

# 博士論文（要約）

多感覚刺激によるクロスモーダル効果を利用した風覚提示の研究

伊東 健一

# Copyright Notice

## Chapter 6

© 2023 IEEE. Reprinted, with permission, from Kenichi Ito, Juro Hosoi, Yuki Ban, Takayuki Kikuchi, Kyosuke Nakagawa, Hanako Kitagawa, Chizuru Murakami, Yosuke Imai, and Shin'ichi Warisawa. Wind comfort and emotion can be changed by the cross-modal presentation of audio-visual stimuli of indoor and outdoor environments. In *2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 215–225, 2023.

<https://doi.org/10.1109/VR55154.2023.00037>

In reference to IEEE copyrighted material which is used with permission in this thesis, the IEEE does not endorse any of the University of Tokyo's products or services. Internal or personal use of this material is permitted. If interested in reprinting/republishing IEEE copyrighted material for advertising or promotional purposes or for creating new collective works for resale or redistribution, please go to [http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/rights\\_link.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/rights_link.html) to learn how to obtain a License from RightsLink. If applicable, University Microfilms and/or ProQuest Library, or the Archives of Canada may supply single copies of the dissertation.

# 目次

目次	2
図目次	6
表目次	9
1 序論	10
1.1 背景	10
1.2 本研究の目的	12
1.3 本論文の構成	15
2 風覚を用いたインタラクションの関連研究	16
2.1 本章の概要	16
2.2 人の風知覚	21
2.2.1 風知覚の基礎	21
2.2.2 風速知覚	22
2.2.3 風向知覚	24
2.2.4 風温知覚	25
2.2.5 風の快適感	25
2.3 風覚ディスプレイ	26
2.3.1 風覚ディスプレイの研究動向	26
2.3.2 風覚ディスプレイの装置形態	28
2.3.3 実際の送風を用いる風覚ディスプレイにおける課題の整理	34
2.4 クロスモーダル効果による知覚変化	34
2.4.1 クロスモーダル効果	34
2.4.2 クロスモーダル効果の生起メカニズムのモデル化	35
2.4.3 クロスモーダル効果による風知覚変化	37
2.5 本研究の位置付けと展望	40

3	風の作用を想起させる多感覚刺激によるクロスモーダルな風知覚変化	43
3.1	本研究で対象とする風知覚の要素	43
3.2	風に関連する多感覚刺激の特殊性	44
3.3	風知覚におけるクロスモーダル効果を誘発する刺激の設計方針	44
3.3.1	風を想起させる刺激の分類	44
3.3.2	感覚モダリティ別の検討	45
3.3.3	本研究および先行研究で用いた感覚刺激の整理	46
3.4	風向知覚変化を誘発する視聴覚刺激の例	47
4	衣服の振動による触覚刺激を用いた風速および風の範囲知覚の変化	53
4.1	本章の概要	53
4.2	動く衣服による触覚刺激の関連研究	55
4.3	強風による衣服の振動を再現するウェアラブルデバイスの設計	56
4.3.1	強風下における衣服の挙動計測	56
4.3.2	ウェアラブルデバイスによる衣服の振動を実現する手法の検討	57
4.3.3	リンク機構を用いた衣服振動装置	60
4.4	衣服の振動による風速と風の範囲知覚を測定する実験	61
4.4.1	実験設計	61
4.4.2	仮説および評価	62
4.4.3	実験装置	63
4.4.4	実験手順	65
4.4.5	環境及び感覚刺激の統制	66
4.4.6	実験結果	66
4.4.7	議論	68
4.5	衣服の振動および衣服が揺れる映像による風速と風の範囲知覚を測定する実験	71
4.5.1	実験設計	71
4.5.2	仮説および評価	71
4.5.3	実験装置	74
4.5.4	衣服が揺れる VR 映像	74
4.5.5	実験手順	75
4.5.6	環境及び感覚刺激の統制	76
4.5.7	実験結果	77
4.5.8	議論	82
4.6	本研究の制限	84

---

4.7	本章の結論と将来展望 . . . . .	84
5	物体やアバタの色変化を用いた風温知覚変化	86
5.1	本章の概要 . . . . .	86
5.2	視覚刺激による温度知覚変化の関連研究 . . . . .	88
5.3	物体やアバタの色変化を用いた風温知覚変化手法 . . . . .	90
5.3.1	色を変化させる部位の検討 . . . . .	90
5.3.2	物体やアバタの色が変化する VR 環境の制作 . . . . .	91
5.4	物体やアバタの色変化による風温知覚変化を測定する実験 . . . . .	94
5.4.1	実験設計 . . . . .	94
5.4.2	仮説および評価 . . . . .	95
5.4.3	実験装置 . . . . .	96
5.4.4	実験手順 . . . . .	98
5.4.5	環境及び感覚刺激の統制 . . . . .	99
5.5	結果および議論 . . . . .	99
5.5.1	実験結果 . . . . .	99
5.5.2	議論 . . . . .	105
5.5.3	本研究の制限 . . . . .	109
5.6	本章の結論 . . . . .	109
6	屋内外のバーチャル映像および音による風の印象および感情変化	110
6.1	本章の概要 . . . . .	110
6.2	快適な風の再現に関する関連研究 . . . . .	111
6.2.1	快適な風の再現 . . . . .	111
6.2.2	多感覚統合と風の快適さ . . . . .	113
6.3	視聴覚刺激による風の印象および感情変化の検証実験 . . . . .	114
6.3.1	3種のバーチャル環境における多感覚刺激設計 . . . . .	114
6.3.2	実験設計 . . . . .	118
6.3.3	風の印象, 空間の印象, および感情の評価手法 . . . . .	118
6.3.4	実験手順 . . . . .	122
6.3.5	環境及び感覚刺激の統制 . . . . .	123
6.4	実験結果 . . . . .	124
6.4.1	アンケート回答 . . . . .	124
6.4.2	生体情報 . . . . .	127
6.4.3	自由回答 . . . . .	128

6.5	議論 . . . . .	129
6.5.1	屋外環境の視聴覚情報による風の快適感と開放感の向上 . . . . .	129
6.5.2	屋外空間の視聴覚情報と模擬自然風によるバーチャル空間の印象向上 . . . . .	129
6.5.3	屋外空間の視聴覚情報と模擬自然風によるリラックス効果 . . . . .	130
6.5.4	風覚を用いたリラクゼーションシステムにおける設計指針の提案 . . . . .	131
6.5.5	本研究の制限 . . . . .	131
6.6	本章の結論 . . . . .	132
7	結論 . . . . .	134
7.1	本研究の成果および知見 . . . . .	134
7.2	総合考察 . . . . .	135
7.2.1	実現した風知覚変化 . . . . .	135
7.2.2	風知覚変化を誘発する感覚刺激 . . . . .	136
7.2.3	風知覚変化手法の組み合わせ . . . . .	137
7.2.4	実風速と風知覚変化の関係 . . . . .	138
7.2.5	感覚刺激と送風する部位の関係 . . . . .	139
7.2.6	クロスモーダル効果による風知覚変化を検証する実験における工夫 . . . . .	139
7.3	本研究の応用と展望 . . . . .	141
7.3.1	風覚の利用拡大 . . . . .	141
7.3.2	快適な風体験の実現 . . . . .	142
7.3.3	ユーザと風のインタラクションを考慮した風知覚変化手法の研究 . . . . .	142
7.3.4	ウェアラブルデバイスを用いた全身への風覚提示 . . . . .	142
7.3.5	他の感覚刺激への手法の応用 . . . . .	143
	参考文献 . . . . .	144
	謝辞 . . . . .	158
	研究業績リスト . . . . .	160

# 目次

1.1	物理的に風を再現する風覚ディスプレイの例 . . . . .	11
1.2	クロスモーダル効果を利用した風覚提示の全体像 . . . . .	13
1.3	クロスモーダル効果を利用した風覚提示の全体像 . . . . .	14
1.4	本論文の構成 . . . . .	14
2.1	中野らが風向の JND 測定に用いた装置 . . . . .	25
2.2	Sensorama . . . . .	27
2.3	設置型風覚ディスプレイの研究例 . . . . .	28
2.4	装着型風覚ディスプレイの研究例 . . . . .	29
2.5	関連研究において提示可能な最大風量と風源の直径の関係 . . . . .	31
2.6	風向を可変とした関連研究において用いられた風源の個数 . . . . .	32
2.7	クロスモーダル効果による風向知覚変化の研究例 . . . . .	38
2.8	クロスモーダル効果による風速知覚変化や触覚刺激による強風表現の研究例	39
2.9	風向知覚変化のメリット . . . . .	41
2.10	風速知覚変化のメリット . . . . .	41
2.11	風温知覚変化のメリット . . . . .	42
2.12	視聴覚刺激による風の印象変化のイメージ . . . . .	42
3.1	風知覚におけるクロスモーダル効果を誘発する刺激の 3 分類 . . . . .	45
3.2	視聴覚刺激による風向知覚操作の概念図 . . . . .	47
3.3	粒子の流れる VR 映像 . . . . .	48
3.4	風向知覚変化検証実験に用いた送風装置 . . . . .	49
3.5	風向知覚変化検証実験におけるバーチャル風向とファンの風速の関係 . . . . .	49
3.6	知覚した風向を回答するインタフェース . . . . .	50
3.7	風向知覚変化検証実験における知覚された風向の平均 ( $\overline{\theta_{\text{perceived}}}$ ± 標準誤差) とバーチャル風向 ( $\theta_{\text{virtual}}$ ) のプロット . . . . .	51

---

4.1	WearSway：衣服振動により強風の触覚刺激を再現するウェアラブルデバイス	53
4.2	強風の中では衣服がバタバタと振動する	56
4.3	強風による布の振動測定装置	57
4.4	強風による布の振動測定で得られたパワースペクトル密度（PSD）	58
4.5	衣服振動装置 WearSway の外観	60
4.6	WearSway の機構概要図. 寸法は主要寸法のみ記入した	61
4.7	WearSway による布の振動測定で得られたパワースペクトル密度（PSD）	62
4.8	衣服の振動による風速と風の範囲知覚を測定する実験のアンケート画面	63
4.9	衣服の振動実験の装置	64
4.10	衣服の振動実験における送風の切り替え	65
4.11	衣服の振動実験の手順	65
4.12	衣服の振動実験の結果（風の現実感）	67
4.13	衣服の振動実験の結果（風速知覚）	68
4.14	衣服の振動実験の結果（風の範囲の知覚）	69
4.15	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験のアンケート画面	72
4.16	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験における送風の切り替え	75
4.17	実験に使用した衣服の揺れる映像（映像から切り出した数フレームを合成）	76
4.18	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の手順	76
4.19	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の結果（風の現実感）	77
4.20	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の結果（風速知覚）	78
4.21	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の結果（風の範囲の知覚）	79
4.22	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の結果（知覚された風の範囲の終点における衣服振動の主効果）	79
4.23	衣服の振動および衣服が揺れる映像提示実験の結果（臨場感）	80
4.24	衣服振動による強風知覚提示の応用例	85
5.1	物体やアバタの色変化の例	86
5.2	物体に直接接触する際の 温度知覚変化の模式図	87
5.3	送風を受ける際の温度知覚変化の模式図	87
5.4	Hue-heat Hypothesis	88
5.5	Ho ら（2014）の実験結果	89
5.6	本研究で用いる物体やアバタの色変化の一覧	92
5.7	物体やアバタの色変化実験のアンケート画面	96
5.8	物体やアバタの色変化実験の装置	97

5.9	物体やアバタの色変化実験における送風の切り替え . . . . .	97
5.10	物体やアバタの色変化実験の手順 . . . . .	98
5.11	物体やアバタの色変化実験の結果 (風温知覚・温風時) . . . . .	100
5.12	物体やアバタの色変化実験の結果 (風温知覚・常温風時) . . . . .	100
5.13	物体やアバタの色変化実験の結果 (風の現実感) . . . . .	101
5.14	物体やアバタの色変化実験の結果 (風速知覚) . . . . .	101
5.15	物体やアバタの色変化実験の結果 (General Presence) . . . . .	102
5.16	物体やアバタの色変化実験の結果 (Spatial Presence) . . . . .	102
5.17	物体やアバタの色変化実験の結果 (Involvement) . . . . .	103
5.18	物体やアバタの色変化実験の結果 (Realness) . . . . .	103
5.19	物体やアバタの色変化実験における風温知覚回答の中央値 . . . . .	106
6.1	本研究の背景及び位置づけ . . . . .	112
6.2	風の印象および感情変化検証実験の様子 . . . . .	117
6.3	装置の正面, 左 300 mm, 右 300 mm 地点における送風装置の風速変化の 測定結果 . . . . .	117
6.4	送風装置による模擬自然風のパワースペクトル . . . . .	118
6.5	アンケート回答のためのインタフェース . . . . .	119
6.6	頭部に HMD, ヘッドホン, 脳波計を取り付けた様子 . . . . .	122
6.7	風の印象および感情変化検証実験の手順 . . . . .	122
6.8	風の印象に関するアンケート回答の得点 . . . . .	125
6.9	バーチャル空間の印象に関するアンケート回答の得点 . . . . .	127
6.10	感情アンケート TDMS-ST の得点 . . . . .	127
6.11	心電信号から算出した RRI . . . . .	128
7.1	本研究におけるクロスモーダル効果による風知覚変化のまとめ . . . . .	135
7.2	本研究におけるクロスモーダル効果による風知覚変化を誘発する刺激のま とめ . . . . .	137

# 表目次

2.1	風覚提示によるインタラクション関連研究（前半）	17
2.2	風覚提示によるインタラクション関連研究（後半）	18
2.3	風覚提示によるインタラクション関連研究における装置の諸元（前半）	19
2.4	風覚提示によるインタラクション関連研究における装置の諸元（後半）	20
2.5	風覚ディスプレイにおける装置の配置と提示対象である身体部位との関係	29
3.1	風知覚のクロスモーダル効果を誘発する刺激と本論文で扱う風覚要素の対応表	47
3.2	送風方向ごとの感覚情報条件に対する絶対誤差の統計検定結果	51
3.3	感覚情報ごとの送風方向条件に対する絶対誤差の統計検定結果	52
4.1	衣服を振動させるウェアラブルデバイスのための手法比較	58
4.2	風の範囲の知覚に関する事後検定結果	69
4.3	実験で使用した IPQ の質問項目	73
4.4	実験で使用した自由記述の質問項目	74
4.5	spatial presence および realness に関する事後検定結果	80
5.1	物体やアバタの色変化による風温知覚変化測定実験の条件	94
6.1	実験に使用した 3 種のバーチャル環境の視聴覚刺激の概要	115
6.2	風の印象に関する質問紙項目	120
6.3	バーチャル空間の印象に関する質問紙項目	121
6.4	風の印象, バーチャル空間の印象, 感情に関するアンケートの事後検定結果	126
7.1	風速知覚変化の実験で使用された実際の風速と結果の関係	138

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

風は、我々人間が日常的に体験する空気の流れである。戸外に出ると風が吹いていたり、自転車やバイクで移動すると前方からの風圧を受けたり、暑い日に扇風機の風で涼を取ったりと、生活の様々な場面で風を体験する機会がある。そうした風の体験は多様であり、例えば風速が異なればそよ風や強風、風温が異なれば温風や冷風と、それぞれ印象を異にする。さらには、人工的に温風や冷風を発生させることで快適な温熱環境を作り出す空気調和（空調）技術は生活に欠かせない。風は我々の生活と密接に結びつき、天候や移動の情報を伝え、また快適性にも強く関連すると言える。

風の感覚をバーチャルリアリティ（virtual reality; VR）上でも再現し、VR 環境の気候やユーザの移動に応じた風刺激を提供する研究が行われている。VR は、現実に近い感覚刺激を人工的に再現することで、作り出された空間に自身がいるかのように知覚させる技術である。近年普及が進むヘッドマウントディスプレイ（head mounted display; HMD）は、主には視聴覚刺激をユーザに提示する。しかし、人は視聴覚以外にも触覚、味覚、嗅覚といった多様な形式（感覚モダリティ）で周囲の世界の情報を得ていることから、VR においてもそれらを再現する多感覚刺激技術の利用が試みられている。風から得られる触覚刺激も、多感覚刺激の一種として VR 技術の勃興期から活用されてきた [1]。

本論文では、先行研究にならい、風の感覚を「風覚」、風の感覚を再現する装置を「風覚ディスプレイ（wind display）」と呼ぶ。小木と廣瀬は、風覚を科学データ提示に利用することを提案した 1995 年の論文で、風覚を「触圧覚、温覚、冷覚等が複合された広い意味での触覚の一種 [2]」と定義した。

冒頭に述べたとおり我々は日常的に風覚を体験しているため、現実に近い風覚を再現できれば VR の没入感や臨場感が高まると考えられる。風向や風速、風温を制御した風覚ディスプレイによって、VR 体験中の臨場感増強 [3-7]・自己運動感覚・旋回感覚の増

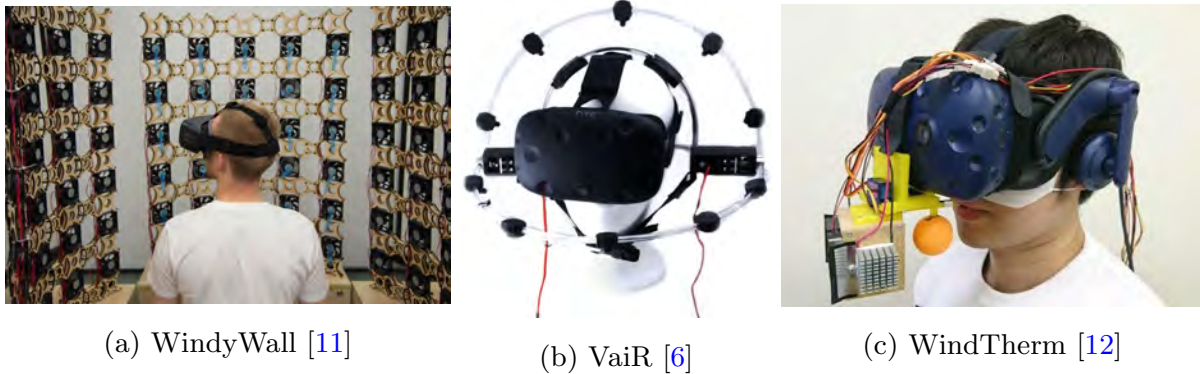


図 1.1: 物理的に風を再現する風覚ディスプレイの例

強 [8, 9]・VR 酔いの軽減 [9]・感情の喚起 [7, 10] といった効果が報告されている。

これまでに提案されている風覚ディスプレイの多くは、もっぱら風を物理的に再現することによって風覚を提示していた。例えば、Tolley らの WindyWall [11] は、90 個のファンを使用者の周囲に配置することで、様々な風速・風向の風を再現した (図 1.1 (a))。また、Rietzler らの VaiR [6] は、弓形の枠に気流を吹き出すノズルを取り付け、枠を回転させることで風向を可変とした (図 1.1 (b))。鈴木らの WindTherm [12] は、ペルチェ素子とヒートシンクを内蔵し、常温の風や温風を送風できた (図 1.1 (c))。

風はファンの回転や空気圧によって簡便に生成できるため、既存の風覚ディスプレイが物理的に風を再現する方針を取ってきたことは自然なことである。しかし、物理的な送風のみによって風速・風向・風温といった風の多様な要素を精緻に再現しようとするほど、装置の大型化・複雑化を招くという課題がある。例えば、風向を再現するには風の発生源 (風源) を多数並べるまたは位置を可変とする必要が [6, 11]、風温を再現するには空気を加熱または冷却する必要がある [12]。VR デバイスは一般への普及のために小型軽量化が進む傾向にあり、風覚ディスプレイの装置が大型・複雑であることは普及の妨げとなりうる。

加えて、物理的に風を再現する方針では、風が遮られることで風覚を提示できない場合が生じる。例えば、衣服に覆われた身体部位に対しては、風を直接届けられないことがある。そのため風覚ディスプレイの研究では、衣服に覆われていない顔 [5-7, 12] や手 [13, 14] に送風する形式を採用したものが多い。

このような風覚ディスプレイの大型・複雑化や風を提示可能な範囲の制限を解決する方針として、筆者はクロスモーダル効果を利用した風覚提示を提案する。クロスモーダル効果とは、多感覚刺激間の相互作用によって、あるモダリティの刺激が他のモダリティの刺激に対する知覚を変化させる現象である [15]。触知覚は、視触覚間 [16] や聴触覚間 [17] のクロスモーダル効果によって変化することがすでに明らかになっている。クロスモーダ

ル効果によって、実際の物理現象を完全に再現せずとも多様な知覚を提示できるため、嗅覚 [18] や味覚 [19] といった、物理的再現が難しい感覚提示への応用が注目されている。

広い意味での触覚の一種である風の知覚も、クロスモーダル効果によって変化すると考えられる。実際に、伊藤ら [20] の研究では風向を示唆する視覚情報によって、筆者ら [21, 22] の研究では風向を示唆する視聴覚情報によって風向知覚が変化し、2 台、4 台など少数のファンのみで広範囲の風向が提示できることが明らかにされてきた。西牧らは、旗のはためきの強さや風で飛ぶ落葉の速さといった風速を想起させる視覚刺激によって、風速の知覚が変化することを明らかにした [23]。

これらの研究により、クロスモーダル効果を利用した風覚提示の実現可能性が示唆されてきた。しかしながら、風覚の様々な側面におけるクロスモーダル効果の有用性が十分に解明されたとはいえない。例えば、西牧らの実験結果では、視覚刺激が提示された場合の風速は、視覚刺激なしの基準の風に対して全体的に弱く評価された [23]。すなわち、風速を実際より速く知覚する現象は、この手法ではみられなかったと考えられる。加えて、風温の提示には空気を加熱・冷却する装置が必要となる点も風覚ディスプレイの課題であるものの、クロスモーダル効果を用いて風温の知覚を変化させる手法は筆者の知る限り提案されていない。こうした背景から、本研究では風向、風速、風温といった異なる風の要素をクロスモーダル効果によって変化させる手法を明らかにすることを目指す。

さらに、風の印象や感情といった高次の心理状態におけるクロスモーダル効果の活用も興味深い研究課題である。冒頭で述べたように異なる様相の風は異なる印象や快適性を誘発するため、これらを適切に設計できれば、バーチャルリアリティのみに留まらず快適な空気環境を追求する空調や建築等の分野においても活用可能な知見となる。クロスモーダル効果の研究分野では、単純な知覚量に留まらず複合的な知覚や認知も変化しうることが明らかになっており [24, 25]、風覚にも応用できる可能性がある。風覚ディスプレイ研究においても、風によるストレス抑制効果 [26] や感情の喚起 [7, 10] といった効果がみられてはいるものの、多感覚刺激との組み合わせによる影響は解明されていない。したがって、本研究では、風の印象や感情といった心理状態に対する、風覚と多感覚刺激のクロスモーダル効果の影響も検証する。

## 1.2 本研究の目的

本研究の主目的は、クロスモーダル効果を利用して人間の風知覚を変化させる手法を提案し、風知覚のどのような要素が、どのように変化するか明らかにすることである。本研究で目的とする風知覚変化の枠組みを図 1.2 に示す。実際の風のみを用いる風覚ディスプレイでは、実際の風がそのまま知覚される。他方、風と多感覚刺激を組み合わせる風知覚変化を誘発できれば、実際の風を簡易な装置で発生させていたとしても多様な風覚提示

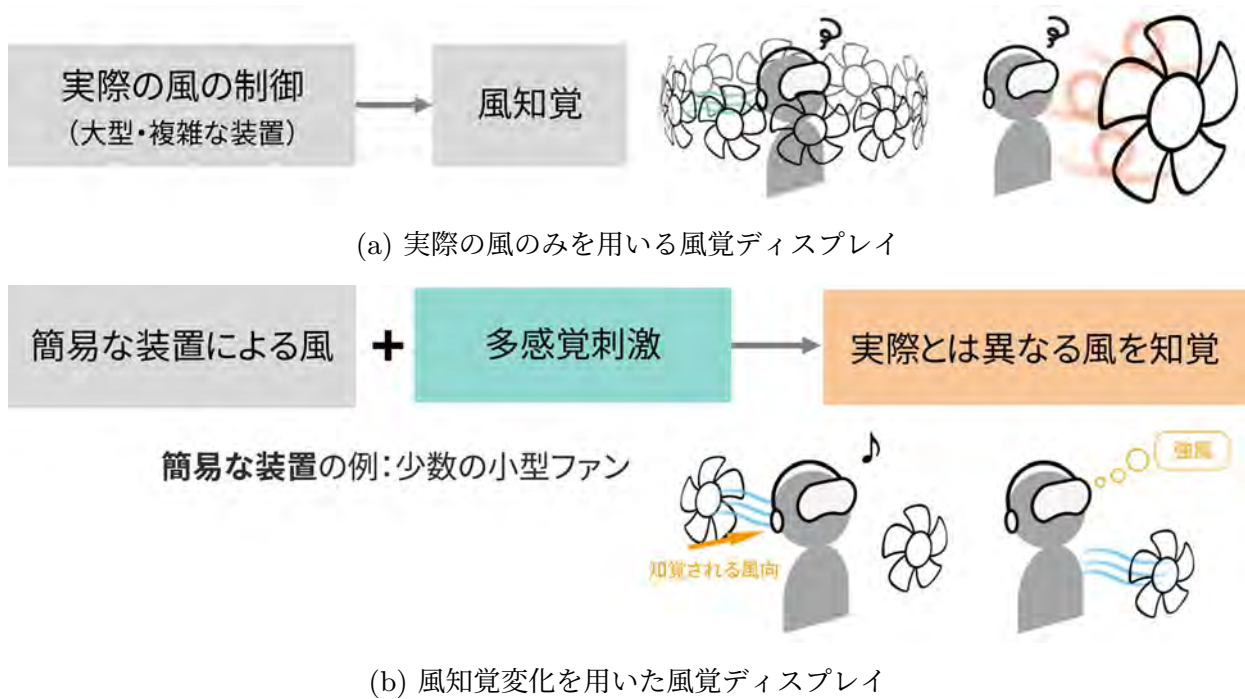


図 1.2: クロスモーダル効果を利用した風覚提示の全体像

が可能となる。

具体的には、風向、風速、風温、および風の印象に関する知覚の変化について取り扱う。図 1.3 に、本研究の手法の全体像を示す。風知覚の変化を制御することで、送風装置による風が同一であっても異なる風向、風速、風温を知覚できるようになり、現在の風覚ディスプレイにおける技術課題の克服に繋がる。加えて、風は温熱快適性や気流がもたらす触覚的快適性などと密接に関連していることから、風の快適感等の複合的な知覚や、ユーザの心理状態に対するクロスモーダル効果についても研究する。

風は視覚的には通常見えない空気の流れであり、物体との衝突などがなければ無音であるため、これまでのクロスモーダル効果の研究で用いられてきた物体そのものの見た目や音の変更といった手法をそのまま適用することが難しい。したがって、本研究では風の発生や作用を間接的に想起させる多感覚刺激を通じて風知覚を変化させることを提案する。

本研究の主な貢献は、クロスモーダル効果による風知覚の変化を、風知覚を構成する各要素に対して解明することである。それにより、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 コンテンツにおける風覚の活用促進が期待される。風の快適性が重視される空調やリラクゼーションの分野に対しても、多感覚刺激を取り入れて快適感を向上させるための知見を提供できる。加えて、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することで、クロスモーダル効果の研究分野にも貢献する。

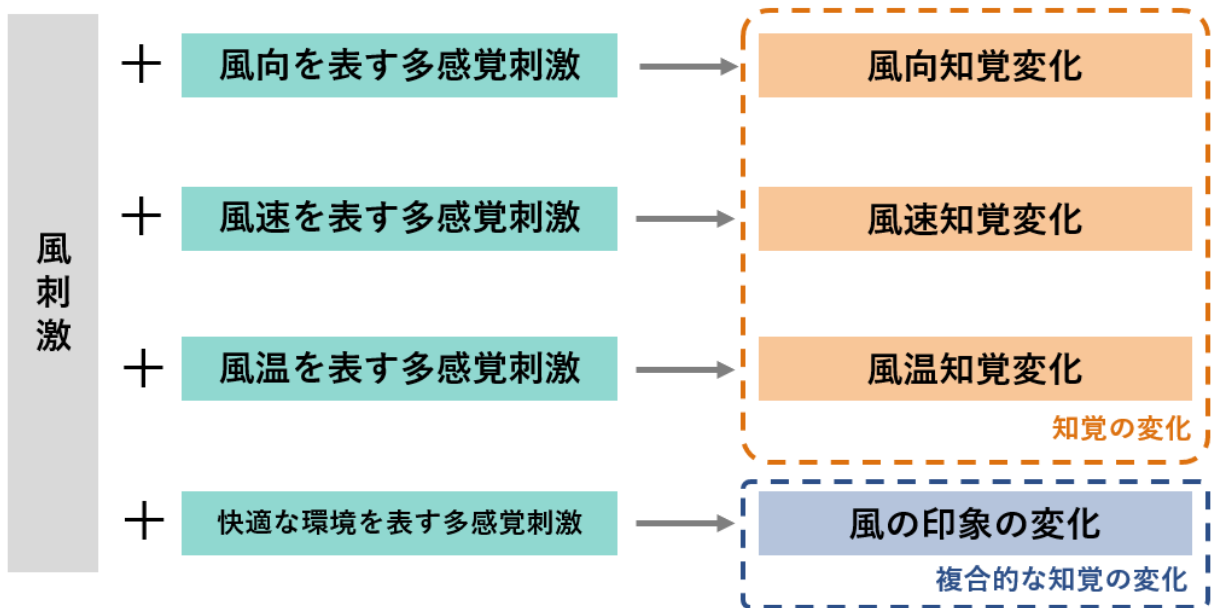


図 1.3: クロスモーダル効果を利用した風覚提示の全体像

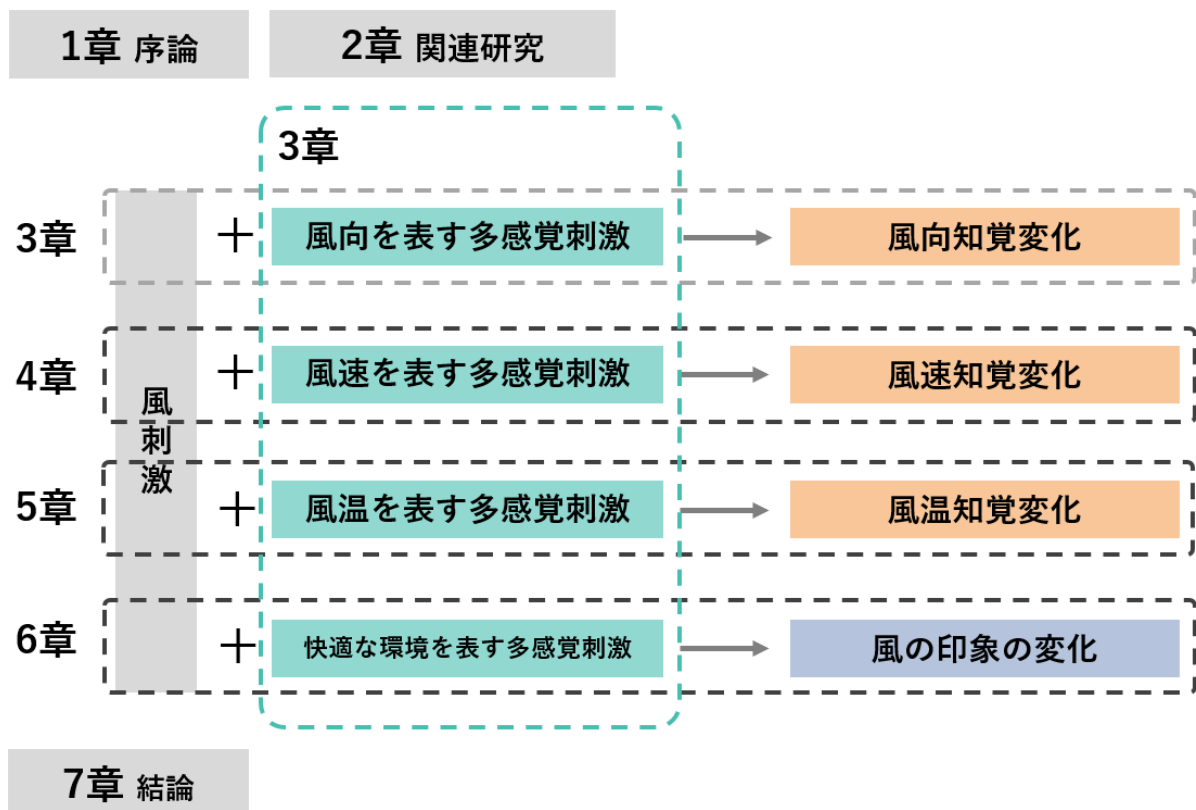


図 1.4: 本論文の構成

## 1.3 本論文の構成

本論文は、図 1.4に示した全 7 章から構成される。以下に各章の概要を述べる。

第 1 章「序論」では本研究の背景と目的、本論文の構成を述べた。

第 2 章「風覚を用いたインタラクションの関連研究」では、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション分野における風覚刺激提示の研究動向や課題をまとめた結果をもとに、本研究の位置づけや展望を述べる。

第 3 章「風の作用を想起させる多感覚刺激によるクロスモーダルな風知覚変化」では、クロスモーダル効果による風知覚変化を生起させるための多感覚刺激の設計方針を提案する。対象とする風知覚の要素や、風に関連する多感覚刺激の特殊性を述べたうえで、クロスモーダル効果を誘発するための刺激に関する仮説や分類をまとめる。また、提案する設計方針の具体例として、過去に筆者が取り組んだ、風向を表す VR 映像や立体音を用いて風向知覚を変化させる手法を取り上げる。

第 4 章「衣服の振動による触覚刺激を用いた風速および風の範囲知覚の変化」では、強風による衣服の振動を再現する装置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と検証実験について報告する。

第 5 章「物体やアバタの色変化を用いた風温知覚変化」では、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と検証実験について報告する。

第 6 章「屋内外のバーチャル映像および音による風の印象および感情変化」では、風に関する複合的な知覚である快適感に着目し、屋外や屋内のバーチャル環境による風の快適感や開放感、ユーザの感情の変化を検証した実験について報告する。

第 7 章「結論」では、結論として本研究で得られた成果をまとめ、将来展望について論じる。

## 第2章

# 風覚を用いたインタラクションの関連研究

### 2.1 本章の概要

本章では、風覚を用いたヒューマン・コンピュータ・インタラクション（HCI）に関する研究を概観し、研究領域における本研究の位置づけを述べる。

第1章にて述べたように、風覚を活用したインタフェースとして風覚ディスプレイが研究されている。また、風覚ディスプレイを設計するためには、人の風知覚の特性を解明することも欠かせない。表2.1および表2.2は、こうした風覚によるインタラクションに関する国内外の主な研究58件をまとめたものである。これらの研究では風覚の様々な要素を可変としている。なかでも頻出のものは、風速（46件）、風向（37件）、風温（6件）である。その他には、風を提示する位置（3件）、風を提示する範囲（4件）、知覚変化により風感覚を錯覚させる（3件）ものがある。したがって、第2.2節においては、主に風速・風向・風温の知覚を検証した研究事例について述べる。なお、風と同時に温度変化や香り、ミスト（湿り気）などの多感覚刺激を提示する研究も少なくない。ただし、こうした刺激の感覚は（風知覚変化を目的としたものでない限り）風覚とは別個のものと捉えられるため、本章では取り上げない。

表2.3および表2.4は、表2.1、表2.2の研究において使用された装置の諸元をまとめたものである。風覚刺激提示の研究においては、それぞれの目的のもとに多様な形態の装置が提案されてきた。第2.3節では、風覚ディスプレイの装置の形態や、それらの装置が抱える課題について議論する。

第2.4節では、本研究の提案手法の中核にあたるクロスモーダル効果について基本的な知識を概説したうえで、風知覚におけるこれまでの研究事例を挙げる。

最後に、研究分野における本研究の位置づけと展望を第2.5節にて論じる。

表 2.1: 風覚提示によるインタラクシオン関連研究 (前半)

著者・年	結果	可変である風覚要素
Ogi & Hirose 1995 [2]	視覚・聴覚・風覚を用いてデータ提示し, 知覚成績が向上	風向, 風速
Noel et al. 2004 [27]	仮想環境体験中の風により臨場感向上, VR 酔い低減	風速
Moon & Kim 2004 [3]	多数のファンを用いた風覚ディスプレイ WindCube により臨場感向上	風向, 風速
Deligiannidis & Jacob 2006 [28]	振動と風の刺激が可能な VR Scooter により, 走行時の能力が向上	風速
Hashimoto & Imaeda 2006 [29]	人差し指の風覚の絶対閾は 0.6m/s 程度, 弁別閾は 0.7m/s 程度, 方向誤差は 50° 程度	風向, 風速
Minakuchi & Nakamura 2007 [30]	風覚ディスプレイを用いた非接触な情報提示の提案	風向, 風速
Cardin et al. 2007 [31]	HMD の周囲にファンを配置する Head Mounted Wind を提案	風向, 風速
Sawada et al. 2008 [32]	風を媒体として遠隔コミュニケーション可能なビュー・ビュー・View を提案	風向, 風速
Kosaka 2009 [33]	全方位の風を記録, 再生可能な WindState を用いたコンテンツ提案	風向, 風速
Kojima et al. 2009 [34]	頭部に局所的な風の感覚を提示するウェアラブルデバイスの提案	風提示位置
Kulkarni et al. 2012 [35]	CAVE 環境において風を再現する TPAWT のスケールモデルを設計, 製作	風向, 風速
Nakano et al. 2013 [36]	風向知覚の丁度可差異 (JND) は個人差, 風の局所性, 風速によって変化する	風向, 風速
Verlinden et al. 2013 [4]	バーチャルな航海体験で風を再現し, 臨場感とエンゲージメント向上	風向, 風速
Hirota et al. 2013 [37]	60° 間隔で設置した複数ファンの気流を混合し, 中間の風向を知覚させる補間手法	風向, 風速
Rheiner 2014 [38]	モーションプラットフォームとファンにより飛行体験が可能な Birdly を提案	風速
Murata et al. 2014 [8]	体全体の振動と風を同時に提示すると, 風と反対方向への移動を知覚する	(一定)
Nakano et al. 2014 [39]	頭部前面での風向の JND は, 局所風より一般的な風の方が大きい	風向, 風速, 風提示範囲
Hülsmann et al. 2014 [40]	CAVE 環境において風と暖かさを同時に提示し, 臨場感が向上	風向, 風速, (幅射熱)
Kulkarni et al. 2015 [41]	CAVE 環境において風を再現する TPAWT の実物大モデルを設計, 製作	風向, 風速
Pluijms et al. 2015 [42]	熟練の船員は, 船員でない人より弱い風の風向の知覚成績がよい	風向, 風速
Feng et al. 2016 [43]	バーチャル環境での歩行時, 風を含む多感覚手がかりにより知覚精度を高める	風向, 風速
Lee & Lee 2016 [13]	皮膚に送風する気流の位置を用いたウェアラブル情報提示デバイスの提案	風向, 風速
Nakano et al. 2017 [44]	頭部の風向の JND は, 単発のファンでは前面で 4.29°, 側面で 11.30°, 背面で 4.41°	風提示位置
Ranasinghe et al. 2017 [5]	HMD に装着して環境温度と風を再現する Ambiotherm により臨場感向上	風向, 風速, 風提示範囲
Rietzler et al. 2017 [6]	HMD に装着して立体的な風向を再現する VaiR により臨場感や楽しさ向上	風向, 風速, (温度)
Saito et al. 2017 [45]	HMD で映像と音を体験している場合, 風向のずれを認識する角度は 49° から 61°	風向, 風速
Ranasinghe et al. 2018 [10]	香り, 熱, 風等の多感覚刺激を組み合わせた Season Traveller により臨場感向上	風向, 風速, (温度, 香り)
Kurosawa et al. 2018 [46]	バーチャル歩行時の知覚される風速は, 実際の風速の 5 から 29% 低下する	風速
Tomono & Tomono 2018 [47]	スクリーン映像に風と香りの刺激を加える KMMMD によって臨場感と清涼感が向上	風向, 風速, (香り)
Gromer et al. 2018 [48]	VR 曝露療法 (VRET) において風の刺激を恐怖感の操作に使用できる	不明

表 2.2: 風覚提示によるインタラクション関連研究 (後半)

著者・年	結果	可変である風覚要素
Shimizu et al. 2018 [49]	風を含む五感刺激を利用してバーチャル旅行を実現する FiveStar VR を提案	風向, 風速, (振動, 香り)
Koki Ito et al. 2019a [20]	風が流れている映像を HMD で視聴すると, 4 つの送風機で全周囲からの風向を知覚	風向 (知覚変化), 風速
Takenouchi et al. 2019 [50]	風圧の知覚は Weber 則に従う。また, 温風では強さの変化量を知覚しにくい	風速, 風温
Tolley et al. 2019 [11]	多数のファンを備えた風刺激設計プラットフォーム WindyWall を提案	風向, 風速, 風提示範囲
Suzuki & Matsuura 2019 [9]	ペルチェ素子により温風を送風可能な風覚ディスプレイ Windtherm を提案	風向, 風速, 風温 (温風)
Kim et al. 2019 [51]	物理的な風とバーチャルヒューマンの相互作用により social presence が向上	風向
Xu et al. 2019 [52]	圧縮空気と Vortex Tube を用いた冷風生成による非接触温度ディスプレイを提案	風温 (冷風)
Han et al. 2019 [53]	バーチャルな天候を温度, 風, 湿度で再現する Hapmosphere を提案	風向, 風速, 風温 (温風), (輻射熱, ミスト)
Kenichi Ito et al. 2019 [21]	立体的な風の音により, 知覚される風向が最大 67.12° 変化することを解明	風向 (知覚変化), 風速
Ogasahara & Sakaguchi 2019 [54]	保冷剤で冷却した空気によって冷風刺激を生成した	風速, 風温
Suzuki et al. 2019 [12]	VR 空間で旋回する際の風提示により, VR 酔いが減少し旋回感覚が増強	風向, 風速
Koki Ito et al. 2019b [55]	4 台のヒータと送風機により, 全周囲からの熱刺激や暖風を知覚	風向 (知覚変化), (輻射熱)
Maeda & Kurahashi 2019 [14]	振動, 温度, 圧力, 風を再現する装着可能なモジュールを備えた Haptiple を提案	風速, (振動, 温度, 圧力)
Narciso et al. 2020 [56]	360 度動画の臨場感が嗅覚刺激によって向上する一方, 風の刺激では向上しない	風速
Kwon 2020 [57]	VR の消防訓練において温度と風の皮膚感覚刺激を与えると集中度が向上	風速, (輻射熱)
Wilberz et al. 2020 [7]	HMD にロケットアームを装着し多方向から触覚刺激可能な FaceHaptics を提案	風向, 風速, (温度, ミスト)
Tseng et al. 2020 [58]	HMD に内蔵した回転式リングから気流によって情報提示するディスプレイを提案	風速, 風提示位置
Takeda et al. 2020 [59]	3 台の空気砲により風の仮現運動を発生させると, 低遅延で風を錯覚させられる	風向, 風感覚 (知覚変化)
Mitsuhashi & Shishibori 2020 [60]	VR/AR を用いた擬似的な竜巻体験により, 災害教育の効果が向上	風速
Hsieh et al. 2020 [61]	ユーザ正面のファンと手持ち式のファンを組み合わせ風提示手法の提案	風速, 風提示範囲
Giraldo et al. 2020 [62]	都市の風を表現する際に, 実際の風を用いることが知覚精度や臨場感に有効	風向, 風速
Nishimaki et al. 2021 [23]	VR 映像と風のクロスモーダル効果により風速知覚が変化する	風向, 風速 (知覚変化)
Rodrigues et al. 2021 [63]	ミスト, ドライヤー等を組み合わせて冷風と温風を切替可能な風提示手法の提案	風向, 風温 (温風, 冷風)
Murakami et al. 2021 [64]	身体全体への模擬自然風によって, 作業の満足度が向上し, 疲労が抑制される	風速
Hosoi et al. 2021 [65]	クロスモーダル効果により風感覚を再現するヘッドホン型デバイス VWind の提案	風感覚 (知覚変化)
Tseng et al. 2022 [66]	VR における瞬間移動中に風による空気抵抗を表現する HeadWind を提案した	風向, 風速
Sakaguchi & Takekawa 2022 [67]	HMD 内部の冷却や快適感向上のため, チューブにより HMD 内に送風する手法の提案	風速
Hosoi et al. 2023 [68]	クロスモーダル効果により温冷風の風感覚を再現できることを解明	風感覚 (知覚変化)

表 2.3: 風覚提示によるインタラクション関連研究における装置の諸元 (前半)

著者・年	対象の部位	配置	風覚刺激のための主要な部品	風源数	最大風速 [m/s]	風源との距離 [cm]
Ogi & Hirose 1995 [2]	手	設置型	ファン	4	4.47	不明 (数 cm)
Noel et al. 2004 [27]	顔	設置型	ファン (換気扇), ノズル (直径 76 mm)	1	11 程度	60
Moon & Kim 2004 [3]	全身	設置型	ファン (直径 120 mm), フレーム	20	不明	40
Deligiannidis & Jacob 2006 [28]	全身	設置型	ファン	1	不明	不明 (数十 cm)
Hashimoto & Imaeda 2006 [29]	指先	設置型	ファン (直径 60 mm)	1	7.2	不明 (数 cm)
Minakuchi & Nakamura 2007 [30]	頭部	設置型	ファン (DC ファンまたは卓上ファン)	2	4.16	20-40
Cardin et al. 2007 [31]	頭部	装着型	ファン (直径 80 mm), フレーム	8	不明	不明 (数十 cm)
Sawada et al. 2008 [32]	顔	設置型	プロアファン, 風を通すスクリーン	12	9	30
Kosaka 2009 [33]	全身	設置型	ファン (直径 172 mm), ドーム骨格	41	3.5	85
Kojima et al. 2009 [34]	耳	装着型	スピーカ振動による送風装置	4	不明	4-14
Kulkarni et al. 2012 [35]	全身	設置型	ファン, ダクト, ノズル	2	4	60 程度
Nakano et al. 2013 [36]	顔	設置型	ファン (直径 120 mm)	13	1.30	80
Verlinden et al. 2013 [4]	全身	設置型	ファン (直径 406 mm)	8	8 程度	280 程度
Hirota et al. 2013 [37]	顔	設置型	ファン	4	3	150
Rheiner 2014 [38]	頭部	設置型	ファン	1	不明	不明
Murata et al. 2014 [8]	全身	設置型	ファン (直径 400 mm)	1	5.5	60
Nakano et al. 2014 [39]	顔	設置型	ファン (直径 120 mm), 曲線レール, モータ	1	1.30	80
Hülsmann et al. 2014 [40]	全身	設置型	ファン (直径 254 mm)	8	4.4	45-85
Kulkarni et al. 2015 [41]	全身	設置型	ファン (直径約 1000 mm), ダクト, ノズル	2	30	240 程度
Pluijms et al. 2015 [42]	全身	設置型	ファン (直径 400 mm)	8	3	280 程度
Feng et al. 2016 [43]	全身	設置型	ファン (直径 120 mm), サーボモータ (2軸)	8	4	50
Lee & Lee 2016 [13]	首, 手首等	装着型	空気ポンプ, ノズル (直径 3 mm)	4	74.3	1
Nakano et al. 2017 [44]	顔	設置型	ファン (直径 120 mm), 曲線レール, モータ	1	1.30	80
Ranasinghe et al. 2017 [5]	顔	装着型	ファン (直径 40 mm), サーボモータ	2	不明	不明 (数 cm)
Rietzler et al. 2017 [6]	頭部	装着型	圧縮空気, バルブ, ノズル, サーボモータ	10	7	不明 (数 cm)
Saito et al. 2017 [45]	頭部	設置型	ファン	1	1.9	100
Ranasinghe et al. 2018 [10]	顔	装着型	ファン (直径 40 mm), サーボモータ	2	不明	不明 (数 cm)
Kurosawa et al. 2018 [46]	顔	設置型	ファン	2	3.2	150 程度
Tomono & Tomono 2018 [47]	顔	設置型	プロアファン, 可動ブレード	1	1	200
Gromer et al. 2018 [48]	全身	設置型	ファン	4	不明	不明

表 2.4: 風覚提示によるインタラクション関連研究における装置の諸元 (後半)

著者・年	対象の部位	配置	風覚刺激のための主要な部品	風源数	最大風速 [m/s]	風源との距離 [cm]
Shimizu et al. 2018 [49]	上半身	設置型	ファン	4	不明	不明
Koki Ito et al. 2019a [20]	頭部	設置型	ファン (サーキュレータ)	4	1.8	170
Takenouchi et al. 2019 [50]	上半身	設置型	ファン (扇風機)	1	4.1	不明 (数十 cm)
Tolley et al. 2019 [11]	全身	設置型	ファン (直径 80 mm), パネル	90	約 1	60
Suzuki & Matsuura 2019 [9]	顔	装着型	ファン, ペルチェ素子, ヒートシンク, サーボモータ	1	2.3	不明 (数 cm)
Kim et al. 2019 [51]	全身	設置型	ファン (扇風機)	1	不明	不明
Xu et al. 2019 [52]	首	設置型	圧縮空気, Vortex Tube, バルブ, ノズル	1	3.5	0.5
Han et al. 2019 [53]	全身	設置型	温風ブロー, ファン (直径 140 mm)	2	4.4	50 程度
Kenichi Ito et al. 2019 [21]	頭部	設置型	ファン (直径 172 mm)	2	2.1	30
Ogasahara & Sakaguchi 2019 [54]	首	設置型	ファン (直径 80 mm), 保冷剤	1	4.6	20
Suzuki et al. 2019 [12]	頭部	設置型	ファン (直径 160 mm)	5	7	60
Koki Ito et al. 2019b [55]	頭部	設置型	ファン (サーキュレータ)	4	1.5	170
Maeda & Kurahashi 2019 [14]	様々な身体部位	装着型	ファン	1	不明	不明 (数 cm)
Narciso et al. 2020 [56]	不明	設置型	圧縮空気, ノズル	1	不明	150
Kwon 2020 [57]	上半身	設置型	ファン	1	不明	不明 (数十 cm)
Wilberz et al. 2020 [7]	顔	装着型	ファン, ロボットアーム	1	不明	不明 (数 cm)
Tseng et al. 2020 [58]	目の周囲	装着型	空気ポンプ, ノズル, モータ	1	不明	不明 (数 mm)
Takeda et al. 2020 [59]	顔	設置型	空気砲	3	8.02	60
Mitsuhashi & Shishibori 2020 [60]	全身	設置型	大型ファン	1	30	不明
Hsieh et al. 2020 [61]	全身	複合型	ファン (固定, 手持ち)	2	2.3	100-460 (固定ファン)
Giraldo et al. 2020 [62]	全身	設置型	ファン (510 mm)	8	不明	100
Nishimaki et al. 2021 [23]	顔	設置型	ファン (扇風機またはサーキュレータ)	3	2.31	150
Rodrigues et al. 2021 [63]	頭部	設置型	ファン, ドライヤー, ペルチェ素子, 超音波ミスト噴霧器	4	不明	100
Murakami et al. 2021 [64]	全身	設置型	ファン	9	1 程度	不明 (数 m)
Hosoi et al. 2021 [65]	耳	装着型	振動アクチュエータ, ペルチェ素子	0	風なし	風なし
Tseng et al. 2022 [66]	顔	装着型	圧縮空気, バルブ, ノズル	3	13.7	30
Sakaguchi & Takekawa 2022 [67]	顔	装着型	ブロー, チューブ	1	不明	不明
Hosoi et al. 2023 [68]	腕	装着型	振動アクチュエータ, ペルチェ素子	0	風なし	風なし

なお、表 2.1から表 2.4では、同じ著者による目的や装置が類似した文献を省略したことがある。最大風速や風源との距離は、原則文献中の数値を記載したが、一部は風量や装置の寸法といった情報から換算したものが含まれる。また、風速は風源からの距離によって変化するものの、表中の文献から得られた風速の数値には、風源の近傍でのものとユーザの位置でのものが混在している。

本章では、連続的な風の感覚刺激によるインタラクションに関する研究を主に紹介する。AIREAL [69] 等の、いわゆる空気砲を使用した空気渦輪の研究は、持続する風覚より瞬間的な触覚刺激提示を主眼とした場合が多いため扱わなかった（例外として、武田らの研究は連続的な風覚の再現を目的としたため含めた [59]）。また、気流によって香り物質 [70,71] やミスト [72] を搬送する研究も、風覚ではなく冷覚や嗅覚の刺激を主眼としたものであるため含めなかった。プロペラ [73,74] や圧縮空気ノズル [75] からの気流により力覚フィードバックする研究は、ユーザに直接風刺激を提示するものではないため含めなかった。

## 2.2 人の風知覚

### 2.2.1 風知覚の基礎

序論で述べたとおり、小木らは風覚を「触覚、温覚、冷覚等が複合された広い意味での触覚の一種 [2]」と定義した。風が皮膚に当たると、気流の感触は触覚や圧覚の機械受容器、気流による温度変化は温覚受容器や冷覚受容器を刺激すると考えられる。皮膚無毛部の機械受容器にはマイスナー小体、パチニ小体、メルケル触盤、ルフィニ終末があり、受容器と神経線維を合わせた機械受容単位（FAI, FAII, SAI, SAII）とも関連づけられている [76]。なお、ここで用いる「触覚」「圧覚」の用語は、これらの機械受容器で受容される皮膚感覚の一種を指し、温覚、冷覚、痛覚とは区別する。

Tseng らは、皮膚に対して気流が動いているときは FAI（マイスナー小体）が、動いていないときは SAI（メルケル触盤）がそれぞれ活性化されると考察した [58]。メルケル触盤は圧覚に関係しているとされており [76]、定常的な風圧の感覚を生起させると考えられる。こうした風圧は、特に台風の風やドライヤーの風といった風速の大きい風では明瞭に知覚される。一方で、肌を撫でる程度の微風では風圧より振動や温度変化の知覚が中心になると考えられ、風速に応じて知覚メカニズムが異なることが風覚の特徴である。

風が皮膚に当たると、多くの場合温冷知覚も生じる。室温の気流が皮膚に当たると、強制対流熱伝達によって皮膚の熱を奪うため、冷覚の知覚が生じる。一方、ドライヤーの風など高温の気流が送風されれば温覚の知覚が生じる。以上のように、皮膚感覚としての風覚は触覚、圧覚、温冷覚が複合したものである。また、それらの寄与は風速の大小によって変化すると考えられる。

一方で、皮膚感覚以外のモダリティでも風についての情報は得られる。例えば、我々は激しく揺れる旗を見れば強い風が吹いていることを知り、風鈴の音を聞けば涼しい風が吹いていることを知る。様々なモダリティの情報が統合され 1 つの事象として知覚される多感覚統合 [77] の見地からは、風覚は視覚・聴覚・皮膚感覚などの感覚情報を統合したものと考えられる。Giraldo らは、都市形態学の観点から、異なる風の視覚的表現や風覚ディスプレイ、あるいはそれらの組み合わせによる風知覚の正確さを比較した [62]。結果は、映像に加えて風の触覚刺激があることによって風向や風速の判断が正確になるというものであった。こうした結果は、我々が複数モダリティの感覚を統合して風を知覚していることの証拠を示すものと考えられる。多感覚統合の結果として生起する、クロスモーダル効果による風知覚変化については第 2.4.3 項で詳述する。

## 2.2.2 風速知覚

風速は、風の性質や印象を劇的に変える。国内外で風速の基準として用いられているビューフォート風力階級では、「Calm (風速 0–0.2 m/s)」から「Hurricane (32.7 m/s 以上)」 [78] まで風速を 12 に区分している。気象庁は気象観測の一環として風速を記録しているほか、風による災害のおそれがあるときには強風注意報、暴風警報などを発表する。

### 風速、風量、風圧、風力

風の強さを表す単語は複数あり、それぞれ異なる概念を指しているため留意が必要である。風速は気流の流速を意味する。風量は、単位時間あたりに流れる空気の体積（体積流量）を指し、管内の気流など通過する断面積が分かっている場合は風速に断面積を掛けることで求まる。

風圧は、風から受ける圧力のことを指す。気流が物体にせき止められ静止するよどみ点を考えると、全圧（よどみ点圧力） $p_t$  は静圧  $p_s$ 、密度  $\rho$ 、風速  $v$  を用いて  $p_t = p_s + \rho v^2 / 2$  となる。一般的な風洞実験では、風圧を計測点での圧力と基準となる静圧の差で評価する [79]。すなわち、よどみ点で増加する動圧の部分 ( $\rho v^2 / 2$ ) を風圧と捉えている。

風力は風による力を示しているが、文脈によりその定義が異なる。耐風設計の観点では、風力は風が物体に及ぼす力である。風力発電においては風の運動エネルギーを指し、気象の用語ではビューフォート風力階級による風速の分類を指す。このように、単に風力と言った場合には定義が曖昧であるため、本論文では用いない。

### 風速の推定

気象の分野では、人が強風の風速を過大に見積もる傾向が報告されている。Miller らは、気象観測の観点から人の風速推定の傾向を検証するため、米国における 18 年間に人が報告

した風速データを実際の観測値と比較した [80]. 結果として, 一日の最大風速を一日の平均風速で割って算出される突風係数が, 実際の 1/3 程度過大に見積もられていたことが明らかになった. Agdas らは, 巨大な送風装置を用いて最大 26.8 m/s の風に対する風速の推定値を回答させ, 強風であるほど風速が過大評価されることを示した [81]. 一方で, 風速が 4.5 m/s や 8.9 m/s など比較的強くない風に対しては風速は正確に推定された. これらの研究では風速に関する事前情報なしに数値で風速を推定させているため, 認知バイアスや過去にハリケーンを体験したか [81] 等個人の経験が影響してしまうと考察されている.

Pluijms らは, 船員と一般人の風速・風向の知覚能力を検証するため, 風速をマグニチュード推定法で回答させた [42]. 結果は参加者ごとの平均値で正規化された. 分析により, 風速の推定値が Stevens のべき乗則 (刺激の強度  $x$  に対する知覚強度  $= cx^\alpha$ ) によく当てはまり, 指数  $\alpha$  は 1 より小さい, すなわち風速が高くなるにつれ知覚強度の変化が減少することが明らかになった. また, 前方からの風は後方からの風より速いと回答された. 風覚ディスプレイに関する複数の研究では, 長髪のユーザの髪が風を遮るため, 後方からの風を知覚しにくい [6, 21, 30, 31] ことが指摘されている.

### 風速の絶対閾

窪田らは顔または全身の風速の絶対閾を恒常法で測定し, 均一な整流で 0.6 m/s 程度, 噴流で 0.25 m/s 程度との結果を得た [82]. 橋本らは, 指先における風速の絶対閾は右手で平均 0.51 m/s, 左手で平均 0.60 m/s と報告した [29]. Hseigh らは, 身体部位を明示していないものの 97.5% のユーザが 0.41 m/s より強い風に気づいたとした [61]. 文献によって数値は若干異なるものの, 0.5 m/s 前後より強い風であれば多くのユーザが知覚可能と考えられる.

### 風速の弁別閾

窪田によると, 顔面における風速知覚の相対的な弁別閾 (Weber 比=弁別閾/刺激強度) は流速とともに減少し, 風速 1 m/s では 0.04 (0.04 m/s の差を知覚), 風速 3 m/s では 0.024 (0.07 m/s の差を知覚) などとなった [83]. 橋本らによれば, 指先の風速弁別閾 (丁度可知差異; JND) は風速 3.4 m/s から 4.5 m/s で 0.7 m/s 程度だった [29]. 竹ノ内らは, 扇風機の風速の変化が知覚されるまでの風速変化量を評価した [50]. 彼らは皮膚感覚により知覚される風の強度は風速ではなく風圧であると考え, 結果の数値を二乗して風圧に変換して分析した. 結果は風圧が大きいほど風圧の差を感じるまでの変化量が増加する, すなわち変化を感じにくくなるというもので, Weber の法則に従う可能性が示された. また, 温風に比べて涼風では風圧の変化が感じられにくかった. これは, 指先と風の温度差が小さい温風のほうが温覚による触覚の抑制が少ないためと考察されている.

弁別閾についても文献により数値の差があるが, 他の知覚量と同様に Weber の法則や

Stevens のべき乗則が適用できる点では一致している。

### 2.2.3 風向知覚

人は、風の方向を日々感じ取っている。特に、ヨットやサーフィン等のマリンスポーツ、凧揚げやパラグライダーなどの活動においては風向の感覚が重要である。

小木らの実験では、手に当たる風の風向の誤差は手を固定した場合  $19.28^\circ$ 、自由に回転できた場合  $13.03^\circ$  だった [2]。橋本らは右手示指で同様の実験を行い、固定時は平均約  $50^\circ$ 、回転可能時は平均約  $30^\circ$  だったとした [29]。この結果について橋本らは、指先の皮膚感覚は敏感であるが、気流を受ける表面積が小さいこと、風が回り込んでしまうことにより風向を特定しづらいためと考察した。

Pluijms らは、船員や一般人に 8 台のファンで風を提示し、低い風速では熟練した船員の方が風知覚において優れていることを示した [42]。実験は低速 (約  $1.5 \text{ m/s}$ )・中速 (約  $2.0 \text{ m/s}$ )・高速 (約  $2.5 \text{ m/s}$ ) の風提示下で行われ、参加者は画面上の針の方向をノブで回転させて風向を回答した。風の知覚に熟練していない人による風向誤差の平均は、それぞれの風速条件で  $11.08^\circ$ 、 $10.54^\circ$ 、 $6.27^\circ$  だった。

中野らは、風向提示に最適な風源の間隔を決定する目的で、恒常法を用いて頭部の風向に対する JND を測定した [44]。単発のファンから局所的な風 (風速  $1.3 \text{ m/s}$ ) を提示した場合の JND は、頭部前面で  $4.29^\circ$ 、側面で  $11.30^\circ$ 、背面で  $4.41^\circ$  だった。一方、図 2.1 のように  $3 \times 3$  のファン配列を用いて均一な風を提示した場合の JND は、頭部前面で  $7.85^\circ$ 、側面で  $11.24^\circ$ 、背面で  $6.78^\circ$  と大きくなった。このことから、風が均一であると風向を判断しにくくなることが明らかになった。

人が頭部で風向を弁別する手がかりとして、中野らは皮膚に当たる気流の位置を挙げた。例えば、頭部前面における風向知覚を調べた実験で、顔の両側に風が当たりやすい条件より片側のみに風が当たりやすい条件の方で JND が改善した [36]。実験参加者の中には、風速が大きい場合は風が流れる方向で、小さい場合は風が当たる位置で風向を判断したと述べたものもいた。また、中野らは局所的な風より均一な風のほうが風向を判断しにくい点について、顔全体に風が当たるため位置の判別が難しかったためと考察した [39]。

斉藤らは、多感覚刺激提示中の風向知覚特性を調べるため、HMD を装着して風を示す視聴覚の刺激を受けているユーザの風向に対する JND を測定した [45]。JND は、頭部前面で  $49^\circ$ 、側面で  $61^\circ$ 、背面で  $60^\circ$  だった。中野らの実験とは測定条件や心理物理学的測定法が異なるため単純な比較はできないものの、視聴覚刺激によって風向知覚の精度が低下する可能性が示唆された。

Pluijms ら、中野らの研究から、人の頭部における風向弁別閾は  $4^\circ$  から  $11^\circ$  程度であり、風速や提示する位置により変動することが分かる。また、均一な風や視聴覚刺激によって



図 2.1: 中野ら [44] が風向の JND 測定に用いた装置

風向の知覚が鈍化することが示唆されている。こうした風向知覚の不正確さを利用することで、クロスモーダル効果を用いた風向知覚変化が可能である [20–22]。

### 2.2.4 風温知覚

Stevens らによれば、温冷覚の弁別閾は年齢や身体部位等によって異なるが、18 歳から 28 歳の顔や手、腕では  $0.1^{\circ}\text{C}$  から  $0.3^{\circ}\text{C}$  程度だった [84]。また、冷覚の方が温覚よりも弁別閾が小さく、温度変化に対して鋭敏であった。空調によって恒温室の室温を上昇または下降させた実験では、温冷感の JND は皮膚温や温度変化率に応じて  $0.09^{\circ}\text{C}$  から  $0.90^{\circ}\text{C}$  の範囲で異なった [85]。

本節の冒頭で述べたように、風の温度が室温と同等であっても、強制対流熱伝達により冷覚が生じる。空気環境を考慮した温熱知覚の指標には体感温度がある。体感温度を求める式は複数存在するが、風速が大きいと体感温度は低下するとされている [86]。体感温度は室温や湿度の影響も受けるため、風による温度知覚を検証するには温熱環境の統制が必要である。

### 2.2.5 風の快適感

#### 温熱快適性

前項で述べたように、風速は温熱環境の快適性知覚に影響する要素の 1 つである。気温・湿度・着衣・活動量も考慮し、人の温熱快適性を評価する尺度として予測温冷感申告 (predicted mean vote; PMV) [87] が用いられている。算出した PMV が  $-0.5$  から  $0.5$  の

範囲であれば、不快になる人の割合が10%以内となり、快適な温熱環境とされる。気流のほとんどない空間では不快な暑さを感じる、逆に過度に強い風があると不快な寒さを感じるなど、風速は温熱快適性を左右する。

屋外空間に関しては、日照や突風などの屋外気候の要素をも考慮した温熱快適性の指標が提案されている [88, 89]。Walton らは、平均風速は温熱快適性を向上させるものの、最大風速は逆に低下させることを明らかにし、突風が風の快適性に負の影響を与える可能性を示唆した [89]。

### 触覚的快適性

風の体験における人の快適性には、温熱快適性だけでなく触知覚によるものも含まれる。例えば、戸外のそよ風は多くの人にとって快適に感じられるが、エアコンディショナや扇風機の風は不快に感じられる場合がある。このような、過度な局所的気流によって起きる不快感はドラフト感とよばれ、風速や乱流強度によって増加する [90]。

気流そのものが不快感を与える場合がある一方で、自然の風や、自然の風の特徴を再現した模擬自然風 (Simulated Natural Wind; SNW) に快適感を感じるという報告もある。Zhu らは、動的にゆらぐ風速の気流を体験した実験参加者によって「柔らかい」や「優しい」といった触覚的印象が言及されたことを述べた [91]。住谷ら、八木ら、Kim らも、模擬自然風に対する主観的な印象を検証し、ゆらぎのある風速や風向が快適な印象をもたらすことを発見した [92–94]。因子分析の結果によれば、心地よい風の印象は、快適感 [92, 93]・強弱感 [92, 93]・開放感 [93]・湿感 [92]・安定感 [92] といった因子に分けられる。

## 2.3 風覚ディスプレイ

### 2.3.1 風覚ディスプレイの研究動向

第1.1節で述べたとおり、ユーザに風覚刺激を提示する「風覚ディスプレイ」が提案されてきた。風覚ディスプレイの多くは、多感覚刺激の一種として風を使用し、情報の提示やVR体験の質の向上を目的としている。

最初期のVR技術の1つと言われる Heilig の Sensorama は、風・香り・振動といった多感覚刺激を立体映像に同期して提示する映画上映装置である [1] (図2.2)。多感覚刺激を活用して臨場感を増強する映画技術は今日では「4D映画」と呼ばれ、国内劇場で多く導入された4DX、MX4Dともに風や熱風の刺激を取り入れている [95]。

より近年では、CAVE Automatic Virtual Environment (CAVE) やHMDといった没入技術の発展に伴い、ユーザの周囲に送風機を設置して臨場感向上をねらった風覚ディスプレイ (本論文では設置型と呼ぶ) の研究が行われた [3, 4, 11, 27, 28, 33, 35, 38, 40, 41, 43, 47, 49]。



図 2.2: Sensorama [1] (筆者撮影)

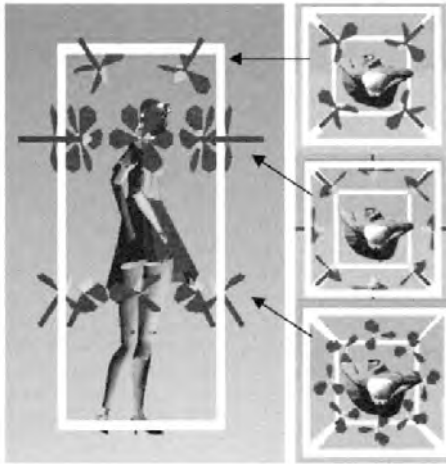
設置型風覚ディスプレイの例を図 2.3 に示す。例えば、Moon らは 20 台の DC ファンによりユーザの全身を取り囲み、風向や風速を再現する WindCube [3] を提案した。小坂は、全方位の風を記録・再生するシステム WindStage の一部として 41 個のファンをドーム状に配置する WindDisplay [33] を提案した。

HMD や腕等に風源を取り付ける装着型の風覚ディスプレイも存在する [5-7, 10, 14, 31, 34, 61, 66]。例を図 2.4 に示す。例を挙げれば、Rietzler らの VaiR [6]、Ranasinghe らの Ambiotherm [5]、Wilberz らの FaceHaptics [7] は、いずれもファンやノズル等の送風機構を HMD に取り付け、バーチャル環境の風向や風速を再現する。

装着型の風覚ディスプレイにはユーザが姿勢を変えたり移動したりしても提示に問題がなく、刺激タイミングの遅延や減衰も少ないメリットがある一方で、重量やサイズがユーザの負担になる、身体の一部にしか送風できないという課題がある。一方、設置型の風覚ディスプレイはユーザに装着の負荷をかけないが、ユーザの姿勢や移動に対処する必要があり、遅延や減衰の影響を受けやすい。Hseigh らは、ユーザの前方に設置したファンと手持ち式のファンを組み合わせることで双方の利点を享受するハイブリッド型の風フィードバックシステムを提案した [61]。

風の温度変化も、熱さや冷たさを表現するバーチャル環境の臨場感向上には重要な要素である。ペルチェ素子 [9, 63]、圧縮空気と Vortex Tube [52]、保冷剤 [54]、ヒータ [53, 63] などを用いて風を加熱または冷却する風覚ディスプレイが開発されている。

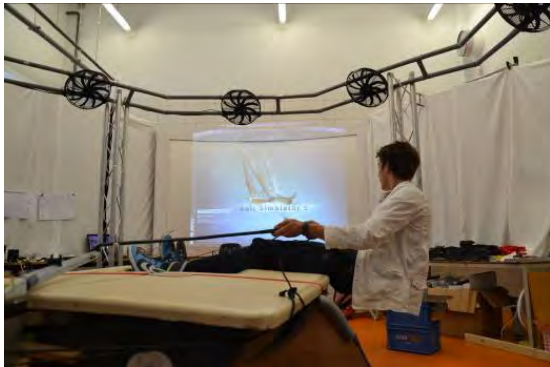
風覚ディスプレイを触覚刺激提示装置の一種として捉え、情報提示に利用する研究も行われている [2, 13, 30, 32, 58]。風向や風速といった風の要素を変化させることで、多感覚刺激によるデータ提示 [2] や遠隔コミュニケーション [32] に応用できる。皮膚に近接させた



(a) WindCube [3]



(b) WindStage [33]



(c) Sail Simulator [4]

(d) FiveStar VR [49]  
(筆者撮影)

図 2.3: 設置型風覚ディスプレイの研究例

ノズルを用い、皮膚に当たる気流の位置を制御して情報提示する提案もある [13, 58].

### 2.3.2 風覚ディスプレイの装置形態

#### 対象とする身体部位と配置

振動、圧力等の皮膚感覚刺激を行う装置には、手・腕・顔・上半身など様々な身体部位に対して刺激を与えるものがある。風覚ディスプレイが対象とする身体部位は、その装置の配置によって異なる。表 2.5は、表 2.1から表 2.4で挙げた研究の提示対象の部位についてまとめたものである（提示部位が不明な 1 件を除いた。顔や耳など頭部の一部であるものは頭部に含めた）。設置型・装着型共に、頭部を提示対象とした研究が多い。これは、頭部には通常風を遮る衣服がなく、皮膚感覚も比較的鋭い [96] ことから風提示に適した部位として選ばれやすいためと考えられる。一方、我々は普段頭部のほかに腕などでも風を知



(a) Head Mounted Wind [31]



(b) Ambiotherm [5]

(c) Haptiple [14]  
(筆者撮影)

(d) Facehaptics [7]

図 2.4: 装着型風覚ディスプレイの研究例

表 2.5: 風覚ディスプレイにおける装置の配置と提示対象である身体部位との関係

	頭部	頭部以外	上半身または全身
設置型	20	2	21
装着型	11	3	0

覚しているものの、こうした頭部以外への風覚刺激手法の提案例は相対的に少なく、研究分野におけるギャップの1つといえる。

上半身や全身など広範囲に送風する研究は、設置型では多数だったものの、装着型では皆無であった。これは、身体に近接して設置する装着型風覚ディスプレイから広範囲へ送風することが、装置の重量からも配置からも困難であるためと考えられる。しかるに、市販のHMDでは外部センサ不要のインサイドアウト型が主流となる、触覚ディスプレイにおいてもベスト型 [97] やグローブ型 [98] など装着可能なものが提案されるなど、装着可能なVRデバイスに対する要請は大きい。したがって、装着可能な風覚ディスプレイによる

より広範囲への風覚提示の実現は、今後取り組まれるべき課題の1つといえる。

風を提示する身体部位に関する別の課題は、デバイスや衣服で覆われている部位への風提示ができないことである。例えば、振動触覚では胴体への振動提示が可能だが [97]、衣服のある胴体を積極的に風提示の対象とした例は少ない。また、Noel らや Rietzler らは、HMD 装着中は HMD に覆われていない顔の下半分にしか送風できないことを指摘した [6, 27]。Tseng らや坂口らは、HMD 内部に送風口を内蔵し、HMD で覆われた部位に送風することを提案した [66, 67]。

### 送風装置と遅延

表 2.1 から表 2.4 で挙げた研究の中で風を発生させるために使用された装置は、ファン (47 件)、圧縮空気とバルブ (4 件)、空気ポンプ (2 件)、スピーカ (1 件) であった。ファンは冷却や換気のため日常的に使用されており、市販品が安価に入手できるため、風覚刺激提示にも採用されやすいと考えられる。一方で、ファンは始動や停止、風速変更に時間を要するため、インタラクティブな風提示においては遅延を生じやすいというデメリットも抱えている [11, 30–33, 40]。こうした遅延を補償するため、映像や音のタイミングをファンの遅延分だけ遅らせる [32, 33]、ファンをモータ駆動のパン・チルト台に載せ、送風が必要な際のみユーザに向ける [43] といった対策が行われている。

低遅延の送風手法として、圧縮空気等による空気圧を用いたものがある、Rietzler らは、空気圧を利用した風覚ディスプレイの利点として 2 ms 未満という低遅延で送風を開始できることを挙げた [6]。Tseng らも、瞬間移動時の風を再現する目的には低遅延が求められるため、圧縮空気を用いる、風源をなるべくユーザの頭部に近づけるといった工夫を行った [66]。ただ、圧縮空気を用いる場合はコンプレッサやタンクといった設備が必要になる、コンプレッサやノズルから騒音が発生するといった課題もある。

細井らは、振動や温度変化によって風刺激の要素を再現し、送風装置を用いない風感覚提示手法を提案した [65, 68]。この方式には、風覚ディスプレイの風源を削減できる、温風や冷風を生成するための大型の熱機構が不要となる、送風のためのスペースを要しないため小型であるといった利点がある。擬似的な風覚刺激は、冷風においては有意に実際の風と同等と評価された一方で、温風では実際の風に及ばなかった [68]。

### 風速の再現

風速の変化は、単にファンの回転数を増減するなどして実現できる。ただし、実現可能な最大の風速は研究によって 1 m/s から 74.3 m/s まで大きく異なる。強風を再現できる風覚ディスプレイは、強い風が想定される天候や移動、災害といった状況の臨場感をより高められると考えられる。しかし、全身に対して強風を提示するには、大型で強力な送風機が必要である。

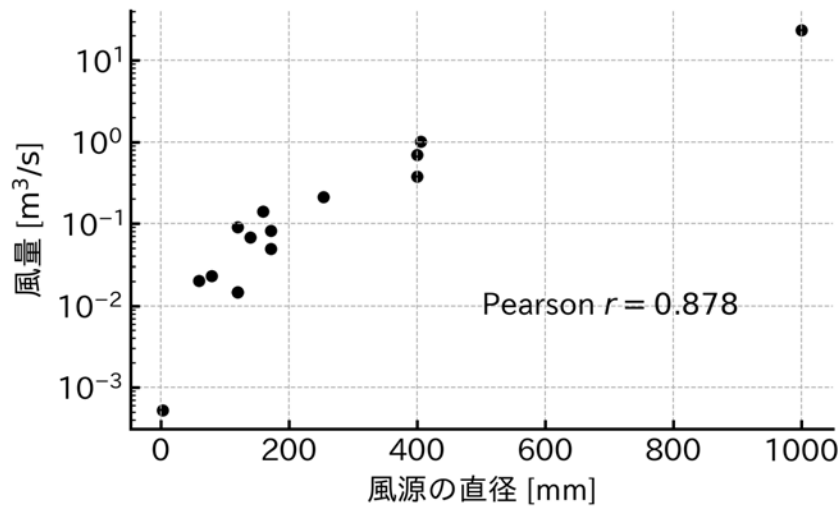


図 2.5: 関連研究において提示可能な最大風量と風源の直径の関係（風量のオーダーに差があるため，縦軸を対数目盛とした）

送風装置の規模と風速は単純な相関関係ではなく，風の吹出口の面積の影響も受ける．なぜなら，風速を  $v$ ，吹出口の面積を  $A$ ，風量を  $q$  とすると  $q = Av$  の関係にあり，同じ風量であっても吹出口が小さければ風速は大きくなる．強風を生成すること自体はドライヤーやエアガンなど局所的に送風する送風機を使用すれば容易に達成できるものの，広範囲に強風を送風するには出力の大きい送風機が必要である．

図 2.5は，送風可能な最大風速または風量と風源のサイズ（直径）の双方が判明している関連研究 15 件について，最大風量（最大風速から換算したものを含む）と風源の直径の関係を散布図にしたものである．風量と風源のサイズは相関関係（Pearson の相関係数  $r = 0.878$ ,  $p = 1.64 \times 10^{-5}$ ）にあることが分かる．加えて，既存研究のほとんどの風源直径は 100 mm から 200 mm（サーキュレータや PC 冷却用ファン等）および 400 mm（扇風機等）付近に分布している．これらの風源で出力可能な風量は  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ （直径 400 mm で約  $0.8 \text{ m/s}$ ）から  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ （直径 400 mm で約  $8 \text{ m/s}$ ）のオーダーであり，多くの風覚ディスプレイでは  $10 \text{ m/s}$  を超えるような強風の再現は難しいことが分かる．実際に強風を発生させることは装置サイズだけでなく騒音や危険性の問題もはらむため，強風の知覚の再現は風覚ディスプレイにおける課題と言える．

### 風向の再現

風向の揺れ動く自然風や，移動するヘリコプターから吹いてくる風など，表現によっては様々な風向を再現することが適当である．また，頭部に装着する形式の風覚ディスプレイでは，HMD による立体映像や立体音響と同様に，一定の向き of 風刺激を表現するには

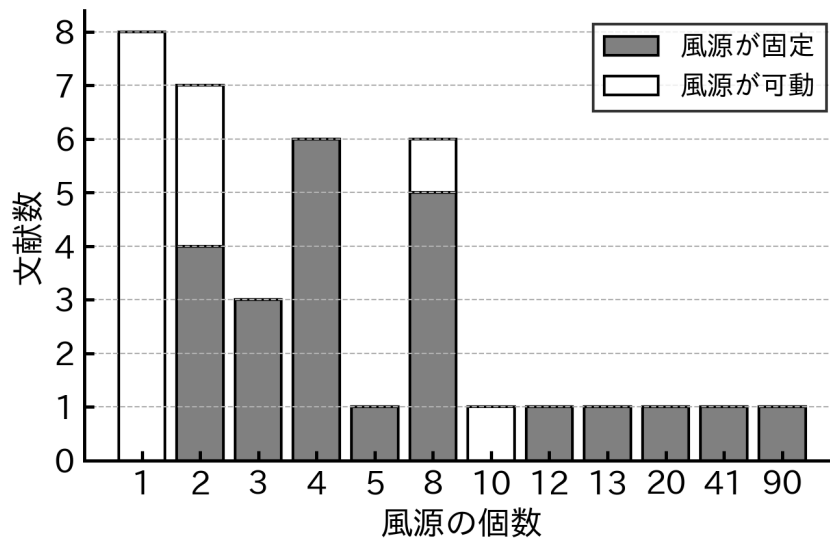


図 2.6: 風向を可変とした関連研究において用いられた風源の個数

頭部の向きに応じて風向を変化させる必要がある。

風向の変化を実現するためのもっとも単純な方法は、風源を多数並べ、それらの風速を個別に制御することである。図 2.6は、関連研究の中で風向が可変であるものの風源の数、風源が固定であったか可動であったかを集計したものである。複数の風源によって風向を再現した例が多数あることが分かる。中には 41 個 [33] や 90 個 [11] と大量の風源を備えたものもある。こうした多数の風源を用いる手法では、装置のサイズや重量が大きくなるを得ず、製造コストの増加や設置空間の圧迫、装着型の場合ユーザの負担となる等の課題がある [21, 37, 68]。

風源の配置間隔は、例えば円周上に 4 個の風源を均等に配すれば 90 度間隔、8 個であれば 45 度間隔である。しかし、風源の間隔が表現できる風向の細かさと一致するわけではない。取り付け方向の異なる複数の風源からの風を混合し、中間の風向をも再現する方法が用いられているためである [2, 3, 31, 35, 37, 41]。特に、Kulkarni ら [35, 41] や 広田ら [37] は、実際の風向測定、モデル化、数値流体力学などを用いて風源同士の間風向を精緻に再現する手法を構築した。ただし、気流の流れは装置の寸法、配置、ユーザの位置によってそれぞれ異なるため、風覚ディスプレイの装置ごとに細かな調整が必要となる。

前述した装置の大きさ・重量の課題に対処するため、アクチュエータ等により風源を可動とすることで風向の変化を実現する手法もある。図 2.6からは、風源の個数が 1 から 2 である場合には特に風源を可動とした研究事例が多いことが分かる。例えば、Ambiotherm [5] や VaiR [6] では、サーボモータにより風源を搭載した枠を回転させることで風向の変化が再現された。Wilberz らの FaceHaptics [7] は、HMD に搭載した 4 自由度のロボットアーム

ムのエンドエフェクタとして風源を配置することで、 $\pm 65^\circ$  の範囲で頭部に対する風向を変更できる。しかし、アクチュエータを搭載することで当然装置の複雑さや重量は増加し、VaiR は 766 g、FaceHaptics は 1059 g (バランスをとるためのウェイトを含む) などとなっている。

### 風温の再現

雪山で吹く冷たい風、爆発の熱風といったように、室温とは異なる温度の風を体験したくなる状況もある。風温の変化を実現するため、空気を加熱 [12, 50, 53, 63] または冷却 [52, 54, 63] 可能な風覚ディスプレイが提案されている。加熱の場合はペルチェ素子やヒータが、冷却の場合は圧縮空気と Vortex Tube (圧縮空気を高温の気流・低温の気流に分離する装置)、ミストの気化、保冷剤などが使用された。

こうした空気そのものの加熱や冷却は、ドライヤーや冷房など日用品でも行われており技術的困難さは少ないものの、流れる気流の温度を変え続けるには多くのエネルギーが必要である。例えば、風速  $v = 1 \text{ m/s}$ 、風量  $q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、温度  $t = 25^\circ\text{C}$  の気流を  $1^\circ\text{C}$  加熱し続ける際に必要な仕事率  $P [\text{W}]$  は、空気の比熱  $c$  を  $1.01 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kgK})$ 、密度  $\rho$  ( $25^\circ\text{C}$ ) を  $1.184 \text{ kg}/\text{m}^3$  とすると (2.1) 式のように求められる。

$$P = qcpt \simeq 120 [\text{W}] \quad (2.1)$$

実際には、ヒータ等の熱効率に応じてさらに多くのエネルギーが必要である。 $2^\circ\text{C}$  から  $3^\circ\text{C}$  ほど風温を上下させるだけでも、一般的な家庭用電子レンジに匹敵するエネルギーを消費することになる。

一方で、風覚ディスプレイの関連研究の中には空気ではなく皮膚を加熱・冷却したものもある。赤外線ランプやヒータを用いて輻射熱を提示すれば、バーチャル環境の熱さを表現できる [7, 40, 53, 55, 57]。保冷剤との輻射を用いて皮膚を冷却する手法も提案されている [99] もの、体表面との温度差が確保し難い、低温部の面積を大きくとる必要があるなど、加熱と比較して実現には課題が多い。非接触で冷刺激を与える別の手法としては、気流によってミストを皮膚まで輸送し、ミストが気化する際の潜熱を利用するものもある [72]。ただし、これらの研究の多くは温冷風ではなく温冷感の知覚を目的としたものである。

装着型の風覚ディスプレイでは、ペルチェ素子を皮膚に接触させて温冷感の提示を行うものが主流である [5, 10, 14, 65, 68]。ペルチェ素子を皮膚に接触させる機器は、猛暑対策のための冷却グッズとしても人気が高まっており、サンコーの「ネッククーラー Neo [100]」や SONY の「REON POCKET 4 [101]」などが市販されている。ネッククーラー Neo の公称消費電力は  $5 \text{ W}$  であり [100]、数百  $\text{W}$  の熱量が必要な空気の加熱・冷却に対してエネルギー消費は低く抑えられる。

皮膚の温度変化によって、風温知覚が変化する現象も報告されている。伊藤らは、ヒータと送風機を用いて熱と風を提示したところ4名中3名から4名の参加者が温風を知覚したとし、皮膚の加熱と風の組み合わせにより温風知覚が生起することを示唆した [55]。伴野らは、秋や冬の季節の映像と実際の送風によって、体感温度が平均1°C低下し清涼感が感じられることを報告した [47]。こうした風温知覚変化の手法を探求することで、風温を実際に変化させる場合の装置の大型化やエネルギー消費の問題に対処できると考えられる。

### 2.3.3 実際の送風を用いる風覚ディスプレイにおける課題の整理

本項で述べてきた、実際の送風による風覚ディスプレイの課題を整理する。

- 風向を再現するため多数の風源またはアクチュエータを用いると、装置が大型・複雑化
- 広範囲に強風を送風すると、装置が大型化・エネルギー消費大・騒音や危険性を伴う
- 風温を再現するため気流を加熱または冷却すると、装置が大型化・エネルギー消費大
- 装着型の風覚ディスプレイでは、身体の広範囲に送風することが難しい
- 衣服やデバイスに風が遮られる部位には、送風することが難しい

こうした課題は、いずれも気流のパラメタを実際に再現するために大型で複雑な装置が必要であったり、そもそも再現が難しかったりという共通した特徴を持つ。こうした課題に対して、筆者は気流のパラメタを実際には変化させず、気流の知覚を変化させて対処することを提案する。例えば、風向・風速・風温の知覚変化を生起させれば、それらパラメタを実際に再現するための機構が削減できる。風向や風の範囲の知覚が変化すれば、送風可能な部位や範囲の制限も緩和されると期待できる。

## 2.4 クロスモーダル効果による知覚変化

### 2.4.1 クロスモーダル効果

本研究では、人の風知覚が変化するメカニズムとしてクロスモーダル効果に着目する。クロスモーダル効果（感覚間相互作用）は、複数の感覚モダリティから得られた感覚情報が脳内で統合され、相互に影響を与えることをいう [15]。よく知られるクロスモーダル効果の例として、視覚情報に一致するように音源位置の知覚が書き換わる腹話術効果（ventriloquism effect） [102] や、視覚情報によって音韻の知覚が書き換わるマガーク効果（McGurk effect） [103] が挙げられる。

風覚を構成する触知覚においても、身体運動時に視覚情報を変調すると擬似的な触力覚が生じる pseudo-haptics [16] や、バーチャルハンドの変形により形状や重量の知覚が変化

する現象 [104] が知られている。また、聴覚刺激によって皮膚の質感知覚が変化する聴触覚間クロスモーダル効果 [17] も明らかになっている。

クロスモーダル効果を応用することで、視聴覚刺激に比べて提示が難しい触覚・嗅覚・味覚等のインタフェースを簡易な装置で実現する手法が提案されている。例えば南部らは、匂い提示と同時に匂いを想起させる画像を見せ、知覚される匂いを操作する手法を提案した [18]。鳴海らは、クッキーを食べる際に視覚と嗅覚の刺激を重畳することで、知覚される味を操作するシステム Meta Cookie [19] を構築した。

### 2.4.2 クロスモーダル効果の生起メカニズムのモデル化

クロスモーダル効果を引き起こす脳のふるまいを説明するためのモデルが提案されている。こうしたモデル化によって、どのような刺激が知覚を変化させるか推定できるため、本研究の仮説立案や感覚刺激の設計方針にも重要な知見である。

#### 最尤推定とベイズ推定

Ernst らは、視触覚間クロスモーダル効果において、視覚刺激にノイズを加えて分散を大きくすると、視覚優位から触覚優位に知覚が変化することを発見した [105]。この結果から、Ernst らは多感覚統合を最尤推定としてモデル化し、分散が小さく信頼性が高い感覚モダリティが優位に統合されるという原則を提案した。

人の知覚は現在の感覚刺激と過去の経験の両方に影響されるという考えから、ベイズ推定を用いたモデリングも提案されている。ベイズ推定モデルでは、視聴覚の感覚信号  $A, V$  がそれぞれの原因  $Z_A, Z_V$  に起因する事後確率  $P(Z_A, Z_V | A, V)$  を、尤度  $P(A | Z_A), P(V | Z_V)$ 、以前の知識・経験により得られた事前確率  $P(Z_A, Z_V)$  から (2.2) 式のように算出する [106]。得られた事後確率  $P(Z_A, Z_V | A, V)$  は、推定結果として脳が生成する知覚を表す。ベイズ推定モデルには、事前確率を考慮するため統合の効果が弱い場合と強い場合の双方を説明できる、感覚情報の独立性を仮定する必要がないといった利点がある。

$$P(Z_A, Z_V | A, V) = \frac{P(A | Z_A) P(V | Z_V) P(Z_A, Z_V)}{P(A, V)} \quad (2.2)$$

Wozny らは、視覚・聴覚・触覚の3モダリティ間の flash illusion を測定し、実験結果をベイズ推定モデルにより約 88.8% 説明できるとした [107]。Wozny らの結果からは、3モダリティ間のクロスモーダル効果は2モダリティ間のそれより強いことも示唆された。

### ベイズ推定モデルの拡張

Körding らは、複数の感覚信号が共通の原因を持っているかどうかを表す変数  $C$  を導入した因果的ベイズ推定モデルを提案した [108]。このモデルは2段階になっており、まず感覚信号の原因が共通である ( $C = 1$ ) かそれぞれ独立である ( $C = 2$ ) かをベイズ推定し、次に共通または独立した原因を想定してベイズ推定を行う。Körding らは、因果的ベイズ推定モデルにより、視聴覚間の腹話術効果実験で互いの位置が離れるほど錯覚が弱まる結果を97%とよく説明できることを示した。これにより、複数の感覚刺激の差が大きい場合にはクロスモーダル効果が発生しないという現象が、知覚メカニズムの観点から裏付けられた。

通常のベイズ推定モデルにおいては事後確率は事前確率の分布と尤度関数の間に位置することとなるが、このモデルに当てはまらない知覚現象も存在する。一例として、同じ重さの物体を持ち上げた際に大きいほうが軽く感じる「大きさ重さ錯覚（シャルパンティエ効果）」が挙げられる。ベイズ推定に従えば、重さ知覚は事前確率（大きい物体は重いという経験）と感覚刺激から得られた尤度分布の間となる、すなわち大きい物体は実際の重さより重く感じられると考えられる。しかし、実際には知覚は事前確率から離れ、大きい物体が軽く感じられる。このように、予測と実際の感覚刺激の差が過大評価される現象を対比（contrast）といい、反対に過小評価される現象を同化（assimilation）と呼ぶ [109]。

Brayanov らは、こうした一見ベイズ推定に反する知覚をアンチベイズ統合と呼び、予想外の刺激が入力された際には予想と刺激の差を誇張するような知覚メカニズムの存在を示唆した [110]。Wei らは、効率的符号化（efficient coding）の理論とベイズ推定を統合することで、アンチベイズ統合のように思われる現象もベイズモデルによって説明できることを明らかにした [111]。効率的符号化とは脳内の感覚表象が感覚刺激との相互情報量を最大化するようにコーディングされているという仮説である。効率的符号化に基づいて計算された尤度関数は非対称な形状になり、条件によってはベイズ推定に基づいて得られた事後確率の平均が事前確率から遠ざかることになる。

柳澤は、事前の予測と尤度関数のピークとの差で表される予測誤差に着目し、Wei らのモデルにおいて予測誤差が小さい場合は同化、大きい場合は対比が起きるという結果を得た [109]。また、大きさ重さ錯覚において、大きさの差（予測誤差）が小さい場合は通常の大さき重さ錯覚とは逆に同化が生じること、差が増大するにつれて同化から対比に推移することを実証した [112]。これらの結果から、効率的符号化を考慮したベイズ推定モデルを用いれば、一見反対の結果のように見えるクロスモーダル効果を統一的に説明可能である。

### 自由エネルギー原理

Friston は、生物の知覚・行動・学習といった機能を統一的に説明するモデルとして自由エネルギー原理を提唱している [113]。自由エネルギー原理では、脳は外界の事象に関して推論を行っており、その際の情報論的自由エネルギーを最小化しなければならないとしている。具体的には、自由エネルギー  $F$  は脳内で生成される認識  $q(\theta)$  と事後確率  $p(\theta|s)$  ( $\theta$  は外界にある原因,  $s$  は感覚信号) などを用いて (2.3) 式のような式で表せる [113]。

$$F = D_{KL}(q(\theta)||p(\theta|s)) - \ln p(s) \quad (2.3)$$

(2.3) 式の第 1 項は認識と事後確率の誤差 (Kullback-Leibler ダイバージェンス) を表しており、変分ベイズ推定によって最適化問題を解くことで自由エネルギーの最小化が行われる。このふるまいは我々の認識をなるべくベイズ推定モデルの事後確率に近づけることと解釈でき、したがって知覚の観点では自由エネルギー原理はベイズ推定モデルを内包するものと言える。自由エネルギー原理に則れば、行動によって感覚刺激そのものを変化させる能動的推論 (active inference) など、より広範な脳機能を説明できる [113]。

### 2.4.3 クロスモーダル効果による風知覚変化

第 2.3.3 項にて述べたような風覚ディスプレイの装置の課題を解決するため、本研究ではクロスモーダル効果による風知覚の変化を用いることを提案する。

#### 風向知覚変化

伊藤らは、風が流れる様子を示す VR 映像を HMD に表示して風向の錯覚を起こし、4 台の送風機により全周からの風を知覚させる手法を提案した [20] (図 2.7 (a))。4 台の送風機を用いた実験で、実験参加者 11 名中 9 名が風向に関する違和感を報告しなかった。著者らは、簡易な装置による多様な風向提示を目的として、視聴触覚間のクロスモーダル効果による風向知覚変化を提案した [21, 22, 114] (図 2.7 (b))。聴覚刺激としては、実際の風の音を録音した立体音像を用いることで風向知覚変化を実現した [21]。視覚刺激としては、風に飛ばされる物体を模した粒子の VR 映像を HMD に表示し、その方向を変化させた。風向を示唆する視覚・聴覚両方の刺激を提示すると知覚変化の効果が高まり、2 台のファンによって全周囲の風向が知覚されることが明らかになった [22]。武田らは、触覚の仮現運動を利用して、3 台の空気砲から顔の 3 点に連続する気流刺激を与えることで、吹き抜ける風を感じさせる手法を提案した [59]。この手法も錯覚を利用した風向知覚の変化と言えるものの、仮現運動を利用するため車が通り過ぎるなど風向が急激に変化する状況の表

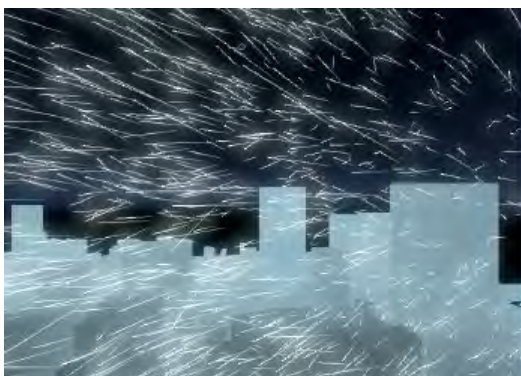
現に特化している。

### 風速知覚変化

西牧らは、風速に関する情報を得られるような VR 映像を用いて風速知覚の変化を検証した [23] (図 2.8 (a))。ユーザから離れた旗のゆらぎの強さが変化する映像、ユーザを取り巻くように舞う落葉の速さが変化する映像の双方で、映像内の風の強さに依存して知覚される風速が変化した。また、実際の風が弱いほど視覚情報の影響が強まることも明らかになった。一方で、視覚刺激とともに風を提示すると知覚強度が弱まる傾向が見られており、基準の風速を超える風速知覚、すなわち実際より強風に感じられる効果はみられなかった。

西牧らの 2 番目の実験では、風速知覚の変化は実際の風向と映像内の風向が一致していなくとも生起することも示された [23]。この原因について、風速知覚に加えて風向知覚についても視覚刺激と風覚刺激が多感覚統合された、すなわち風向知覚変化も誘発されていた可能性が指摘されている。こうした結果は、風向知覚と風速知覚という異種の風知覚のクロスモーダル効果による変化が両立する可能性を示すものといえる。

強風による触覚刺激を再現することで、強風の演出を行う手法が提案されている。清水らの FiveStar VR では、滝の激しい風雨をポンチョの振動として表現した [49]。伊藤らの VR 消防体験-炎舞-では、火災現場の激しい熱風を再現するために、紐による衣服の振動が用いられた [115] (図 2.8 (b))。大石らは、同様に衣服を紐により前後に引っ張ることで自己運動感覚を生起させる HapPull を提案した [116]。これらの手法は衣服を介した触覚刺激により移動や風を表現する点で共通しているが、いずれもクロスモーダル効果による風速知覚の変化を検証してはいない。



(a) 視覚刺激を用いたもの [20]



(b) 視聴覚刺激を用いたもの [22, 114]

図 2.7: クロスモーダル効果による風向知覚変化の研究例

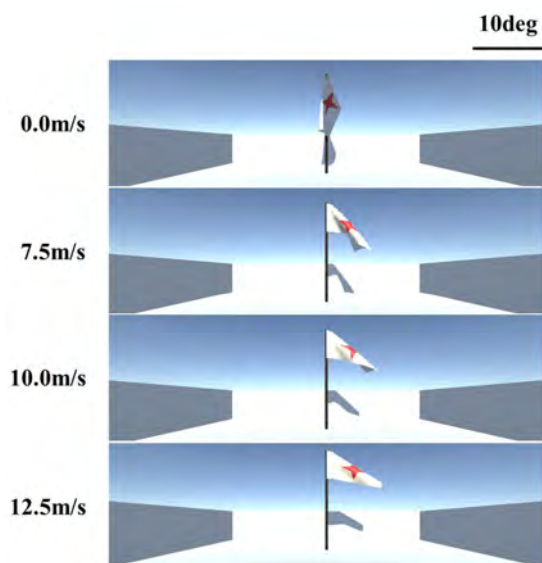
### 風温知覚変化

クロスモーダル効果を用いた風の温度の知覚変化に関する研究は、筆者の知る限り行われていない。ただし、複数のモダリティの刺激を用いて温冷感を操作する手法では、実際の風や風の視覚効果を用いた例がある。Xu らは、低温の気流と LED による輻射熱を同時に皮膚に提示することで、温冷知覚の伴った触覚刺激を行う HeatMagic を提案した [117]。伊藤らは、ヒータと送風機を用いて熱と風を提示しすることで温風が知覚される可能性を報告した [55]。

丸田らは、仮想物体から煙や光線などが出てくるような VR 映像を作成し、物体の色を変えると触覚刺激を全く提示せずとも擬似的な温度知覚が生じることを示した [118]。擬似的な温度知覚の生起には仮想物体の現実感や動きの存在が重要だった。このような、視覚刺激による温冷感の変化が実際の風温の知覚においても起きるかどうかは明らかになっていない。

### 擬似的な風知覚

実際の風を用いずに風を知覚させる手法も提案され始めている。Pusch らが考案した Hand-Displacement-Based Pseudo-haptics (HEMP) は、視覚的な手の位置を変化させることによって流れに押されるような力覚刺激を擬似的に知覚させる手法である [119]。Pseudo-haptics (擬似触力覚) とは、視覚刺激を操作することによってユーザが触覚刺激を



(a) 旗の映像を用いた風速知覚変化 [23]



(b) 衣服の振動を用いた強風の表現 [115]

図 2.8: クロスモーダル効果による風速知覚変化や触覚刺激による強風表現の研究例

錯覚する現象であり、HEMPはその一種といえる。Puschらは、バーチャルな力場によって手が流されるような映像を表示し、実験参加者にはその動きに逆らって手の位置を保つように指示して実験を行った。結果として、参加者はバーチャルな力場の力を識別でき、強い流れのような力を感じたと報告した。参加者の一部は、感覚の説明として水流や気流に言及した。ただし、HEMPの実験は特定の流体现象を想起させることではなく、力覚を知覚させることを目的としていた。そのため、実際の風とHEMPを組み合わせた場合でも力覚が知覚されると期待できるものの、それによって風速や風向等の知覚が変化するかどうかは自明ではない。

細井らは、ペルチェ素子と振動アクチュエータによって風による温度変化と振動を再現する擬似風覚を提案し、視聴覚刺激とのクロスモーダル効果によって温冷風の風感覚が生起することを明らかにした [65, 68]。この手法は、小型の装置を耳や腕など身体に装着するだけで温風や冷風の知覚を生起させられるため、風提示に必要な大型の装置やスペースが不要である利点がある。

以上のように、視聴触覚刺激によって擬似的な風知覚が生起するものの、現状では温風や冷風の存在を知覚するかどうかという点に焦点が当たっており、擬似風覚によって多様な風向や風速が知覚されるかどうかは明らかになっていない。一方で、実際の風を送風する場合には風向・風速・風温といった要素を制御可能であり、そうした送風のための装置をクロスモーダル効果で代替する手法の検討を本研究の主眼とする。加えて、実風の知覚におけるクロスモーダル効果を検証すれば、得られた知見を擬似風覚と組み合わせることで多様な風の知覚を擬似的に生起させるといった応用も考えうる。

## 2.5 本研究の位置付けと展望

第2.3節で述べたように様々な風覚ディスプレイが提案されているものの、多くは物理的な送風に依存している。物理的な送風で発生する装置の大型化・複雑化や風源の配置といった問題に対して、人の知覚を書き換えることで対処することを提案する。

風向については、視覚・聴覚・触覚刺激のクロスモーダル効果を用いた風向知覚変化 [20–22] が提案されてきた。風向知覚の変化を利用することで、風向の再現に多数の風源を必要としなくなり、少数の風源によって全周囲の風向を再現できる (図 2.9)。

風速については、広範囲への強風の送風には大型で強力な風源が必要であるという問題を解決するため、振動触覚刺激や視覚刺激によって風速を実際より強く錯覚させる手法を提案する (図 2.10)。また、衣服自体の振動を利用して風の範囲の知覚を拡大させることで、装着型の風覚ディスプレイでは全身への送風ができない問題や、衣服等に風が遮られる問題の解決も試みる。

風温については、視覚刺激の色による温度知覚の変化 [118] が、固体ではない風につい

でも生起するかどうかを実験的に検証する。これにより、気流の加熱や冷却に大型の装置や多量のエネルギーが必要となる問題に対処する（図 2.11）。

風刺激が深く関わっている快適感については、視聴覚刺激が風の印象に影響を与えるかどうかを検証した（図 2.12）。快適な自然の風を再現したリラックスシステムが提案されており、多感覚刺激がその効果に与える影響を解明できれば、こうしたシステムにおける視覚刺激や聴覚刺激の設計指針についての情報が得られる。

このように、本研究は簡易な装置と多感覚刺激を組み合わせることで多様な風向・風速・風温を提示する風覚ディスプレイの実現手法を提案し、VR における風覚提示技術の普及に寄与する。また、風の快適感の知覚変化は、VR のみならず風を用いたリラックスシステムや空調の不快感低減など、人への送風を伴う技術にも応用できると期待される。

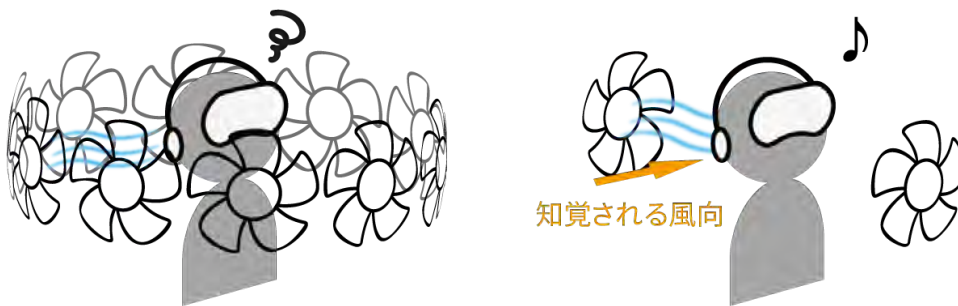


図 2.9: 風向知覚変化のメリット. (左) 物理的な風のみで風向を再現する風覚ディスプレイ (右) 風向知覚変化を活用した風覚ディスプレイ

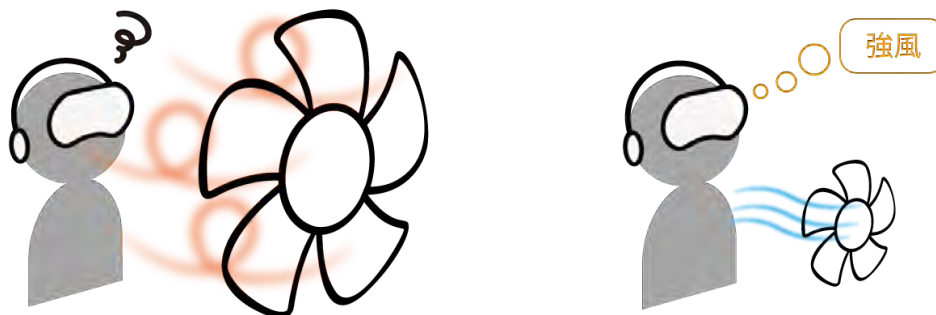


図 2.10: 風速知覚変化のメリット. (左) 物理的な風のみで強風を再現する風覚ディスプレイ (右) 風速知覚変化を活用した風覚ディスプレイ



図 2.11: 風温知覚変化のメリット. (左) 物理的な風のみで風温を再現する風覚ディスプレイ (右) 風温知覚変化を活用した風覚ディスプレイ

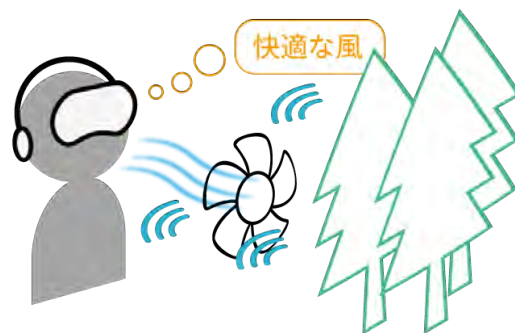


図 2.12: 視聴覚刺激による風の印象変化のイメージ

## 第3章

# 風的作用を想起させる多感覚刺激によるクロスモーダルな風知覚変化

### 3.1 本研究で対象とする風知覚の要素

本章では、本研究で提案するクロスモーダル効果による風知覚変化のために用いるアプローチについて述べ、取りうる手法を整理する。第2章でも述べたとおり、本研究では風知覚の要素として風向・風速・風温を、また風に関連する複合的な知覚として風の快適感を対象とする。

第2章で取り上げた風覚ディスプレイ等の研究の多くは風向、風速、風温のうちのいずれかまたは複数を可変としている。風を物理的に再現する風覚ディスプレイにおいては、第2.3.3項のように装置の大型・複雑化や送風の難しさなどの課題が存在する。風向、風速、風温の知覚変化の手法を活用することでこれらの課題を解決し、簡易な装置であっても多様な風覚提示を可能とすることを目指す。

風の快適感には、第2.2.5項で整理したように、温熱知覚や触知覚が関わっている。加えて、VR技術や多感覚刺激を用いたリラクゼーションやストレス軽減手法の研究が進められており[120]、快適感とは視聴覚刺激なども統合された複合的な知覚によって形作られるものと考えられる。これまでに、食物の見た目への介入により満腹感や食行動を変化させる拡張満腹感[24]や、身体反応を模擬することによって感情を変化させる感情喚起インタフェース[25]など、クロスモーダル効果によって複合的な知覚の変化も実現可能であることが示されてきた。したがって、我々の風体験に密接な関わりのある風の快適感においても、クロスモーダル効果がどのように影響を与えるのか検証する。

## 3.2 風に関連する多感覚刺激の特殊性

クロスモーダル効果を活用したインタフェースの研究において、主題となる物体の見た目 [18, 19, 104] や音 [17], 香り [19] を変化させることが幅広く行われてきた。ただし、これらの直接的な感覚情報の変更を風刺激に単純に適用することは難しい。なぜなら、風は通常目に見えず、整流であれば音が聞こえることもないため、一定の外見や音と対応していないためである。そのため、他のクロスモーダル効果の応用事例のように、風から直接得られる刺激を変化させようとすると、取りうる手法が主には皮膚感覚に関するものに制限されてしまう。

ただし、第 2.2.1 項で指摘したとおり、実際には視聴覚刺激によっても風の存在や状態を知覚できる。その感覚刺激とは、風によって揺れるあるいは飛ばされる物を目にする、風が物に衝突して出す空力音を聴くなど、風と関わる現象に起因するものである。こうした、いわば間接的に風の情報を得られる感覚刺激をも活用することで、多感覚刺激を用いた風知覚のクロスモーダル効果が実現しうる。

## 3.3 風知覚におけるクロスモーダル効果を誘発する刺激の設計方針

本節では、風知覚をクロスモーダル効果によって変化させるための感覚刺激の特徴に関する仮説を立案する。

風から直接受容する刺激以外に、風の発生や作用を間接的に想起させる刺激によっても、風知覚のクロスモーダル効果が発生するという仮説を立てた。このような刺激の例としては、風向知覚変化の研究で用いられた風向を示唆する粒子の映像 [20, 22, 114] や立体的な風音 [21, 22, 114] が挙げられる。粒子の映像や風音は、風が生じたり、物体に対して作用したりするさまを表す刺激と解釈できる。このような、間接的に風を想起させるための刺激について分類を提案し、さらに感覚モダリティ別に検討する。

### 3.3.1 風を想起させる刺激の分類

風の発生や作用を間接的に想起させる刺激を、図 3.1 のように大きく 3 つのグループに分類する。

1 つには、風の発生を表すものがある。人工的な風は、うちわや扇風機などの風源から発生している。自然風であっても、炎から熱風が生じたり、岩の隙間から風が吹いてきたりと、状況によっては風の発生源が視覚等で感じ取れる場合もある。扇風機を例にとると、扇風

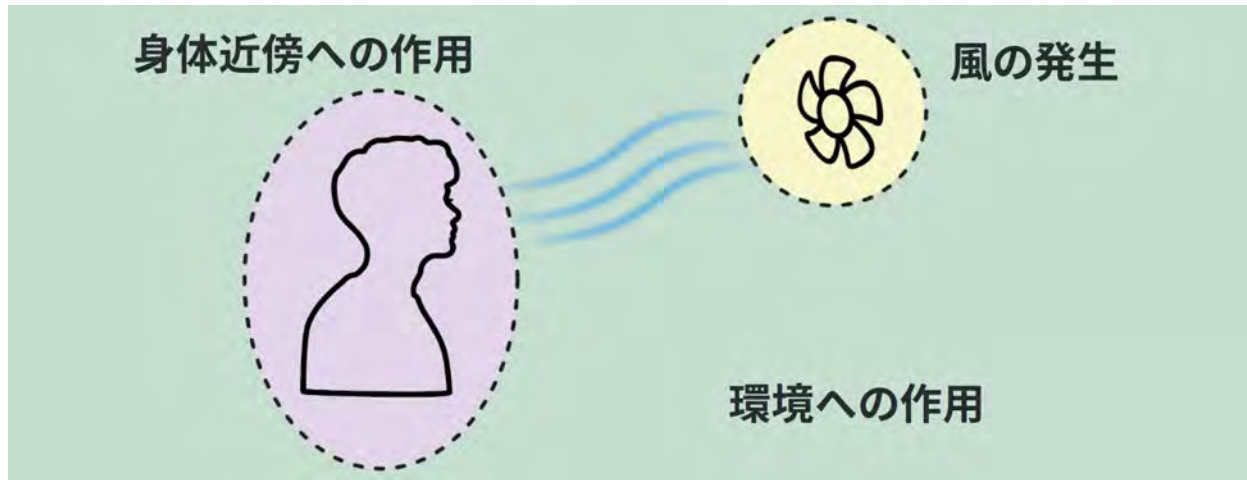


図 3.1: 風知覚におけるクロスモーダル効果を誘発する刺激の 3 分類

機が大きな音を立てて高速で回転しているのを目にすれば、たとえその風が直接当たっていなくとも強い風が吹いていることを了解できる。このように、風の発生に関する情報によって風の状態を表せる。

2つ目は、環境に対する風の作用を表すものである。例えば、台風中継などのニュース映像で、木々が風に煽られている映像や激しい風の音によって強風を視覚的・聴覚的に伝えるということはたびたび行われる。絵画や写真、映画などの表現としても、木・草・雪・雲などの動きを表現して、風の強さや風向などの特性を伝える技法がある [62]。

3つ目は、身体近傍に対する風の作用を表すものである。風が自分の身体に当たると、髪や衣服が揺れ動いたり、押さえつけられたりといった現象が起こる。この物理現象自体は環境に対する風の作用と共通するものの、身体に近い範囲は身体近傍空間 (peripersonal space; PPS) として区別され、多感覚統合の促進などの現象が確認されている [121] ため、本研究でも区別して取り扱う。なお、衣服は身体そのものではないものの、身体と密接に結びついており、VR ソフトウェアの実装としてもアバタに含まれる場合が多いことから、本研究では「身体近傍」としてまとめて議論する。

### 3.3.2 感覚モダリティ別の検討

■視覚 風の発生を表す視覚刺激としては、回転している扇風機やうちわで扇ぐ様子などが挙げられる。風源の位置によって風向を、大きさや羽根の回転速度などによって風速を、色や質感 (炎、氷など) によって風温を表現できる。環境に対する風の作用を表す視覚刺激としては、前項で述べたように、木・草・雪・雲が風で揺れる、あるいは飛ばされる様子が挙げられる。流れる粒子の映像 [20, 22, 114] によって風向知覚の変化が生じたように、必ずしも現実的な物体の見た目でなくとも使用可能である。身体近傍に対する風の作用を

表す視覚刺激としては、髪や衣服が風に反応する様子が考えられる。

■**聴覚** 風の発生を表す聴覚刺激としては、例えば送風機の動作音を利用できる。環境に対する風の作用を表す聴覚刺激としては、気流そのものや気流と物体の相互作用によって発せられる空力音や、草木などの物体が動いて生じる音が挙げられる。例として、風が電線など柱状の物体に衝突して発生するカルマン渦に起因する「ヒュー」という音はエオルス音 (aeolian tone) [122] と呼ばれる。身体近傍に対する風の作用を表す聴覚刺激としては、風が耳などに当たって出す風切り音 (風雑音 [123]) がある。

■**皮膚感覚** 皮膚に当たる風は、皮膚感覚として直接知覚できる。ただし、もし全身にコート等を着用して皮膚を覆ったとしても、衣服が風圧で押される、強風で振動するなどして、身体近傍に対する風の作用が間接的に知覚される。

■**嗅覚, 味覚** 嗅覚や味覚の刺激については、香りや味に関わる物質が風に含まれていれば感じられる。ただ、状況が限定的であり、幅広い気流には適用できないと見込まれることから本研究では取り上げていない。

■**前庭感覚** 台風のように風が強ければ、皮膚感覚に加えて身体が押される感覚によって身体近傍に対する風の作用を知覚することはありうる。鈴木らは、前庭電気刺激 (galvanic vestibular stimulation; GVS) によって押された感覚を作り出し、非接触の触覚刺激の体験を強化することを提案した [124]。こうした手法によって風速や風向などを示唆する刺激を作り出せる可能性はあるが、身体が押されるほどの強風が吹く状況に限定されると考えられることから、本研究の範囲では取り扱わない。

### 3.3.3 本研究および先行研究で用いた感覚刺激の整理

本研究や先行研究で提案されている、風向、風速、風温、風の快適感それぞれの知覚を変化させる多感覚刺激と、本節で提案した刺激の設計方針との対応を表 3.1 に示す。表にあるように、風の発生や、環境に対する風の作用、身体近傍に対する風の作用それぞれについて、適切な感覚刺激を作成することで風知覚の変化が実現できる。例えば、伊藤らや筆者らの風向知覚変化に関する研究で用いられた粒子が飛ぶ映像や、西牧らの風速知覚変化に関する研究で用いられた旗や落葉の映像は環境に対する作用を表すものに分類される。

このように、風の発生や作用を間接的に想起させる刺激というアプローチによって、様々な種類の感覚刺激を活用して風知覚のクロスモーダル効果を誘発できるようになる、これは、変化させたい知覚やコンテンツに応じた柔軟な感覚刺激設計を可能とする。

表 3.1: 風知覚のクロスモーダル効果を誘発する刺激と本論文で扱う風覚要素の対応表

	風の発生	環境への作用	身体近傍への作用
風向	ファンの動作音の方向 [21, 22]	飛ぶ粒子の VR 映像の方向 [20, 22]	風切り音の方向 [21, 22]
風速		風に揺れる旗や飛ぶ落葉の速度 [23]	衣服の振動 (第 4 章) アバタの服の変形 (第 4 章)
風温	送風機の色変化 (第 5 章)	煙の色変化 (第 5 章)	腕の色変化 (第 5 章)
快適感	扇風機の映像・音 (第 6 章)	風に揺れる草原の映像・音 (第 6 章)	

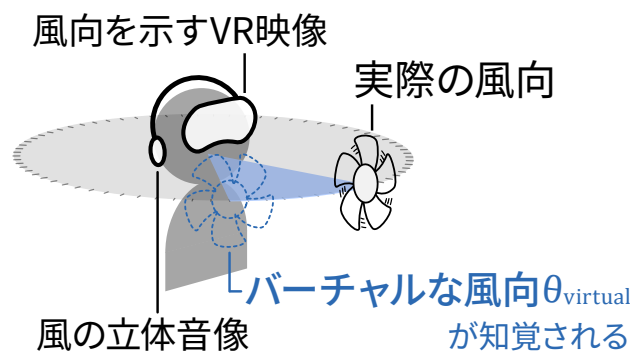


図 3.2: 視聴覚刺激による風向知覚操作の概念図 [22]

### 3.4 風向知覚変化を誘発する視聴覚刺激の例

本節では、風知覚のクロスモーダル効果を誘発する刺激の設計事例として、筆者が過去に行った視聴覚刺激による風向知覚変化の研究を取りあげる [22]. この研究では、視覚・聴覚・触覚を組み合わせたクロスモーダル効果により風向知覚変化の効果が向上し、視聴覚刺激および前後からの物理風を組み合わせると、2つという少数の風源でも全周囲からの風を提示できることが明らかになった。

風向知覚の変化とは、例えば前から来る風が斜め右から吹いたかのように感じられるなど、実際とは異なる風向を錯覚する現象をいう。使用する視聴覚刺激には、図 3.2 に示すように、風向を示す VR 映像および風の立体音像を使用した。これ以降、視聴覚刺激によって表現される風向を「バーチャル風向 ( $\theta_{\text{virtual}}$ )」、送風装置が発生させる風の方向を「物理的風向 ( $\theta_{\text{physical}}$ )」と呼ぶ。

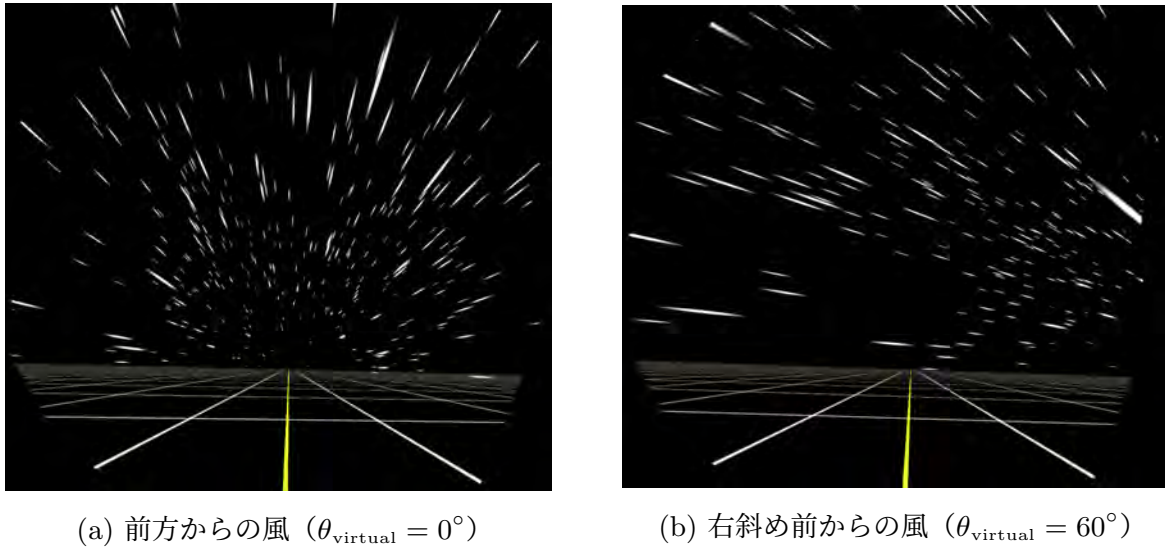


図 3.3: 粒子の流れる VR 映像 [22]

■視覚刺激 図 3.3に示す，粒子がバーチャル風向から体験者に向かって流れる VR 映像を使用した．これは，粒子の流れる方向に吹いている風の存在を示唆する情報といえる．VR 映像はゲームエンジンの Unity で制作し，HMD（HTC VIVE Pro）に表示した．

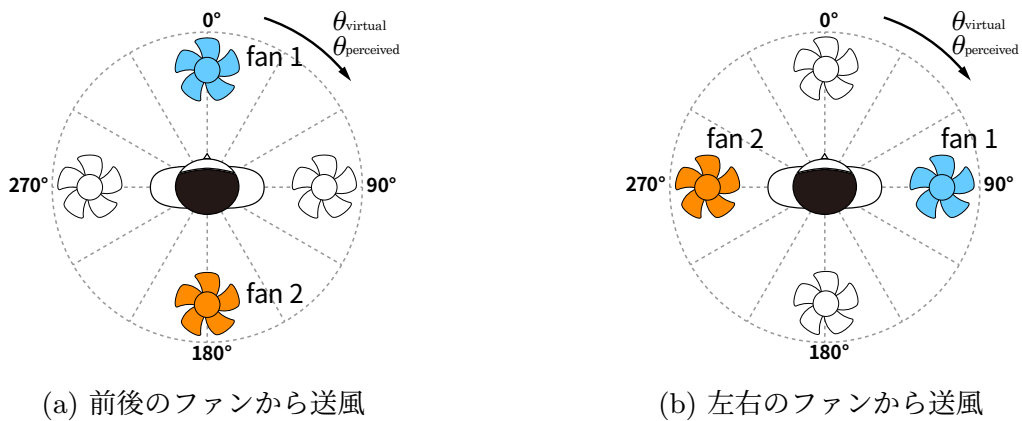
■聴覚刺激 風の音を，音源方向が定位できるようヘッドホンから再生することでバーチャル風向を提示した．筆者らの以前の研究で使用した，ダミーヘッド（ACO SAMURAI HATS）によって実際の風音を録音した音源 [21] を使用した．ダミーヘッドは，人の耳や頭部，上半身の形状を模擬しており，頭部伝達関数（Head-Related Transfer Function; HRTF） [125] に近い周波数特性を再現することによって立体的な音を収録できる．録音された音には，バーチャル風向から聞こえてくるファンの動作音や，風が耳に衝突して生じる風切り音が含まれていた．

■風覚刺激 図 3.4のように，直径 172mm のファン（山洋電気 San Ace 172）4 台を実験参加者の前後左右に配置した．実験参加者は VR 体験のために HMD やヘッドホンを装着するため，送風方向によって風を受ける皮膚の範囲が異なると考えられる．従って，送風する方向について前後，左右を比較するようにした．ファンは実験参加者の頭部に送風するように設置された．

直径 800 mm の円周レール上にポールを立ててファンを設置し，ファンから頭部表面までの距離が 300 mm 程度となるようにした．ファンの風速は，図 3.5のように，0.8 m/s から 2.0 m/s までの範囲でバーチャル風向に応じて連続的に制御した．

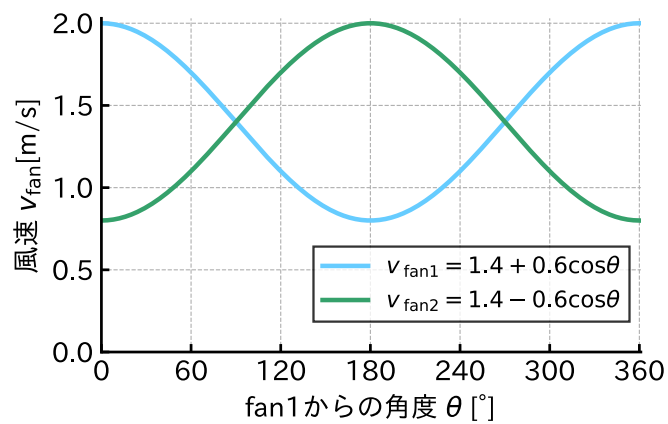


図 3.4: 風向知覚変化検証実験に用いた送風装置 [22]



(a) 前後のファンから送風

(b) 左右のファンから送風



(c) fan1 からの角度と風速の関係

図 3.5: 風向知覚変化検証実験におけるバーチャル風向とファンの風速の関係 [22]

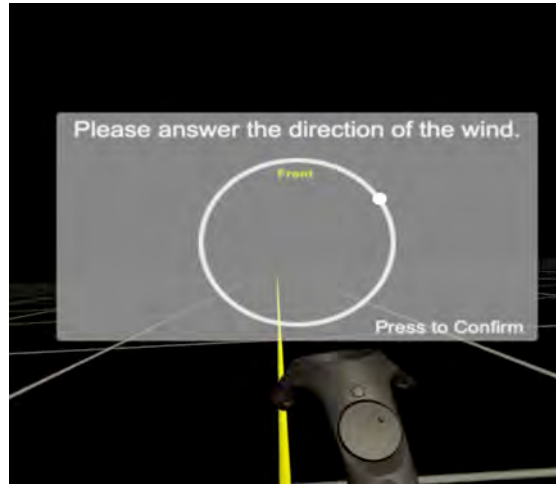


図 3.6: 知覚した風向を回答するインタフェース [22]

■**実験** 視聴覚情報によりバーチャル風向を提示し、知覚される風向が変化するかどうかを検証する実験を行った。実験は参加者内計画で、感覚刺激のモダリティ（視聴覚・視覚のみ・聴覚のみ）と送風するファンの方向（前後・左右）の 2 要因 6 条件で実施した。提示するバーチャル風向は、 $30^\circ$  ごとに 12 種類とした。実験参加者は、図 3.6 に示すインタフェースによって風向を VR コントローラのトラックパッドにより回答した。

■**実験結果と議論** 知覚された風向の平均 ( $\overline{\theta_{\text{perceived}}}$ ) を算出し、バーチャル風向 ( $\theta_{\text{virtual}}$ ) との関係性をプロットした図を図 3.7 に示す。知覚された風向がバーチャル風向に近づいており、風向知覚が変化したことが分かる。バーチャル風向と知覚された風向の誤差の絶対値（絶対誤差）に対して整列ランク変換（Aligned Rank Transform; ART [126]）を適用した分散分析を行ったところ、視聴覚刺激の組み合わせによって風向知覚変化の効果が向上したことが明らかになった。特に、前後から送風し視聴覚刺激を提示した条件では、絶対誤差の中央値が 12 種類のバーチャル風向全体で最大  $34.8^\circ$  となり、提案手法によって全周囲からの風が知覚されることが示された。

分散分析の結果単純・単純交互作用の検定が必要となったため、送風方向・感覚情報それぞれについてデータを分け、Hommel 法により多重性を補正した Wilcoxon の符号順位検定を行った。結果を表 3.2、表 3.3 に示す。左右から送風した際の絶対誤差の中央値は最大  $57.6^\circ$  であり、前後から送風したほうが風向知覚変化の効果が高い傾向がみられた。表 3.3 によると、視聴覚刺激を提示した条件において  $\theta_{\text{virtual}} = 0^\circ, 30^\circ, 150^\circ, 330^\circ$  のとき、前後から送風した条件の絶対誤差が左右から送風したときより有意に小さかった。したがって、特に前後に近いバーチャル風向を知覚させたい場合には前後から送風することが有益だった。これらの条件では物理的風向とバーチャル風向の差が  $30^\circ$  以内であり、風向知覚

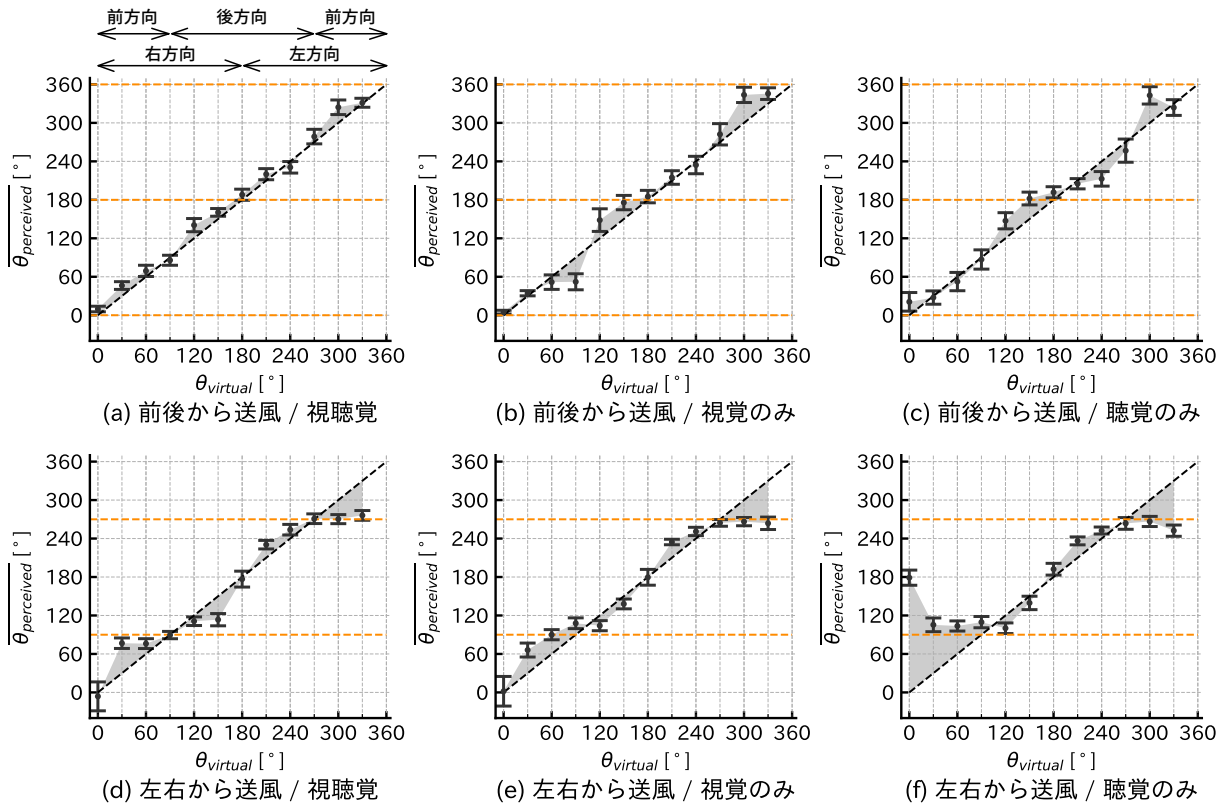


図 3.7: 風向知覚変化検証実験における知覚された風向の平均 ( $\overline{\theta_{\text{perceived}}}$  ± 標準誤差) とバーチャル風向 ( $\theta_{\text{virtual}}$ ) のプロット [22]. 斜めの破線は  $\theta_{\text{virtual}} = \overline{\theta_{\text{perceived}}}$  を, 水平の破線は実際のファンの方向を示す. 左上の矢印は角度と実験参加者に対する方向の対応を示す.

表 3.2: 送風方向ごとの感覚情報条件に対する絶対誤差の統計検定結果 [22]. 表中の数値は中央値.

送風方向	感覚情報	0°(前)	30°	60°	90°(右)	120°	150°	180°(後)	210°	240°	270°(左)	300°	330°
前後	視聴覚	5.73	20.2	22.7	9.53	29.2	18.3	5.00	24.0	13.1	15.9	34.8	26.9
	視覚のみ	3.57	19.2	31.1	60.1	63.1	24.8	5.82	24.7	23.9	51.8	55.7	21.4
	聴覚のみ	27.6	30.3	57.8	52.3	36.1	31.7	9.50	31.1	30.5	53.6	59.7	38.5
左右	視聴覚	24.3	43.0	23.5	10.5	11.5	30.9	4.62	17.5	19.2	5.66	35.6	57.6
	視覚のみ	49.0	26.8	34.7	16.4	17.6	19.8	5.92	25.0	14.0	9.35	26.1	62.4
	聴覚のみ	158	68.9	47.4	26.2	25.4	22.0	7.21	27.2	20.5	18.7	43.7	85.6

\*\* :  $p < .01$ , \* :  $p < .05$ , † :  $p < .1$

を変化させなければならない幅が小さいことで風向知覚操作の効果が高くなったと考えられる.

伊藤ら [20] の研究では, 本稿の実験では取り扱わなかった斜め方向にファンを配置しての風向知覚操作が報告された. 一部のファンを斜め方向に配置するなどして, 前後・左右のバーチャル風向をより正確に提示するアプローチも今後検討が必要である.

表 3.3: 感覚情報ごとの送風方向条件に対する絶対誤差の統計検定結果 [22]. 表中の数値は中央値.

感覚情報	送風方向	0°(前)	30°	60°	90°(右)	120°	150°	180°(後)	210°	240°	270°(左)	300°	330°
視聴覚	前後	5.73	20.2	22.7	9.53	29.2	18.3	5.00	24.0	13.1	15.9	34.8	26.9
	左右	24.3	43.0	23.5	10.5	11.5	30.9	4.62	17.5	19.2	5.66	35.6	57.6
視覚のみ	前後	3.57	19.2	31.1	60.1	63.1	24.8	5.82	24.7	23.9	51.8	55.7	21.4
	左右	49.0	26.8	34.7	16.4	17.6	19.8	5.92	25.0	14.0	9.35	26.1	62.4
聴覚のみ	前後	27.6	30.3	57.8	52.3	36.1	31.7	9.50	31.1	30.5	53.6	59.7	38.5
	左右	158	68.9	47.4	26.2	25.4	22.0	7.21	27.2	20.5	18.7	43.7	85.6

\*\*: $p<.01$ , \*: $p<.05$ , †: $p<.1$

■刺激の設計方針との関連 前述のとおり，風向知覚変化の検証実験において使用された視聴覚刺激は，風の流れを示す粒子の映像，ファンの動作音，風が耳に衝突する際の風切り音の情報を含んでいた．これらを表 3.1に示した刺激の分類に当てはめると，粒子の映像は風の環境への作用を表す情報，ファンの動作音は風の発生を表す情報，風切り音は風の身体近傍への作用を表す情報と考えられる．したがって，風向知覚変化の研究で提案された手法は，本章で提案した風の発生や作用を間接的に想起させる手法に当てはまると言える．

本博士論文中、第4章（pp. 53-85）の部分は、5年以内に学術雑誌等に掲載等の形で刊行される予定であるため、学位授与日から最大5年間インターネットでの公表をすることができません。本PDFファイルでは一部除外しております。

本博士論文中、第5章（pp. 86-109）の部分は、5年以内に学術雑誌等に掲載等の形で刊行される予定であるため、学位授与日から最大5年間インターネットでの公表をすることができません。本PDFファイルでは一部除外しております。

## 第6章

# 屋内外のバーチャル映像および音による風の印象および感情変化

### 6.1 本章の概要

本章では、屋内外のバーチャル空間を表す視聴覚刺激による、風の印象や空間の印象、感情の変化について検証した結果を報告する。

前章まで、クロスモーダル効果を活用することで、風覚を構成する風向、風速、風温といった要素を簡易な送風装置によって提示できることを明らかにしてきた。ただ、実際に送風する際には、風と密接に関係する快適感についても考慮する必要がある。例えば、穏やかな自然の風は心地いいという共通認識がある一方で、空調の気流など人工的な風にはドラフト感 [90] などの不快感を覚える人もいる。そのため、風提示を用いたアプリケーションがユーザに受け入れられるためには、風の体験を快適なものにする手法を明らかにすることも必要である。

屋外の自然風のような「心地よい風」を再現し、リラックスやポジティブ感情を引き出す手法は、リラクゼーションやストレス対処の観点で注目されている。精神的ストレスは心血管疾患、肥満、鬱病、不安症など様々な健康問題を誘引するため、その解消は重大な社会的課題である [171]。

これまでに、いくつかの風覚ディスプレイによってストレス抑制やポジティブ感情の増加が報告されている [7, 10, 26]。風速のゆらぎや広範囲の気流によって、自然風のような心地よい風を人工的に再現する模擬自然風 (SNW) の技術も研究対象となってきた [64, 172, 173]。

しかし、気流以外の多感覚刺激が風の心地よさに与える影響を検討した研究は少ない。これまでの章で示してきたとおり、多感覚刺激は風知覚の様々な側面を変化させることがあり、風の印象や体験者の感情に対しても影響する可能性が考えられる。また、視覚的な

景観 [174] や音 [175] が、リラックス介入の結果に影響することが知られている。こうした影響の有無は、風を利用したリラックス手法において多感覚刺激の設計を考慮すべきかどうかを判断するために重要な情報である。

本研究では、風を用いたリラックスシステムで利用されるような模擬自然風の送風とともに、VRを通じて自然の風が吹く屋外や人工の風が吹く屋内の映像と音を体験する間の風の印象、バーチャル空間の印象、感情状態を検証した。実験の結果、屋外の草原を表すバーチャル環境と自然の風音によって、風の快適感や開放感、およびユーザの感情状態が有意に改善した。また、模擬自然風の送風によって精神的ストレスが軽減されることがアンケートや生体情報から示された。本研究の結果により、自然な風を表す多感覚刺激は、快適で開放された印象を風に付与する際に有用であることが明らかになった。

本章における用語を次のように定義する。

- 風の印象：風刺激に対する主観的な印象（快適感、強弱感、開放感等）
- バーチャル空間の印象：視聴覚刺激で表現されたバーチャル空間に対する主観的な印象
- 感情状態：感覚刺激を体験中の参加者の感情の状態

本章の残りの部分においては、第 6.2 節で快適な風を再現する技術に関する関連研究をまとめ、本研究の位置づけを整理する。次に、第 6.3 節で視聴覚刺激による風の印象および感情変化を検証するための刺激設計や実験設計について述べる。第 6.4 節では実験結果を報告し、第 6.5 節では議論とそれに基づくリラクゼーションシステムにおける設計指針を論じる。第 6.6 節で結論を述べる。

## 6.2 快適な風の再現に関する関連研究

本節では、快適な風の再現や風の快適性における多感覚統合に関する関連研究を概説する。また、図 6.1 に示す本研究の位置づけについて整理する。

### 6.2.1 快適な風の再現

第 2.2.5 項で、風の快適感には温熱快適性や気流の触覚的快適性が関係していることを指摘した。温熱環境を快適に保つだけでなく、自然風のように感じる気流を再現することで触覚的快適性をも高める手法が研究されてきた。

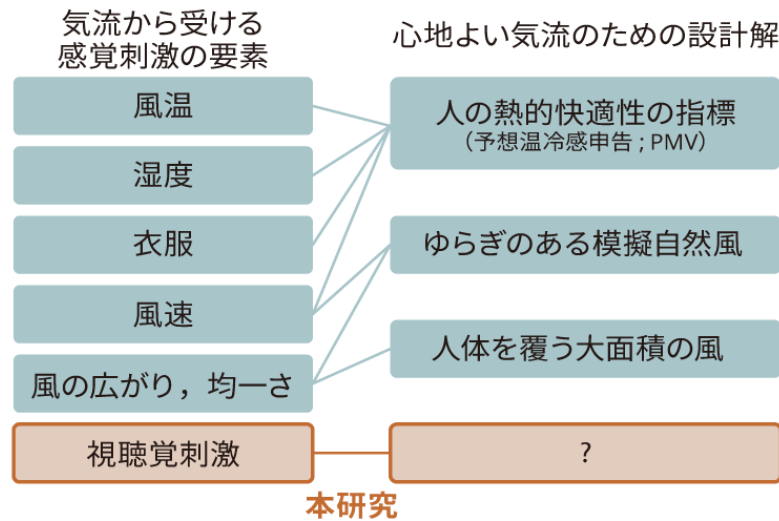


図 6.1: 本研究の背景及び位置づけ ©2023 IEEE

### 模擬自然風

Zhu らは、室内気流を快適なものとするには、自然換気を取り入れた動的な温熱環境における人間の知覚を理解する必要があると主張した [91]。また、風速を制御して自然風の特徴を再現することで模擬自然風 (SNW) を生成でき、それによって温熱快適性が改善することを示した。

自然の風の風速を特徴づける要素の1つに、「 $1/f$ ゆらぎ」がある [176]。 $1/f$ ゆらぎとは、パワースペクトルが周波数 ( $f$ ) に反比例するような波形をいう。Ouyang らは、風の対数パワースペクトルの負の傾き ( $\beta$ ) を測定し、 $\beta$  の値は自然風において 1.1 から 2.0 の間であることを見出した [177]。この  $\beta$  値は、模擬自然風と自然風の類似性を評価するために用いられる [91]。

模擬自然風の効果を検証した研究では、定常風と比較して模擬自然風が温熱快適性に好影響を及ぼすことが確認された [172, 173]。こうした効果を見込んで、パナソニック株式会社の扇風機 [178] や株式会社コロナのファンヒーター [179] など、リラックスや爽やかさを得る目的で模擬自然風を使用した電化製品が発表されている。

### 広範囲の気流

風速を制御した模擬自然風は主に風の時間的特性に着目したものであるが、自然風の空間的特性もまた考慮に値する。扇風機や空調機器の風は局所的であるのに対し、自然の風はより広範囲に吹いており、そのため全身に感じられる。したがって、広範囲の気流を再現することで快適な自然風に近い印象を得られる可能性がある。

バルミューダ株式会社は、二重構造の羽根を用いて風を広範囲に広げて快適な自然風を再現するとした扇風機「GreenFan」を製造している [180]. 広範囲の気流を得る別の手段として、複数のファンを広い面積に配置することも挙げられる. 中野らは、一辺 360 mm の正方形のファン配列を用いて、一様風による人間の風向知覚を調査した [44]. 同様に、Tolley らが提案した WindyWall は、高さ 1045 mm、幅 800 mm のパネルに 90 個のファンを配置しており、人体全体における風の体感を可能とした [11]. 村上らは、風速のゆらぐ広範囲の風を送風できる 1600 mm × 1600 mm の大きさのファン装置を提案し、この風により快適性の向上と疲労の抑制が見られたことを報告した [64].

既存研究においては、以上のとおり物理的な気流を制御して快適な風を生成する研究が数多く行われてきた. 一方で、視覚や聴覚といった風覚以外の感覚モダリティの利用はそれほど考慮されてこなかった. 多感覚刺激による快適な風体験のアプローチについて、第 6.2.2 項で検討する.

### 6.2.2 多感覚統合と風の快適さ

視覚・聴覚・嗅覚・触覚などの多感覚刺激を用いた VR リラクゼーション手法は近年注目されている [120]. 風に関連する試みでは、パナソニックエコシステムズ株式会社が提案した空気質改善ソリューション「Reboot Space」において植物が風に揺れる様子や水流の音を用いて自然感を再現するとした事例 [181] などが存在する.

ただし、多感覚刺激による風の快適性への影響を検証した研究は少ない. 風覚ディスプレイの感情への効果を示唆した既存研究においても、異なる印象の視聴覚刺激を比較してはならず、例えば自然の風が吹く屋外空間のみを実験に用いていた [7, 10]. 本論文で述べてきたような風知覚に対する視覚刺激や聴覚刺激の影響を考慮すれば、風の快適性もまた、多感覚刺激によるクロスモーダル効果によって変化しうると考える.

温熱快適性の文脈において、Chen らは屋外のオープンスペースで音楽や自然音などの 5 種類の音を再生し、聴覚と温熱知覚の間のクロスモーダル効果を評価した [182]. 実験の結果、音楽と自然音は快適な音として知覚され、温熱快適性を向上させるとされた. しかしながら、この研究は温熱快適性のみに着目したもので、触覚的快適性に関しては議論していない. また、Chen らの研究対象は実際の屋外空間における快適性であったため、バーチャルな視覚刺激の効果は検証されていない.

そこで、本研究では、触覚的快適性と感情の観点から、風の快適性に対して視聴覚刺激が及ぼすクロスモーダル効果を検証した. 本研究は、すでに快適性を高めるための設計が明らかにされている気温や湿度、風速、模擬自然風などに対して、多感覚刺激の設計に関する知見を付け加えるものである.

## 6.3 視聴覚刺激による風の印象および感情変化の検証実験

視覚・聴覚情報が風の快適性やユーザの感情に影響を与えるかどうか検証するために、風とともに異なるバーチャル環境の視聴覚刺激を体験する実験を行った。表 6.1 に示すように、屋外環境・屋内環境・無地環境の3種のバーチャル環境を、それぞれ自然感や開放感の印象が異なるように設計した。さらに、空調された実験室と、広範囲の模擬自然風を送風可能な装置を用いて、温熱快適性と風の触覚的快適性が確保された状態を作り出した。実験参加者は送風装置の前に着席し、HMD を装着して風とバーチャル環境を体験した。

### 6.3.1 3種のバーチャル環境における多感覚刺激設計

#### 視聴覚刺激


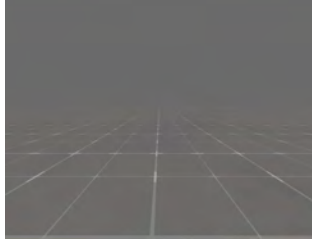
バーチャル環境の視聴覚刺激は、HMD (Meta Quest 2) およびワイヤレスノイズキャンセリングヘッドホン (SONY WH-1000XM4) によって没入感の高い形で提示した。屋外環境は快適で広大な草原の映像であり、屋内環境は壁で区切られた簡素なオフィスの映像である。これら2種は、風の存在を表す視聴覚刺激を含み、かつ自然感や開放感に関して対照的な印象を抱かせるものとして設計した。

無地環境は、ほとんど視聴覚刺激の入力がないコントロール条件として用いた。バーチャル環境はいずれも Unity ゲームエンジンで制作し、VR 機器に表示した。環境内に、参加者のアバターは表示しなかった。

■**屋外環境** 屋外環境は、多くの人が心地よさを感じる自然景観として、風に揺れる草で構成された草原空間とした。屋外の快適な風を想起させる典型的な環境には、草原・森・海などがある。しかし、森や海において木々の揺れや波で風の存在を表すと強風が連想されてしまう可能性があり、本実験で使用した穏やかな風とは印象が食い違う。そこで、草の動きによって穏やかな気流を連想できるよう草原の環境を選定した。草原の風景は、Unity アセット「Advanced Terrain Grass [183]」を使用して作成した。このアセットは、リアルな草のシェーダおよび、風に揺れる草の映像を生成するスクリプトを収録している。アセットを使用し、見えている範囲の地表を密に覆うよう草を配置した。背景音には、日本各地の自然音を中継する Cyberforest プロジェクト [187] のデータから、植物が風に揺れる音を使用した (#yatake from Yatakezawa, 2022-01-05 [186])。音源には、鳥の鳴き声や雨音など風音以外の音が含まれていない1分程度の部分を使用した。

■**屋内環境** 室内環境は、典型的なオフィスの空間とした。広大な自然を感じられる屋外環境と十分に対照的な風景とするため、壁で区切られた人工的な室内風景となるように設

表 6.1: 実験に使用した 3 種のバーチャル環境の視聴覚刺激の概要 ©2023 IEEE

名称	条件		
	(a) 屋外環境	(b) 屋内環境	(c) 無地環境
外観			
映像	草原 [183]	オフィスの机と椅子 [184], 扇風機 [185]	灰色の空間
広さ	無限	幅 10 m x 奥行 10 m x 高さ 3 m	無限
音	木が風に揺れる音 [186]	扇風機の動作音	無音
音量	44–48 dB	44–48 dB	無音

計した。また、環境の種類以外が結果に影響しないよう、感情や集中を乱すような刺激を含めないようにした。したがって、大学の研究棟の居室に類似し、参加者の大学（院）生や職員が見慣れていると考えられる簡素なオフィス環境を選定した。オフィスの風景は、Unity アセット「Snaps Art Office [184]」を用いて作成した。アセットに含まれる机や椅子に加えて、風の存在を示すために扇風機の 3D モデル（「Oscillating Pedestal Fan [185]」）を参加者の前に配置した。部屋のサイズは幅 10 m、奥行き 10 m、高さ 3 m とした。HMD を用いた VR 体験では距離が過小評価されることが知られている [188] ため、実際の実験室より大きめの寸法を設定した。背景音として、扇風機から録音した作動音（モータ音と羽根の風切り音を含む）を使用した。

■無地環境 無地環境はグレーの単色空間とした。完全な単色の視覚刺激では平面的な画像と区別できないため、立体空間として知覚されるよう白い格子を床面に表示した。無地環境では音を再生せず、ノイズキャンセリングヘッドホンによって周囲の雑音を抑制した。

■明るさの統一 環境の外見以外で視覚的印象に影響を与えうる要素を統制した。環境の明るさは主観的な空間の魅力や、気分、幸福感に影響するため [189]、3 種の環境が同様の明るさに感じられるよう照明条件を調整した。知覚される明るさの基準として、明るさ感評価指標「Feu」を用いた [190]。Feu は、誘導視野内（水平方向に 100°、垂直方向に 85°）の輝度値の幾何平均で算出でき、人が空間を目にした際の明るさの印象を定量化したもの

とされている。Unity のカメラ機能を用いて誘導視野内のスクリーンショットを取得し、グレースケール画像に変換したのち Feu を算出した。続いて、3 種の環境の間で Feu の差が 1% 以内に収まるよう、バーチャル環境内の照明強度を調整した。

■音量の統一 実験に使用したヘッドホンと騒音計（小野測器 LA-4350）を用いて、屋外環境と屋内環境の音量を統一した（無地環境は無音であるため、対象としなかった）。両環境の A 特性音圧レベルは 44 dB から 48 dB であった。環境内の音はバイノーラル音源として再生したため、音像の方向によって音圧は変動した。風向と音の方向に違和感を感じさせないように、送風装置と同様に参加者の正面に音像を配置した。

### 広範囲の模擬自然風

快適な模擬自然風を利用したリラクセスシステムにおける視聴覚刺激の応用を想定し、実験では快適に感じられる実風を送風するようにした。そのため、広範囲の模擬自然風を生成可能な送風装置「ウインドユニット（株式会社オカムラ）」を利用した。ウインドユニットは大型のファン 6 基を縦 3、横 2 ずつ配列したもので、風速のゆらぎを再現することで模擬自然風を送風できる [64]。風は幅 1.1 m、高さ 1.6 m の範囲に送風されるため、図 6.2 に示すように、着席した実験参加者の全身に模擬自然風を提示可能である。6 基のファンの回転数は同期し、軽井沢で実測された 3 分間の風速データに基づいてゆらぎのある風を再現した。電源投入からファンが目標の回転数に達するまで時間を要するため、実験では視聴覚刺激より 17 秒早くウインドユニットを起動した。

快適な模擬自然風を提示できることを確認するため、送風装置の風速を測定した。装置から距離 2 m、高さ 1 m の位置に熱線式風速計（testo 440 Hot Wire Kit）を設置し、1 Hz で 180 秒間風速を記録した。加えて、広範囲の気流を送風できることの確認のため、装置の正面、正面から左右に 300 mm の計 3 地点での風速を記録した。

結果を図 6.3 に示す。3 地点の風速が、左右にずれた位置を含めて同様のパターンで変化していることから、送風装置によって広範囲に送風できることが確認された。平均風速は装置正面で 0.49 m/s であった。0.49 m/s の気流は多くの人が皮膚で知覚可能であり [61]、かつ不快感が生じるほど強いこともないためこの風速を採用した。

装置が模擬自然風を送風できているかどうか確認するため、対数パワースペクトルの負の傾き ( $\beta$ ) が自然風と同様に 1.1 から 2.0 の間にある [177] ことを周波数解析によって検証した。図 6.4 に示すように、Welch 法によりパワースペクトル密度を計算し、線形回帰によって  $\beta$  を推定した。推定された  $\beta$  は 1.2 であり、送風装置が模擬自然風を送風可能なことが確認されたといえる。

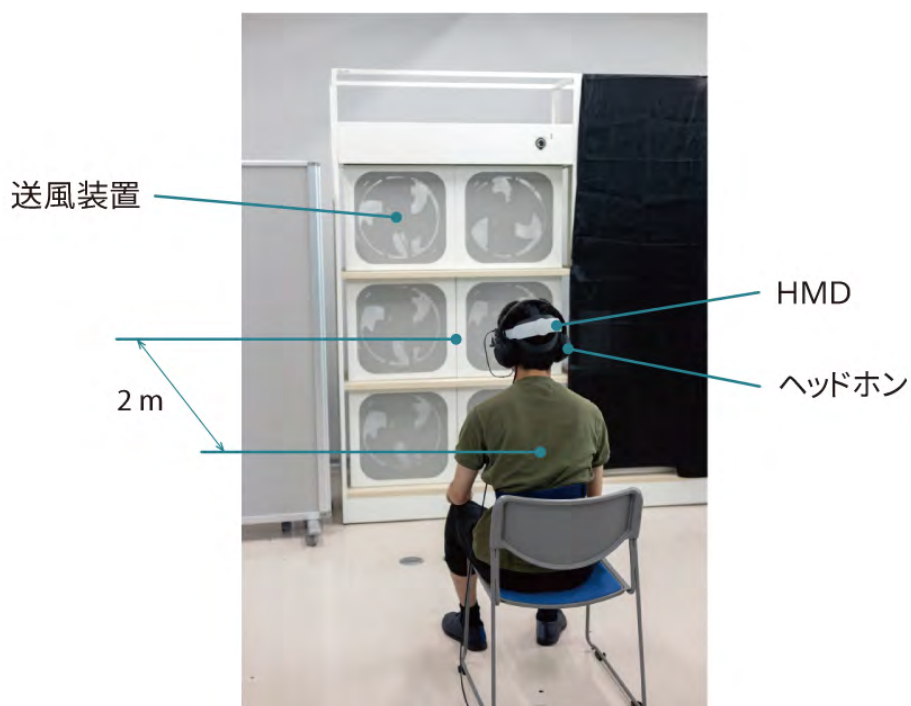


図 6.2: 風の印象および感情変化検証実験の様子 ©2023 IEEE

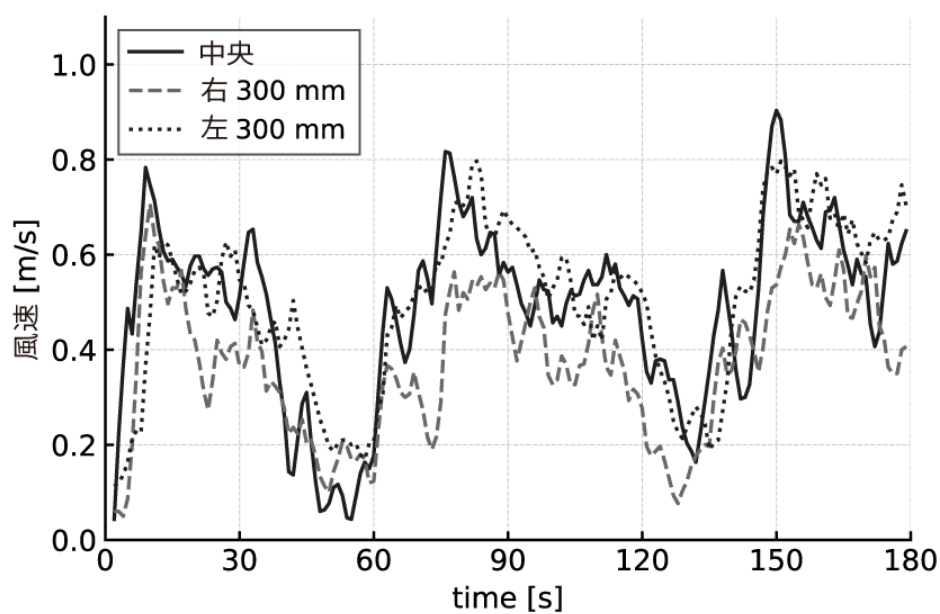


図 6.3: 装置の正面, 左 300 mm, 右 300 mm 地点における送風装置の風速変化の測定結果 (3 点毎の移動平均) ©2023 IEEE

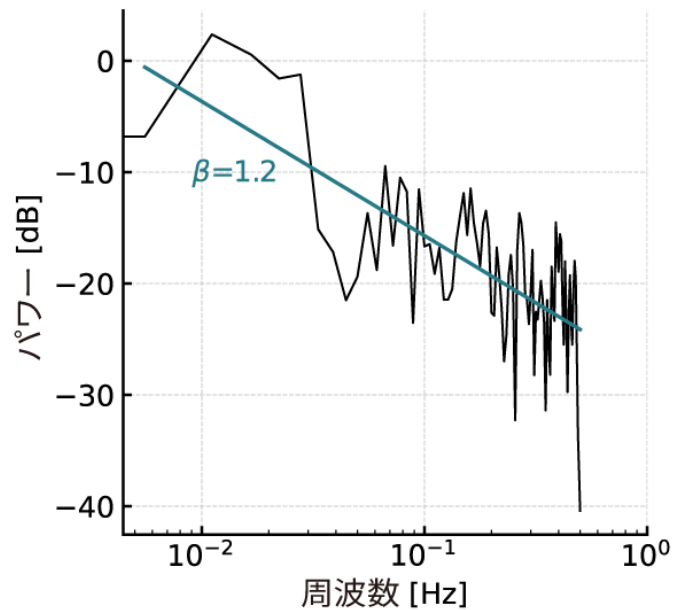


図 6.4: 送風装置による模擬自然風のパワースペクトル ©2023 IEEE

### 6.3.2 実験設計

実験は 2 要因の独立変数を用意し、実験参加者内計画で実施した。実験条件は、バーチャル環境の種類 3 条件（屋外環境・屋内環境・無地環境）と、模擬自然風による風覚刺激の有無 2 条件を組み合わせた 6 条件とした。快適性と感情に対する模擬自然風と視聴覚刺激の影響を分離して評価するため、風のない条件を用意した。

実験参加者は、6 条件それぞれで 3 分間バーチャル環境を体験した後、アンケートに回答した。また、体験中に生体情報として心電 (ECG)、呼吸、脳波 (EEG) を計測し、参加者のリラックス度を客観評価した。6 条件の順番は、順序効果による偏りを防ぐため Balanced Latin Square [191] によってカウンターバランスした。実験ソフトウェアは、Unity 上の研究フレームワーク bmlTUX [144] を用いて実装した。実験は、東京大学倫理審査専門委員会の承認 (No. 21-384) を受け、書面によるインフォームド・コンセントのもと実施された。

### 6.3.3 風の印象、空間の印象、および感情の評価手法

#### アンケート

参加者の快適性と感情を評価するため、各条件について 3 種類の選択式アンケートと自由回答の設問に回答させた。参加者の没入感を保つため、図 6.5 のように、HMD を装着し



図 6.5: アンケート回答のためのインターフェース ©2023 IEEE

たまま VR コントローラにより回答を入力できるインターフェースとした。

■風の印象 風の印象を評価した複数の研究の中で、八木らの研究のアンケート [93] を使用した。八木らの研究ではセマンティック・ディファレンシャル法 (SD 法) [192] を用いて風の印象を評価しており、項目は快適感・強弱感・開放感の 3 因子に関するものに分かれる。屋内外のバーチャル環境では、快適感や開放感に関連する印象が異なると予想されるため、これらの要素を実験で評価するようにした。質問紙は、表 6.2 に示すとおり、7 段階で回答可能な 17 項目からなる。実験では、質問の順序を無作為順とした。風のない条件では風の印象を体験しないため、7 段階に加えて「印象なし」の選択肢も用意した。「印象なし」の回答は、実験結果の分析対象には含めなかった。

■バーチャル空間の印象 風の印象に関するアンケートについて、実験参加者が風の印象とバーチャル空間の印象を混同して回答するのではないかと懸念があった。このような問題を回避するため、バーチャル空間の印象に関するアンケートも用意した。質問項目は、櫻川らによる木と金属の壁材を用いた部屋について評価した研究のものを使用した [193]。質問紙は、表 6.3 に示すとおり、7 段階で回答可能な 13 項目からなり、「健康・開放感」「変動・自然感」「安定・静寂感」「新鮮感」の 4 因子に分かれている。実験では、質問の順序を無作為順とした。

■感情 感情状態の評価尺度としては、Self-Assessment Manikin (SAM) [194], Positive and Negative Affect Schedule (PANAS) [195], 二次元気分尺度 (Two-dimensional Mood Scale-Short Term; TDMS-ST) [196] などが提案されている。本研究では、8 項目で短時間のうちに回答でき、短期間の感情状態の変化を評価できることから TDMS-ST を用いた。

表 6.2: 風の印象に関する質問紙項目 [93]

因子	項目
快適感	いらいらする/ゆったりする
	不安な/安らぐ
	嫌いな/好きな
	居心地が悪い/居心地が良い
	疲れる/疲れしない
	不快な/快適な
強弱感	弱い/強い
	遅い/速い
	単調な/変化に富んだ
	うっとろしい/さわやかな
	眠い/さえた
	緊張した/くつろいだ
	厳しい/優しい
開放感	圧迫感のある/開放的な
	不自然な/自然な
	気が散る/落ち着く
	不健康な/健康的な

TDMS-ST では、気分を表現する 8 単語について 6 段階で回答し、覚醒度と快適度の 2 指標を算出できる。質問の順序は、TDMS-ST の原案を踏襲した。

■自由回答 VR 体験の感想をより詳細に収集するため、自由回答の質問も実施した。各条件のアンケート回答後に、視覚刺激、聴覚刺激、風覚刺激の間に違和感を感じたかどうかを口頭で回答させた。

### 生体情報

生体計測は、生理的な反応から感情状態を評価するために用いられる手法である [197–199]。本研究では、主観アンケートに加えて心電、呼吸、脳波の 3 種類の生体情報を測定した。

心電信号は、心電センサと無線式生体信号ロガー (biosignalsPlux, Plux Wireless Biosignals) によって測定した。心電信号の R 波間隔 (RRI) は、自律神経系の反応を反映すると言われており、精神的ストレスを推定するのに用いられる [197]。参加者の左右の肩甲骨

表 6.3: バーチャル空間の印象に関する質問紙項目 [193]

因子	項目
健康・開放感	不健康な/健康的な
	かたい/やわらかい
	圧迫感のある/圧迫感のない
	親しみにくい/親しみやすい
変動・自然感	閉鎖的な/開放的な
	単調な/変化に富んだ
	つまらない/面白い
	冷たい/暖かい
安定・静寂感	不自然な/自然な
	落ち着かない/落ち着いた
	騒々しい/静かな
新鮮感	不快な/快適な
	新鮮でない/新鮮な

と腰に3つのゲル電極を貼り付け、100 Hz のサンプリングレートで心電信号を計測した。

呼吸数と呼吸の深さによっても、精神的ストレスを予測できる [198, 199]。したがって、biosignalsPlux 社製のベルト型呼吸センサを使用し呼吸を測定した。実験参加者の胸部にベルトを装着し、肺の動きを 100 Hz のサンプリングレートで計測した。

加えて、脳波によってリラックス [200]、集中 [201]、ポジティブ度 [202] などの感情状態を推定するため、無線式脳波センサ (Mind Tune Band, 株式会社リトルソフトウェア) を使用した。図 6.6 に示すように、実験参加者の前頭部にサージカルテープで電極を貼り付け、耳垂にクリップでリファレンス電極を取り付けた。

各条件につき、3 分間の心電・呼吸・脳波信号を分析した。心拍変動 (heart rate variability; HRV) 解析の従来手法 [203] では、少なくとも 5 分間の測定が必要とされている。しかし、最近の研究によれば、60 から 100 の R 波ピークを持つ心電データを用いて、一部の時間領域・周波数領域の特徴を算出可能である [204]。実験参加者が退屈を感じないよう各条件の体験時間を短くするため、計測時間を 3 分とした。3 分間のデータがあれば、仮に心拍数が 50 と低い場合でも 150 の R 波ピークが含まれることになり、心拍変動解析が可能である。

心電および呼吸信号の解析には Python パッケージ BioSPPy [205] を使用した。このパッケージは、3 Hz から 45 Hz のバンドパスフィルタを適用したのち、Hamilton のアルゴリズム [206] を用いて R 波ピークを検出する。R 波間隔データから RRI, RRI の分散 (RRV), RRI の標準偏差 (SDNN), RRI 標準偏差の二乗平均平方根 (RMSSD), RRI の



図 6.6: 頭部に HMD, ヘッドホン, 脳波計を取り付けた様子 ©2023 IEEE

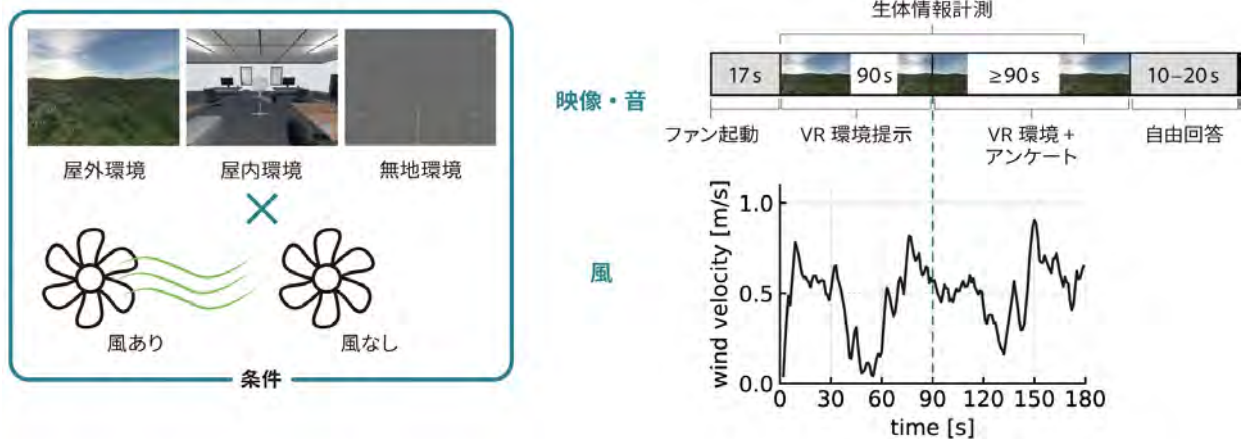


図 6.7: 風の印象および感情変化検証実験の手順 ©2023 IEEE

差が 50 ms 以上である割合 (pNN50) [203] を算出した。また、周波数領域の指標として、低周波強度と高周波強度の比 (LF/HF) も pyHRV [207] を用いて算出した。呼吸信号からは、呼吸数 (RR), RR の標準偏差 (RR.STD), 呼吸の深さを算出した。脳波信号からは、アルファ波とベータ波の強度を用いて、快適・集中・ポジティブ・リラックスという 4 つの尺度を株式会社リトルソフトウェアのアルゴリズムによって算出した。

### 6.3.4 実験手順

図 6.7 に実験手順を示す。実験の所要時間は、全体で 1 時間から 1 時間 30 分程度であった。実験参加者は実験目的や内容の説明を受けたのち、同意書に署名した。

参加者は生体情報センサを装着し、椅子に座って注視点を見ながら 5 分間安静にするよ

う求められた。続いて、図 6.6 のように HMD とヘッドホンを装着し、VR コントローラの操作説明を受けて回答方法を練習した。参加者には、VR 体験中は目を開けて映像を見ること、バーチャル環境を見回してもよいことを説明した。参加者はバーチャル環境内を移動したりインタラクションを行ったりできず、全員が同じコンテンツを体験した。移動やインタラクションを不可としたのは、実験の状況をシンプルなものとし、受動的な体験におけるリラクセス度を評価するためである。

実験では、各試行につき実験条件に対応した VR 画像と音が再生された。視聴覚刺激より 17 秒早く送風装置を起動し、送風の開始と視聴覚刺激の開始が同期するようにした。

3 分間の体験中、参加者が一切の行動やタスクを行わないと、退屈や眠気を感じてしまう懸念があった。この問題を避けるため、提示開始 1 分 30 秒後からアンケートを表示し、回答できる状態とした。アンケートの回答時間は制限しなかった。参加者の回答中も、VR 映像、音、風の刺激は提示され続けた。実験中のアンケートは、前述のとおり VR 内で回答可能であった。アンケートの後、参加者は自由回答の質問に答え、次の試行まで 20 秒間待機した。

実験終了後、参加者は装置を取り外し、体験や風の好みに対する追加のアンケートに回答した。アンケート結果および生体情報は匿名化して分析に用いた。

### 6.3.5 環境及び感覚刺激の統制

参加者間で風の体験が均一となるよう、温熱快適性を中心に条件の統制を行った。実験参加者の服装は半袖シャツ・長ズボン・靴下・靴とし、衣服の熱抵抗値 (clo 値) の値が約 0.4 となるようにした。弱い風を感じられるよう、実験中は参加者にフェイスマスクを外すよう求めた。実験室の温湿度は、PMV [87] が快適範囲 ( $-0.5 < PMV < 0.5$ ) となるよう実験前に空調を用いて制御した。実験中は、送風装置以外からの気流が生じないように空調を停止し、窓を閉めた。実際に、この状態で風速計の誤差範囲を超える気流が発生していないことを、熱線式風速計 (testo 440 Hot Wire Kit) によって確認した。

送風装置の外見による先入観が風の印象に影響しないよう、送風装置の前にパーテーションを置き、実験前の参加者から見えないようにした。また、周囲の環境音が聞こえないよう、ノイズキャンセリングヘッドホンを使用した。

生体情報は、心理状態のほかにも、激しい運動などの身体的条件によって影響される可能性がある。したがって、参加者には実験開始から 5 分間安静にし、実験中は着座するよう指示することで、活動量を一般的なデスクワークと同等に維持した。

## 6.4 実験結果

20名の病気のない成人が実験に参加した。実験装置の不具合により実験が正常に行えなかった3名を除き、平均年齢26.1歳（標準偏差5.0歳）の18名のデータを分析に使用した（男性11名、女性7名）。また、脳波については皮膚の状態や電極のずれによって正常に測定できなかった6名をさらに除外した。参加者のうち、VR機器をときどき利用する者が1名、数回VRを体験した者が10名おり、その他の7名はVR未経験者であった。

実験は夏季に行われ、実験開始時の室温は平均25.2°C、湿度は平均61.4%だった。実験中は空調を停止したため、終了時は室温平均26.9°C、湿度平均61.8%に上昇した。普段の風に対する好き嫌いの印象を聞いたところ、「とても好き」17名、「やや好き」1名となった。

### 6.4.1 アンケート回答

各因子が条件間でどのように変化したかを分析するため、3つの質問紙についてそれぞれ因子得点を算出した。風とバーチャル空間の印象については、先行研究[93,193]の因子負荷量に回答値を乗じて足し合わせた。TDMS-STの点数は、質問紙指定の計算方法[196]に従って計算した。

多肢選択式アンケートの回答は順序尺度と考えられるため、主効果・交互作用ごとに、ノンパラメトリックなデータに対する分散分析（ANOVA）を可能にする整列ランク変換（ART）[126]を適用した。本実験における統計検定の有意水準は5%とした。

結果の外れ値を判別するため、四分位範囲（interquartile range; IQR）法を採用した。第3四分位点と第1四分位点の差をIQRとして、第1四分位点をIQRの1.5倍以上下回る、または第3四分位点をIQRの1.5倍以上上回るサンプルを外れ値とみなした。外れ値は、結果の各図において×印で表される。本節で使用するARTを用いた分散分析やノンパラメトリック検定は、外れ値に対して頑健であると考えられている。

### 風の印象

風の印象に関する結果を図6.8に示す。風の印象は風がある条件でのみ回答されたため、風なしの条件は除外されている。屋外環境、屋内環境、無地環境の順で、快適感と開放感の得点が高くなった。一方、強弱感の因子には条件間でわずかな違いしかなかった。

風の印象について、ARTを用いた一元配置反復測定分散分析を実施した結果、快適感（ $F(2, 34) = 12.2, p = 0.0001$ ）と開放感（ $F(2, 34) = 10.8, p = 0.00024$ ）において、バーチャル環境の主効果が有意だった。強弱感については、バーチャル環境の主効果は有意でなかった（ $F(2, 34) = 0.368, p = 0.695$ ）。そこで、快適感と開放感について、Hommel法

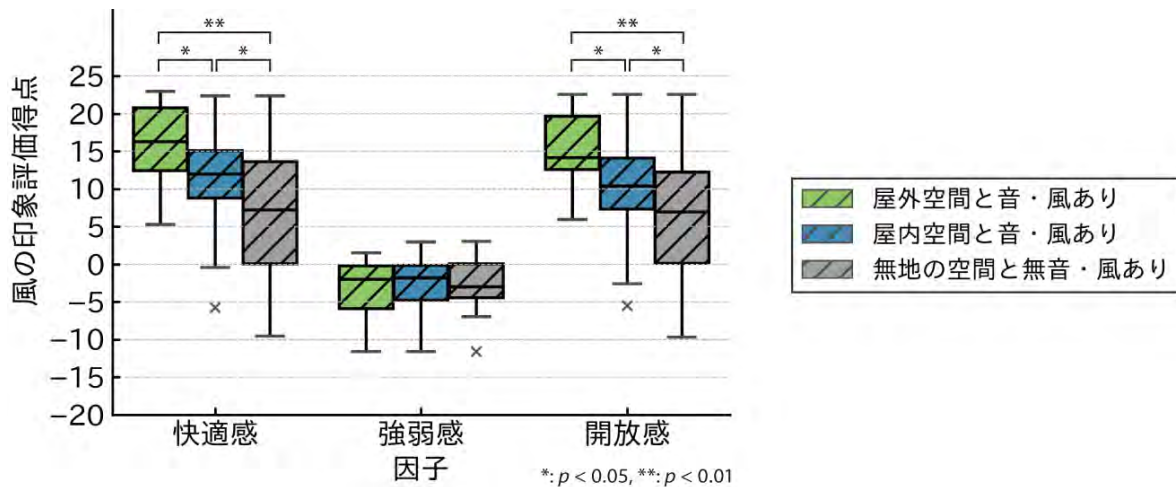


図 6.8: 風の印象に関するアンケート回答の得点. × 印は外れ値. ©2023 IEEE

により多重性を補正した Wilcoxon の符号順位検定を用いて事後検定した. その結果, 両因子において 3 組の条件全ての間には有意差があった. 事後検定の結果を表 6.4 (a) にまとめる.

#### バーチャル空間の印象

バーチャル空間の印象に関する結果を図 6.9 に示す. 屋外環境, 屋内環境, 無地環境の順で, 4 因子全ての得点が高かった. さらに, 風ありの条件では, 風なしの条件より健康・開放感, 変動・自然感, 安定・静寂感の因子の得点が高かった. ART を用いた二元配置反復測定分散分析では, 4 因子全てでバーチャル環境の主効果が有意だった (健康・開放感:  $F(2, 85) = 117, p = 0$ , 変動・自然感:  $F(2, 85) = 154, p = 0$ , 安定・静寂感  $F(2, 85) = 43.5, p < 0.0001$ , 新鮮感:  $F(2, 85) = 28, p < 0.0001$ ). 風条件の主効果は, 新鮮感以外では有意だった (健康・開放感:  $F(1, 85) = 3.98, p = 0.049$ , 変動・自然感:  $F(1, 85) = 5.84, p = 0.018$ , 安定・静寂感  $F(1, 85) = 5.18, p = 0.025$ , 新鮮感:  $F(1, 85) = 1.43, p = 0.235$ ). 交互作用はいずれの因子でも有意でなかった. 事後検定の結果を表 6.4 (b) にまとめる.

#### 感情

感情に関する TDMS-ST アンケート結果を図 6.10 に示す. 快適度は, 屋外環境, 屋内環境, 無地環境の順に高く, また風があることによっても向上した. 一方で, 覚醒度はバーチャル環境の条件間では差が小さく, 風のある条件で低下した. 快適度については, ART を用いた二元配置反復測定分散分析で, バーチャル環境条件 ( $F(2, 85) = 31.3, p < 0.0001$ ) および風条件 ( $F(1, 85) = 11.2, p = 0.0012$ ) の有意な主効果があった. 覚醒度については, バーチャル環境条件の主効果は有意でなく ( $F(2, 85) = 0.587, p = 0.558$ ), 風条件の

表 6.4: 風の印象, バーチャル空間の印象, 感情に関するアンケートの事後検定結果. 比較ペアごとに  $p$  値,  $Z$  統計量, 効果量  $r$  を示す. ©2023 IEEE

指標	比較	$p$ 値 (補正後)	$Z$	効果量 $r$
<b>(a) 風の印象</b>				
快適感	屋外 > 屋内	0.037 *	2.3	0.54
	屋内 > 無地	0.037 *	2.1	0.49
	屋外 > 無地	0.0009 **	3.6	0.85
強弱感	屋外 = 屋内	0.38	-	-
	屋内 = 無地	0.79	-	-
	屋外 = 無地	0.79	-	-
開放感	屋外 > 無地	0.037 *	2.4	0.55
	屋内 > 無地	0.049 *	2.0	0.46
	屋外 > 無地	0.0006 **	3.7	0.87
<b>(b) バーチャル空間の印象</b>				
健康・開放感	屋外 > 屋内	<0.0001 **	5.1	0.85
	屋内 > 無地	<0.0001 **	4.0	0.67
	屋外 > 無地	<0.0001 **	5.2	0.87
	風あり > 風なし	0.0036 **	2.9	0.40
変動・自然感	屋外 > 屋内	<0.0001 **	4.7	0.79
	屋内 > 無地	<0.0001 **	5.1	0.86
	屋外 > 無地	<0.0001 **	5.2	0.87
	風あり > 風なし	0.01 *	2.6	0.35
安定・静寂感	屋外 > 屋内	<0.0001 **	4.1	0.68
	屋内 > 無地	0.0017 **	3.1	0.52
	屋外 > 無地	<0.0001 **	5.0	0.83
	風あり > 風なし	0.0008 **	3.3	0.46
新鮮感	屋外 > 屋内	<0.0001 **	4.8	0.80
	屋内 = 無地	0.44	-	-
	屋外 > 無地	<0.0001 **	4.3	0.71
	風あり = 風なし	0.95	-	-
<b>(c) 感情 (TDMS-ST)</b>				
快適度	屋外 > 屋内	0.00042 **	3.5	0.59
	屋内 > 無地	0.00042 **	3.7	0.62
	屋外 > 無地	<0.0001 **	4.9	0.82
	風あり > 風なし	<0.0001 **	4.4	0.60
覚醒度	屋外 = 屋内	0.85	-	-
	屋内 = 無地	0.85	-	-
	屋外 = 無地	0.85	-	-
	風あり < 風なし	0.0062 **	-2.7	-0.37

\*:  $p < .05$ , \*\*:  $p < .01$

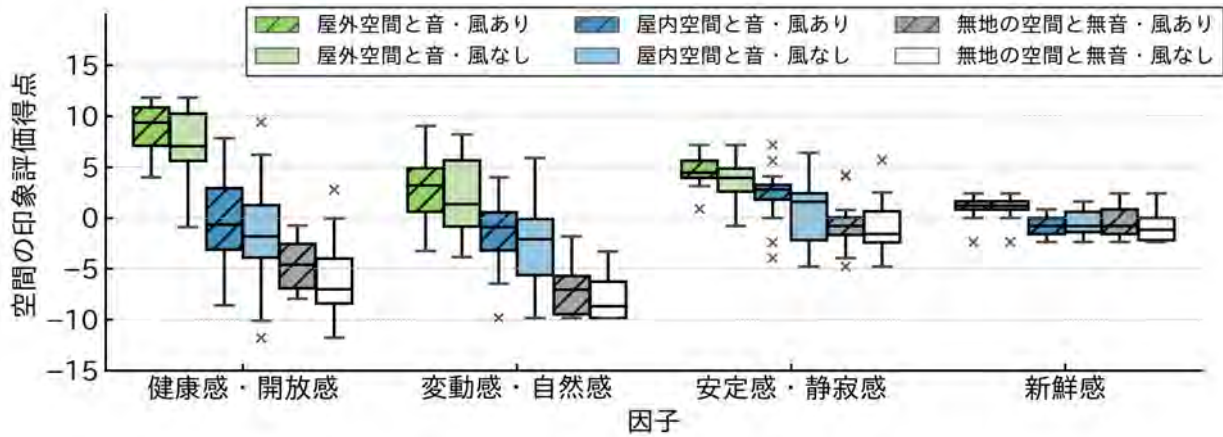


図 6.9: バーチャル空間の印象に関するアンケート回答の得点. × 印は外れ値. ©2023 IEEE

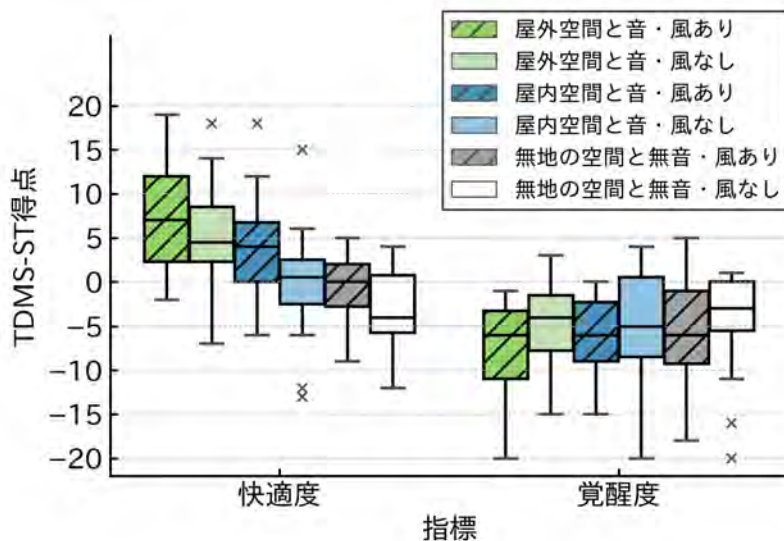


図 6.10: 感情アンケート TDMS-ST の得点. × 印は外れ値. ©2023 IEEE

主効果は有意であった ( $F(1, 85) = 8.03, p = 0.0058$ ). 交互作用は快適度・覚醒度いずれでも有意でなかった. 事後検定の結果を表 6.4 (c) にまとめる.

### 6.4.2 生体情報

実験では多種の生体情報を取得したため, 統計検定を用いて, 条件間で有意に変化したものを絞り込んだ. 心電, 呼吸, 脳波の信号から抽出した生体情報の特徴量について, 二元配置反復測定分散分析を行った. 全ての特徴量について Shapiro-Wilk 検定により正規性の仮定を確認し, 正規分布に従わないと考えられるものについては ART ANOVA を用

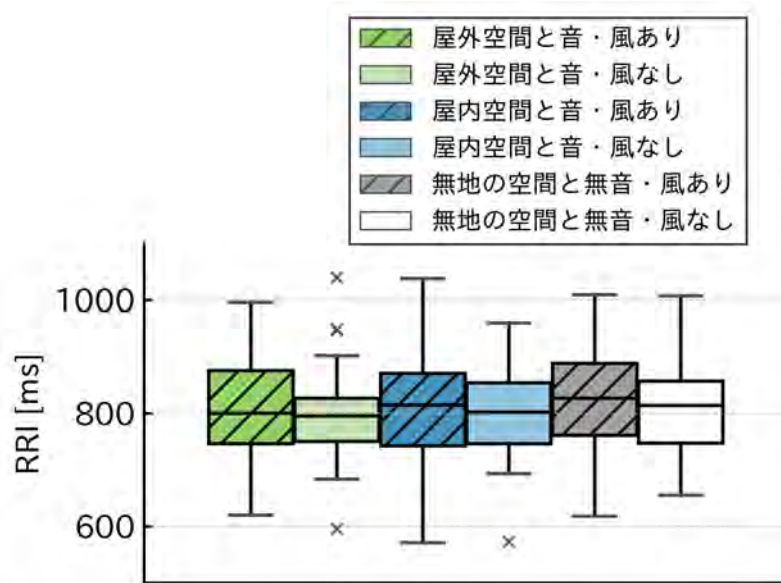


図 6.11: 心電信号から算出した RRI ©2023 IEEE

いた．同一のデータに対して複数の統計検定を行うことによる第一種の過誤を避けるため，3種の生体信号それぞれについて  $p$  値に Bonferroni 補正を実施した．

検定の結果，RRI で風条件の有意な主効果が認められた ( $F(1,17) = 10.1$ , 補正後の  $p = 0.033$ )．他の生体情報特徴量には，有意な主効果や交互作用は見られなかった．各条件における RRI の箱ひげ図を図 6.11 に示す．RRI 値は，風なしの場合に比べ風ありの場合に 4.67 ms から 12.9 ms 程度増加した．RRI が大きい（心拍数が小さい）ことは，参加者がよりリラックスしたことを示唆する [197]．

### 6.4.3 自由回答

実験に使用した視覚，聴覚，風覚の刺激間の違和感について，自由回答により意見を集めた．18人の参加者のうち，7人が刺激間の違和感に言及した．5人は風を感じない場合があったと述べたが，これは風なしの条件における意図的な操作であった．4人は草の動きのリズム，風速，風向，風を受ける範囲について，映像と風の違和感を指摘した．さらに，1人ずつが，音が単方向であること，屋外環境で風音が人工的に感じられたこと，無地環境では音がないことを指摘した（これも条件によっては意図的な操作であった）．残りの11人の参加者からは，違和感についての指摘はなかった．

## 6.5 議論

### 6.5.1 屋外環境の視聴覚情報による風の快適感と開放感の向上

風の印象の評価（図 6.8）から、屋外環境の映像と風音は、屋内環境のそれより風の快適で開放的な印象を強めると考えられる。また、強弱感の印象は条件感で変化しなかった。

第 6.3.3 節で述べたように、参加者が風の印象ではなくバーチャル環境の印象を答えてしまうのではないかという懸念があった。ただし、空間の印象（図 6.9）や感情の快適度（図 6.10）に対する回答が風の条件間で有意に異なることから、参加者が風の有無にかかわらず同様のアンケート回答をしていたとは考えにくい。したがって、バーチャル環境の視聴覚刺激が風の快適感や開放感に影響を与えたと考えられる。

本実験では、視聴覚刺激によって風の印象が変化し理由を判断するのに十分な情報は得られていない。実験中の視聴覚刺激では、色・場所・壁の有無・音源の種類など様々な要素が変化した。さらに、屋外環境ではバーチャル空間の印象の様々な因子（健康・開放感、変動・自然感、安定・静寂感、新鮮感）が改善された（図 6.9）ため、印象変化の要因は複数の視聴覚要素にあると推定される。また、実験室内の気流環境および温熱環境は統制していたため、温熱快適性の度合いは大きく変動しなかったと考えられる（ただし、環境ごとの色等の違いにより風温知覚が変化し、温熱快適性が変化した可能性はある。例えば、草原の空間を目にして涼しさを感じるなどである）。このように、開放感、変動感、自然感などのバーチャル環境の印象を変化させる視聴覚刺激が、風の触覚的快適性などの知覚に影響する可能性がある。

### 6.5.2 屋外空間の視聴覚情報と模擬自然風によるバーチャル空間の印象向上

図 6.9によると、バーチャル空間の印象の多くの因子が屋外環境、屋内環境、無地環境の順に向上した。この結果は、開放的でリラックスするような草原環境という屋外環境のデザイン方針を反映している。逆に、屋内環境は壁に覆われた典型的なオフィス空間だった。無地環境は屋内環境とは異なり空間を区切る壁を含まないものの、健康・開放感の評価はもっとも低かった。無地環境では視聴覚的刺激が最小限であり、参加者は退屈さやストレスを感じたと推定される。こうした結果は、メンタルセラピーにおける自然の視聴覚刺激の活用を提案した先行研究 [174, 175] の知見と一致する。

また、模擬自然風の存在もバーチャル空間の印象を有意に高めた。総合するに、屋外環境の視聴覚刺激と模擬自然風を統合することで、バーチャル空間の評価がもっとも高くなった。ただし、バーチャル環境条件と風条件の交互作用は有意でなく、それぞれの効果

は独立していると見なされる。

### 6.5.3 屋外空間の視聴覚情報と模擬自然風によるリラックス効果

感情アンケートの結果（図 6.10）によると、屋外のバーチャル環境では、空間印象の結果と同様に、快適度が有意に向上した。模擬自然風の刺激は快適度を増加させ、覚醒度を減少させた。また、風ありの条件で RRI が有意に増加したことで、模擬自然風がリラックス状態に導くことが客観評価でも示された。この結果は、リラックス度やポジティブ感情を高める風刺激の効果を報告した先行研究 [7, 10, 26, 64] を裏付ける。ただし、この結果はあらゆる風がリラックスに有益であることを示唆するものではなく、バーチャルな視聴覚刺激と模擬自然風を用いた場合に限定されることには注意が必要である。

感情アンケートの結果では、バーチャル環境条件と風条件の交互作用は有意でなかった。これは、バーチャル環境の種類により風の印象が変化するものの、リラックス効果においては視聴覚刺激と風刺激が互いに干渉するわけではないことを示している。分散分析の主効果によれば、屋内環境・無地環境よりも屋外のバーチャル環境を、無風より模擬自然風を使用することがリラックスシステムにおいて有益であるといえる。

生体情報の結果では、心電の RRI にのみ有意差があり、呼吸と脳波の特徴量には有意差がなかった。外的にストレスレベルを変動させた方が生体情報の変化を明瞭に測定できるものの、本実験ではリラックス度を検証するため精神ストレスが加わるような課題を実施しなかった。したがって、どの条件でも実験参加者は基本的にリラックス状態にあったと考えられ、したがって生体情報には差が出にくかった可能性がある。今後の研究として、デスクワーク中など異なる状況下で検証することも考えられる。

RRI は風の有無によって変化したものの、バーチャル環境の違いによる有意な変化はなかった。この結果は、バーチャル環境の視聴覚刺激によるリラックス効果は、風の刺激によるものより小さいことを示唆している。しかし、本研究の体験時間は3分と短かったため、さらに計測時間を増加させれば、RRI や他の生体情報に異なる変化がみられる可能性もある。例えば、村上らの実験では30分間気流を体験しながらのデスクワークを行い、脳波分析から模擬自然風による疲労の上昇抑制や快適性の向上といった効果がみられている [64]。屋外のVR映像や音に関しても、それぞれ6分間、4分間の自然映像による覚醒度の向上やストレスからの回復といった効果が、皮膚コンダクタンス (SCL) の計測結果から示された [174, 175]。したがって、今後の研究でより長い時間での生体情報計測を行えば、リラックス効果における視聴覚刺激と模擬自然風の関係が新たに判明する可能性がある。

#### 6.5.4 風覚を用いたリラクゼーションシステムにおける設計指針の提案

以上から、リラックス可能な風を想起させる視聴覚刺激や模擬自然風を VR システムに取り入れることで、ユーザに対するリラックス効果を実際に高められると考えられる。例えば、風を利用したリラクゼーション装置を作成する際には、自然を感じられるバーチャル環境の映像や音を追加することを検討できる。さらに、VR 体験中に模擬自然風を送風することも、リラックス効果の誘発に有益であると考えられる。

#### 6.5.5 本研究の制限

##### バーチャル環境の視聴覚刺激

本研究では環境の明るさ感や音量を統一したものの、環境の外見に関しては、屋外・屋内といった種類の違いに加えて、広さや置かれている物体などの違いが存在した。例えば、屋外環境では多量の草が揺れている映像が無限に続いていたのに対し、屋内環境は比較的単調な壁や机等で区切られた簡素な空間だった。また、無地環境には注意を引く視覚刺激や聴覚刺激がほとんどなかった。Spence らは、ベーコンの焼ける音を聞く場合と鶏の鳴き声を聞く場合とでアイスクリームの味の評価が異なった例を挙げ、聴覚刺激によって特定の味の要素に注意が引きつけられる効果があると考察した [208]。翻って考えると、本研究の屋外環境・屋内環境では風を想起させる映像や音を再生したことから、風に注意が向きやすい状況であったと考えられる。一方で、無地環境の場合は視覚刺激と聴覚刺激が乏しく、風に関する手がかりがない状態であった。全ての条件で風の印象を尋ねるアンケートを行なったことから風に対する注意はいずれの条件でも向いていたと考えられるが、風に必ずしも注意が向かない状況下や、風以外の物体や現象にユーザが集中している状況下に対しては本研究の知見を一般化できない。今後の研究として、視覚刺激や聴覚刺激による注意の誘導をより精緻に検証し、風に注意が向く場合、向かない場合においてリラックス効果に違いがあるかどうかを検証することが考えられる。

本研究で用いたバーチャル環境は全て、Unity のコンピュータグラフィックスによって物体の質感に大きな違いがないように制作したものである。ただ、外観の詳細度の違いからリアリズムが異なる印象を与えた可能性はあると考えられる。これは、主に環境に配置する視覚的要素の違いから生じている。すなわち、屋外環境では精細な草原の外見を再現したのに対し、屋内環境では壁や机など平面的な表面が多く、また無地環境では無機質な床だけが存在した。本研究では印象や感情の評価を主眼としており現実感による影響の検証は目的としなかったが、こうした VR 環境の外観の差による没入感の変化があった可能性はある。ただ、臨場感と感情反応との関係に関するいくつかの研究によれば、幸福やリ

ラックスといった感情は、恐怖や不安といった覚醒度の高い感情よりもVRの没入感に影響を受けにくいという結果が得られている [209]。本研究の実験はリラックスした感情を誘発する状況下で行われたため、この結果に従えば没入感による感情への影響は小さいと推定される。バーチャル環境の種類と現実感の双方を制御した対照実験が実施できれば、こうした臨場感とリラックス効果の関係をさらに明らかにできると期待される。

自由回答の結果では、視覚・聴覚・風覚刺激の間の違和感を指摘する参加者もいた。VR映像、音、風は別々に制作したものであるため、例えば草の揺れと風の強度など細かい点では同期していなかった。こうした齟齬を減少させるには、ファンの風速を映像に合わせて制御したり、風に合わせた映像や音の自動生成といった手法を用い、多感覚刺激のゆらぎを同期させる方針が考えられる。また、より効果的な風のVR体験を設計するために、様々なバーチャル環境をより体系的に探索することも興味深い。

### 模擬自然風および快適性

本研究では、快適な広範囲の模擬自然風をベースとして快適性の向上を検証し、他の種類の風刺激については検証しなかった。したがって、風刺激のバーチャル空間の印象や感情に及ぼす影響が、扇風機やエアコンディショナなど別の送風装置の風にも当てはまるかどうかは不明である。特に、実際の風が人工的に感じられる場合には、ユーザは屋外のバーチャル環境より屋内のバーチャル環境を体験した場合に、風と視聴覚刺激が一致する印象を受けると考えられる。こうした条件でも、屋外のバーチャル環境を体験させた場合に風の快適性が向上するかどうかは自明ではなく、検証が求められる。また、実験が夏季に行われたため参加者は風による涼しさを感じ、風の快適さを過大に評価した可能性がある。

本研究では温熱環境と着衣の条件を快適範囲に統制したため、温熱快適性の差については調査しなかった。しかし、温熱快適性もリラックスを目的とするならば重要な要素である。例えば、日常生活で冷たすぎる冷房の風に不快感を感じる人が存在する。温熱快適性の異なる条件下における視聴覚刺激や風刺激による効果の評価は、次なる研究の展開として検討に値する。

## 6.6 本章の結論

本研究では、様々なバーチャル環境を表す視聴覚刺激が風のリラックス効果に及ぼす影響を検討した。屋外環境、屋内環境、無地環境の視聴覚刺激を制作し、参加者が広範囲の模擬自然風とともにバーチャル環境を体験する実験を行った。その結果、視聴覚刺激が風の快適感や開放感、感情の快適度に影響することが明らかになった。模擬自然風の刺激によって、バーチャル空間の印象や感情の快適度が改善した。特に、模擬自然風のリラックス効果は心電信号からも確認された。

風刺激を用いたリラクゼーションシステムは、快適な視聴覚体験も提供できれば、より効果的になると考えられる。また、VRを用いたリラクゼーション手法に快適な風の刺激を組み込むことも有益であろう。今後の研究では、HMDを使用しない実生活の環境でも同様の効果を実現したり、多感覚刺激により人工の風から感じる不快感を軽減したりすることが考えられる。

## 第7章

# 結論

### 7.1 本研究の成果および知見

本研究では、クロスモーダル効果を利用して人間の風知覚を変化させる手法を提案し、風知覚の様々な要素がどのように変化するか検証することを目的とした。

第3章では、風知覚の主要な要素である風向、風速、風温、および風と密接に関係する風の快適感を研究対象とすることを述べた。次に、風から直接の感覚刺激を得られるモダリティには制限があるという特徴を踏まえて、風の発生や作用を間接的に想起させる刺激によって風知覚のクロスモーダル効果を誘発する手法を提案した。提案した刺激の設計方針の例として、風向を示唆する VR 映像と立体音による風向知覚変化の研究の手法や結果を述べた。

第4章では、強風による衣服の振動を再現する装置 WearSway を提案し、実際の風と WearSway、またアバタの服が揺れる VR 映像を組み合わせて行った2つの実験について報告した。最初の実験では、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。2番目の実験では、アバタの衣服が揺れる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一方で、臨場感を高める効果があることが示された。

第5章では、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る手法を提案し、風源や風の視覚効果、アバタの手という3種類の部位それぞれの色変化の効果を比較した実験について報告した。実験の結果、青色の視覚刺激によって常温風の風温が低く、赤色の視覚刺激によって温風の風温が高く知覚される効果が示された。常温の風と赤色など、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。

第6章では、屋外や屋内などの異なる周囲環境を想起させる VR 映像による、風の印象や感情の変化を検証した実験について報告した。広範囲に対する模擬自然風とともに、屋

外を表すバーチャル環境を提示したところ，風の快適感や開放感，感情の快適度が改善された．また，模擬自然風によっても感情が改善することが質問紙と生体情報の両方から確認された．

## 7.2 総合考察

### 7.2.1 実現した風知覚変化

本研究および関連の深い先行研究で明らかになった，風知覚の変化現象を図 7.1 にまとめる．風向知覚については，2 つの対向する風源によって最大  $90^\circ$  までの知覚変化が生じ，視聴覚刺激によって提示した風向と知覚された風向の絶対誤差の中央値は  $34.8^\circ$  だった [22]．風速知覚については，衣服の振動によって約  $7\text{ m/s}$  の風の風速が約 1.47 倍強く知覚される効果がみられた．風速が弱く感じられる効果は示されなかったが，西牧らの研究では  $0.68\text{ m/s}$  と弱い風であれば視覚刺激によって約 0.5 倍まで弱く知覚されることが明らかになっている [23]．風温知覚については，色の変化によって温風が実際より  $1^\circ\text{C}$  から  $2^\circ\text{C}$  前後温かく，あるいは常温風が実際より  $2^\circ\text{C}$  前後冷たく知覚される効果がみられた．一方で，温風を冷たく・常温風を温かく知覚させるには，実際の風の温度イメージに合致する視覚刺激の考案が今後必要であることが分かった．風の印象については，屋外を表すバーチャル環境によって風の快適感や開放感が向上した．

風向，風速，風温，および風の印象に関する知覚それぞれの変化の生起が確認され，本研究の目的であるクロスモーダルな風覚提示が達成されたといえる．これまでの風覚ディスプレイにおいて物理的な風の特性を制御することで表現されてきた風向，風速，風温は，

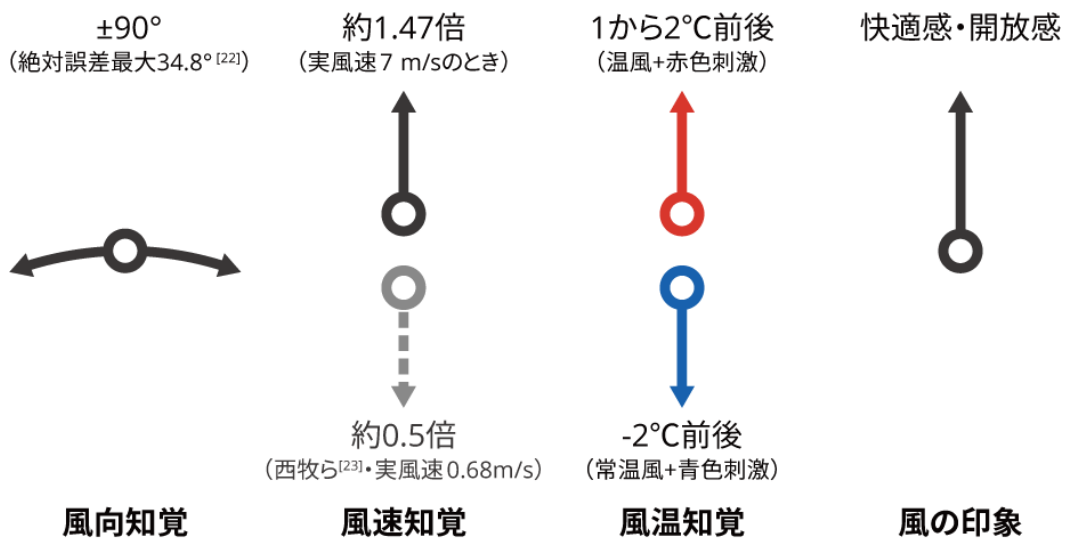


図 7.1: 本研究におけるクロスモーダル効果による風知覚変化のまとめ

クロスモーダル効果を用いた知覚変化によっても提示可能であることが解明された。

ただし、本研究の範囲では発生が確かめられていない種類の風知覚変化もある。例えば、7m/s程度の風の風速が実際より弱く感じられる効果はみられなかった。西牧らは、実際の風刺激の強度が強いと、逆効率の法則に従い多感覚統合の効果が弱まると考察した [23]。こうした機序を考慮すると、風を実際より弱く知覚させる手法として、1つには風速の小さい実風のみを使用することが考えられる。また、これまで用いてきた弱い風を示唆する視覚刺激よりも多感覚統合における影響が強い感覚刺激を考案できれば、実風が強い場合でも風速知覚変化の生起が実現する可能性もある。例えば、圧覚刺激の消失を示唆する映像を用いた圧覚の隠消現実感 (diminished reality; DR) [210] の手法を応用することが考えられる。風温知覚変化の実験では生起しなかった、常温風が実際より温かく知覚されたり温風が実際より冷たく知覚されたりする現象に関しても、それぞれ冷覚・温覚の知覚が抑制されることと捉えれば DR の手法を用いるアプローチも検討に値する。

風の印象については、向上する方向の変化のみ目的とし、快適感などを低下させる手法は必要になるケースが少ないと考え取り扱わなかった。ただ、ホラー表現を用いた VR コンテンツ [211] や恐怖症治療のための曝露療法 [212] など、恐怖などのネガティブな感情の制御を目的としたシステムも存在する。こうした目的によっては、クロスモーダル効果によって不快な風を知覚させる手法の研究が有益となりうる。

## 7.2.2 風知覚変化を誘発する感覚刺激

本研究で風知覚の変化を引き起こした感覚刺激を図 7.2 に整理した。身体やアバタ、風そのもの、風源、周囲環境など様々な部分において、風の状態を示唆する刺激の有用性が明らかになった。第3章で仮説を立てたように、風の発生や作用を間接的に想起させる刺激を用いることで、多様な感覚刺激を風知覚変化のために利用できることが解明された。

これらの感覚刺激の中には、ユーザの身体や身体近傍空間における刺激から、ユーザと離れており直接触れない箇所の刺激まで含まれている。クロスモーダル効果には、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強まるという spatial rule [213] が存在しているが、こと風に関しては、少なくとも風との関連が示唆されていれば幅広い位置からの感覚刺激が風知覚変化を引き起こすといえる。このように幅広い感覚刺激の種類が手法として許容されていることで、本研究の手法を応用する際に VR コンテンツの文脈に応じて異なる手法を選択できると考えられる。

本研究では検証していない感覚刺激によっても、風知覚が変化する可能性はある。例えば、風源に関連する感覚刺激による風速知覚への影響は未検証であるが、例えば風源のサイズや回転速度、動作音を変化させて実際より強い風や弱い風の発生を示唆する手法を取りうる。刺激のモダリティに関しても、風速知覚や風温知覚の実験では用いなかった聴覚

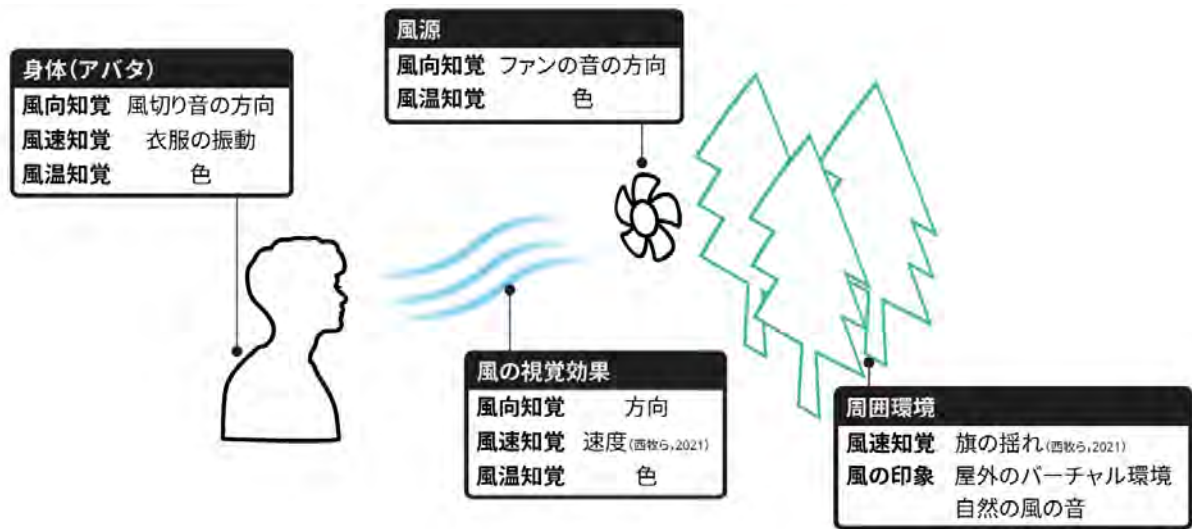


図 7.2: 本研究におけるクロスモーダル効果による風知覚変化を誘発する刺激のまとめ

刺激を，風の音の音量変化によって異なる風速を表現したり，音と温度のクロスモーダル対応 [214] を活用して風温知覚変化を試みたりといった研究が可能である．

### 7.2.3 風知覚変化手法の組み合わせ

本研究で検証した知覚変化の手法は，複数を組み合わせで使用可能であるのかどうか検討する．総じて，図 7.2 に示した感覚刺激は，変化させたい風知覚の要素ごとに異なるモダリティや種類に分かれており，相互に干渉せず使用できるケースが多いと考えられる．例を挙げれば，風の視覚効果の方向，速度，色を同時に変化させ，風速・風向・風温の知覚を同時に変化させる試みが可能である．

実際に，西牧らの研究では実際の風向と映像中の風向がずれていても風速知覚の変化が生起し，その原因として風向知覚変化も同時に発生していた可能性が指摘されている [23]．また，本研究においても，風温知覚の変化を検証する実験（第 5 章）では風速知覚が実風温によって有意に変化し，自由記述アンケートにおいても風の強弱を感じたとの意見が見られるなど，複数種の風知覚の変化が同時に発生したことを窺わせる結果が得られた．これらの結果から，本研究で明らかにした風向・風速・風温といった知覚の変化手法は独立に組み合わせで使用できると推察できる．ただし，変化させる感覚刺激の種類が複数に渡っても，単体で用いた場合と同じ強度でクロスモーダル効果が生じるかどうかについては検証が必要と考えられる．

### 7.2.4 実風速と風知覚変化の関係

風速は、微風から台風のような猛烈な風まで風の様相を大きく変えるパラメータである。本項では、風知覚変化に関する先行研究や本研究で様々な風速のもと実験が行われた、風速知覚変化に関する知見を総合して考察する。

表 7.1は、西牧らの研究 [23] および本研究（第4章）の実験結果をまとめたものである。使用した視覚刺激や送風の手法、実験手法に違いがあることには留意が必要であるものの、無風から 11 m/s までの範囲の実風速で風速知覚が変化するかどうかの検証結果が得られている。表によれば、風速が強まるにつれて、衣服振動については 11 m/s で、映像については 2.31 m/s でそれぞれ知覚の変化がみられなくなる。したがって、衣服振動についても映像についても、一定以上強い風に対しては知覚を変化させる効果が弱まること、衣服振動の方が映像より広い範囲の実風速で風速知覚を変化させたことが読み取れる。

風速が強い場合にクロスモーダル効果による知覚変化が起きにくくなる要因としては、第4章で考察したように、刺激の強度が弱いほど感覚統合の効果が強まる「逆効率の法則 [149]」が関係していると考えられる。風向や風温といった他の風知覚変化についても、実風速が強まれば効果がみられなくなる可能性はある。反面、風速が 1 m/s 程度と弱い範囲であれば、多感覚刺激による風知覚変化が起きやすくなると考えられ、両者を組み合わせた風速知覚の変化も実現する可能性がある。

また、さきに述べたとおり、衣服振動を用いれば映像では風速知覚が変化しない実風速 7 m/s でも知覚変化の効果がみられた。第4章では、衣服振動がはっきりして信頼性の高い刺激であるため、クロスモーダル効果において優位に統合されやすいことが原因ではないかと考察した。衣服振動以外の刺激を知覚変化に用いる際も、強い風に対しての適用を目的とするのであれば、その刺激の明瞭さや信頼性を高める工夫が求められるであろう。

表 7.1: 風速知覚変化の実験で使用された実際の風速と結果の関係

	衣服振動の効果	映像の効果
無風	風速を強く知覚する（第4章）	
0.68 m/s, 1.48 m/s		風速を弱く知覚する [23]
2.31 m/s		変化がみられない [23]
7 m/s	風速を強く知覚する（第4章）	変化がみられない（第4章）
11 m/s	変化がみられない（第4章）	

### 7.2.5 感覚刺激と送風する部位の関係

本研究の実験では、それぞれ送風した身体部位が異なっていた。例えば、風向知覚変化の実験では、全周囲からの風向について検証するため、全周の皮膚が露出していることの多い頭部を送風対象とした。風速知覚変化・風温知覚変化の実験では、アバタの視覚情報を変化させる手法を検証するため、自然に目に入りやすい腕の見た目の変化と腕への送風を用いた。風の印象変化の実験では、周囲環境の視聴覚刺激を変化させるのみであったため、特に送風する範囲を制限せず全身に風を提示した。

風覚ディスプレイの既存研究においては、第 2.3.2 項で指摘したように頭部に送風しているものが多く、他に腕や上半身などがある。頭部のみに送風する場合、全周囲から送風できる一方で、ユーザの身体（アバタ）における視覚刺激を同様に頭部に表示してもユーザの視界に入りにくい。ただし、視覚以外の聴覚刺激や触覚刺激を用いたり、風の発生や周囲環境に対する風的作用を表す情報を用いれば風知覚変化を誘起可能である。一方、腕や全身といったユーザの目に入りやすい部位へ送風している場合には、身体近傍に対する風的作用を表す視覚情報も使用できる。総合すると、本研究では送風する身体部位と矛盾がなく、かつ刺激が容易に知覚される位置に多感覚刺激を提示するようにした。

### 7.2.6 クロスモーダル効果による風知覚変化を検証する実験における工夫

本研究では、風知覚変化を誘発するクロスモーダル効果に関する様々な実験を行った。それらに共通する工夫や、残された課題に関して議論する。

#### 風刺激が実際に変化する条件による主観評価バイアスの抑制

本研究では、クロスモーダル効果を測定する際には実験参加者が知覚した内容を数値等でそのまま回答させる評価方法を主に採用した。先行研究で風の知覚を検証する際には主観評価を用いたものが大半であったため、本研究でも主観評価を引き続き用いた。ただ、こうした主観評価には、実際には知覚が変わっていないにも関わらず仮説を推測して答えたり、逆に知覚が変化したにも関わらず実際の物理現象を推測して答えたりといったバイアスが混入する余地がある。こうしたバイアスへの対処として、本研究で行った風知覚変化に関する実験では、物理的に風刺激が変化する条件が必ず含まれるようにした。実験条件間で風刺激が実際に変化的することで、参加者は実際の風の変化とクロスモーダル効果による知覚変化の双方を無作為に体験することとなり、仮説や実際の物理現象を推測して回答することが難しくなる。これらの工夫により、参加者の回答に実験実施者の期待が反映される可能性を抑制できたと考えられる。

### 実験参加者が持つ事前知識や先入観の統制

実験参加者が事前に仮説や装置について知識や先入観を持ってしまうことも、主観評価の結果に影響しうる。本研究では、実験参加者が仮説を知らないよう研究室外から実験参加者を募り、同内容の実験を同一人物に対して2度以上実験することは避けた。また風向知覚変化や風の印象・感情変化に関する実験では、実験装置を実験参加者が目にすることで風に対する先入観を持ってしまわないよう、実験前には装置を取り外して隠す、パーティションで覆うなどの対策を実施した。

### 主観指標以外の評価手法の導入

以上のような対策を行なっても、実験参加者が実験中の体験から仮説を推測してしまうなどして回答にバイアスがかかる可能性が皆無とは言えない。Slaterらは、VR体験における重要な指標の1つである臨場感（presence）を評価する際、アンケートだけでなく身体反応や生体情報といった客観的な評価手法を組み合わせることを提案した [215]。本研究においては、第6章の実験で心電、呼吸、脳波を取得しリラックス度等の分析に用いた。他の知覚変化の実験においても、同様に現実の刺激で起こりうる身体反応や生体情報の変化がみられるかどうかを検証することで、結果が客観的に裏付けられると考える。

### クロスモーダルな知覚変化に関する確信度の評価

本研究で扱ってきた知覚変化は、実際の風知覚と区別がつかないほど明確に知覚されるのか、はっきりしないがそう知覚したように思われる程度であるのかという疑問がある。すなわち、クロスモーダル効果に対する確信度を評価できるとよいものの、知覚を定量的に回答させるだけでは確信度を区別できない。直接確信度を問うたものではないが、第4章や第5章の実験では、風が現実の風と感じられた度合いである「風の現実感」を質問した。その結果、風と共に強風による衣服の揺れを再現した触覚刺激を提示した場合や、実風の温度と色から想起する温度イメージが食い違う場合には風の現実感が有意に低下した。したがって、クロスモーダル効果による風知覚変化が生起する状態では、現実の風単体よりは風知覚の明瞭度が低い場合があると考えられる。

クロスモーダル効果の確信度を評価したい場合、実験前にどのように知覚が変化するかという仮説を伝え、その変化がどの程度確かに知覚されたかを質問する方法も考えられる。ただし、本項で述べたように、仮説を伝えることで先入観によって回答にバイアスがかかる可能性があり、この懸念が生じないような実験手法を考案することが今後の課題である。

### 実験室内の気流の統制

実験装置以外の気流による知覚への影響を避けるため、送風していない状態では実験参加者の周辺を無風に近い状態とする必要がある。本研究の実験においては、窓を閉め空調を実験中停止させる、あるいは実験装置から離れた位置の空調のみ動作させカーテンで部屋を仕切るという対策を実施した。加えて、熱線式風速計を用いて室内の気流が無風に近いことを確認したうえで実験を行った。

### 温熱環境の統制

温熱環境も、風知覚に影響を及ぼす要因の1つである。例えば、冷風と温風では風速の知覚に差が生じることが知られている（竹ノ内らの実験 [50] および本研究の第5章）。また、快適でない温熱環境は実験参加者にストレスを与え、倫理的配慮上も問題がある。

恒温室等ではない通常の実験室で温湿度を完全に一致させることは難しいものの、第4章、第5章、第6章の実験では測温冷感申告（PMV） [87] を快適範囲である-0.5から0.5に収める考え方をを用いた。PMVは気温・湿度・風速・着衣・活動量から算出でき、例えば実験内容や季節から風速・着衣・活動量が決まっていれば快適範囲となるような室温と湿度の範囲を決定できる。第6章の実験では、全身に送風した際の快適性を評価するために、当日の着衣や活動量を実験開始時に参加者間で同等にすることで温熱快適性が統一されるようにした。

## 7.3 本研究の応用と展望

本研究の成果から考えられる応用と今後の展望を述べる。

### 7.3.1 風覚の利用拡大

風知覚の変化を利用することで、これまで物理的に風を再現するために使用されていた風覚ディスプレイの装置を簡略化できる。簡易な送風装置であっても多様な風覚を提示できれば、VRコンテンツにおいて幅広く風の表現を導入でき、臨場感や移動感の増強、VR酔いの軽減などに応用できると見込まれる。

特定の活動や職業においては、風の知覚から情報を読み取る必要が生じる。例えば、熟練した船員は風を正確に知覚するよう訓練され、実際に一般の人より優れた風向知覚能力を持っている [42]。風知覚変化を用いてこうした活動の訓練を行う場合には、本研究の結果で観察されたような知覚量のばらつきや個人差の影響を抑制し、正確な風知覚を実現する必要がある。一方で、消防訓練において炎の熱さを伝える [57, 115] など、知覚の正確性

より場面の状況を伝えることが重視される目的に対しては、状況に適した風知覚を生み出すために知覚変化を有効活用できると考えられる。

### 7.3.2 快適な風体験の実現

VR 利用中以外の場面でも、空調やリラックス効果のために風の技術が用いられている。風向、風速、風温の知覚や快適性を変化させる技術によって、日常生活や仕事などの場面で温熱快適性や気流の快適性を高める多感覚刺激提示システムの実現にも繋がる可能性がある。例えば、風速知覚を弱めたり、風の冷たさの知覚を抑制したりできれば、過度な局所的気流による不快感であるドラフト感 [90] の軽減が可能となる。ひいては、ストレスの緩和や省エネルギーといった目標の達成に対して、クロスモーダル効果を用いた風覚刺激提示の寄与が期待される。

### 7.3.3 ユーザと風のインタラクションを考慮した風知覚変化手法の研究

本研究では、ユーザの姿勢が固定された状況で、ユーザがインタラクションをせずとも刺激が変化する受動的な風体験を扱った。しかし、実際の VR アプリケーションではユーザが移動や環境とのインタラクションを行う場合は多い。そうした場面を考慮すれば、ユーザの動作に対する視覚的フィードバックを変化させる pseudo-haptics や、ユーザの身体の動きにくさを提示するなど、新たな風知覚変化の手法が考案できる。ユーザのインタラクションを考慮した手法は効果的かどうか、また本研究で提案してきた受動的な多感覚刺激提示と組み合わせ可能であるのかに関する研究が望まれる。

一方で、ユーザの身体が動くことによって風に対する方向や風の当たる位置、風速等が変化する可能性がある。風知覚変化を利用している間にこうした風の変化が生じると、違和感が生じて風知覚変化の効果が弱まることも考えられる。したがって、ユーザの動きに対応して提示する感覚刺激の強度や位置を変化させる補償を行うなどの工夫も必要になる。

### 7.3.4 ウェアラブルデバイスを用いた全身への風覚提示

本研究の実験において使用した送風装置は床や机に固定されていた。しかし、ユーザが動き回ることを考慮すると、実践的な風覚ディスプレイはユーザの身体に固定されたウェアラブルデバイスであることが望ましい。ウェアラブルな風覚ディスプレイはすでに提案されているものの、第 2.3.2 項で指摘したように、送風可能な範囲が限られることや小型・軽量化が課題である。第 4 章では、強風による衣服振動を再現する装置によって風を知覚する範囲が衣服に覆われた部分にも拡大することが明らかになった。加えて、風を用いない触覚デバイスによって風を知覚させる擬似風覚の手法も提案されている [68]。これらの

手法を活用することで、ウェアラブルな風覚ディスプレイの装置を小型化し、さらに広い範囲への風覚提示も実現する道筋が開けると期待できる。全身への風覚提示を実現するにあたっては、装着する装置を可能な限り簡易に保つ必要性から、全身への風であると感じられるための最適な装置の配置も解明する必要がある。

### 7.3.5 他の感覚刺激への手法の応用

本研究では、目に見えない風を対象にクロスモーダル効果を生じさせるため、風の発生や作用を間接的に表す刺激というアプローチを提案した。このような考え方は、風のほかにも視覚や聴覚の刺激では直接の提示が難しい物体の密度や輻射熱の強さ、まぶしい光などを VR で表現する際にも役立つ可能性がある。例えば、松山らが提案したエージェントの表情による擬似力覚の生起 [216] は、引っ張り力の情報を表情から間接的に想起させる視覚刺激を用いたものと解釈できる。また、細井らが提案した強い光に伴う残像や反射的な瞬きを再現することによって眩しさを知覚させる手法も、明るい光による身体反応を模擬して知覚変化を誘発するものである [217]。このように、物体や現象そのものの感覚刺激だけでなく、物体や現象による環境や身体への作用を示唆する刺激を用いる考え方は、クロスモーダル効果の研究における手法の立案に幅広く貢献できると見込まれる。

## 参考文献

- [1] Morton L. Heilig. Sensorama simulator, Aug 1962, US Patent 3050870.
- [2] 小木哲朗, 廣瀬通孝. 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, pp. 1586–1592, 1995. DOI: <https://doi.org/10.1299/kikaic.61.1586>
- [3] Taeyong Moon and Gerard J. Kim. Design and evaluation of a wind display for virtual reality. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '04, pp. 122–128. ACM, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1145/1077534.1077558>
- [4] Jouke C. Verlinden, Fabian A. Mulder, Joris S. Vergeest, Anna de Jonge, Darina Krutiy, Zsuzsa Nagy, Bob J. Logeman, and Paul Schouten. Enhancement of presence in a virtual sailing environment through localized wind simulation. *Procedia Engineering*, Vol. 60, pp. 435–441, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.07.050>, 6th Asia-Pacific Congress on Sports Technology (APCST)
- [5] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, Shienny Karwita, David Tolley, and Ellen Yi-Luen Do. Ambiotherm: Enhancing sense of presence in virtual reality by simulating real-world environmental conditions. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 1731–1742. ACM, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025723>
- [6] Michael Rietzler, Katrin Plaumann, Taras Kränzle, Marcel Erath, Alexander Stahl, and Enrico Rukzio. VaiR: Simulating 3D airflows in virtual reality. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 5669–5677. ACM, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3026009>
- [7] Alexander Wilberz, Dominik Leschtschow, Christina Trepkowski, Jens Maiero, Ernst Kruijff, and Bernhard Riecke. Facehaptics: Robot arm based versatile facial haptics for immersive environments. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–14. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376481>
- [8] Kayoko Murata, Takeharu Seno, Yoko Ozawa, and Shigeru Ichihara. Self-motion perception induced by cutaneous sensation caused by constant wind. *Psychology*, Vol. 5, No. 15, pp. 1777–1782, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4236/psych.2014.515184>
- [9] Yujin Suzuki, Vibol Yem, Koichi Hirota, Tomohiro Amemiya, Michiteru Kitazaki, and Yasushi Ikei. Airflow presentation method for turning motion feedback in VR environment. In Yasuaki Kakehi and Atsushi Hiyama, editors, *ICAT-EGVE 2019 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments - Posters and Demos*. The Eurographics Association, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2312/egve.20191295>
- [10] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, Nguyen Thi Ngoc Tram, Koon Chuan Raymond Koh, David Tolley, Shienny Karwita, Lin Lien-Ya, Yan Liangkun, Kala Shamaiah, Chow Eason Wai Tung, Ching Chiuan Yen, and Ellen Yi-Luen Do. Season traveller: Multisensory narration for enhancing the virtual reality experience. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, pp. 1–13. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3173574.3174151>
- [11] David Tolley, Thi Ngoc Tram Nguyen, Anthony Tang, Nimesha Ranasinghe, Kensaku Kawauchi, and Ching Chiuan Yen. Windywall: Exploring creative wind simulations. In *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '19,

- pp. 635–644. ACM, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3294109.3295624>
- [12] M. Suzuki and A. Matsuura. Windtherm: A wearable VR device that provides temperature-controlled wind. *Proceedings of the Virtual Reality International Conference (VRIC '19)*, pp. 39–44. Laval Virtual, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20870/IJVR.2019..0.2920>
- [13] Jaeyeon Lee and Geehyuk Lee. Designing a non-contact wearable tactile display using airflows. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '16*, pp. 183–194. ACM, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2984511.2984583>
- [14] Tomosuke Maeda and Tetsuo Kurahashi. Haptiple: A wearable, modular and multiple haptic feedback system for embodied interaction. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies, SA '19*, pp. 19–20. ACM, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3355049.3360519>
- [15] 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. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(00\)00241-5](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(00)00241-5)
- [16] Anatole Lécuyer. Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39–53, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1162/pres.18.1.39>
- [17] Veikko Jousmäki and Riitta Hari. Parchment-skin illusion: sound-biased touch. *Current biology*, Vol. 8, No. 6, pp. R190–R191, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(98\)70120-4](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(98)70120-4)
- [18] Aiko Nambu, Takuji Narumi, Kunihiro Nishimura, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Visual-olfactory display using olfactory sensory map. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 39–42, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444817>
- [19] Takuji Narumi, Shinya Nishizaka, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Augmented reality flavors: Gustatory display based on edible marker and cross-modal interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp. 93–102. ACM, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1145/1978942.1978957>
- [20] 伊藤亘輝, 小野龍一, 羽田久一. VR空間で全周囲から風を感じる為の送風機の配置の検討. 情報処理学会研究報告, Vol. 2019-GN-106, No. 48, pp. 1–5, Jan 2019.
- [21] Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Manipulation of the perceived direction of wind by cross-modal effects of wind and three-dimensional sound. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 622–627, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/WHC.2019.8816111>
- [22] 伊東健一, 伴祐樹, 割澤伸一. 視聴触覚間のクロスモーダル効果による風向知覚操作. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 26, No. 4, pp. 277–287, 2021. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.4\\_277](https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.4_277)
- [23] 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. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.1\\_14](https://doi.org/10.18974/tvrsj.26.1_14)
- [24] Takuji Narumi, Yuki Ban, Takashi Kajinami, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Augmented perception of satiety: Controlling food consumption by changing apparent size of food with augmented reality. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '12*, pp. 109–118. ACM, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1145/2207676.2207693>
- [25] Shigeo Yoshida, Tomohiro Tanikawa, Sho Sakurai, Michitaka Hirose, and Takuji Narumi. Manipulation of an emotional experience by real-time deformed facial feedback. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference, AH '13*, pp. 35–42. ACM, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1145/2459236.2459243>
- [26] Yuka Sato and Ryoko Ueoka. Investigating haptic perception of and physiological responses to air vortex rings on a user's cheek. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '17*, pp. 3083–3094. ACM, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025501>
- [27] S. Noel, S. Dumoulin, T. Whalen, M. Ward, J.A. Stewart, and E. Lee. A breeze enhances presence in a virtual environment. In *The 3rd IEEE International Workshop on Haptic, Audio and Visual Environments and Their Applications*, pp. 63–68, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/HAVE.>

- 2004.1391883
- [28] L. Deligiannidis and R.J.K. Jacob. The VR scooter: Wind and tactile feedback improve user performance. In *3D User Interfaces (3DUI'06)*, pp. 143–150, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1109/VR.2006.131>
- [29] 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. ヒューマンインタフェース学会研究報告集 : human interface, Vol. 8, No. 3, pp. 35–40, Jun 2006.
- [30] Mitsuru Minakuchi and Satoshi Nakamura. Collaborative ambient systems by blow displays. In *Proceedings of the 1st International Conference on Tangible and Embedded Interaction*, TEI '07, pp. 105–108. ACM, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1145/1226969.1226992>
- [31] Sylvain Cardin, Daniel Thalmann, and Frederic Vexo. Head mounted wind. In *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, pp. 101–108, 2007.
- [32] 澤田枝里香, 淡路達人, 森下圭介, 古川正紘, 有賀友恒, 木村秀俊, 藤井智子, 武市隆太, 清水紀芳, 井田信也, 常磐拓司, 杉本麻樹, 稲見昌彦. 風を利用した入出力インタフェース : ビュー・ビュー・view(「テレイマージョン」特集). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 3, pp. 375–383, 2008. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.13.3\\_375](https://doi.org/10.18974/tvrsj.13.3_375)
- [33] 小坂崇之. Windstage(winddisplay & windcamera). 芸術科学会論文誌, Vol. 8, No. 2, pp. 57–65, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3756/artsci.8.57>
- [34] Yuichiro Kojima, Yuki Hashimoto, and Hiroyuki Kajimoto. A novel wearable device to present localized sensation of wind. In *Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE '09, pp. 61–65. ACM, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1145/1690388.1690399>
- [35] Sandip D. Kulkarni, Mark A. Minor, Mark W. Deaver, Eric R. Pardyjak, and John M. Hollerbach. Design, sensing, and control of a scaled wind tunnel for atmospheric display. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 17, No. 4, pp. 635–645, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2113353>
- [36] 中野拓哉, 佐治翔太, 吉岡有哉, 河地祐樹, 柳田康幸. 単発のファンを用いた人の頭部前面における風向知覚特性の測定 (< 特集 >VR 心理学 5～脳機能計測と VR～). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 1, pp. 37–44, 2013. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.18.1\\_37](https://doi.org/10.18974/tvrsj.18.1_37)
- [37] Koichi Hirota, Yoko Ito, Tomohiro Amemiya, and Yasushi Ikei. Generation of directional wind by colliding airflows. In *2013 World Haptics Conference (WHC)*, pp. 509–514, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/WHC.2013.6548460>
- [38] Max Rheiner. Birdly an attempt to fly. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '14. ACM, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1145/2614066.2614101>
- [39] 中野拓哉, 吉岡有哉, 柳田康幸. 風向知覚特性に対する風源配置精度と風速分布局所性の影響 (< 特集 > ハプティックコンテンツ). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 551–557, 2014. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.19.4\\_551](https://doi.org/10.18974/tvrsj.19.4_551)
- [40] Felix Hülsmann, Nikita Mattar, Julia Fröhlich, and Ipke Wachsmuth. Simulating wind and warmth in virtual reality: Conception, realization and evaluation for a CAVE environment. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, Vol. 11(2014), No. 10, 2014. DOI: <https://doi.org/10.20385/1860-2037/11.2014.10>
- [41] Sandip D. Kulkarni, Charles J. Fisher, Price Lefler, Aditya Desai, Shanthanu Chakravarthy, Eric R. Pardyjak, Mark A. Minor, and John M. Hollerbach. A full body steerable wind display for a locomotion interface. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 10, pp. 1146–1159, Oct 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2015.2424862>
- [42] Joost P. Pluijms, Rouwen Cañal-Bruland, Wouter M. Bergmann Tiest, Fabian A. Mulder, and Geert J. P. Savelsbergh. Expertise effects in cutaneous wind perception. *Attention, Perception, & Psychophysics*, Vol. 77, No. 6, pp. 2121–2133, Aug 2015. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0893-6>
- [43] Mi Feng, Arindam Dey, and Robert W. Lindeman. An initial exploration of a multi-sensory design space: Tactile support for walking in immersive virtual environments. In *2016 IEEE Symposium on*

- 3D User Interfaces (3DUI), pp. 95–104, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/3DUI.2016.7460037>
- [44] Takuya Nakano and Yasuyuki Yanagida. Conditions influencing perception of wind direction by the head. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 229–230, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/VR.2017.7892260>
- [45] 斉藤佑祈, 室崎之典, 小野龍一, 中野亜希人, 羽田久一. ヘッドマウントディスプレイを装着した状態での風向知覚特性の測定. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2017 論文集, 第 2017 巻, pp. 138–144, Sep 2017.
- [46] Masato Kurosawa, Yasushi Ikei, Yujin Suzuki, Tomohiro Amemiya, Koichi Hirota, and Michiteru Kitazaki. Airflow for body motion virtual reality. In Sakae Yamamoto and Hirohiko Mori, editors, *Human Interface and the Management of Information. Interaction, Visualization, and Analytics*, pp. 395–402. Springer International Publishing, 2018.
- [47] 伴野啓介, 伴野明. 気体通過型映像表示装置によって生成される清涼感心理効果. 電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌), Vol. 138, No. 8, pp. 343–353, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1541/ieejsmas.138.343>
- [48] Daniel Gromer, Octávia Madeira, Philipp Gast, Markus Nehfischer, Michael Jost, Mathias Müller, Andreas Mühlberger, and Paul Pauli. Height simulation in a virtual reality CAVE system: Validity of fear responses and effects of an immersion manipulation. *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 12, p. 372, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00372>
- [49] Koichi Shimizu, Gaku Sueta, Kentaro Yamaoka, Kazuki Sawamura, Yujin Suzuki, Keisuke Yoshida, Vibol Yem, Yasushi Ikei, Tomohiro Amemiya, Makoto Sato, Koichi Hirota, and Michiteru Kitazaki. FiveStar VR: Shareable travel experience through multisensory stimulation to the whole body. In *SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality*, SA '18. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3275495.3275502>
- [50] 竹ノ内朝陽, 矢谷浩司. 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. Technical Report 20, Feb 2019.
- [51] Kangsoo Kim, Ryan Schubert, Jason Hochreiter, Gerd Bruder, and Gregory Welch. Blowing in the wind: Increasing social presence with a virtual human via environmental airflow interaction in mixed reality. *Computers & Graphics*, Vol. 83, pp. 23–32, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2019.06.006>
- [52] J. Xu, Y. Kuroda, S. Yoshimoto, and O. Oshiro. Non-contact cold thermal display by controlling low-temperature air flow generated with vortex tube. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 133–138, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/WHC.2019.8816089>
- [53] P. Han, Y. Chen, C. Hsieh, H. Wang, and Y. Hung. Hapmosphere: Simulating the weathers for walking around in immersive environment with haptics feedback. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 247–252, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/WHC.2019.8816140>
- [54] 小笠原健太郎, 坂口正道. 風を用いた温冷覚刺激による人体への影響. 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 5A–05, Sep 2019.
- [55] 伊藤亘輝, 羽田久一. VR 空間で全周から触覚刺激を提示する為の熱源の配置と検討. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2019 論文集, 第 2019 巻, pp. 303–309, Sep 2019.
- [56] David Narciso, Miguel Melo, José Vasconcelos-Raposo, and Maximino Bessa. The impact of olfactory and wind stimuli on 360 videos using head-mounted displays. *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 17, No. 1, feb 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3380903>
- [57] Chongsan Kwon. A study on the verification of the effect of sensory extension through cutaneous sensation on experiential learning using VR. *Virtual Reality*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10055-020-00435-9>
- [58] Wen-Jie Tseng, Yi-Chen Lee, Roshan Lalintha Peiris, and Liwei Chan. A skin-stroke display on the eye-ring through head-mounted displays. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–13. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376700>
- [59] Toki Takeda, Arinobu Nijima, Takafumi Mukouchi, and Takashi Satou. Creating illusion of wind

- blowing with air vortex-induced apparent tactile motion. In *Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '20, pp. 1–7. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3334480.3382811>
- [60] 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. DOI: <https://doi.org/10.12937/ejsise.19.21>
- [61] Chiao-En Hsieh, Yu-Ta Chen, Hao-Chen Wang, Yang-Sheng Chen, Ping-Hsuan Han, and Yi-Ping Hung. Utilizing handheld wind feedback to expand the perception of environmental wind from stationary device. In *ACM SIGGRAPH 2020 Posters*, SIGGRAPH '20. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3388770.3407406>
- [62] Gabriel Giraldo, Myriam Servières, Guillaume Moreau. Perception of multisensory wind representation in virtual reality. In *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 45–53, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00024>
- [63] Eduardo C. Rodrigues, Estevao B. Saleme, and Celso A. S. Santos. A haptic system for switching wind temperatures based on ultrasonic vibrations, peltier elements, and electrical resistances for multisensory applications. In *Proceedings of the Brazilian Symposium on Multimedia and the Web, WebMedia '21*, pp. 73–80. ACM, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3470482.3479638>
- [64] 村上千鶴, 今井洋輔, 配川知之. オフィス環境における模擬自然風の生理的・心理的效果に関する検証. 室内環境学会学術大会講演要旨集, 第 2021 卷, pp. 182–183, 2021.
- [65] Juro Hosoi, Yuki Ban, Kenichi Ito, and Shin'ichi Warisawa. VWind: Virtual wind sensation to the ear by cross-modal effects of audio-visual, thermal, and vibrotactile stimuli. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, SA '21. ACM, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3476122.3484848>
- [66] Chun-Miao Tseng, Po-Yu Chen, Shih Chin Lin, Yu-Wei Wang, Yu-Hsin Lin, Mu-An Kuo, Neng-Hao Yu, and Mike Y. Chen. HeadWind: Enhancing teleportation experience in VR by simulating air drag during rapid motion. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '22. ACM, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1145/3491102.3501890>
- [67] 坂口正道, 竹川和. 小型プロアを用いた内部への送風機能を有する HMD の開発と評価. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2022, pp. 2P2–C06, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmermd.2022.2P2-C06>
- [68] Juro Hosoi, Yuki Ban, Kenichi Ito, and Shin'ichi Warisawa. Pseudo-wind perception induced by cross-modal reproduction of thermal, vibrotactile, visual, and auditory stimuli. *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 4781–4793, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236310>
- [69] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, and Ali Israr. AIREAL: Interactive tactile experiences in free air. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 32, No. 4, July 2013. DOI: <https://doi.org/10.1145/2461912.2462007>
- [70] Y. Yanagida, S. Kawato, H. Noma, A. Tomono, and N. Tesutani. Projection based olfactory display with nose tracking. In *IEEE Virtual Reality 2004*, pp. 43–50, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1109/VR.2004.1310054>
- [71] Keisuke Hasegawa, Liwei Qiu, and Hiroyuki Shinoda. Midair ultrasound fragrance rendering. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1477–1485, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794118>
- [72] Mitsuru Nakajima, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Remote cooling sensation presentation controlling mist in midair. In *2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1238–1241, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/SII46433.2020.9025959>
- [73] Tomoya Sasaki, Richard Sahala Hartanto, Kao-Hua Liu, Keitarou Tsuchiya, Atsushi Hiyama, and Masahiko Inami. Leviopole: Mid-air haptic interactions using multirotor. In *ACM SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '18. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3214907.3214913>
- [74] Matthias Hoppe, Daria Oskina, Albrecht Schmidt, and Thomas Kosch. Odin's helmet: A head-

- worn haptic feedback device to simulate g-forces on the human body in virtual reality. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 5, No. EICS, may 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3461734>
- [75] Yu-Wei Wang, Yu-Hsin Lin, Pin-Sung Ku, Yōko Miyatake, Yi-Hsuan Mao, Po Yu Chen, Chun-Miao Tseng, and Mike Y. Chen. Jetcontroller: High-speed ungrounded 3-dof force feedback controllers using air propulsion jets. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21. ACM, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3411764.3445549>
- [76] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 (編). 触覚認識メカニズムと応用技術-触覚センサ・触覚ディスプレイ-【増補版】. S&T 出版, 2014.
- [77] 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. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.27.1\\_18](https://doi.org/10.18974/tvrsj.27.1_18)
- [78] World Meteorological Organization (WMO). Manual on Codes Volume I.1 Annex II to the WMO Technical Regulations Part A – Alphanumeric Codes, 2011 edition, updated in 2017. WMO-No. 306. World Meteorological Organization (WMO), 2017. DOI: <https://doi.org/10.25607/OBP-109>
- [79] 中村論史, 前田潤滋, 竹内崇, 鶴則生. 突風風洞での基準静圧変動を考慮した圧力計測による切妻屋根物体の表面風圧特性. *風工学シンポジウム論文集*, Vol. 21, pp. 197–202, 2010. DOI: <https://doi.org/10.14887/kazekosymp.21.0.197.0>
- [80] Paul W. Miller, Alan W. Black, Castle A. Williams, and John A. Knox. Quantitative assessment of human wind speed overestimation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 55, No. 4, pp. 1009–1020, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0259.1>
- [81] Duzgun Agdas, Gregory D. Webster, and Forrest J. Masters. Wind speed perception and risk. *PLOS ONE*, Vol. 7, No. 11, pp. 1–8, 11 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049944>
- [82] 窪田英樹, 原子博光, 丸藤睦, 三井健. 「気流感」に関する研究 (その 6) : 気流の刺激閾・弁別閾. *日本建築学会昭和 53 年度秋季大会学術講演梗概集 (計画系分冊)*, pp. 585–586, 1978.
- [83] 窪田英樹. 気流感の因子分析と建築気候. *人間工学*, Vol. 17, No. Supplement, pp. 50–51, 1981. DOI: [https://doi.org/10.5100/jje.17.Supplement\\_50](https://doi.org/10.5100/jje.17.Supplement_50)
- [84] Joseph C. Stevens and Kenneth K. Choo. Temperature sensitivity of the body surface over the life span. *Somatosensory & Motor Research*, Vol. 15, No. 1, pp. 13–28, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1080/08990229870925>
- [85] Hak Min Lee, Chang K Cho, Myung Hwan Yun, and Myun W Lee. Development of a temperature control procedure for a room air-conditioner using the concept of just noticeable difference (JND) in thermal sensation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 22, No. 3, pp. 207–216, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(97\)00009-7](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(97)00009-7)
- [86] World Meteorological Organization (WMO). *The Assessment of Human bioclimate: A limited review of physical parameters*. WMO-No. 331. World Meteorological Organization (WMO), 1972.
- [87] ISO. ISO 7730:2005 ergonomics of the thermal environment — analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.
- [88] M. Tackén. A comfortable wind climate for outdoor relaxation in urban areas. *Building and Environment*, Vol. 24, No. 4, pp. 321–324, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(89\)90026-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(89)90026-7)
- [89] D. Walton, V. Dravitzki, and M. Donn. The relative influence of wind, sunlight and temperature on user comfort in urban outdoor spaces. *Building and Environment*, Vol. 42, No. 9, pp. 3166–3175, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.004>
- [90] P.O. Fanger, A.K. Melikov, H. Hanzawa, and J. Ring. Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, Vol. 12, No. 1, pp. 21–39, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90053-9)
- [91] Yingxin Zhu, Maohui Luo, Qin Ouyang, Li Huang, and Bin Cao. Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review. *Building and Environment*, Vol. 91, pp. 5–14, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.032>, Fifty Year

- Anniversary for Building and Environment
- [92] 住谷正夫, 安久正紘. 風向および風速にゆらぎ制御を行った風の快適性評価について. 電子情報通信学会論文誌 D-2, Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1994–2001, 1997.
- [93] 八木由紀, 久保博子, 磯田憲生, 井上雄二, 清水真. 変動気流の前後風向持続時間が温熱的快適性に及ぼす影響. 空気調和・衛生工学会 論文集, Vol. 29, No. 93, pp. 97–103, 2004. DOI: [https://doi.org/10.18948/shase.29.93\\_97](https://doi.org/10.18948/shase.29.93_97)
- [94] Minjung Kim, Jieun Han, Jeongseo Lee, and Chungyoon Chun. Can simulated natural wind provide a better-differentiated air perception? In *Proceedings of 15th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate, INDOOR AIR 2018*, 2018.
- [95] 池井寧. バーチャルリアリティによる身体的追体験. バイオメカニズム学会誌, Vol. 43, No. 1, pp. 17–22, 2019. DOI: [https://doi.org/10.3951/sobim.43.1\\_17](https://doi.org/10.3951/sobim.43.1_17)
- [96] S. Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality. *The skin senses. Proceedings of the First International Symposium March*, Vol. 1966 Tallahassee, Fla, pp. 195–222, 1968.
- [97] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Benjamin Outram, Kouta Minamizawa, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: The full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village, SIGGRAPH '16*. ACM, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2929490.2932629>
- [98] Claudio Pacchierotti, Stephen Sinclair, Massimiliano Solazzi, Antonio Frisoli, Vincent Hayward, and Domenico Prattichizzo. Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 580–600, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/TOH.2017.2689006>
- [99] 久米祐一郎, 水野統太, 米澤李音. 高温・低温放射源を用いた非接触温度情報提示システム. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1F3–4, Sep 2022.
- [100] サンコー株式会社. ペルチェ式ウェアラブルクーラー『ネッククーラー Neo』を発売, <https://kyodonewsprwire.jp/release/202004179121> (2023 年 9 月 25 日閲覧).
- [101] ソニーグループ株式会社. 冷温の自動切り替え機能を新搭載したウェアラブルサーモデバイス『REON POCKET 4』を発売, <https://www.sony.com/ja/SonyInfo/News/Press/202304/23-014/> (2023 年 9 月 25 日閲覧).
- [102] Charles E. Jack and Willard R. Thurlow. Effects of degree of visual association and angle of displacement on the “ventriloquism” effect. *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 37, No. 3, pp. 967–979, 1973. DOI: <https://doi.org/10.1177/003151257303700360>
- [103] Harry McGurk and John MacDonald. Hearing lips and seeing voices. *Nature*, Vol. 264, pp. 746–748, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1038/264746a0>
- [104] 伴祐樹. バーチャルハンドの変形による視触覚間相互作用の生起に関する研究. PhD thesis, 東京大学, Mar 2016
- [105] Marc O. Ernst and Martin S. Banks. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, Vol. 415, No. 6870, pp. 429–433, Jan 2002. DOI: <https://doi.org/10.1038/415429a>
- [106] Ladan Shams, Wei Ji Ma, and Ulrik Beierholm. Sound-induced flash illusion as an optimal percept. *NeuroReport*, Vol. 16, No. 17, pp. 1923–1927, Nov 2005. DOI: <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000187634.68504.bb>
- [107] David R. Wozny, Ulrik R. Beierholm, and Ladan Shams. Human trimodal perception follows optimal statistical inference. *Journal of Vision*, Vol. 8, No. 3, pp. 24–24, Mar 2008. DOI: <https://doi.org/10.1167/8.3.24>
- [108] Konrad P. Körding, Ulrik Beierholm, Wei Ji Ma, Steven Quartz, Joshua B. Tenenbaum, and Ladan Shams. Causal inference in multisensory perception. *PLOS ONE*, Vol. 2, No. 9, pp. 1–10, Sep 2007. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000943>
- [109] *A Computational Model of Human Perception With Prior Expectation: Bayesian Integration and Efficient Coding*, Vol. Volume 1B: 35th Computers and Information in Engineering Conference of *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in*

- Engineering Conference*, 08 2015. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2015-46669>
- [110] Jordan B. Brayanov and Maurice A. Smith. Bayesian and “anti-bayesian” biases in sensory integration for action and perception in the size–weight illusion. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 103, No. 3, pp. 1518–1531, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1152/jn.00814.2009>, PMID: 20089821
- [111] Xue-Xin Wei and Alan A. Stocker. A bayesian observer model constrained by efficient coding can explain ‘anti-bayesian’ percepts. *Nature Neuroscience*, Vol. 18, No. 10, pp. 1509–1517, Oct 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nn.4105>
- [112] Hideyoshi Yanagisawa. A computational model of perceptual expectation effect based on neural coding principles. *Journal of Sensory Studies*, Vol. 31, No. 5, pp. 430–439, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/joss.12233>
- [113] Karl Friston. The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 11, No. 2, pp. 127–138, Feb 2010. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- [114] Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin’ichi Warisawa. Alteredwind: Manipulating perceived direction of the wind by cross-modal presentation of visual, audio and wind stimuli. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA ’19, pp. 3–4. ACM, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1145/3355049.3360525>
- [115] 伊藤弘一郎, 小嶋才蔵, 細谷佳生, 天野靖大, 内山敬太, 亀沢和史, 佐々木勇星, 福田哲生, 松尾大地, 児玉拓郎. VR 消防体験-炎舞-. 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1A–18, Sep 2019.
- [116] Erika Oishi, Masahiro Koge, Takuto Nakamura, and Hiroyuki Kajimoto. Happull: Enhancement of self-motion by pulling clothes. In Adrian David Cheok, Masahiko Inami, and Teresa Romão, editors, *Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 261–271, Cham, 2018. Springer International Publishing.
- [117] Jiayi Xu, Shogo Tamaki, Koyo Makino, Shunsuke Yoshimoto, Shoichi Hasegawa, Naoto Ienaga, and Yoshihiro Kuroda. Heatmagic: Intensity-adjustable thermal feedback system based on the vortex effect and thermal radiation for non-contact thermal interaction. In *Asia Haptics 2022 Demo*, 2022.
- [118] 丸田千滉, 橋口哲志. 色彩効果を用いた疑似温度感覚に関する基礎実験. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 1B4–2, Sep 2022.
- [119] Andreas Pusch, Olivier Martin, and Sabine Coquillart. HEMP-hand-displacement-based pseudo-haptics: A study of a force field application. In *2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, pp. 59–66, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/3DUI.2008.4476593>
- [120] Lisa Brelet and Yoren Gaffary. Stress reduction interventions: A scoping review to explore progress toward use of haptic feedback in virtual reality. *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 3, , 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/frvir.2022.900970>
- [121] Andrea Serino. Peripersonal space (PPS) as a multisensory interface between the individual and the environment, defining the space of the self. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 99, pp. 138–159, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.01.016>
- [122] O. M. Phillips. The intensity of aeolian tones. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 1, No. 6, pp. 607–624, 1956. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112056000408>
- [123] U.R. Kristiansen and O.K.Ø. Pettersen. Experiments on the noise heard by human beings when exposed to atmospheric winds. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 58, No. 2, 1978. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(78\)80082-0](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(78)80082-0)
- [124] Shieru Suzuki, Kazuma Aoyama, Ryosei Kojima, Kazuya Izumi, Tatsuki Fushimi, and Yoichi Ochiai. Exudedvestibule: Enhancing mid-air haptics through galvanic vestibular stimulation. In *ACM SIGGRAPH 2023 Posters*, SIGGRAPH ’23. ACM, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3588028.3603648>
- [125] Kazuhiro Iida. *Head-Related Transfer Function and Acoustic Virtual Reality*. Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9745-5>
- [126] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. 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, pp. 143–146. ACM, 2011.

- DOI: <https://doi.org/10.1145/1978942.1978963>
- [127] Kenichi Ito, Juro Hosoi, Kei Takanohashi, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. WearSway:wearable device to reproduce tactile stimuli of strong wind through swaying clothes. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA Emerging Technologies '23. ACM, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3610541.3614576>
- [128] 福地章. 気象注意報と海難について (海難と気象・海象,<特集>船舶及び海洋構造物の事故と安全). 航海, Vol. 87, pp. 41–49, 1986. DOI: [https://doi.org/10.18949/jinnavib.87.0\\_41](https://doi.org/10.18949/jinnavib.87.0_41)
- [129] Seungsin Lee Gilsoo Cho and Jayoung Cho. Review and reappraisal of smart clothing. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 25, No. 6, pp. 582–617, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/10447310902997744>
- [130] J. Berzowska and M. Coelho. Kukkia and Vilkas: kinetic electronic garments. In *Ninth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'05)*, pp. 82–85, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISWC.2005.29>
- [131] Masaru Ohkubo, Miki Yamamura, Hiroko Uchiyama, and Takuya Nojima. Breathing clothes: Artworks using the hairytop interface. In *Proceedings of the 11th Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, ACE '14*. ACM, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1145/2663806.2663860>
- [132] Ryo Murata, Arata Horie, and Masahiko Inami. Dynamic derm: Body surface deformation display for real-world embodied interactions. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023, AHs '23*, pp. 267–277. ACM, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3582700.3582723>
- [133] Laura Perovich, Philippa Mothersill, and Jennifer Broutin Farah. Awakened apparel: Embedded soft actuators for expressive fashion and functional garments. In *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '14*, pp. 77–80. ACM, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1145/2540930.2540958>
- [134] Haoran Xie, Hiromu Matsuzaki, and Takuma Torii. XClothes: Augmenting human thermoregulation using shape changing clothes. In *Proceedings of the 11th Augmented Human International Conference, AH '20*. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3396339.3396400>
- [135] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L. Klatzky, Scott E. Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P. Sample. Force jacket: Pneumatically-actuated jacket for embodied haptic experiences. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp. 1–12. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3173574.3173894>
- [136] Mengjia Zhu, Amirhossein H. Memar, Aakar Gupta, Majed Samad, Priyanshu Agarwal, Yon Visell, Sean J. Keller, and Nicholas Colonnese. Pneusleeve: In-fabric multimodal actuation and sensing in a soft, compact, and expressive haptic sleeve. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp. 1–12. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376333>
- [137] Kentaro Ueda, Tsutomu Terada, and Masahiko Tsukamoto. Haptic feedback method using deformation of clothing. In *Proceedings of the 17th International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia, MoMM2019*, pp. 84–93. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3365921.3365933>
- [138] Miles Priebe, Esther Foo, and Brad Holschuh. Shape memory alloy haptic compression garment for media augmentation in virtual reality environment. In *Adjunct Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20 Adjunct*, pp. 34–36. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3379350.3416177>
- [139] Sachith Muthukumarana, Alaeddin Nassani, Noel Park, JürgenSteimle, Mark Billingham, Suranga Nanayakkara. XRtic: A prototyping toolkit for xr applications using cloth deformation. In *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 548–557, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMAR55827.2022.00071>
- [140] 大石恵利佳, 高下昌裕, Khurelbaatar Sugarragchaa, 梶本裕之. 衣服牽引を用いた触力覚提示装置. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, 第 2015 巻, pp. 95–99, sep 2015.

- 
- [141] Yusuke Ujitoko, Sho Sakurai, and Koichi Hirota. Vibrator transparency: Re-using vibrotactile signal assets for different black box vibrators without re-designing. In *2020 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 882–889, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/HAPTICS45997.2020.ras.HAP20.80.00957e94>
- [142] Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, and Shoichi Hasegawa. Implementation of tension-based compact necklace-type haptic device achieving widespread transmission of low-frequency vibrations. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 3, pp. 535–546, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TOH.2022.3176673>
- [143] アルプスアルパイン株式会社. ハプティックリアクタ AFT14 シリーズ AFT14A903A 製品情報, <https://tech.alpsalpine.com/j/products/detail/AFT14A903A/> (2023 年 10 月 12 日閲覧) .
- [144] Adam O. Bebeko and Nikolaus F. Troje. bmlTUX: Design and control of experiments in virtual reality and beyond. *i-Perception*, Vol. 11, No. 4, p. 2041669520938400, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/2041669520938400>, PMID: 32733664
- [145] Thomas Schubert, Frank Friedmann, and Holger Regenbrecht. The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 266–281, 06 2001. DOI: <https://doi.org/10.1162/105474601300343603>
- [146] igroup. igroup presence questionnaire (IPQ) item download, <https://www.igroup.org/pq/ipq/download.php> (2023 年 10 月 12 日閲覧) .
- [147] igroup. igroup presence questionnaire (IPQ) database, <https://www.igroup.org/pq/ipq/data.php> (2023 年 10 月 12 日閲覧) .
- [148] Magica Soft. Magica cloth 2. Unity Asset Store, 2023, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/magica-cloth-2-242307> (2023 年 10 月 5 日閲覧) .
- [149] Terrence R. Stanford, Stephan Quessy, and Barry E. Stein. Evaluating the operations underlying multisensory integration in the cat superior colliculus. *Journal of Neuroscience*, Vol. 25, No. 28, pp. 6499–6508, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5095-04.2005>
- [150] Jas Brooks, Steven Nagels, and Pedro Lopes. Trigeminal-based temperature illusions. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–12. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376806>
- [151] Charles Spence. Temperature-based crossmodal correspondences: Causes and consequences. *Multisensory Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 645–682, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1163/22134808-20191494>
- [152] Hsin-Ni Ho, Daisuke Iwai, Yuki Yoshikawa, Junji Watanabe, and Shin'ya Nishida. Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object. *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 1, p. 5527, Jul 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep05527>
- [153] Frank H. Durgin, Laurel Evans, Natalie Dunphy, Susan Klostermann, and Kristina Simmons. Rubber hands feel the touch of light. *Psychological Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 152–157, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.01865.x>, PMID: 17425536
- [154] Michael Landgrebe, Kewir Nyuyki, Elmar Frank, Thomas Steffens, Simone Hauser, Peter Eichhammer, Goran Hajak, and Berthold Langguth. Effects of colour exposure on auditory and somatosensory perception – hints for cross-modal plasticity. *Neuro endocrinology letters*, Vol. 29, No. 4, pp. 518–521, 09 2008.
- [155] Matteo Martini, Daniel Pérez Marcos, Maria Sanchez-Vives. What color is my arm? changes in skin color of an embodied virtual arm modulates pain threshold. *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 7, , 2013. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00438>
- [156] Anna Fenko, Hendrik N.J. Schifferstein, and Paul Hekkert. Looking hot or feeling hot: What determines the product experience of warmth? *Materials & Design*, Vol. 31, No. 3, pp. 1325–1331, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.008>
- [157] Mounia Ziat, Carrie Anne Balcer, Andrew Shirtz, and Taylor Rolison. A century later, the hue-heat hypothesis: Does color truly affect temperature perception? In Fernando Bello, Hiroyuki Kajimoto, and Yon Visell, editors, *Haptics: Perception, Devices, Control, and Applications*,

- pp. 273–280, Cham, 2016. Springer International Publishing. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-42321-0\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-42321-0_25)
- [158] Hsin-Ni Ho, George H. Van Doorn, Takahiro Kawabe, Junji Watanabe, and Charles Spence. Colour-temperature correspondences: When reactions to thermal stimuli are influenced by colour. *PLOS ONE*, Vol. 9, No. 3, pp. 1–7, March 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091854>
- [159] Diana Löffler, Robert Tscharn, and Jörn Hurtienne. Multimodal effects of color and haptics on intuitive interaction with tangible user interfaces. In *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '18, pp. 647–655. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3173225.3173257>
- [160] Sebastian Günther, Florian Müller, Dominik Schön, Omar Elmoghazy, Max Mühlhäuser, and Martin Schmitz. Therminator: Understanding the interdependency of visual and on-body thermal feedback in virtual reality. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–14. ACM, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376195>
- [161] Shoko Kanaya, Yuka Matsushima, and Kazuhiko Yokosawa. Does seeing ice really feel cold? visual-thermal interaction under an illusory body-ownership. *PLOS ONE*, Vol. 7, No. 11, pp. 1–7, 11 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047293>
- [162] Daniel Eckhoff, Cecilia Li-Tsang, Gladys Cheing, Alvaro Cassinelli, and Christian Sandor. Investigation of microcirculatory effects of experiencing burning hands in augmented reality. In *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 569–570, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/VRW52623.2021.00167>
- [163] Martin Kocur, Lukas Jackermeier, Valentin Schwind, and Niels Henze. The effects of avatar and environment on thermal perception and skin temperature in virtual reality. In *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23. ACM, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3544548.3580668>
- [164] NicolasGuéguen, CélineJacob. Coffee cup color and evaluation of a beverage’s “warmth quality”. *Color Research & Application*, Vol. 39, No. 1, pp. 79–81, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.21757>
- [165] Maki Suzuki, Rie Kimura, Yasue Kido, Tomoko Inoue, Toshio Moritani, and Narumi Nagai. Color of hot soup modulates postprandial satiety, thermal sensation, and body temperature in young women. *Appetite*, Vol. 114, pp. 209–216, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.041>
- [166] Yuki Yoshikawa, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. A study of thermal sensation with visuo-thermal projection interfaces. In *2013 IEEE 2nd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 118–119, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/GCCE.2013.6664767>
- [167] George A. Morgan, Felix E. Goodson, and Thomas Jones. Age differences in the associations between felt temperatures and color choices. *The American Journal of Psychology*, Vol. 88, No. 1, pp. 125–130, 1975.
- [168] Unity Technologies. Particle pack. Unity Asset Store, 2018, <https://assetstore.unity.com/packages/vfx/particles/particle-pack-127325> (2023 年 10 月 5 日閲覧) .
- [169] Mark F. Trites. The veridical perception of object temperature with varying skin temperature. *Perception & Psychophysics*, Vol. 43, No. 6, pp. 531–540, Dec 1988. DOI: <https://doi.org/10.3758/BF03207741>
- [170] Yoshiaki Tsushima, Sho Okada, Yuka Kawai, Akio Sumita, Hiroshi Ando, and Mitsunori Miki. Effect of illumination on perceived temperature. *PLOS ONE*, Vol. 15, No. 8, pp. 1–8, 08 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236321>
- [171] Anne I. Turner, Nina Smyth, Sarah J. Hall, Susan J. Torres, Mais Hussein, Sisitha U. Jayasinghe, Kylie Ball, and Angela J. Clow. Psychological stress reactivity and future health and disease outcomes: A systematic review of prospective evidence. *Psychoneuroendocrinology*, Vol. 114, p. 104599, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psyneuen.2020.104599>
- [172] X Zhou, Q Ouyang, G Lin, and Y Zhu. Impact of dynamic airflow on human thermal response. *Indoor air*, Vol. 16, No. 5, pp. 348–355, October 2006. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668>

- 2006.00430.x
- [173] Jinjing Hua, Qin Ouyang, Yiran Wang, Hui Li, and Yingxin Zhu. A dynamic air supply device used to produce simulated natural wind in an indoor environment. *Building and Environment*, Vol. 47, pp. 349–356, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.003>, International Workshop on Ventilation, Comfort, and Health in Transport Vehicles
- [174] Matthew H. E. M. Browning, Katherine J. Mimnaugh, Carena J. van Riper, Heidemarie K. Laurent, and Steven M. LaValle. Can simulated nature support mental health? comparing short, single-doses of 360-degree nature videos in virtual reality with the outdoors. *Frontiers in Psychology*, Vol. 10, p. 2667, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02667>
- [175] Jesper J. Alvarsson, Stefan Wiens, and Mats E. Nilsson. Stress recovery during exposure to nature sound and environmental noise. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 7, No. 3, pp. 1036–1046, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph7031036>
- [176] Toshitsugu Hara, M. Shimizu, K. Iguchi, and G. Odagiri. Chaotic fluctuation in natural wind and its application to thermal amenity. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, Vol. 30, No. 5, pp. 2803–2813, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0362-546X\(97\)00370-2](https://doi.org/10.1016/S0362-546X(97)00370-2), Proceedings of the Second World Congress of Nonlinear Analysts
- [177] Qin Ouyang, Wei Dai, Hongjun Li, and Yingxin Zhu. Study on dynamic characteristics of natural and mechanical wind in built environment using spectral analysis. *Building and Environment*, Vol. 41, No. 4, pp. 418–426, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.008>
- [178] パナソニック株式会社. 扇風機の「1/f ゆらぎ」の風とは, [https://jpn.faq.panasonic.com/app/answers/detail/a\\_id/15049/](https://jpn.faq.panasonic.com/app/answers/detail/a_id/15049/) (2023年9月11日閲覧).
- [179] 株式会社コロナ. DCモーターで自然界の1/f ゆらぎの風を再現 心地よい温風&低消費電力No. 1 コロナ石油ファンヒーター 2022年度モデルを発売, 2022, <https://www.corona.co.jp/news/newpro/2022fh.html> (2023年9月11日閲覧).
- [180] BALMUDA Inc. 「GreenFan」開発の背景, <https://www.balmuda.com/jp/about/story/003> (2022年10月4日閲覧).
- [181] パナソニックエコシステムズ株式会社. 「空気質・水質」の非住宅空間ソリューション事業を創出する「Reboot Space」を開発, <https://news.panasonic.com/jp/press/jn190805-1> (2023年9月11日閲覧).
- [182] Huiying Chen, Bo Hong, Hongyun Qu, Yubo Geng, and Meifang Su. Effects of acoustic perception on outdoor thermal comfort in campus open spaces in china’s cold region. *Buildings*, Vol. 12, No. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12101518>
- [183] forst. Advanced terrain grass. Unity Asset Store, 2017, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/terrain/advanced-terrain-grass-100014> (2022年10月4日閲覧).
- [184] Asset Store Originals. Snaps art — office. Unity Asset Store, 2019, <https://assetstore.unity.com/packages/templates/packs/snaps-art-office-149846> (2022年10月4日閲覧).
- [185] Rivermill Studios. Oscillating pedestal fan. Unity Asset Store, 2017, <https://assetstore.unity.com/packages/3d/props/electronics/oscillating-pedestal-fan-89031> (2022年10月4日閲覧).
- [186] cyberforest.jp. #yatake from yatakezawa in the university of tokyo chichibu forest, 2022-01-05. CC BY-NC-SA 4.0, 2022, <http://cyberforest.nenv.k.u-tokyo.ac.jp/yatake-sound/20220105/20220105002102yatake.mp3> (2022年10月4日閲覧).
- [187] Kaoru Saito, Kazuhiko Nakamura, Mutsuyuki Ueta, Reiko Kurosawa, Akio Fujiwara, Hill Hiroki Kobayashi, Masaya Nakayama, Ayako Toko, and Kazuyo Nagahama. Utilizing the cyberforest live sound system with social media to remotely conduct woodland bird censuses in central japan. *Ambio*, Vol. 44, No. 4, pp. 572–583, Nov 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0708-y>
- [188] Jonathan W. Kelly. Distance perception in virtual reality: A meta-analysis of the effect of head-mounted display characteristics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, pp. 1–13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3196606>, Early Access
- [189] JA Veitch, GR Newsham, PR Boyce, and CC Jones. Lighting appraisal, well-being and performance in open-plan offices: A linked mechanisms approach. *Lighting Research & Technology*, Vol. 40, No. 2,

- pp. 133–151, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1177/1477153507086279>
- [190] Hiroyuki Shinoda. Vision, light and color -mechanism of seeing and techniques for displaying-. *Proceedings of the 1st Asia Color Association Conference (ACA 2013 Thanyaburi)*, pp. 18–21, 2013.
- [191] James V. Bradley. Complete counterbalancing of immediate sequential effects in a latin square design. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 53, No. 282, pp. 525–528, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1958.10501456>
- [192] Charles E. Osgood. The nature and measurement of meaning. *Psychological Bulletin*, Vol. 49, No. 3, pp. 197–237, 1952. DOI: <https://doi.org/10.1037/h0055737>
- [193] Satoshi Sakuragawa, Yoshifumi Miyazaki, Tomoyuki Kaneko, and Teruo Makita. Influence of wood wall panels on physiological and psychological responses. *Journal of Wood Science*, Vol. 51, No. 2, pp. 136–140, Apr 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0643-1>
- [194] Margaret M. Bradley and Peter J. Lang. Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, Vol. 25, No. 1, pp. 49–59, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-7916\(94\)90063-9](https://doi.org/10.1016/0005-7916(94)90063-9)
- [195] David Watson, Lee Anna Clark, and Auke Tellegen. Development and validation of brief measures of positive and negative affect: The PANAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 54, pp. 1063–1070, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1037/0022-3514.54.6.1063>
- [196] Yosuke Sakairi, Kentaro Nakatsuka, and Takeshi Shimizu. Development of the two-dimensional mood scale for self-monitoring and self-regulation of momentary mood states. *Japanese Psychological Research*, Vol. 55, No. 4, pp. 338–349, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpr.12021>
- [197] Joachim Taelman, S. Vandepuut, A. Spaepen, and S. Van Huffel. Influence of mental stress on heart rate and heart rate variability. In Jos Vander Sloten, Pascal Verdonck, Marc Nyssen, and Jens Haueisen, editors, *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering*, pp. 1366–1369, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-89208-3\\_324](https://doi.org/10.1007/978-3-540-89208-3_324)
- [198] Yuri Masaoka and Ikuo Homma. Anxiety and respiratory patterns: their relationship during mental stress and physical load. *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 27, No. 2, pp. 153–159, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(97\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(97)00052-4)
- [199] Ravinder Jerath, John W. Edry, Vernon A. Barnes, and Vandna Jerath. Physiology of long pranayamic breathing: Neural respiratory elements may provide a mechanism that explains how slow deep breathing shifts the autonomic nervous system. *Medical Hypotheses*, Vol. 67, No. 3, pp. 566–571, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.02.042>
- [200] Akanksha Sharma and Mandeep Singh. Assessing alpha activity in attention and relaxed state: An EEG analysis. In *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)*, pp. 508–513, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/NGCT.2015.7375171>
- [201] JanKamiński, Aneta Brzezicka, Mateusz Gola, AndrzejWróbel. Beta band oscillations engagement in human alertness process. *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 85, No. 1, pp. 125–128, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.11.006>, Basic and Applied Electrophysiology
- [202] Shiyi Wu, Xiangmin Xu, Lin Shu, and Bin Hu. Estimation of valence of emotion using two frontal EEG channels. In *2017 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, pp. 1127–1130, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/BIBM.2017.8217815>
- [203] Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, Vol. 93, No. 5, pp. 1043–1065, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
- [204] En-Fan Chou, Michelle Khine, Thurmon Lockhart, and Rahul Soangra. Effects of ECG data length on heart rate variability among young healthy adults. *Sensors*, Vol. 21, No. 18, p. 6286, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186286>

- [205] Carlos Carreiras, Ana Priscila Alves, André Lourenço, Filipe Canento, Hugo Silva, Ana Fred, et al. BioSPPy: Biosignal processing in Python, 2015–, <https://github.com/PIA-Group/BioSPPy/> (2022年10月4日閲覧) .
- [206] P. Hamilton. Open source ECG analysis. In *Computers in Cardiology*, pp. 101–104, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1109/CIC.2002.1166717>
- [207] Pedro Gomes, Petra Margaritoff, and Hugo Silva. pyHRV: Development and evaluation of an open-source python toolbox for heart rate variability (HRV). In *Proceedings of International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN)*, pp. 822–828, 2019.
- [208] Charles Spence and Maya U. Shankar. The influence of auditory cues on the perception of, and responses to, food and drink. *Journal of Sensory Studies*, Vol. 25, No. 3, pp. 406–430, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2009.00267.x>
- [209] Julia Diemer, Georg W. Alpers, Henrik M. Peperkorn, Youssef Shiban, and Andreas Mühlberger. The impact of perception and presence on emotional reactions: a review of research in virtual reality. *Frontiers in Psychology*, Vol. 6, , 2015. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00026>
- [210] 大山晃平, 小川剛史. クロスモーダル効果を用いた圧覚の隠消現実感提示. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 1, pp. 31–39, 2020. DOI: [https://doi.org/10.18974/tvrsj.25.1\\_31](https://doi.org/10.18974/tvrsj.25.1_31)
- [211] Ryoko Ueoka and Ali AlMutawa. Emotion hacking VR: Amplifying scary VR experience by accelerating actual heart rate. In Sakae Yamamoto and Hirohiko Mori, editors, *Human Interface and the Management of Information. Interaction, Visualization, and Analytics*, pp. 436–445, Cham, 2018. Springer International Publishing. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92043-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92043-6_37)
- [212] Oana Bălan, Gabriela Moise, Alin Moldoveanu, Florica Moldoveanu, and Marius Leordeanu. Does automatic game difficulty level adjustment improve acrophobia therapy? differences from baseline. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '18*. ACM, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1145/3281505.3281583>
- [213] Charles Spence. Just how important is spatial coincidence to multisensory integration? evaluating the spatial rule. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 1296, No. 1, pp. 31–49, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1111/nyas.12121>
- [214] Qian (Janice) Wang and Charles Spence. The role of pitch and tempo in sound-temperature crossmodal correspondences. *Multisensory Research*, Vol. 30, No. 3-5, pp. 307–320, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1163/22134808-00002564>
- [215] Mel Slater, Beau Lotto, Maria Marta Arnold, and Maria V Sanchez-Vives. How we experience immersive virtual environments: the concept of presence and its measurement. *Anuario de psicología*, Vol. 40, No. 2, pp. 193–210, 2009.
- [216] Nana Matsuyama, Soichiro Matsuda, and Taku Hachisu. Can facial expressions induce haptic perception? *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. Early Access, pp. 1–6, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/TOH.2023.3275657>
- [217] Juro Hosoi, Takahiro Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. DazzleVR: Enhancement of brightness by presenting afterimage and dazzle reflex sensation in virtual reality. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23. ACM, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1145/3610541.3614579>

© 2023 IEEE. Reprinted, with permission, from Kenichi Ito, Juro Hosoi, Yuki Ban, Takayuki Kikuchi, Kyosuke Nakagawa, Hanako Kitagawa, Chizuru Murakami, Yosuke Imai, and Shin'ichi Warisawa. Wind comfort and emotion can be changed by the cross-modal presentation of audio-visual stimuli of indoor and outdoor environments. In *2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 215–225, 2023.

# 謝辞

本論文は筆者が東京大学大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 博士課程に在学中、東京大学大学院新領域創成科学研究科 割澤 伸一 教授のご指導のもとで行った研究をまとめたものです。この期間中には、日本学術振興会特別研究員（DC1）に採択され、受入研究者である割澤教授のもとで研究課題「視聴触覚問のクロスモーダル効果を用いた多様な風感覚提示手法の研究」に取り組みました。皆様のご支援に感謝し、以下に謝辞を記載いたします。

指導教員（主査）の割澤教授には、筆者が学部4年生で研究室に配属された時から指導教員としてご指導を頂き、博士課程の研究の方向性についての的確なアドバイスをいただきました。研究班や共同研究の打ち合わせなど様々なプロジェクトの場でも、割澤先生が本質を突くコメントをされていたのが常々印象に残っています。本博士論文を執筆するに当たっても、行ってきた研究の成果を博士論文として1つの流れにまとめるための考え方や、筆者が思い至らなかった視点での知見の示し方に関して手厚いご指導をいただきました。

副査である東京工科大学大学院の羽田 久一 教授、情報理工学系研究科の鳴海 拓志 准教授、新領域創成科学研究科の篠田 裕之 教授、伴 祐樹 特任講師には、お時間を割いて本論文の審査をいただき、多くの貴重なご指摘をいただきました。ご指導により、本研究の立ち位置や総合的な考察、クロスモーダル効果の評価方法などに関する議論を深めることができました。感謝致します。

研究室の伴 祐樹 特任講師には、筆者が所属した人間班の研究活動の中で多岐にわたるご支援をいただきました。面白い研究を思いつくための心構えやプロトタイプによる検証の回し方など、伴先生に基本的な研究スタイルを伝授していただいたからこそ風知覚に関する研究を進展させることができたと感じています。また、触覚におけるクロスモーダル効果のトップレベルの研究者として、先生の研究成果から学ぶ点も大いにありました。

研究室の福井 類 准教授、米谷 玲皇 准教授、本田 功輝 特任助教には、研究会や発表練習の場で様々な視点からのご指導を頂きました。ミーティングのために大学に先生や学生が集まる機会が増え、研究班の間で情報交換したり、助け合ったりする機会を折につけてくださったお陰で、自分の分野のことだけを考えていては身につかない考え方や技術を学べたと考えています。

研究室の秘書，特任専門職員，技術補佐員，特任研究員の皆様には，科研費の予算執行や各種の申請，実験の補佐などで大変お世話になりました．特に，技術補佐員の横田 美果様には，第 6 章に記載した研究の実験の実施を補佐いただき，複雑な実験をやり遂げることができました．ありがとうございました．

共同研究先のダイキン工業株式会社の皆様並びに研究統括の川原 圭博 特任教授は，空気環境や気流に関する研究に関わる貴重な機会をご提供くださいました．筆者が所属したワーキンググループの今井 洋輔様，村上 千鶴様，菊池 雄行様，中川 京佑様，北川 華子様には，研究に関して綿密に議論していただいたのに加え，実験装置の準備や実験の実施にあたって幾度もご支援をいただきました．

筆者がメンターや共著者として研究に関わらせていただいた学生の細井 十楽さん，キンイさん，鷹嘴 慧さんとは，クロスモーダル効果や触覚について研究アイデアを話し合ったり，技術トークをしたりと楽しい時間を過ごすことができました．特に，博士課程 1 年の細井さんとは研究分野が近い者同士として学会発表やテレビの取材等で助け合う機会が多く，大変お世話になりました．常に新しい研究アイデアを考え，複数のプロジェクトを推進していく優秀さを活かして，今後も研究室を引っ張ってってくれることに期待しています．

研究室の他の学生の皆さま，実験にご参加いただいた皆さまにも感謝申し上げます．研究室外での活動の場をくださいました，触覚若手の会，Internal Space，バーチャル学会，東京大学きらら同好会，東京大学恋する小惑星同好会，40548F，未発見小惑星検出アプリ COIAS 開発チームの皆様にも御礼申し上げます．最後になりますが，経済面や生活面で筆者を支えてくれている家族に深く感謝いたします．

本論文に含まれる研究の一部は，JSPS 科研費 JP21J21363，JP22K19805，JP22KJ0625，またはダイキン工業株式会社と東京大学インクルーシブ工学連携研究機構との共同研究費による助成を受けたものです．

令和 5 年 12 月 伊東 健一

# 研究業績リスト

## 受賞（筆頭のみ）

1. 伊東健一. ベストプレゼンテーション賞, 触覚若手の会 / 日本バーチャルリアリティ学会ハプティクス研究委員会. September 2022.
2. Kenichi Ito, Yuki Ban, Hikaru Takeda, Jun Takahashi, Kazuaki Harada, and Shin'ichi Warisawa. Honorable Mention: Best Demonstration, Demonstration of Tactile Reverse Playback: Presenting Temporally Reversed Vibration to Increase Convincingness of Reversed Videos. IEEE World Haptics Conference (WHC) 2021. July 2021.
3. 伊東健一. 専攻長賞, 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 人間環境学専攻. March 2021.
4. Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Top-3 for Best Poster Award, Manipulating the Perceived Directions of Wind by Visuo-Audio-Haptic Cross-Modal Effects. EuroHaptics 2020. September 2020.

## 筆頭著者論文

### 雑誌論文

1. 伊東健一, 伴祐樹, 割澤伸一. 視聴触覚間のクロスモーダル効果による風向知覚操作. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 26, No. 4, pp. 277–287, 2021.

### 国際会議発表

1. Kenichi Ito, Juro Hosoi, Kei Takanohashi, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Wear-Sway: wearable device to reproduce tactile stimuli of strong wind through swaying clothes. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA '23. ACM, 2023.

2. Kenichi Ito, Juro Hosoi, Yuki Ban, Takayuki Kikuchi, Kyosuke Nakagawa, Hanako Kitagawa, Chizuru Murakami, Yosuke Imai, and Shin'ichi Warisawa. Wind comfort and emotion can be changed by the cross-modal presentation of audio-visual stimuli of indoor and outdoor environments. In *2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 215–225, 2023.
3. Kenichi Ito, Yuki Ban, Hikaru Takeda, Jun Takahashi, Kazuaki Harada, and Shin'ichi Warisawa. Demonstration of tactile reverse playback: Presenting temporally reversed vibration to increase convincingness of reversed videos. In *IEEE World Haptics Conference (WHC) 2021 Interactive Demonstrations*, July 2021.
4. Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Manipulating the perceived directions of wind by visuo-audio-haptic cross-modal effects. In Ilana Nisky, Jess Hartcher-O'Brien, Michaël Wiertlewski, and Jeroen Smeets, editors, *Haptics: Science, Technology, Applications (EuroHaptics 2020)*, pp. 235–243. Springer International Publishing, 2020.
5. Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. AlteredWind: Manipulating perceived direction of the wind by cross-modal presentation of visual, audio and wind stimuli. In *SIGGRAPH Asia 2019 Emerging Technologies*, SA '19, pp. 3–4. ACM, 2019.
6. Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Manipulation of the perceived direction of wind by cross-modal effects of wind and three-dimensional sound. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 622–627, July 2019.

## 国内学会発表

1. 伊東健一. WebXR pseudo-haptics: Web 上のバーチャル空間における疑似触覚体験. バーチャル学会発表概要集, p. 18, December 2021.
2. 伊東健一, 伴祐樹, 武田輝, 高橋潤, 原田和亮, 割澤伸一. 触覚逆再生: 時間的に逆転した振動提示による逆再生映像の違和感低減. 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1G-7, September 2021.
3. 伊東健一, 伴祐樹, 割澤伸一. 視聴触覚間のクロスモーダル効果を用いた風向知覚操作. バーチャル学会発表概要集, p. 14, December 2020.
4. 伊東健一, 伴祐樹, 割澤伸一. 風と立体音響のクロスモーダル現象による風向知覚操作. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2019, 2A1-T10. 一般社団法人

日本機械学会, June 2019.

## 共著論文

### 雑誌論文

1. Juro Hosoi, Yuki Ban, Kenichi Ito, and Shin'Ichi Warisawa. Pseudo-wind perception induced by cross-modal reproduction of thermal, vibrotactile, visual, and auditory stimuli. *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 4781–4793, 2023.

### 国際会議発表

1. Shoko Kimura, Kenichi Ito, Ayaka Fujii, Rihito Tsuboi, Kazuki Okawa, Hibiki Kojima, Keisuke Kitagawa, and Yoshinori Natsume. Inclusive quiet room -for building an inclusive society-. In *ACM SIGGRAPH 2023 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '23. ACM, 2023.
2. Yi Jin, Kenichi Ito, Yuki Ban, and Shin'ichi Warisawa. Impact of sound localization on roughness perception in audio-tactile cross-modal effect. In *IEEE World Haptics 2023 conference, Work in Progress*, WIP.E2a.2, July 2023.
3. Juro Hosoi, Yuki Ban, Kenichi Ito, and Shin'ichi Warisawa. VWind: Virtual wind sensation to the ear by cross-modal effects of audio-visual, thermal, and vibrotactile stimuli. In *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, SA '21. ACM, 2021.
4. Shoko Kimura, Ayaka Fujii, Kenichi Ito, Yoshihiro Tanaka, and Kazunori Miyata. A VR experience of being warmly swaddled using otonamaki and haptics device. In *2021 Nicograph International (NicoInt)*, pp. 90–93. IEEE, July 2021.
5. Shoko Kimura, Ayaka Fujii, Kenichi Ito, Rihito Tsuboi, Kazuki Asakura, and Kazunori Miyata. Into the womb - born again : A VR experience of being warmly swaddled using "otonamaki" from japanese method. In *ConVRgence, Proceedings of Virtual Reality International Conference (VRIC 2020)*, pp. 169–171. Laval Virtual, April 2020.

### 国内学会発表

1. 鷹薙慧, 伊東健一, 子系卓, 伴祐樹, 割澤伸一. 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. 第28回日本バーチャルリアリティ学会

- 大会論文集, 1C1-11, September 2023.
2. キンイ, 伊東健一, 伴祐樹, 割澤伸一. 聴触覚クロスモーダル効果に対する音像定位の影響. 第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2E2-3, September 2022.
  3. 木村正子, 藤井綺香, 伊東健一, 田中由浩. 妊婦体験と胎児体験を繋ぐ触覚相互コミュニケーションシステム Touch Love の開発. 第 25 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, September 2020.

## 報道

1. テレビ朝日. 新世界 メタバース TV!!, July 2023.
2. 東京大学大学院新領域創成科学研究科広報誌. 創成 第 40 号 特集「VR 研究の最前線ハプティクスの可能性」, September 2022.
3. 日本テレビ. 「スッキリ」メタバースの未来を調査：風を感じるヘッドホン, March 2022.
4. テレビ東京. ワールドビジネスサテライト (WBS) 【トレたま】風を感じられる VR, January 2022.
5. ITmedia. Innovative tech : VR キャラクターに耳を「フー」してもらえるヘッドフォン、東大が開発 風源なしで温冷風を再現, January 2022.
6. ITmedia. Innovative tech : 2 台の扇風機で多様な風向き知覚 東京大学、「Altered-Wind」発表, January 2020.

以上

博士論文

多感覚刺激によるクロスモーダル効果を利用した風覚提示の研究

伊東 健一