にすることで、風温知覚が変化することを示した。屋外の草原を模した仮想映像と音によって風から受ける印象や感情が改善し、自然風を模擬した気流によって、精神的ストレスが軽減することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

風向、風速、風温、および風の印象に関する知覚がクロスモーダル効果によって変化することを示し、また、風覚の様々な側面における多感覚の相互作用を検証し、多感覚刺激の設計方針を整理したことの学術的な意義は極めて大きい。風の発生や作用を間接的に想起させる多感覚刺激の設計方針は、身体やアバタ、風そのもの、風源、周囲環境などバーチャル環境の様々な部分に適用でき、風感覚の変化を活用した簡易な装置による風覚ディスプレイの実現に繋がり、幅広いVRコンテンツの風感覚活用促進や風の快適性が重視される空調やリラクゼーション分野での活用など、産業応用上重要な知見を与えている。

研究成果の概要（英文）：A method to change wind perception using cross-modal effects of the senses is proposed, and it is shown that changes in psychological states such as wind impressions and emotions can also be achieved through cross-modal effects. It was shown that the perception of wind direction can be changed by using images and stereophonic sounds that remind the user of the wind direction, and that the effect is maximised by combining audiovisual information. It was shown that wind speed is perceived faster than it actually is by a wearable device that evokes the swaying of clothing. Shown that wind temperature perception was altered by colouring virtual video objects and avatars to evoke temperature. Virtual images and sounds simulating an outdoor meadow improved impressions and emotions from wind, and air currents simulating natural winds reduced mental stress.

研究分野：人間環境情報学

キーワード：クロスモーダル効果 パーチャルリアリティ 風覚ディスプレイ 少数風源 リラックス

## 1. 研究開始当初の背景

風向・風速等の風の感覚を与える「風覚ディスプレイ」は主に VR の分野に置いて様々に研究されてきたが、そのほとんどが提示したい触圧刺激・温冷刺激等を実際の風によって物理的に再現する手法であり、大量の風源や温熱・冷却装置が必要なため、システムが複雑・長大になるという欠点を抱えていた。

一方で、多感覚による情報提示の研究においてクロスモーダル現象が注目されている。これは多感覚の刺激が同時に与えられるとその相互作用によって様々な感覚モダリティの知覚が変化するという現象である。本現象を用いることで物理的な触力覚を 100%再現する必要がなくなり触力覚提示装置を簡略化できるため、多くの触覚提示に活用されつつあるものの、風覚ディスプレイでは効果が確かめられてこなかった。

風覚提示においても物理的な触力覚提示装置の簡易化のため、人の風向知覚精度より風源の配置間隔を割り出す研究や複数の風源を用いて中間の風向を補間する研究が進められてきた。しかし、いずれも風提示手法として物理的な風のみを用いており、クロスモーダル効果が風覚に及ぼす影響を考慮したものではない。

## 2. 研究の目的

視聴触感覚間のクロスモーダル効果を活用した風感覚に関わる知覚を変化させることで、多様な風感覚を提示するハードウェア・ソフトウェア基盤を構築し、これを最大限に活用して知覚を操作することによって風知覚機序を解明することである。

## 3. 研究の方法

### (1) 少数風源と視覚・聴覚刺激の組み合わせによる多様な風感覚提示基盤の構築

多様な風感覚を提示するアプローチとして視聴触感覚間のクロスモーダル効果に着目した。視覚・聴覚刺激が触覚に影響を及ぼし、物理的に提示している触覚刺激とは異なる擬似的な触力覚を知覚させるクロスモーダル効果を活用して、少数風源と視覚・聴覚刺激の組み合わせにより多様な風感覚を提示できるハードウェア・ソフトウェア基盤を構築する。

- ① 聴覚刺激の検討：まず、様々な向き・速さの風で知覚される音をダミーヘッドを用いてバイノーラル録音した音像として提示する聴触覚間クロスモーダル効果により、風向・風速知覚を操作できるかを検証する。次に、風速だけでなく風種をパラメータとして用意し、これらの合成方法を実験的に検討することによって、風量知覚を操作することを狙う。音源の収集に当たっては、ファンからの風音等統制された環境で録音したものから着手しつつ、草木のさざめき等の人の記憶等で想起される質的な情報を持つ風音を用いて風向・風速知覚を操作することを目指す。
- ② 視覚刺激の検討：まず、HMD によりバーチャル空間中にパーティクルを流し、その方向や量を制御することで風向・風速に対する知覚を操作できるかを検証する。次に、周辺視を活用したり草木や旗等の揺れや雲の流れ等の自然の映像を視覚刺激として活用して風感覚を操作できるかを検討する。

### (2) 風感覚機序の解明

風源と視覚・聴覚刺激の系統的な組み合わせ実験の実施と、風向、風量、風温に関わる主観評価、さらに VR 環境における臨場感、生活環境、オフィス環境における快適性や生産性に関わる生理指標計測による定量評価を通して、人の風感覚機序を解明する。風感覚変化については、実際に全周からの風を提示するシステムを構築し、物理的的刺激との比較を行って調整法等で主観的等価点を求めることで定量的に評価する。

(1) で構築した風感覚提示基盤を用いて、風向や風量に関わる知覚を操作しながら、風温知覚を加えて風感覚機序の解明を進める。具体的には、温度提示が可能なモジュールを搭載したウェアラブルデバイスを構築し、皮膚への直接の温度提示と(1)で構築した視覚刺激を組み合わせることで風温知覚を変化させる手法を検討する。提示温度やその提示位置によっても知覚する風向・風速・風種が変化する可能性があるため、(1)の構築過程ですでに得ている風向や風量に風温を加えた風感覚と視覚・聴覚・触覚刺激との関係を、刺激提示位置や刺激強度の組み合わせ毎に記述するとともに、これらを風知覚機序として整理する。

## 4. 研究成果

### (1) 風向知覚の提示

視覚、聴覚、触覚の刺激を組み合わせたクロスモーダル効果によって風向知覚変化を誘発できるかを検討した。視覚刺激として、提示したい風向から粒子が流れる様子をヘッドマウントディスプレイの映像として提示した(図1左)。聴覚刺激として、提示したい方向から風音が定位できるようにヘッドホンから提示した。音源はダミーヘッドによって収録し、ファンの音や耳近傍の風切り音が含まれる。触覚刺激として、直径 172 mm のファン 2 台を前後あるいは左右に配置し

頭部に送風した (図 1 右)。したがって、物理的な風は前後あるいは左右から一定方向に吹く。実験の結果、物理的な風が一定方向に吹いているにも関わらず、視聴覚の刺激を変化させることによって風向知覚が変化し、全周囲からの風が知覚されることが明らかになった (図 2)。特に、前後から送風し視覚と聴覚の刺激を同時に提示した場合に、知覚された風向の誤差は最大で  $34.8^\circ$  であった。

### (2) 風速知覚の提示

強風による衣服の振動を再現する装置 WearSway を開発し (図 3)、これを用いて風速知覚と風の範囲の知覚を変化させ、弱い風を強風のように感じさせる手法を提案し、検証実験によりその有効性を明らかにした。具体的には、実際より強い風が知覚される風速知覚変化が実現されていないことから、強風の中で衣服が揺れる現象を再現した触覚刺激や視覚刺激を提示する手法としてこれを提案し、その効果を検証した。その結果、衣服の振動によって弱い風が風速 10 m/s 超の強風のように知覚されることや、風の範囲が実際の送風範囲より広がって知覚されることが明らかになった。アバタの衣服が揺れる VR 映像には風速知覚や風の範囲の知覚を変化させる効果はないものの、臨場感を高める効果があることを確認した。

### (3) 風温知覚の提示

物体やアバタの色を変更することによって風温知覚を変化させ、実際より温かい風や冷たい風の体験を実現する手法を提案し、検証実験によりその有効性を明らかにした。具体的には、実風を提示しつつ、VR 映像における物体、手のアバタ、仮想風の色が変化することによって風温知覚が影響されるかどうかを検証した (図 5)。青色の視覚刺激によって常温実風の風温が低く、赤色の視覚刺激によって温実風の風温が高く知覚される効果を確認した (図 6)。また、常温の風と赤色、温風と青色など、実際の風温と映像の温度イメージが不一致の条件では風温知覚の有意な変化がみられないことも明らかになった。

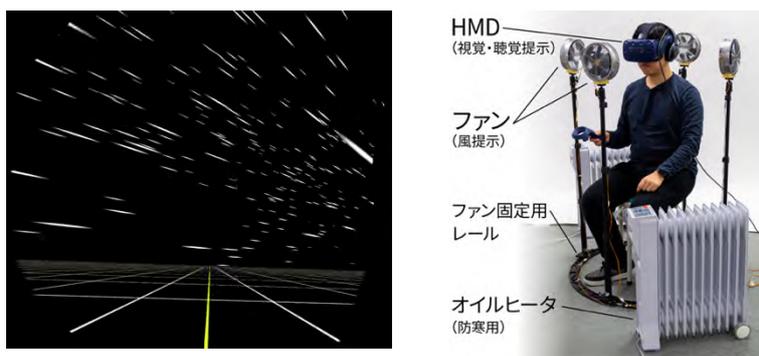


図 1 風向知覚提示 (左：視覚刺激、右：触覚提示)

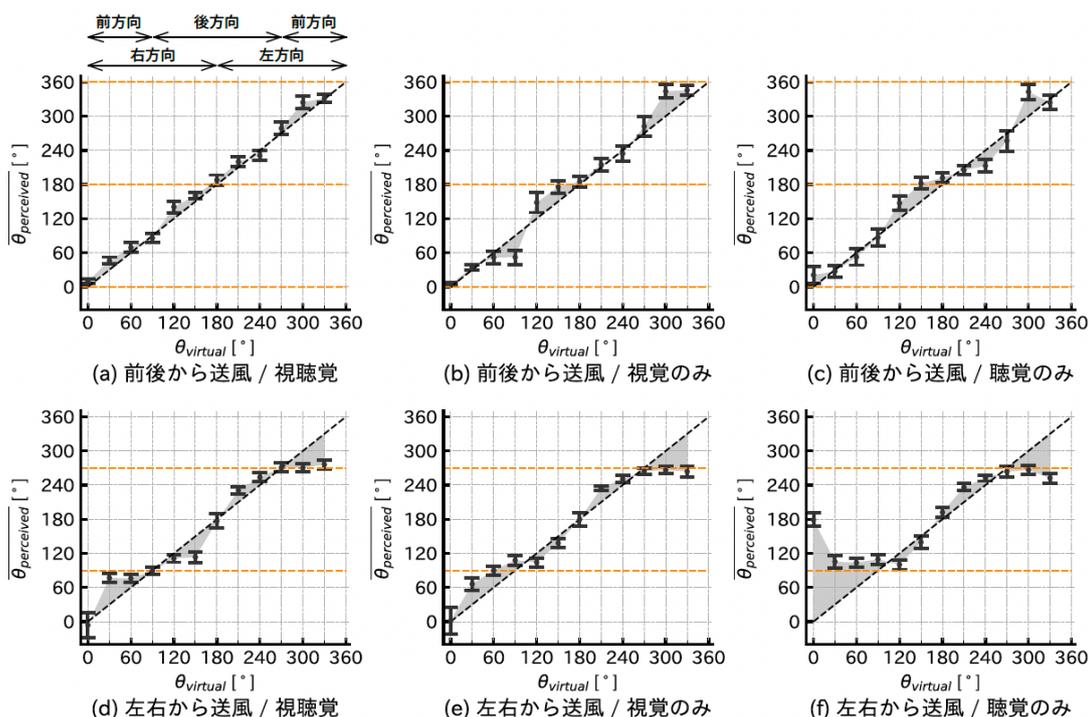


図 2 風向知覚変化実験の結果 (横軸：提示方向、縦軸：知覚方向)

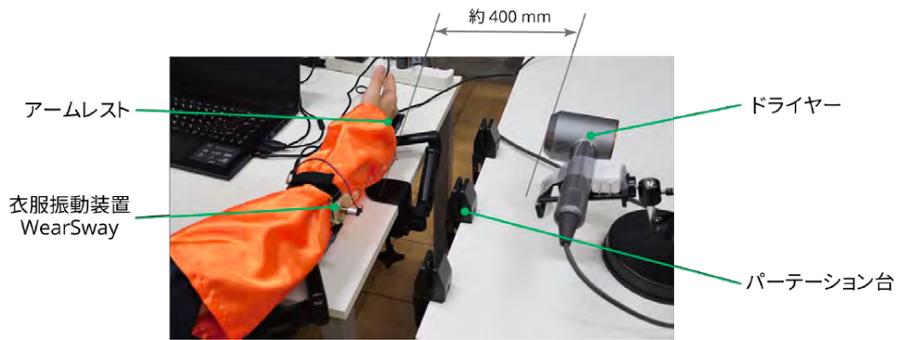


図3 強風による衣服の振動触覚を提示するデバイス (WearSway)

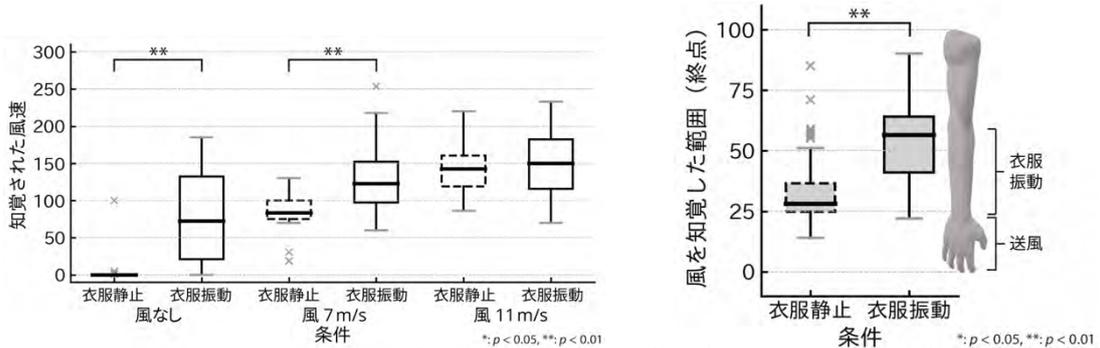


図4 衣服の振動実験の結果 (左: 風速の知覚、右: 風の範囲の知覚)

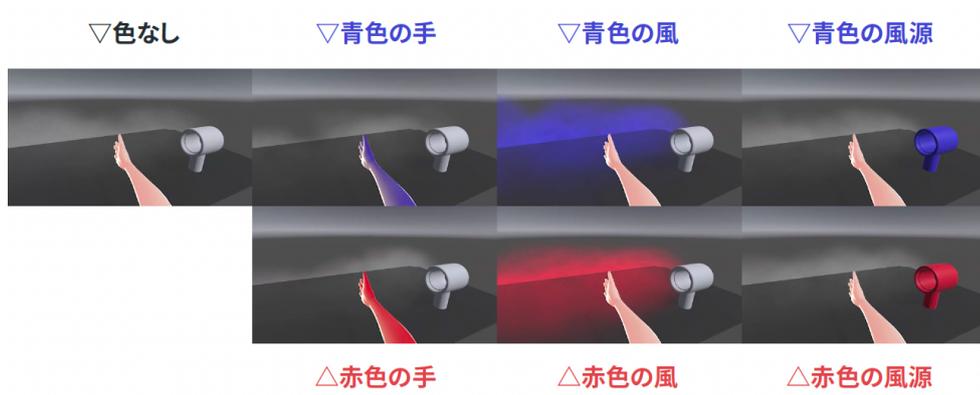


図5 手、風、風源の色提示

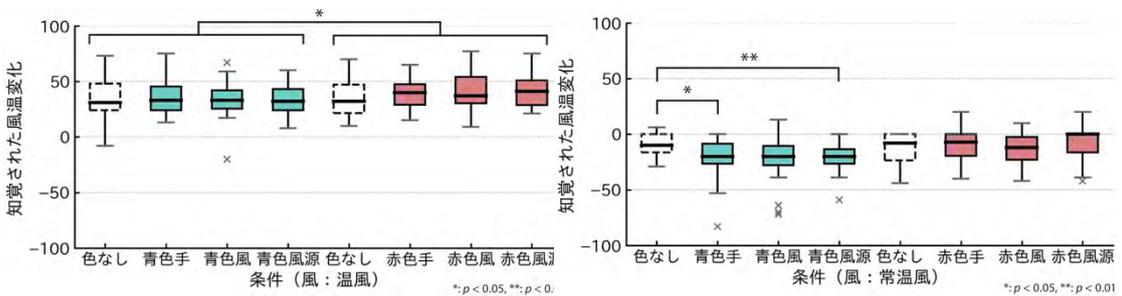


図6 物体やアバタの色提示による風温知覚の結果 (左: 温実風、右: 常温実風)

#### (4) 風印象の提示

風に関する複合的な知覚である快適感に着目し、人に対して広範囲に模擬自然風を送りながら、屋外や屋内のバーチャル環境に無地の環境 (図7右の灰色背景) の視覚刺激と対応する聴覚刺激を加えて、風の快適感や開放感、ユーザの感情の変化を検証した。視聴覚刺激が風の快適感や開放感、感情の快適度を改善する効果があることが明らかになった。模擬自然風の刺激によって、VR空間の印象や感情の快適度が改善することを確認した (図8)。すなわち、実風刺激 (触覚刺激) を用いたリラクゼーションシステムにとって、快適な視聴覚刺激が適切に提供されるこ

とによって、より高い効果が得られることを示唆している。

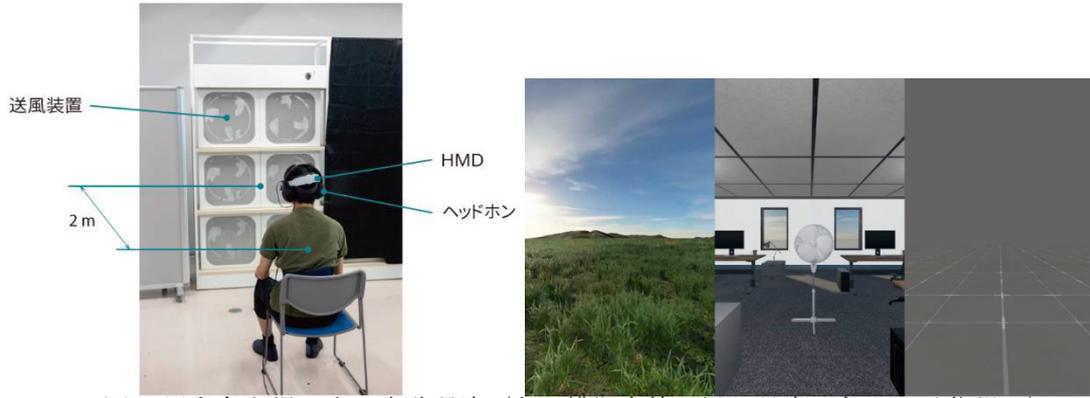


図7 風印象を提示する実験環境 (左: 模擬自然風提示環境、右: VR映像提示)

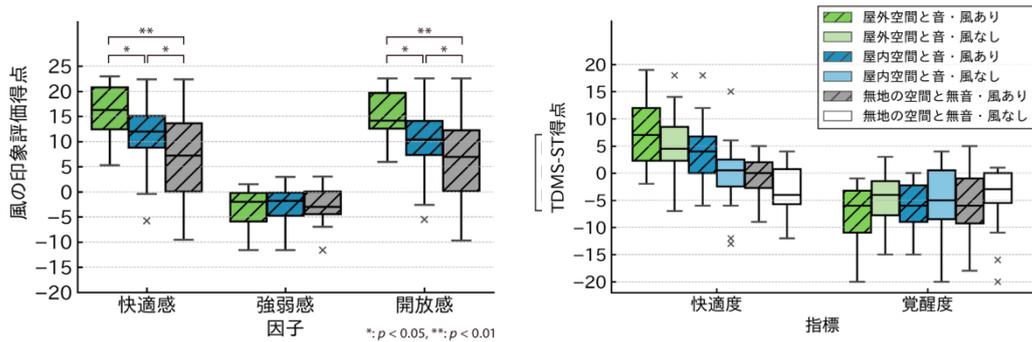


図8 風印象及び感情による評価結果

### (6) 風感覚機序

本研究により、複数のモダリティからの刺激によって知覚が変化するクロスモーダル効果を用いて、風感覚として取り上げた風向、風速、風音、並びに、風の印象や感情といった心理状態を変化させられることが明らかにされた。

風感覚変化を誘発する感覚刺激には、ユーザの身体や身体近傍空間からの刺激に加えて、ユーザから離れた風源や周囲環境からの刺激も含まれ、有効な風感覚変化を見出すことができた (図9)。異なるモダリティの刺激が空間的に一致している方が統合の効果が高まる spatial rule が示されているが、風が与える作用を考えれば、その範囲を広く捉えられる可能性が示唆される。

変化させたい風感覚ごとに異なるモダリティや異なる種類の感覚刺激が有効であることから、これらを独立に組み合わせることによって風感覚を独立に変化させられる可能性がある。一方で、逆効率の法則に照らしてみれば、感覚刺激の強度が強すぎる場合には感覚のクロスモーダル効果が現れない可能性もある。本研究では、常に実風を感覚刺激の一つとして捉えているが、実風速によって他の刺激の効果に違いがあると整理できる。この整理によれば、1 m/s 前後の弱い風と多感覚刺激の組み合わせであれば風感覚の変化を起こしやすいと考えられるが、衣服振動を用いた場合には強い風であっても風感覚の変化を誘発できた。

仮想的に提示する感覚刺激に高い臨場感を必要とする事例は実施した範囲ではなかったものの、その感覚刺激が風そのものあるいは風が引き起こす身体近傍や環境への作用が妥当な現象として知覚されることは、風感覚の変化を引き出す重要な要素となっているのではないかと考えられる。

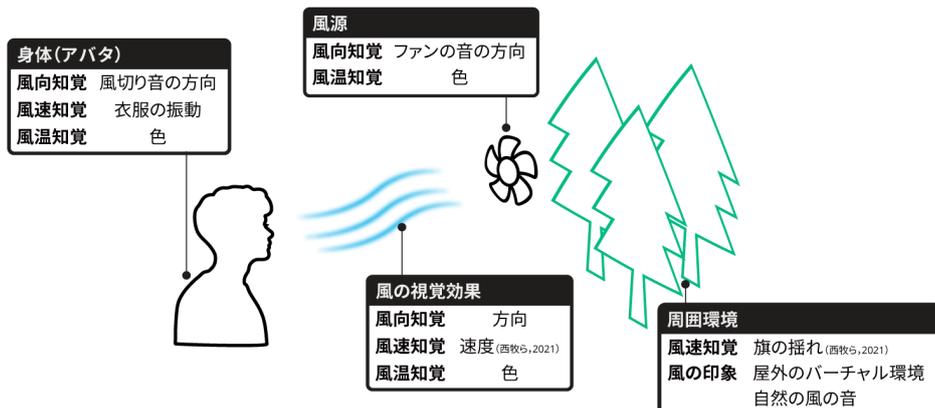


図9 風感覚変化を誘発する感覚刺激

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Hosoi Juro, Ban Yuki, Ito Kenichi, Warisawa Shin'ichi  | 4. 巻<br>11                |
| 2. 論文標題<br>Pseudo-Wind Perception Induced by Cross-Modal Reproduction of Thermal, Vibrotactile, Visual, and Auditory Stimuli | 5. 発行年<br>2023年           |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Access  | 6. 最初と最後の頁<br>4781 ~ 4793 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/access.2023.3236310   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難   | 国際共著<br>-                 |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Kenichi Ito, Juro Hosoi, Yuki Ban, Takayuki Kikuchi, Kyosuke Nakagawa, Hanako Kitagawa, Chizuru Murakami, Yosuke Imai, Shin'ichi Warisawa |
| 2. 発表標題<br>Wind comfort and emotion can be changed by the cross-modal presentation of audio-visual stimuli of indoor and outdoor environments        |
| 3. 学会等名<br>2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>金イ、伊東健一、伴祐樹、割澤伸一        |
| 2. 発表標題<br>聴触覚クロスモーダル効果に対する音像定位の影響 |
| 3. 学会等名<br>第27回日本バーチャルリアリティ学会大会    |
| 4. 発表年<br>2022年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kenichi Ito, Juro Hosoi, Kei Takanohashi, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa                     |
| 2. 発表標題<br>Wear- Sway:wearable device to reproduce tactile stimuli of strong wind through swaying clothes |
| 3. 学会等名<br>SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                      | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究<br>分担者 | 伴 祐樹<br><br>(Ban Yuki)<br><br>(20789391) | 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任講師<br><br><br>(12601) |    |

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)  | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|-----------|----------------------------|-----------------------|----|
| 研究<br>協力者 | 伊東 健一<br><br>(Ito Kenichi) |                       |    |
| 研究<br>協力者 | 細井 十郎<br><br>(Hosoi Juro)  |                       |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|