

修士論文

風覚のテレプレゼンスのための 風のセンシングとディスプレイシステム

青木 大典

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科

情報理工学プログラム

主指導教員: 清川 清 教授

(情報科学領域)

令和5年3月17日 提出

本論文は奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

青木 大典

審査委員：

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| 清川 清 教授 | (主指導教員, 情報科学領域) |
| 和田 隆広 教授 | (副指導教員, 情報科学領域) |
| 内山 英昭 准教授 | (副指導教員, 情報科学領域) |
| 磯山 直也 助教 | (副指導教員, 情報科学領域) |
| Perusquía-Hernández Monica 助教 | (副指導教員, 情報科学領域) |

風覚のテレプレゼンスのための 風のセンシングとディスプレイシステム*

青木 大典

内容梗概

リフレッシュなどを目的にひとりでもしくは友人や家族と共に散歩やランニングなどの屋外活動を楽しむことはよくある。しかし、地理的、身体的な理由でその活動を行うことが困難な場合がある。この問題に対して、テレプレゼンス技術を利用して遠隔地で感じられる感覚を伝達することで活動の共有をよりよくする試みがある。屋外環境において風は人に作用する要素として重要であることから、従来研究の少ない風を感じる感覚(風覚)のテレプレゼンスに着目する。屋外活動者が感じている風覚を屋内体験者に共有するためには、風速と風向のふたつを記録し、再現する必要がある。しかし、従来研究では、歩行等の移動を伴った風向・風速を再現するシステムはない。そこで本研究では、移動を伴った風覚の記録・再現を行えるシステムを提案する。提案システムでは、屋外体験者が360°カメラで映像を、小型の風向風速計によって風覚を記録し、屋内体験者には記録した結果を、ヘッドマウントディスプレイにて映像の提示、複数のファンを用いて屋外で感じられる風覚を提示する。本論文では、屋内体験者が映像・風覚提示を受けた時の表情変化・心拍変動による客観的評価、そしてアンケートによる主観的評価によって評価を行った。アンケート評価から、屋内体験者は映像提示のみに比べて、風覚提示によって現実感が増加することがわかった。また、感情価に関するアンケート項目より風覚提示によって快適な気分を与えることが確認された。以上より、提案システムを用いることで屋外活動による効果を疑似的に得られることが示唆された。また、複数人で活動した感覚を得るためにリアルタイムテレプレゼンスシステムを設計し実装した。

*奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 先端科学技術専攻 修士論文, 令和5年3月17日。

キーワード

バーチャルリアリティ, テレプレゼンス, 風覚, 風センシング, 風ディスプレイ

A Telepresence System with Wind Sensation Transfer*

Daisuke Aoki

Abstract

People often enjoy outdoor activities such as walking or running to refresh themselves, either alone or with friends and family. However, it is sometimes difficult to do these activities due to geographical or physical reasons. To overcome this problem, attempts are being made to improve activity sharing with telepresence technology to transmit sensations that can be felt at a distance. As the wind is an important element that affects people in outdoor environments, we focus on the telepresence of the sensation of wind (wind perception). It is necessary to record and reproduce the wind speed and direction to share the sensation of wind felt by outdoor users with people staying indoors. However, in previous studies, no system has reproduced wind direction and wind speed with movement such as walking. In this study, we propose a system that can record and reproduce wind sensations along with user movement. In the proposed system, outdoor users record images with a 360° camera and wind sensations with a small anemometer. Indoor users see the recorded view of the outdoor user on a head-mounted display, along with the wind sensations felt outdoors. Wind sensations are presented using multiple fans. In this paper, the indoor experiencers were evaluated objectively by changes in facial expression and heart rate fluctuations when presented with the video and wind sensations, and subjectively by a questionnaire. The questionnaire evaluation showed that the presentation of the wind sensation increased the indoor users' sense of re-

*Master's Thesis, Department of Science and Technology, Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, March 17, 2023.

ality compared to the video presentation alone. The questionnaire items on emotional value showed that the wind sensation gave a pleasant feeling. These results suggest that the proposed system can simulate the effects of outdoor activities. In addition, a real-time telepresence system was designed and implemented to provide the sensation of activity by multiple people.

Keywords:

VR, Telepresence, Wind Sensation, Wind Sensing, Wind Display

目次

| | | |
|-------|-------------------|----|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 第2章 | 関連研究 | 4 |
| 2.1 | 複数人で行う屋外活動の効果 | 4 |
| 2.2 | 風覚の効果 | 4 |
| 2.3 | バーチャル空間における風覚提示 | 5 |
| 2.4 | 実空間の風の再現 | 6 |
| 2.5 | エモーションの測定 | 7 |
| 第3章 | システム設計 | 8 |
| 3.1 | 概要 | 8 |
| 3.2 | センシングシステム | 8 |
| 3.2.1 | 風覚 | 8 |
| 3.2.2 | 映像・音声 | 9 |
| 3.3 | ディスプレイシステム | 9 |
| 3.3.1 | 風覚提示 | 9 |
| 3.3.2 | 映像・音声提示 | 10 |
| 第4章 | 実装 | 11 |
| 4.1 | センシングシステム | 11 |
| 4.2 | ディスプレイシステム | 12 |
| 4.2.1 | 風向提示 | 12 |
| 4.2.2 | 風速制御方法 | 13 |
| 4.3 | 測定風速とファン風速出力の対応づけ | 14 |
| 4.3.1 | 計測目的 | 14 |
| 4.3.2 | 計測装置 | 15 |
| 4.3.3 | 計測手順 | 15 |
| 4.3.4 | 計測結果 | 16 |
| 4.3.5 | 計測結果に対する考察 | 17 |

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 4.4 | 非リアルタイムテレプレゼンスシステム概要 | 20 |
| 4.5 | リアルタイムテレプレゼンスシステム概要 | 20 |
| 第5章 | 非リアルタイムシステムにおける評価実験 | 22 |
| 5.1 | 実験目的 | 22 |
| 5.2 | 実験概要 | 22 |
| 5.3 | 実験手順 | 24 |
| 5.4 | 評価方法 | 26 |
| 5.5 | 実験結果と考察 | 29 |
| 5.5.1 | 自分が体験場所以外に存在する感覚と風の現実感 | 29 |
| 5.5.2 | 映像酔いの度合い | 31 |
| 5.5.3 | 感情価・覚醒度 | 32 |
| 5.5.4 | コプレゼンス | 33 |
| 5.5.5 | 表情筋測定による定量評価 | 36 |
| 5.5.6 | 心電測定によるストレス指標値の定量評価 | 37 |
| 第6章 | リアルタイムシステムにおける評価実験 | 39 |
| 6.1 | 実験目的 | 39 |
| 6.2 | 実験概要 | 39 |
| 6.3 | 実験環境 | 39 |
| 6.4 | 実験手順 | 40 |
| 6.4.1 | 屋内体験者 | 40 |
| 6.4.2 | 屋外体験者 | 40 |
| 6.5 | 評価方法 | 41 |
| 6.6 | 実験結果と考察 | 42 |
| 6.6.1 | 自分が体験場所以外に存在する感覚と風の現実感 | 42 |
| 6.6.2 | 感情価・覚醒度 | 43 |
| 6.6.3 | コプレゼンス | 45 |
| 第7章 | おわりに | 48 |
| | 謝辞 | 49 |

| | |
|-------|----|
| 参考文献 | 50 |
| 発表リスト | 53 |

第1章 はじめに

適度な運動が可能な屋外活動は心身の健康に良いとされる [1]. 加えて, 屋外活動を複数人で行うと同調や協調によってより良い効果が期待される [2]. しかし, 様々な理由で屋内での生活を余儀なくされている人々にとって一人であるいは複数人での屋外活動によるメンタルヘルスの改善効果は享受できない問題がある. その解決策の一つとして, 遠隔地にいるような感覚を創出するテレプレゼンスに注目が集まっている.

これまでに, 臨場感の向上や心的距離感の接近を実現する映像伝送による視覚的なテレプレゼンスが開発されてきた [3, 4]. さらに, 触力覚や嗅覚を含めた複数の感覚提示が可能なテレプレゼンスも提案されている [5, 6]. 一方で, 様々な風速・風向の風を感じられることは, 屋外の特徴であり, 屋外活動に対するテレプレゼンスとして重要な要素であると考えられる.

風の知覚 (風覚) が生じるテレプレゼンスが開発されてきた [7, 8, 5]. 文献 [5] では, ファンが起動してから目標回転数に到達するまでに時間がかかるため, 風を与えるタイミング本来与えるタイミングからずれたり, 目標風速よりも遅い風速になったりする問題点があった. そのファンの起動から体験者に実際に与えるまでの遅延をなくす機構を搭載したファンシステムを開発しこれまでよりもよりバーチャル空間に適した風を提示する. 文献 [7] では, 吐息による風を提示する. 文献 [8] では, 屋外に設置した風速計が記録した実際の風を提示する. これらの研究では, 風覚の提示を追加することによって, 映像のみの提示に比べて屋外にいる感覚の向上やオンラインで話している相手とより一緒に空間にいる効果を向上させることを実現している.

従来の風覚を用いたテレプレゼンスシステムでは, 屋外で吹いている風による提示はできているが屋外活動を行っている人の移動によって生じるその瞬間の風や壁・建物などに遮られることによって生じる風が減衰するなどの環境風の変化を提示できない. 例えば, 文献 [8] は, 風の強さと向き再現性を達成しているが, センシングデバイスが大きく, ウェアラブル性に欠ける. 先行研究では取り入れられていない部分を導入・開発することで, これまでのシステムでは提示できていないこれらの屋外活動者が感じている風覚を屋内の体験者に提示できる. これにより,

これまでの風覚テレプレゼンスシステムに比べて、より屋内で提案システムによって体験提示を受ける人が屋外活動者と近い心理的距離間で接しているような感覚を与えることが期待できる。提案するテレプレゼンスシステムには次の3点を満たすシステムを開発する。

- センシング部の高いウェアラブル性
- 風の強さと向きの再現
- 風覚のリアルタイム再現

センシング部の高いウェアラブル性と風の強さと向きの再現の要件を満たした風覚のテレプレゼンスシステムを開発することで、人の移動によって生じるその瞬間の風や壁・建物などに遮られることによって生じる風が減衰するなどの環境風の変化の提示を実現できる。また、風覚のリアルタイム再現手法を開発することでリアルタイムでコミュニケーションを取りながら体験を実現できる。

そこで本研究では、まず人の移動によって生じるその瞬間の風や壁・建物などに遮られることによって生じる風が減衰するなどの環境風の変化の提示に必要なセンシングの高いウェアラブル性および風の強さと向きの再現できる提示を行うテレプレゼンスシステムを開発・評価する。提案システムにおいて風覚提示の効果を確認した後に、風覚の共有をリアルタイムで再現できるシステムを開発する。屋外で活動を行う人に視聴覚・風覚のセンシングを行ってもらい、屋内でセンシングデータに基づいて、視聴覚に加えて風覚の提示を受ける人が屋外活動者が活動した場所で自分がいるような感覚の創出を目的とする。

提案システムの評価としてまず、センシングシステムを用いて事前記録した風覚をディスプレイシステムを用いて屋内で体験するコンテンツ評価を行う。体験者のアンケート回答を用いた主観的評価と表情筋および心拍数を用いた客観的評価に関して、実環境とバーチャルリアリティ (VR) 環境での体験の比較によって評価し、提案システムにおける風覚ディスプレイによってプレゼンスが向上するかを明らかにする。次に、リアルタイムテレプレゼンスシステムを実装し、システム評価実験を行う。

本論文では、2章で屋外活動の効果や風覚の効果、これまで提案された風覚提示を取り入れたテレプレゼンスシステムを概観する。また、それを踏まえて、3章で

は、本研究の位置づけを述べたうえで提案システムについて述べ、4章にて提案システムの実装について述べる。5章では、提案システムにおける風覚提示の効果を確かめるために、これまでのテレプレゼンスシステムと同様に記録した結果を再現するコンテンツ評価について述べる。6章では、提案システムを用いてリアルタイムテレプレゼンスシステムの動作実験について述べる。7章では、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

2.1 複数人で行う屋外活動の効果

メンタルヘルスの改善や心理的ストレスの軽減のために屋外活動を行うことが効果的であることが期待されている [1, 2]. 例えば文献 [1] では、リハビリテーションにおいて屋外環境でのレクリエーションをすることで身体的機能の回復のみならず、屋内では認められない発話の多様化やそれによって生じるセラピストとの会話が精神的ストレスへの改善や社会性の促進、レクリエーション遂行能力の向上が確認されている。また、文献 [2] では、他者と運動を行っていないものに比べ、他者と運動を行っている方が、ストレス反応やメンタルヘルスの不調が低い状態になることが確認されている。

本研究では、様々な理由で屋内での生活を余儀なくされている人々に対して、他者との屋外活動を行った感覚を創出することを目的にテレプレゼンスシステムを提案する。また、屋外活動の中でも一般的に行われている他者との歩行活動 (散歩) を対象とする。

2.2 風覚の効果

屋外活動において、人は自然に吹く風と移動時に発生する風を感じるということが考えられる。屋外における人が感じる快適性は、風の影響が大きいことが知られている [9, 10]. 文献 [9] では、適度な風が吹いていると人は快適に感じ、突然強い風が吹くと不快になる傾向があると報告している。また、文献 [10] でも、性別や年齢によって感じ方は異なるものの、風速の大きさ・変動によって人が感じる快適性に変化が生じることを報告している。一方で、人は人工的に発生させた風においても速度に揺らぎのある風を受けるとリラククス効果を生じることも報告されている [11]. したがって、風覚は人の感じる感覚の中で快適性の観点で重要な要素の一つであるといえる。

本研究は複数人での屋外活動による快適性の変化を屋内の人に提示することを目的に、これに適したテレプレゼンスシステムを提案する。したがって、与える感覚

として快適性に直接関与する風覚を含む。

2.3 バーチャル空間における風覚提示

臨場感を向上するためにバーチャルリアリティ (VR) の分野では古くから視覚と共に風覚を与えるディスプレイが様々提案されている [12, 13, 14, 15, 16, 17]. 世界初の多感覚提示システムである Sensorama [13] をはじめ, リアリティや臨場感の向上を目標とした WindCube [14]・Head Mounted Wind [15] など風覚提示方法に焦点を当てたシステムが開発されている. また風覚も含めた多感覚提示として, 振動・風覚提示のなかで出力遅延を抑えることで体験を向上したシステム [12] や風覚提示に温度感を追加し臨場感を向上したシステム [16, 17] など開発されている. 例えば文献 [12] では, 複数のファンを用いて複数方向からの風を提示している (図 2.1). 図 2.1 のシステムを用いて, 映像提示に風覚提示のみ・振動提示のみ・風覚・振動提示の両方を加える条件いずれにおいても映像提示のみに比べて, 屋外で歩行している感覚が高くなったことが報告されている. 一方で, これらバーチャル空間における風覚提示はあくまでバーチャル空間上の風覚を提示しており, 実空間に吹く風を提示しているわけではない.

本研究は屋外での人の移動に伴う風をセンシングし, リアルタイムに屋内のユーザにその風を提示する. 提案システムでは実空間上で感じる風覚の提示を目指す.

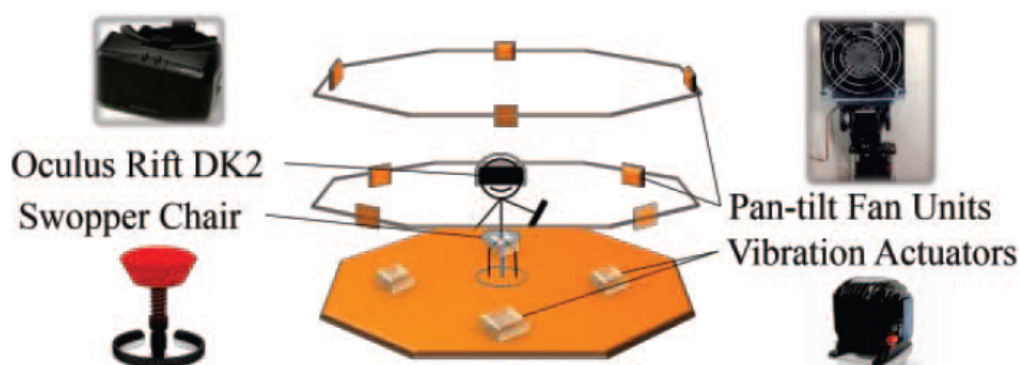


図 2.1: Haptic I/O [12]

2.4 実空間の風の再現

風覚を用いた先駆的な実空間のテレプレゼンスシステムとしてビュー・ビュー・View [7] が挙げられる。ビデオ通話に加えて、呼吸感を伝える風を利用した入出力インタフェースによって、ユーザは遠隔地にいる相手の存在をインタフェースを使わない場合に比べてより強く感じられる。一方で、呼吸感の提示には風の強弱の制御が必要なのに対して、風向の変化は不要であるため表現されていない。

3次元的に屋外の風をセンシングし再現する入出力インタフェース [8] が提案されている (図 2.2)。遠隔地で記録した風を再現することで臨場感を向上する。さらに、風の記録をアーカイブすることで過去の遠隔地での体験を追体験できる。一方で、本システムでは風向が測定できない風速計を使用しているため、複数の風速計を用いて風向を記録しているため、簡単には持ち運べない大きさになっている (図 2.2a)。そのため、センシングデバイスは設置して計測を行うことになり、人の移動によって発生する風や環境の変化には対応できない。

本研究は屋外の様々な風速・風向の風を提示できるテレプレゼンスシステムを提案する。したがって、風向のセンシングが必要である。さらに、人の移動に伴う風をセンシングするため、センシング部はウェアラブルである必要がある。



(a) 風センシングデバイス

(b) 風覚ディスプレイ

図 2.2: 実環境風センシングおよび風覚ディスプレイ (WindStage) [8]

2.5 エモーションの測定

本研究におけるテレプレゼンスシステムは臨場感の向上といった面だけでなく、人の心理的な面にポジティブな効果を与えることを期待している。この効果を検証するために体験者の感情を測定する必要がある。人の心理状況 (エモーション) の測定方法は、心理学的興味やマーケティング分析への適用可能性などの面から測定方法が様々提案されている [18, 19, 20]。Self-Assessment manikin (SAM) [18] は、指標が絵で表されているため文化や言語の影響を受ける事無く、快から不感を表す快次元・興奮から落ち着いた状態を表す覚醒の次元をそれぞれ 9 段階で評価できる。Affective Slider [19] は、覚醒度と楽しさという基本的なエモーションを連続的尺度で測定できる (図 2.3)。また、自己申告の評価以外にも心拍・筋電位などの生理的指標を用いた評価も提案されている [20]。例えば、文献 [20] では、心拍によって覚醒度を測定、眉と頬の筋電位を測定によって表情を推定し、感情価の測定を可能にしている。

エモーションの測定は様々提案されているが、本研究ではエモーション測定において主観的な評価として用いられる Affective Slider と文献 [20] を元に開発された表情筋センサ・心電センサデバイスを使用し、表情変化・心拍からのストレス指標値を用いた客観的な評価を用いて、テレプレゼンスシステムの評価を行う。

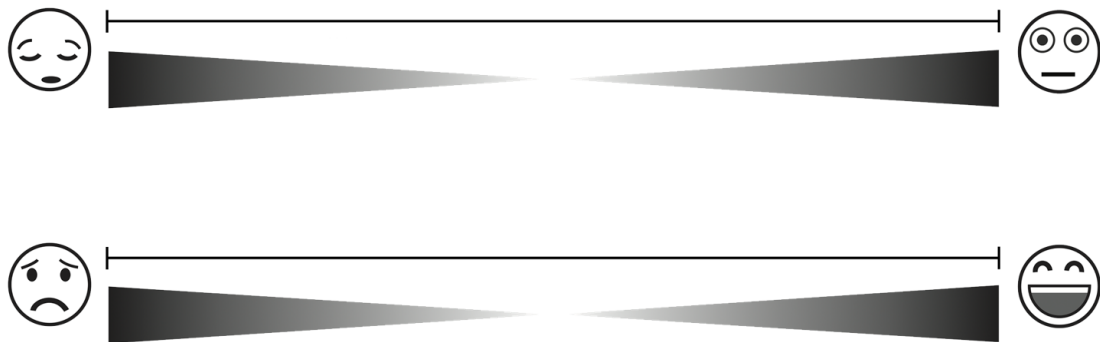


図 2.3: Affective Slider [19]

第3章 システム設計

3.1 概要

本研究ではまず以下2点を持ったシステムに提案する。これらによって、これまでのシステムでは提示できなかった屋外活動を行っている人が移動することによって生じる風や環境の変化に対応した風覚の提示を実現する。

- センシング部の高いウェアラブル性
- 風の強さと向き再現

提案デバイスによる映像・風覚提示から生じるプレゼンスと社会的存在感の向上およびエモーションの変化をアンケートから評価する。また、エモーションの変化に関しては、表情筋センサや心電センサによって生理的指標を用いた定量評価を行う。

本研究では、屋外での歩行などの移動に伴う風のセンシングを行い、測定結果を屋内の体験者に風ディスプレイを用いてリアルタイムに提示するテレプレゼンスシステムを提案する。本システムによって、屋内の体験者が屋外活動を行っている人と一緒にいるように感じる体験を提供する。本章では、提案システムを構成するセンシング部とディスプレイ部の要件を説明する。

3.2 センシングシステム

3.2.1 風覚

提案システムのセンシング部に採用する風速計は、次の四点を満たす必要がある。一つ目に、風速と風向が計測できる。二つ目に、低速域で計測できる。三つ目に、屋外で計測できる。四つ目に小型軽量である。

風速計にはピトー管式、熱線式、ベーン型、超音波式などが存在し、表3.1のような特徴がある。特に超音波風速計は、風向も測定可能であり、低速域で使用可能・屋外使用可能といった特徴を持つ。したがって、提案システムに適した風速計は超音波風速計である。さらに、屋外で計測できる小型の超音波風速計を採用する。

表 3.1: 風速計の種類とその特徴

| 風速計の種類 | 特徴 |
|--------|---------------------------------------|
| ピトー管式 | 高速域での計測が可能である。 5 m/s 以下の風速測定ができない。 |
| 熱線式 | 温度変化の影響を受けやすい。 ちりやほこりでこわれやすい。 |
| ベーン型 | 温度変化の影響を受けにくい。 風向測定ができない。 |
| 超音波式 | 低速域で風向と風速の測定が可能である。 |

3.2.2 映像・音声

提案システムにおける映像・音声は、屋内体験者が周りを見渡せるような映像を見せることで一般的なカメラで撮影した動画よりも実際の歩行のときに近い視覚を提示できる。また、周りの状況や屋外のセンシング側の人の声や環境を提示するために音声の記録・配信をすればよりその体験が向上する。提案システムでは、記録デバイスとして 360° カメラである RICOH THETA V を使用する。RICOH THETA V は最高 4K 画質で撮影でき、カメラ自体に映像を保存できるうえ、PC に USB 接続をして 360° 映像をリアルタイムに YouTube などのプラットフォームを用いて映像配信できる。また、4ch のマイクを本体に搭載しており、ステレオ音声で屋外活動者周辺の環境音や発言を録音・配信することができる。これらのことから RICOH THETA V は提案システムに要求を満たしていると言える。

3.3 ディスプレイシステム

3.3.1 風覚提示

屋外ではそよ風のような微風から台風のような強風まで様々な風速の風が発生する。しかし、強風が吹き荒れる嵐の中で屋外活動は通常行われぬ。そこで、再現する風速域はビューフォート風量階級表 [21] を参考に決定する。ビューフォー

ト風量階級表は地表から 10 m の高さで計測された風速の参考表であり，提案システムの風速域に直接適用することはできない．しかし，風速が階級で分けられており，気象庁も参照するほど信頼性の高い指標であるため，再現する風速域の検討に用いる．

提案システムでは，屋外での活動方法として散歩を想定している．階級表における地表物の様子のうち，砂埃が立たない程度以下の風速階級であれば散歩が行える環境であると考えられる．よって，0 m/s – 5 m/s まで再現できれば晴天時に散歩している感覚を再現できる．

屋外では風向の自由度は非常に高いが，移動による風向は身体前方から側方をぬけることがほとんどである．対して，鉛直方向の風は相対的に少ない．したがって，本研究では三次元的なセンシングとディスプレイを行わず [8]，二次元的なセンシングとディスプレイによって前方から側方への風を再現する．

文献 [22] では，顔を固定した状態で頭部のみに風を与えることで人の風向知覚特性を明らかにしている．人間の風向知覚分解能は約 25° であったと報告がされている．体験者を中心に円を描くように体験者の正面を 0° とし $\pm 90^\circ$ まで配置しやすい約 30° の間隔で体験者とファンの距離が 1 m の場所にファンを配置する．文献 [22] とは異なり，手でファンを配置するため配置角度を 25° に近く配置しやすい角度に設定した．

3.3.2 映像・音声提示

提案システムでは，室内体験者が自然にセンシング環境の様子を視覚的に見渡せるために 360° カメラで撮影した映像をヘッドマウントディスプレイ (HMD) を用いて提示する．HMD で視覚提示を行うことで首を動かしたり，体をひねったりなど散歩などの屋外活動でも行うような動作で室内体験者が周りの環境を視覚的に確認することができる．それにより，モニタ上に映像を映し出す提示方法に比べ，室内体験者が屋外で活動しているような感覚を視覚的に得ることを期待する．また，音声はイヤホン・ステレオスピーカなどを用いてステレオ再生を行い，センシング環境での環境音や屋外で活動する人の声などを聴覚提示する．

第 4 章 実装

4.1 センシングシステム

風覚のセンシングデバイスとして小型の超音波式風向風速計 (Calypso Instruments 社の ULTRASONIC ULP) を用いる。風速計の仕様を表 4.1 に示す。0.5 m/s から風速測定可能であり、小型軽量である。風速計を持ち運びながらセンシングを行うためには、身体に風が阻害されにくい場所に風速計を配置する必要がある。そこで、バックパックに頭頂よりも先端が高い位置になるポールを固定し、その先端に風速計を設置する (図 4.1)。また、風向・風速測定値はバックパック内のノート PC に csv 形式で保存する。また、360° カメラには、RICOH THETA V を用いる。カメラは、スタビライザに装着した状態で屋外活動者自身の手で把持しながら歩行時の映像を撮影する。撮影する際は、屋外活動者の頭の高さかつ頭の横の位置で持つようにすることで、屋内体験者が HMD で映像視聴した際に屋外活動者の存在を認知しやすいような撮影を行うようにする。

表 4.1: 風速計仕様

| | |
|--------|---------------------|
| 風速測定範囲 | 0.5 m/s – 40 m/s |
| 風速分解能 | ±0.1 m/s (10 m/s 時) |
| 風向測定範囲 | 0° – 359° |
| 風向分解能 | ±1° |
| 全高 | 68 mm |
| 直径 | 65 mm |
| 重量 | 210 g |



図 4.1: センシングシステム

4.2 ディスプレイシステム

4.2.1 風向提示

提案システムにおけるファンの配置を図 4.2 に示す。風向提示方法は 3.3.1 で説明した要件を満たすように7つのファンを体験者の周りを囲うように配置し、それぞれのファンを ON-OFF することで風向情報の提示を行う。



図 4.2: 風覚ディスプレイシステム

4.2.2 風速制御方法

風覚ディスプレイに使用するファンは、山善製 YARDD251 に内蔵されたモータを外部に接続したマイコンによって回転速度を制御し、風速を PC 側から制御できるようにしている。風覚ディスプレイシステムは図 4.3 のように Python とマイコンによって制御する。ファンのモータは制御パルス周波数によって回転速度が変化し風速を制御できる。

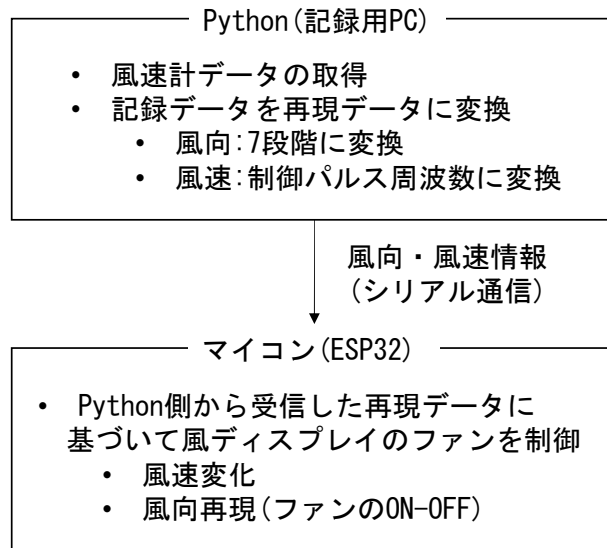


図 4.3: システム制御概要

4.3 測定風速とファン風速出力の対応づけ

4.3.1 計測目的

風速計で測定した風速を再現する制御信号を決定するため制御パルス周波数と風速のマッピングを実験を通して行った。モータは duty 比 0.5, 振幅 3.3 V – 5 V の PWM 制御信号の周波数を変更することで回転速度を変化させることができ、ファンから出力される風速を制御できる。様々な制御パルス周波数を与えた場合の、1 m 離れた地点の実際の風速を計測し、計測結果から出力風速と入力制御パルス周波数のマッピングを行う。なお、提案システムでは全てのファンと体験者の距離は等しく、使用するファンの型番はすべて同じものを使用するため、ファン 1 台のみを用いて測定する。

4.3.2 計測装置

実験装置の構成と実験環境を図 4.4, 4.5 に示す。また、外乱を防ぐため空調を切った状態で測定を行った。出力に対して、試作システムにおけるファンと体験者の距離と等しいファンから 1 m 離れた位置に配置した風速計で風速を 5 分間計測する。計測間隔は 1 秒間に 1 回と設定したため各制御パルス周波数につき 300 サンプルが計測される。

4.3.3 計測手順

ファン制御用 PC から制御用パルス周波数を変化させ、ファンのモータにパルスを入力する。その後、モータ回転の安定を確認した約 10 秒後から 5 分間の計測を開始する。この手順を制御パルス周波数を 90 Hz - 450 Hz まで 5 Hz 間隔で変化させ測定を行った。モータに流れる電流値を常にモニタし、電流値がほぼ変化しなくなったときをモータの回転の安定時だと判断した。

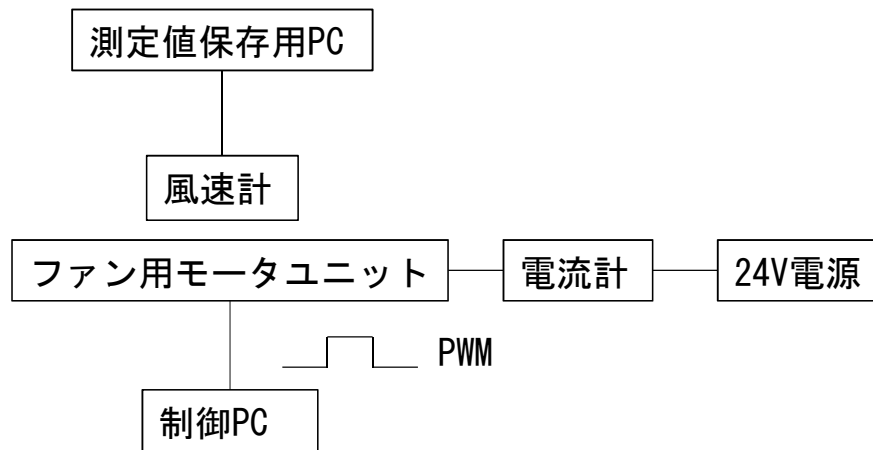


図 4.4: 測定構成

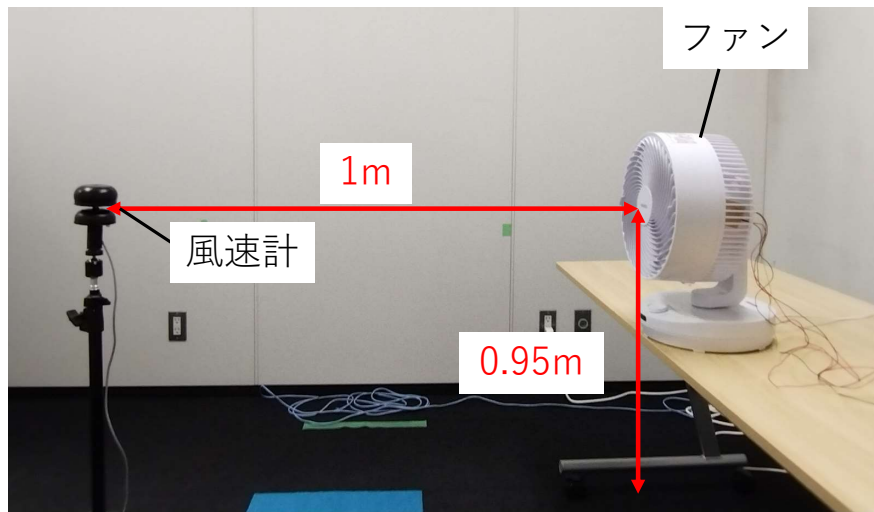


図 4.5: 計測環境

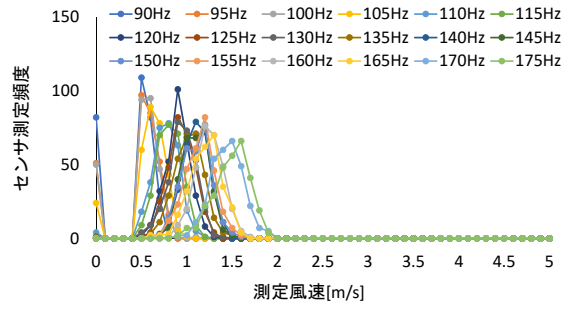
4.3.4 計測結果

計測で得られた 5 分間の結果を図 4.6 に示す. 図 4.6 のようにセンサの測定結果が一定ではなかった. 分布のなだらかさに違いがあるが, おおよそ正規分布に近い. 各制御パルス周波数の計測結果において最頻値を出力風速とした. この最頻値をプロットしたものを図 4.7 に示す. プロット点周辺の色塗りされた領域は 5 分間の風速測定時の標準偏差を表している. グラフを見てわかるように, ほぼ線形な結果となった (相関係数 $r = 0.98$). PWM 信号が 90 Hz 以下のところではファンが回転したものの, 風速計の測定範囲を下回ったため評価できなかった. また, 図 4.7 から発生させる風速が大きくなるにつれてばらつきが大きくなることが確認できた.

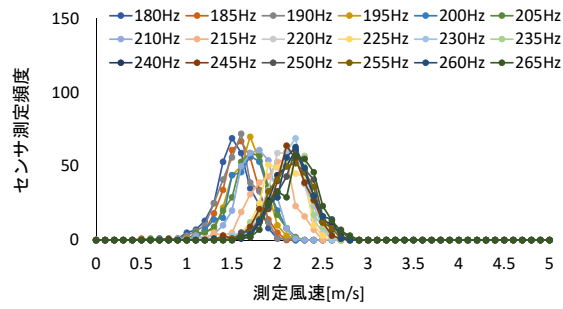
また本実験では風速計に対して 0° 方向に設置した後, 位置を動かさず測定を行った. その方向において測定できた風向測定結果について入力制御信号ごとの標準偏差を表したものを図 4.8 に示す. このグラフより今回の環境において, 風速が遅いとき, 風向のばらつきが大きくなる傾向も確認できた.

4.3.5 計測結果に対する考察

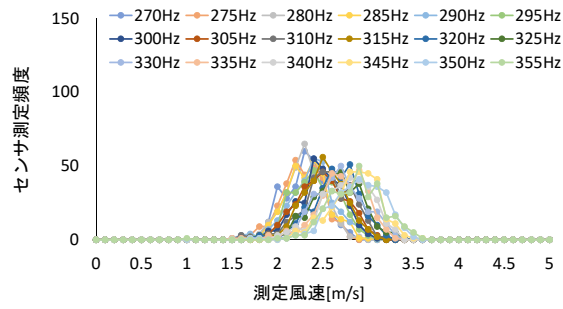
実験結果より本研究における風ディスプレイは $0.5\text{ m/s} - 4\text{ m/s}$ 近くまで再現可能であることが確認できた。目標の 5 m/s を下回ったが、快適な環境下での散歩体験の共有というシーンでは利用可能であると考えられる。また、図 4.7 のグラフからわかるように風速が大きくなるにつれファンから発生する風速のばらつきが大きくなった。このばらつきがセンサの計測精度よりも大きいことからファンの出力が完全には一定でないと考えられる。図 4.6 よりファンの出力風速が大きくなるにつれて分布がなだらかになっていることからファンの出力上限に近づくと風速の出力がばらつきやすいと考えられる。文献 [23] によると指先のみで風を当てたときの丁度可知差異は約 0.7 m/s である。提案システムにおいては、顔に HMD を装着した状態で風が当たることになり、この丁度可知差異よりも大きくなると考えられ、ファンによる提示風速のばらつきの影響は少ないと考えられる。また風向に関して、風速によって測定値にばらつきが生じている。提案システムにおける風向提示分解能は 30° である、図 4.8 から最も標準偏差が大きい場合でもこれより小さいことが分かる。これらのことから風速・風向の提示の使用するファンに起因するばらつきは体験に影響を及ぼさないと考えられる。



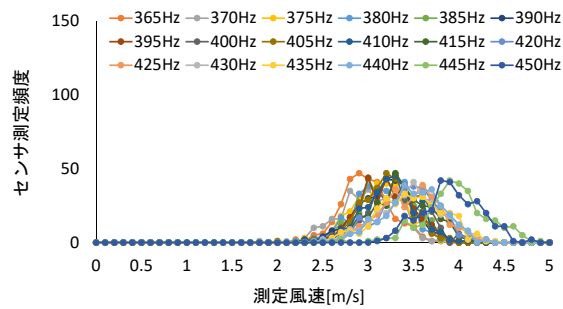
(a) 90 Hz - 175 Hz



(b) 180 Hz - 265 Hz



(c) 270 Hz - 255 Hz



(d) 360 Hz - 450 Hz

図 4.6: 測定結果

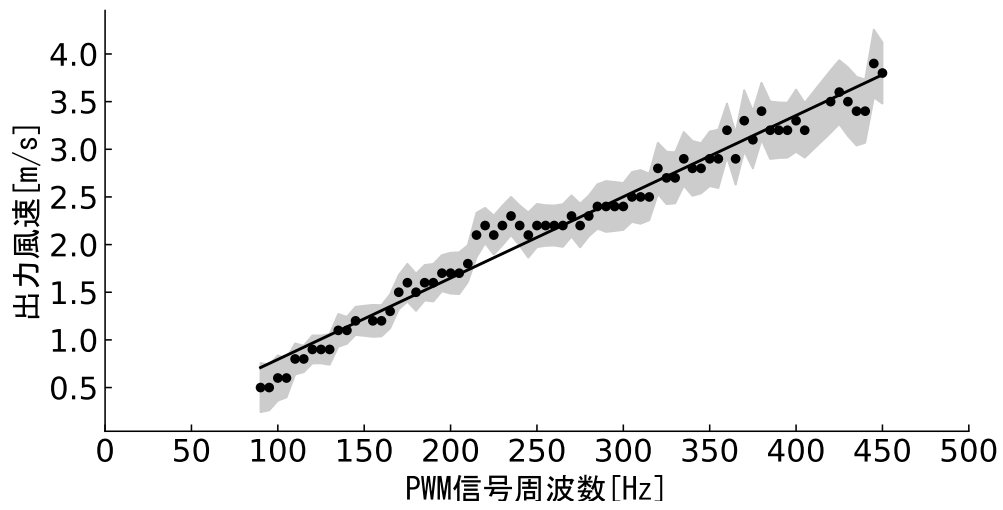


図 4.7: 風速測定結果

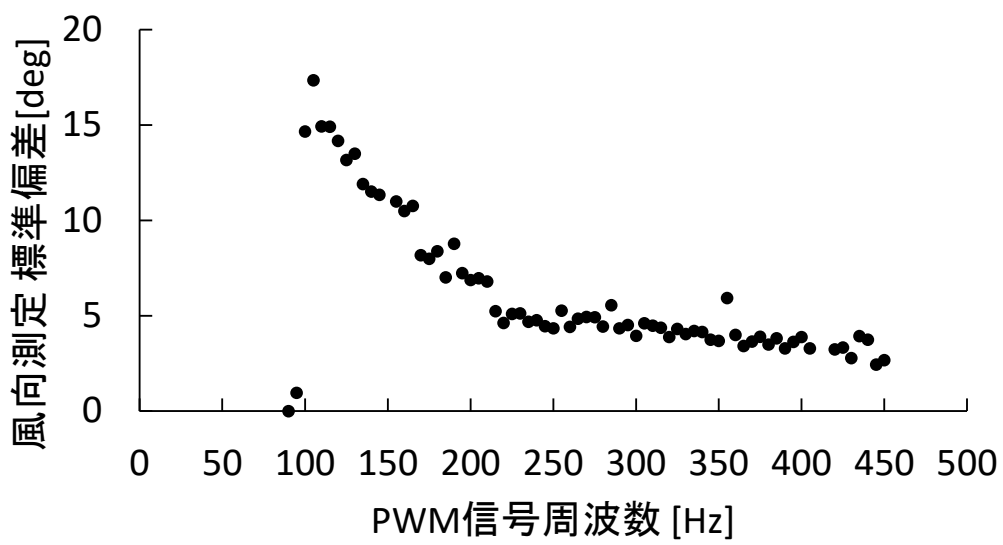


図 4.8: 風向測定のばらつき

4.4 非リアルタイムテレプレゼンスシステム概要

図 4.9 に非リアルタイムテレプレゼンスシステムの概略を示す。このシステムは、事前に屋外で歩行しながらセンシングシステムを使用して、その際の視聴覚およびそれと同時に記録した風覚を動画ファイルおよび csv ファイル形式で保存する。保存したデータを屋内側の PC に移動し、ディスプレイシステムによって屋内体験者に提示することで、屋外活動者が見た景色や感じた風を屋内体験者が後から体験できる。映像は Unity から Oculus Link を利用して HMD (Meta Quest, Meta Quest 2) に映し出され、映像の再生を開始したと同時に映像と同期した風覚データの読み込みおよび再生を Python により行っている。ローカルに保存したデータを再生するシステムであるため、ネットワークを使用せず体験を提供できる利点がある。しかし、屋外の撮影者と屋内の体験者の体験のタイミングが一致しない状態での体験となるため、屋内体験者と屋外活動者同士がコミュニケーションを取りながら屋内体験者がテレプレゼンスシステムを体験することが困難である。

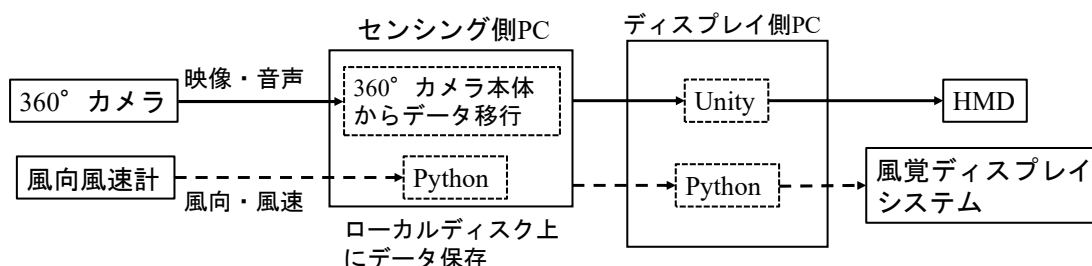


図 4.9: 非リアルタイム提案テレプレゼンスシステム概略

4.5 リアルタイムテレプレゼンスシステム概要

図 4.10 にリアルタイムテレプレゼンスシステムの概略を示す。本システムはセンシングシステムを使用して、バックパック内の PC からインターネットを通じて屋内体験者に屋外の映像・音声・風覚を配信できる。映像・音声は YouTube のライブ配信を利用して配信を行い、屋内体験側では HMD で YouTube から映像を視聴することで、屋外の視聴覚を屋内体験者に共有する。風覚は、ソケット通信に

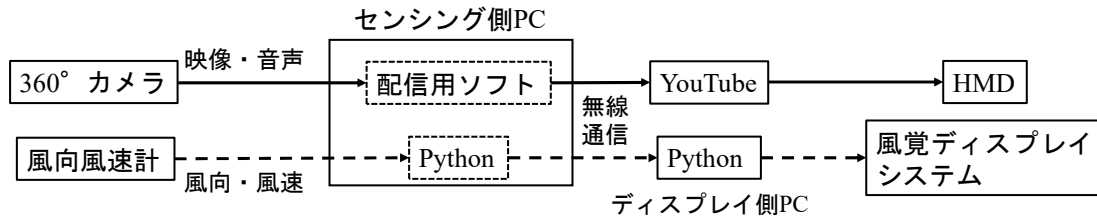


図 4.10: リアルタイム提案テレプレゼンスシステム概略

よって屋外のバックパック内の PC と屋内のディスプレイシステム制御用 PC との 1 対 1 通信を行い，センシングデータに基づいて風覚ディスプレイを制御，屋内体験者に提示することにより屋外活動者が感じている風覚を共有する．リアルタイムでインターネットを通じて配信を行うため屋外活動範囲・屋内体験場所ともにインターネット環境が必要であるが，屋内体験者は屋外活動者とコミュニケーションを取ることが可能になる．

第 5 章 非リアルタイムシステムにおける評価実験

5.1 実験目的

本実験では、提案するディスプレイシステムを用いて、アーカイブ化した視聴覚・風覚を体験者に提示する。その時、風覚が自分がいる場所以外にいるような感覚を向上させるか・HMDをかぶった状態でも体験者は映像から想像できる風覚を適切に被験者に提示できるか・エモーションについてはどのような影響があるかについて評価を行う。アンケート回答を用いた主観的評価および眉・頬の筋電位、心電を用いた客観的評価から 3 種類の映像について、風覚を被験者に提示した場合としない場合の体験の比較によって評価する。

5.2 実験概要

本実験では、被験者は 3 分間コンテンツを体験する。コンテンツは図 5.1 のような 3 種類の映像と風覚提示のあり・なしの合計 6 条件のコンテンツを全被験者が体験し、各条件でアンケートに回答する。各条件の提示順序はカウンタバランスを考慮し被験者ごとに提示順序をランダムに入れ替えて提示を行う。映像から人が想像する風覚の違いの影響やエモーションの感じ方の違いを比較するため風覚提示ありなしに加えて、3 種類の映像を被験者に提示する。本実験は倫理審査番号 2022-I-48 にて倫理審査を認可されている。



(a) つり橋の上を歩く映像



(b) 平坦な道のみを歩く映像



(c) 階段をのぼる区間を含んだ映像

図 5.1: 提示する映像の種類

実験環境を図 5.2 に示す。被験者は HMD である Meta Quest と眉・頬筋電位、心電を測定するセンサデバイスを装着し、提案ディスプレイシステムを体験する。室温の変化による被験者ごとの感じ方の影響をなくすため、室内の温度は 20°C 前後に維持して実験を行う。また、被験者ごとに体験する風覚に違いを生まないよう



図 5.2: 実験の実施環境

にするため、被験者には大きく体をひねらないように指示した。

5.3 実験手順

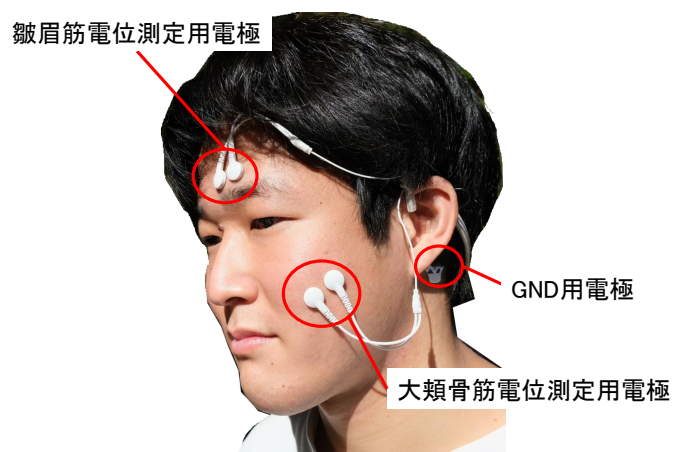
実験は以下の手順で行う。

- (1) 提案システム・実験に関する目的および実験手順の説明を受ける。
- (2) 表情筋センサ・心電センサ (図 5.3, 5.4) のセンサを装着する。
- (3) 椅子に座り、センサキャリブレーションを行う。
- (4) HMD とイヤホンを装着し、以下の条件のうち 1 つを行う。
 - (3-a) つり橋上の歩行映像提示 (風覚提示なし)
 - (3-b) 道が平坦な神社の歩行映像提示 (風覚提示なし)
 - (3-c) 階段をのぼる区間を含んだ神社の歩行映像提示 (風覚提示なし)
 - (3-d) つり橋上の歩行映像提示 (風覚提示あり)

- (3-e) 道が平坦な神社の歩行映像提示 (風覚提示あり)
- (3-f) 階段をのぼる区間を含んだ神社の歩行映像提示 (風覚提示あり)
- (5) 椅子に座り，表情筋センサ・心電センサの計測を終了する.
- (6) HMD とイヤホンを外し，アンケートに回答する.
- (7) 手順 (3)-(6) をすべての条件で行う.



(a) 表情筋測定センサ外観



(b) 表情筋測定センサ取付位置

図 5.3: 表情筋センサ

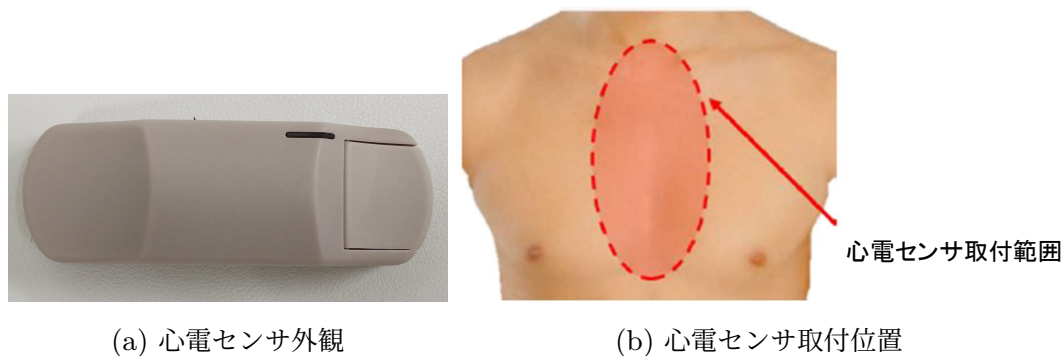


図 5.4: 心電センサ

5.4 評価方法

風覚提示の効果を評価方法として、アンケート・心拍変動・表情変化を用いる。アンケートは、体験場所以外に存在しているような感覚・風の現実感 [14]・映像酔いの度合い [24]・感情価・覚醒度 [19]・自分以外の人と一緒にいるような感覚(コプレゼンス) [25] を評価するアンケートをそれぞれ実施し、心拍変動・表情変化は心電センサ・表情筋センサを用いて測定する。

体験場所以外に存在しているような感覚・風の現実感・感情価・覚醒度については、Visual Analog Scale(VAS) 評価を用いて評価する。感情価、覚醒度については図 2.3 を用いて評価し、体験場所以外に存在しているような感覚 (Q1)・風の現実感 (Q2) をアンケートとして用意した。

Q1 どのくらい自分が今ここ以外の場所にいるように感じたか? (0-100)

Q2 風はどのくらい現実と同じように感じたか? (0-100)

映像酔いについてのアンケートとして、Simulator Sickness Questionnaire(SSQ) を日本語訳したものを被験者に回答してもらった。SSQ は 16 項目からなり、0-3 までの 4 段階の尺度で回答する。各回答に対して、Nausea(吐き気)、Oculomotor(眼球運動)、Disorientation(ふらつき感) が割り振られている。この領域ごとに重みが与えられており、合計値や集計値を求めることで映像による酔いの度合いを評価で

きる。

コプレゼンスの評価は文献 [25] から相互認識・共感・相互注目・相互理解の4カテゴリのアンケート項目を日本語訳したものを使用し，同意しない・同意するを7段階のリッカート尺度で回答する．コプレゼンスに関するアンケート内容について以下に示す．各カテゴリ内のアンケート項目の合計値がカテゴリスコアになる．

- 相互認識

- 私は一人でいるように感じるが多かった
- 私は相手の人が孤独に感じたと思う
- 私は相手のことはほとんど意識になかった
- 相手の人は私が部屋にいることに気づいていない
- 私はほかの人を意識することが多かった
- 他の人は私が部屋にいることを意識していた

- 相互注目

- 私は時々相手のことを気にするふりをした
- 相手は時々私に気をつかうふりをしていた
- 相手は私のことをよく見ている
- 私は相手をよく観察していた
- 私の相手は周囲になにかあるとすぐに気が散っていた
- 私は周囲になにかあるとすぐに気が散っていた
- 相手は私を無視しがちだった
- 私は相手を無視しがちだった

- 共感

- 私が幸せだと，相手も幸せになった
- 相手が幸せな時，私も幸せだった
- 相手は私の気分に影響されていた
- 私は相手の気分に影響されていた
- 相手の気分は，私の気分/感情に影響を与えなかった
- 私の気分は，相手の気分/感情に影響を与えなかった

- 相互理解

- 私の意見は相手にはっきり伝わった
- 相手の意見はわかりやすかった
- 私の思いは相手に伝わった
- 相手の思いは私に伝わった
- 相手は私の言いたいことを理解していた
- 私は相手の言いたいことを理解していた

心拍変動・表情変化の測定には、島津製作所で現在開発中の図 5.3, 5.4 のデバイスを使用する。図 5.3 のデバイスは大頬骨筋電位と皺眉筋電位から体験者の表情変化を推測することが可能である [20]。口角を上げた際の大頬骨筋電位の値が大きくなる。これを利用して、笑顔、つまりポジティブな表情の測定を実現している。一方で、眉を顰めたときに皺眉筋電位の値が大きくなることを利用して、ネガティブな表情の測定を実現している。また、図 5.4 のデバイスは胸部に直接貼り付け、心電位を測定することができる。心電位から心拍・心拍変動(ストレス指標値)などを算出することができる。

図 5.3 および図 5.4 で測定される生理指標は個人差が存在する。この個人差を解析時に補正するため、測定時には、測定開始後に被験者へ以下の手順を行うよう指示する。

- (1) 5 秒程度できるだけ口角を上げる。
- (2) 口角を下げ、5 秒間眉を顰める。
- (3) 真顔になるように指示し、安静状態で 60 秒間待機する。

それぞれ、(1)は大頬骨筋電位の被験者個人の最大値の測定、(2)は皺眉筋電位の被験者個人の最大値の測定、(3)は大頬骨筋電位・皺眉筋電位・心電位のベースとなる値の測定を行っている。これらの値から個人の基準信号を取得し、被験者間で発生する個人差を正規化する。

5.5 実験結果と考察

20代の男性12人に対して実験を実施した。体験者1人あたりの所要時間は約80分であった。アンケート項目に関しては映像間による違い・風覚提示のあり・なしの効果を確認するため、反復測定分散分析を行った。アンケート全項目において、wiは風覚提示ありの条件、woは風覚提示なしの条件である。また、bridgeはつり橋を歩く映像提示、flatは平坦な道のみを歩く映像提示、stairsは階段をのぼる区間を含んだ映像提示の条件である。また、*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$ を、エラーバーは標準誤差を示している。

5.5.1 自分が体験場所以外に存在する感覚と風の現実感

図5.5は体験者自身が体験場所以外に存在する感覚、図5.6は風の現実感に関するアンケート回答について示したものである。2項目ともに映像による違いは有意差が確認されず、風覚提示のありなしに有意差が確認された。体験場所以外に存在する感覚のアンケート結果から、提案風覚ディスプレイシステムは、映像提示の効果に加えて体験場所以外に存在する感覚の向上させる目的に有効であることが確認できた。また、風の現実感のアンケート結果から提示する風覚が映像の場所で実際に吹いている風に近い風の提示を行えるシステムであることが示唆された。被験者のコメントからは「映像から想像される風が吹いているように感じた」という意見があり、実環境の風覚のセンシングおよびディスプレイをすることで映像の現実感を向上できることが示された。

一方で、「階段を上がっているときに風のあたる場所が頭から一切変わらないの違和感がある」「後方からの風を一切感じないのは違和感がある」と意見もあり、ファンの数を増やす・ファンの場所移動する機構を追加するなどして風覚ディスプレイ内の風向提示可能範囲を増やす改良が望まれる。

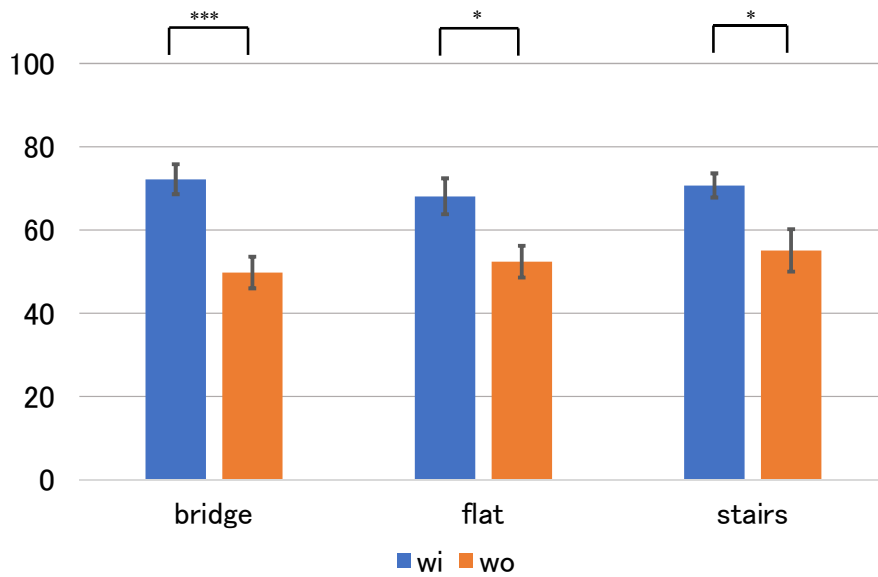


図 5.5: どのくらい自分が今ここ以外の場所にいるように感じたか (非リアルタイムシステム評価実験)

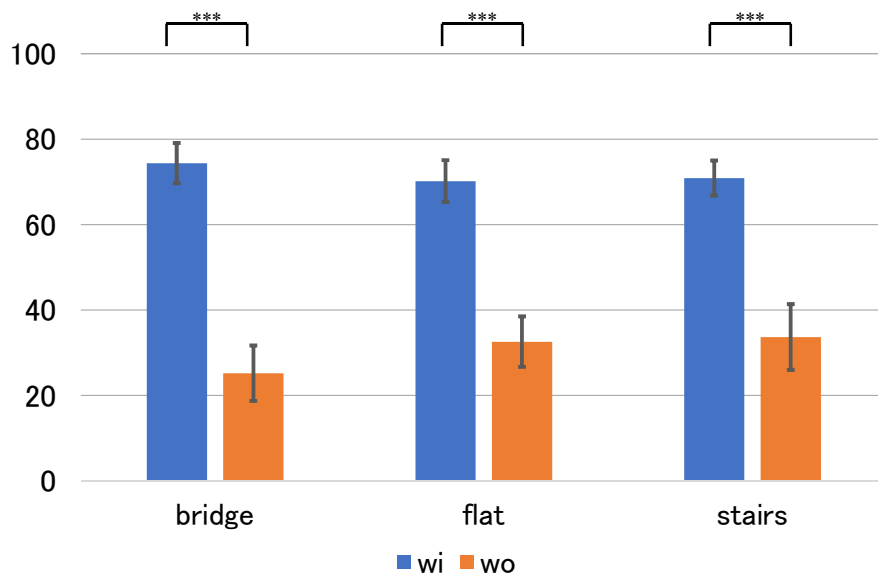


図 5.6: 風はどのくらい現実と同じように感じたか (非リアルタイムシステム評価実験)

5.5.2 映像酔いの度合い

歩行しながらの撮影では、スタビライザを使用した場合でも映像が上下に少し揺れた状態で撮影される。そのため、被験者がその映像を視聴した際に映像酔いを起こさないかの確認、また仮に映像酔いを起こす場合風覚提示に効果があるかを確認するために映像酔いについて SSQ [24] を用いて評価を行った。

図 5.7 は、それぞれのアンケート回答をカテゴリごとにまとめた結果を示したものである。アンケート結果より映像提示のみの条件においても被験者が大きく映像酔いを起こさないことがわかった。このことから提案する撮影方法で映像酔いの観点において体験に影響しないことが確認できた。

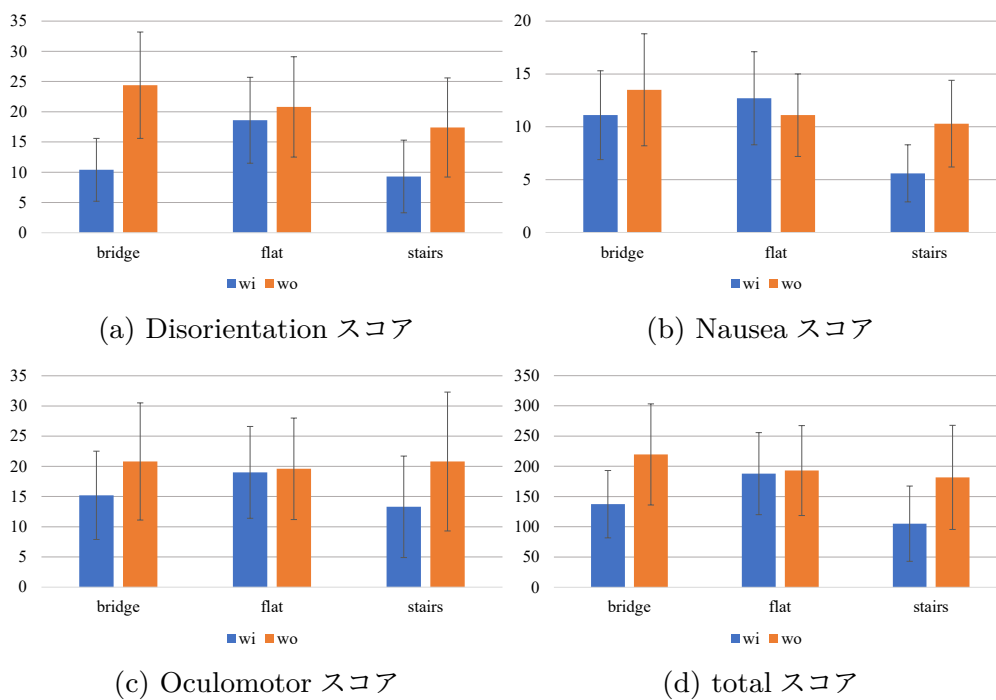


図 5.7: 映像酔い (SSQ)

5.5.3 感情価・覚醒度

図 5.8,5.9 に感情価と覚醒度に関する被験者のアンケート回答結果を示す。感情価に関しては、全映像において風覚提示ありのほうがポジティブな感情の方向に有意差が確認された。これは、屋外映像から想像できる風覚提示による感覚の一致に加えて、文献 [9, 10, 11] でも検証されているような風によるポジティブな効果が発生した可能性が考えられる。

一方で、覚醒度に関してはつり橋の映像における風覚提示ありの条件で大きく覚醒度が上がることが示された。これは 5.5.1 より、風覚提示によって映像の現実感を向上できたことから、よりつり橋という興奮状態になりやすい状況を再現できた可能性がある。これらのことから提案システムを用いて風覚提示を加えることは屋外の現地で感じるエモーションを屋内の体験者に与えること有効であることが示唆された。

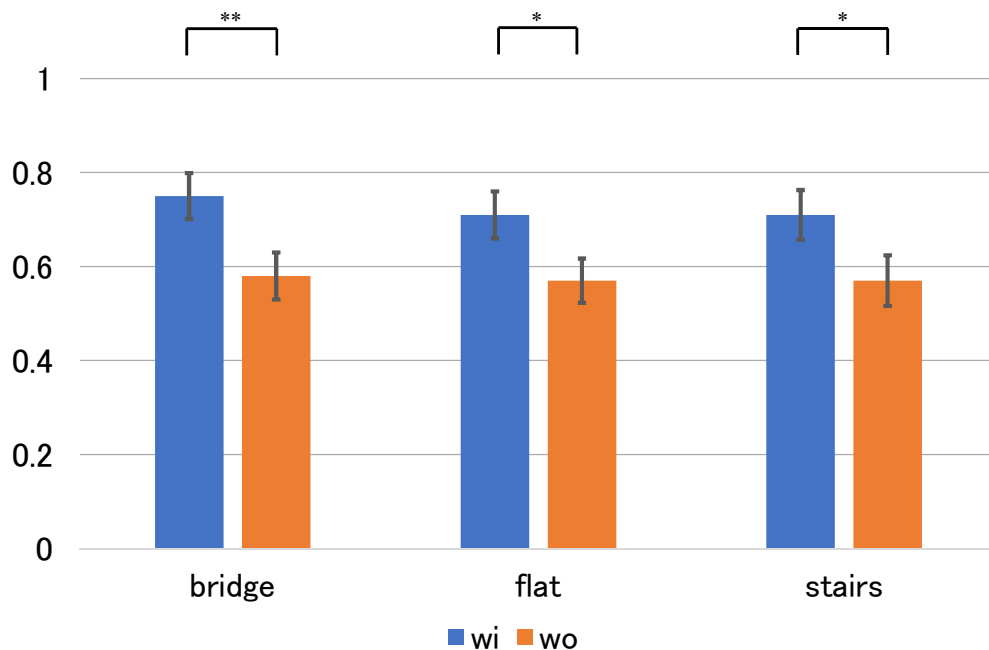


図 5.8: 感情価 (非リアルタイムシステム評価実験)

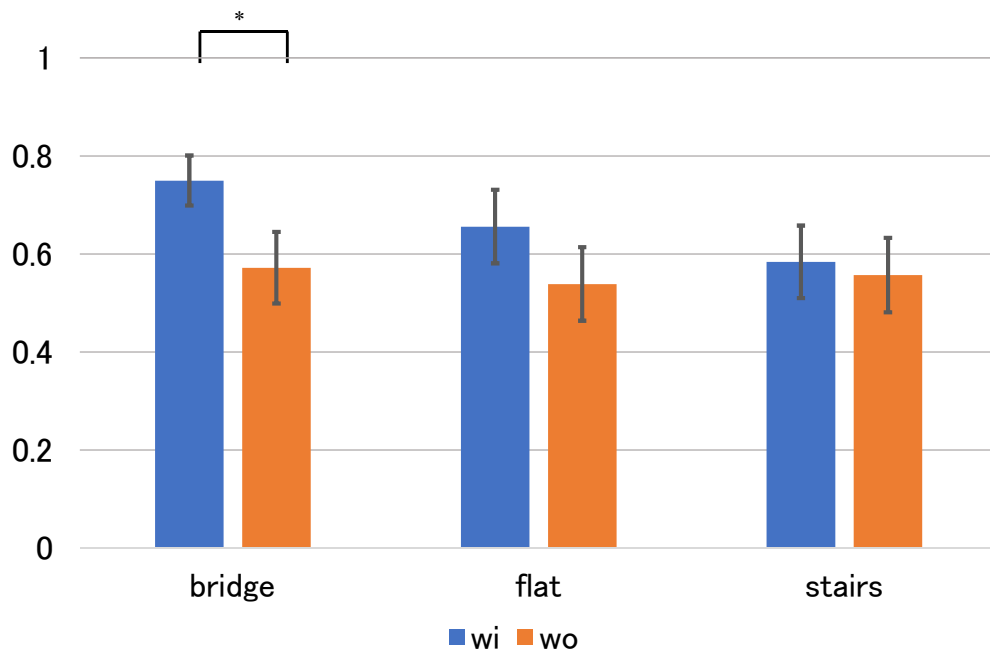


図 5.9: 覚醒度 (非リアルタイムシステム評価実験)

5.5.4 コプレゼンス

図 5.10–5.13 にコプレゼンスに関するアンケート回答結果を示す。本実験では、すべてのアンケート項目において、風覚の効果は確認できなかった。しかし、有意差はないものの映像間でのスコアの変化を確認した。被験者のコメントから、「映像内で人が映っていることが確認できなかった」、「撮影者が映っているのはわかってはいたが、撮影者自身がしゃべっていないので一緒にいる感じはしなかった」などの意見が上がっていた。これは、撮影時につり橋や階段といった細く、足元が不安定な道を歩く際にカメラを撮影者の顔が映る位置にし続けるのが困難であったため、被験者がある程度大きく横を向かないと撮影者の顔を映像で確認できなかったことから、アンケート結果では映像間でスコアの変化が生じた可能性がある。撮影者と被験者が通話などによるコミュニケーションがなかったため、それぞれの項目で被験者自身の感覚と撮影者が感じていた感覚が本当に一緒であったかを確認できず、一緒にいる感覚が向上しなかったと考えられる。

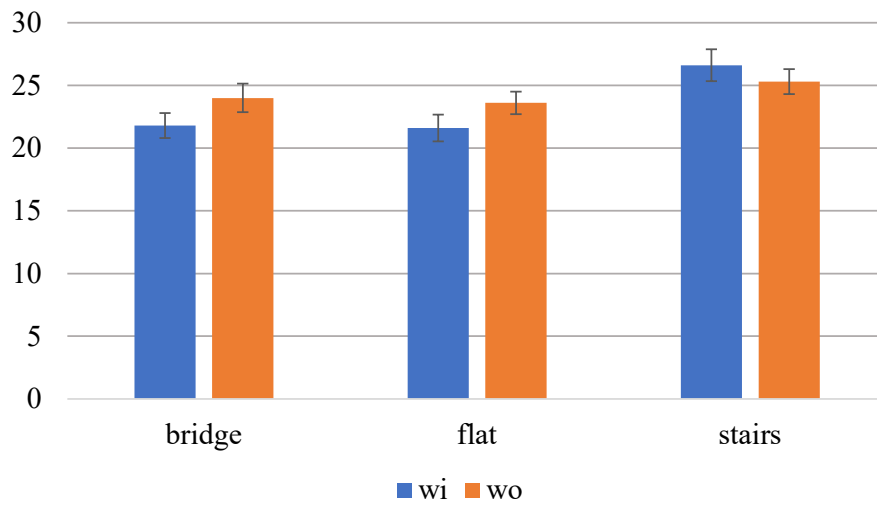


図 5.10: 相互認識に関するアンケート

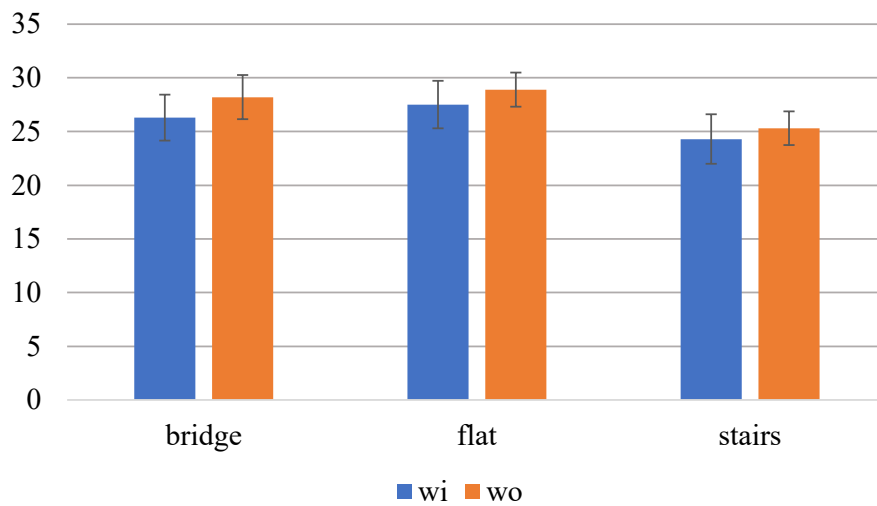


図 5.11: 相互注目に関するアンケート (非リアルタイムシステム評価実験)

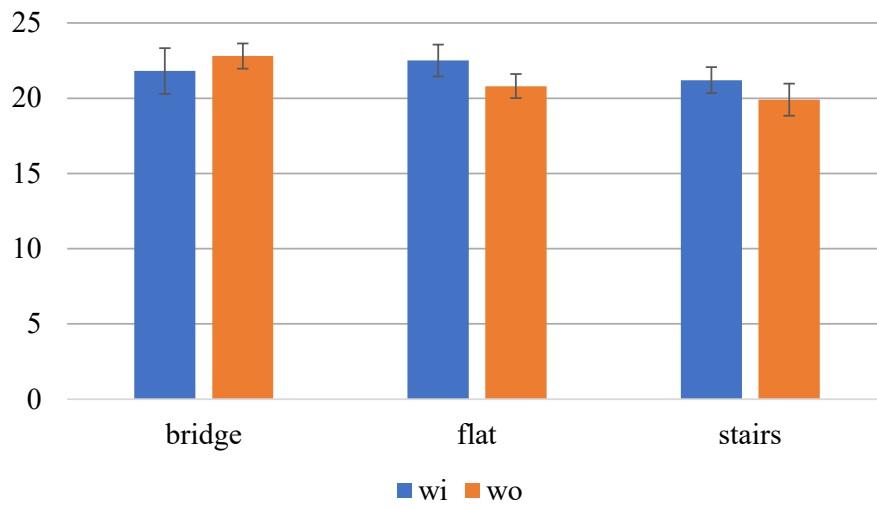


図 5.12: 共感に関するアンケート (非リアルタイムシステム評価実験)

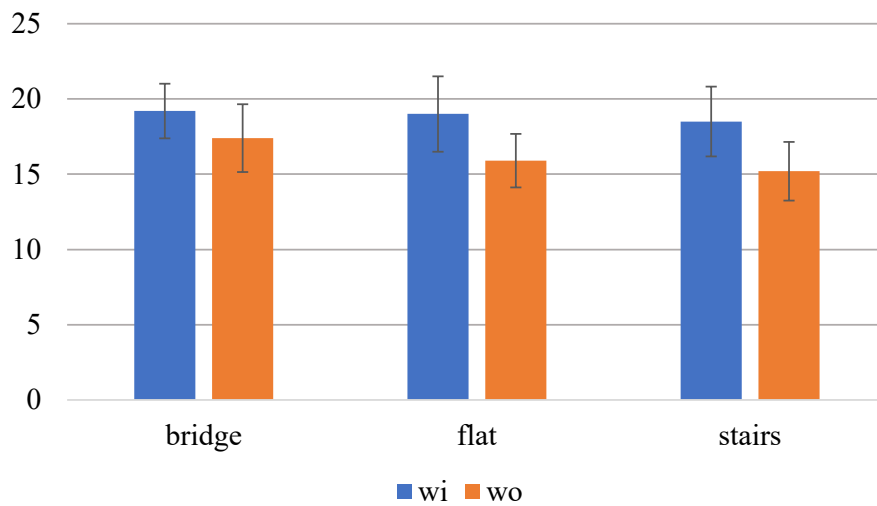


図 5.13: 相互理解に関するアンケート (非リアルタイムシステム評価実験)

5.5.5 表情筋測定による定量評価

表情の推定はそれぞれ違う筋肉の筋電位から行うため、ポジティブ・ネガティブの値についてはそれぞれ独立して算出される。推定値はそれぞれキャリブレーションで取得した各個人の基準信号を用いて測定対象者本人の真顔を0、測定対象者本人のポジティブな表情(笑顔)の最大値、ネガティブな表情(眉を顰める表情)の最大値を用いて0-100まで0.01単位で表される。ポジティブ値およびネガティブ値はおよそ30程度からポジティブ・ネガティブともに表情の変化が起きていることが目視で確認できる。

図5.14, 5.15は、体験時に測定された表情変化を時間平均したものをそれぞれポジティブ・ネガティブそれぞれの値についてプロットしたものである。その結果、表情変化はポジティブ・ネガティブな表情どちらも認められなかった。ネガティブ値が全体的に高い値を示しているが、これはHMDをかぶった際に電磁ノイズが大きく入ったため、フィルタを用いても完全なノイズ除去は行えなかったためである。アンケートによる主観的評価では風覚を提示することにより快適性の向上が確認できたが、表情筋測定による客観的評価では認められなかった。

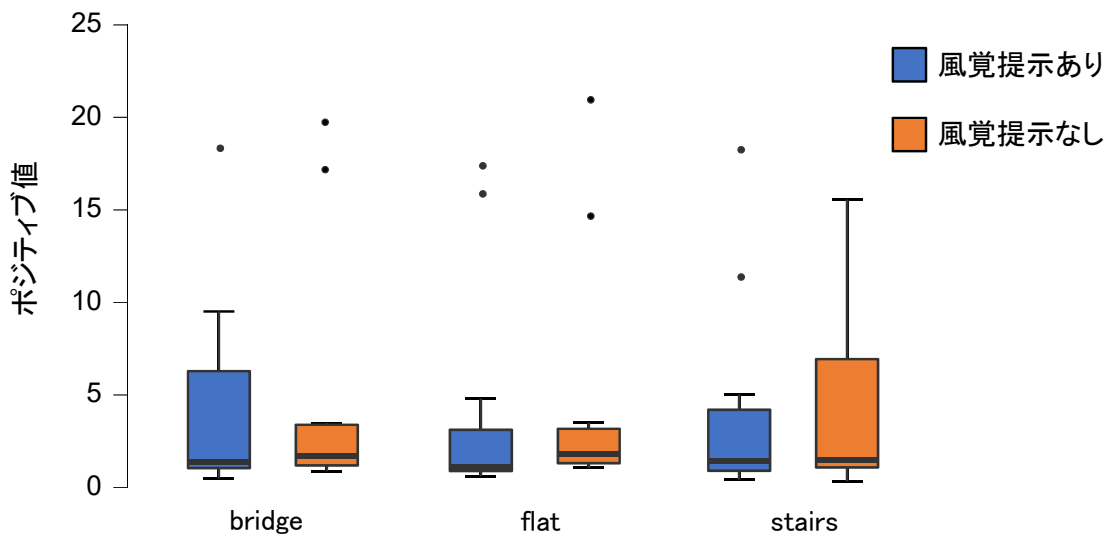


図 5.14: ポジティブな表情変化

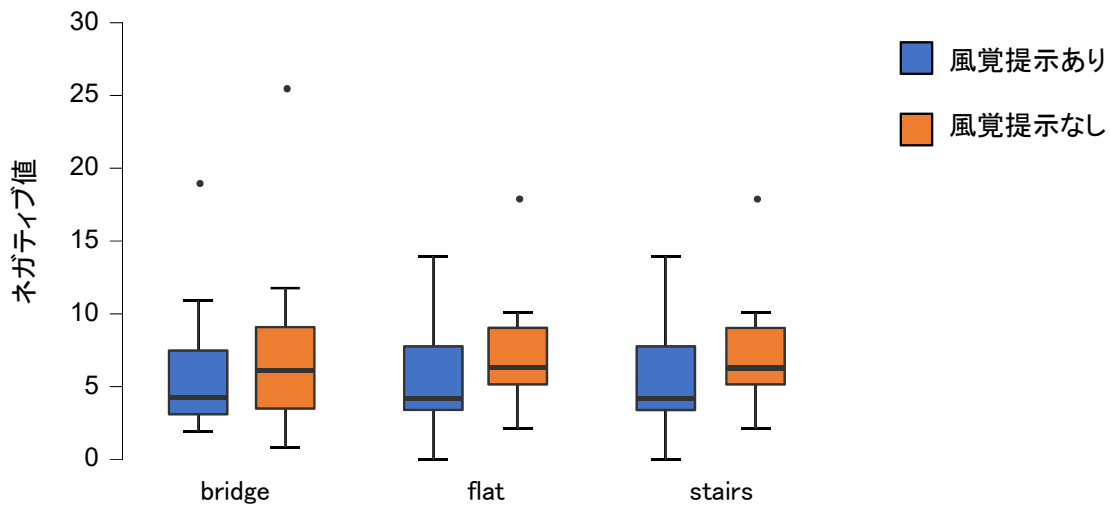


図 5.15: ネガティブな表情変化

5.5.6 心電測定によるストレス指標値の定量評価

心電位から心拍変動を用いて、LF/HF というストレス指標値を算出する。心拍におけるパルスとパルスごとの時間間隔を用いて、計測時間全体での変動に対して離散フーリエを施し、その低周波成分 LF(0.05 Hz–0.15 Hz の合計) と高周波成分 HF(0.15 Hz–0.40 Hz の合計) を求める。その後、LF の値を HF の値で割ることでストレス指標値 LF/HF を導出できる。LF/HF は値が高いほどストレスが高いとされている。本実験では、安静状態 LF/HF から実験中の LF/HF の変動率で評価を行う。

図 5.16 は、体験を受けた際の LF/HF の変動率について示したものである。結果より、映像の違い、風覚の提示ありなしによってストレスの感じ方に有意差はなかった。しかし、階段がある神社の映像かつ風覚提示なし以外の条件では変動率が 100% を下回っていたことから、屋外映像を提示することにより、体験者は屋外で得られるリラックス効果を享受できる可能性が考えられる。

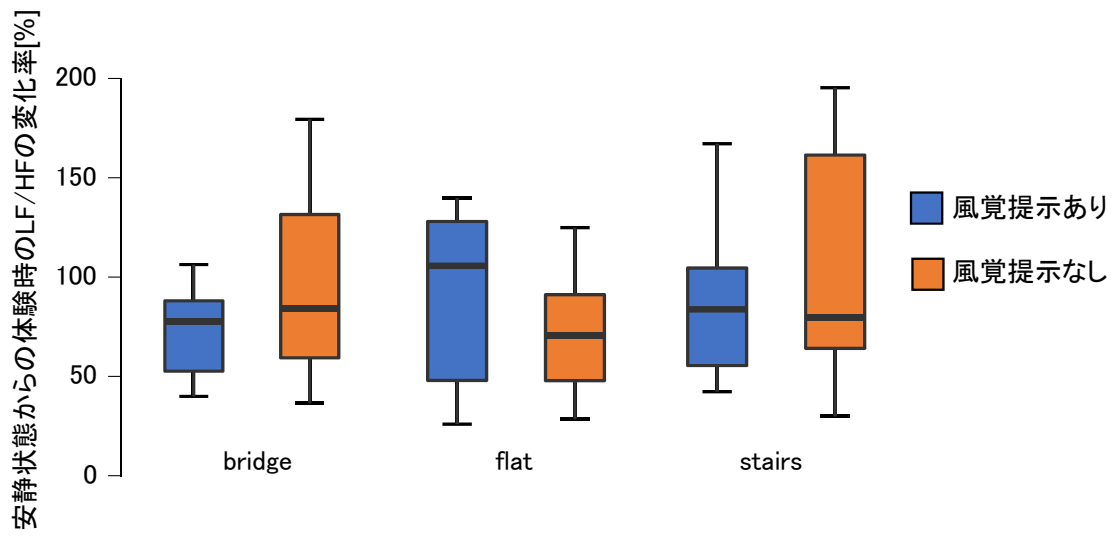


図 5.16: ストレス指標値

第 6 章 リアルタイムシステムにおける評価実験

6.1 実験目的

本実験では、提案する風覚センシングおよびディスプレイシステムを用いて、屋外体験者が実際に歩行した際の視聴覚・風覚のセンシング結果をリアルタイムで屋内体験者に提示する。提案するリアルタイムシステムを用いて、5章と同様のアンケートを用いて、リアルタイムで視聴覚・風覚を共有した際も同様の結果が得られるか、特にリアルタイムの風覚の共有によってコプレゼンスが向上するかを確認する。

6.2 実験概要

本実験は、2人1組で行う。被験者は屋外で映像の撮影・風覚のセンシングを行う役割(屋外体験者)、屋内で撮影された映像の視聴する役割(屋内体験者)に分かれる。屋外体験者は図 4.1 を装着し、こちらが指定するルートで 10 分程度歩行するよう指示する。屋内体験者は HMD を用いて、屋外体験者のカメラから配信される映像を視聴しながら、提案風覚ディスプレイを用いて屋外体験者が配信する風覚情報提示のあり・なしの 2 パターンをお互いに会話せずに体験する。本実験は倫理審査番号 2022-I-48 にて倫理審査を認可されている。

6.3 実験環境

屋内体験者側は第 5 章と同様の図 5.2 の環境で行った。変更点として、映像提示デバイスを Meta Quest から Meta Quest2 に変更した。また第 5 章の実験と同様に、室温の変化による被験者ごとの感じ方の影響をなくすため、室内の温度は 20°C 前後に維持して実験を行う。また、被験者ごとに体験する風覚に違いを生まないようにするため、被験者には大きく体をひねらないように指示した。

一方の屋外体験者は、図 4.1 を装着し、屋外の指定のルートを歩くように指示する。歩行時には、屋内体験者が指定した 3 か所で短い時間立ち止まる・方向転換

をする際にはゆっくり行うよう指示した。歩行速度は屋外体験者本人に一任し、こちらからは指示しなかった。また、実験は屋外の天候が雨や雪が降っていない日に行った。

6.4 実験手順

実験手順を屋内体験者側・屋外体験者側にわけて示す。それぞれの体験が終わったのちに役割を交代し、屋内・屋外ともに体験した後に口頭でシステムを用いた体験について質問する。

6.4.1 屋内体験者

- (1) 提案システム・実験に関する目的および実験手順の説明を受ける。
- (2) 図 6.1 のようなマップを渡し、写真の中から 3 か所屋外体験者に立ち止まる場所を選択する。
- (3) 図 5.2 のように HMD を装着し、屋外体験者の準備が完了するまで待機する。
- (4) 以下の 2 つの条件のどちらかを体験する。
 - 配信映像視聴・風覚提示あり
 - 配信映像視聴・風覚提示なし
- (5) HMD を外し、アンケート回答後、1 分程度休憩する。
- (6) (3)–(5) を (4) の条件を切り替えて繰り返す。

6.4.2 屋外体験者

- (1) 提案システム・実験に関する目的および実験手順の説明を受ける。
- (2) 屋内体験者側の手順 (2) 終了後のマップ (図 6.1) を受け取り、図 4.1 を装着し、指定のルートスタート地点まで移動する。
- (3) 開始の合図とともに指定のルートを歩行し、屋内体験者側の手順 (2) で指定された場所で適宜立ち止まり、ルートを往復する。
- (4) 往復後に休憩し、屋内体験者の休憩終了後準備が整い次第、ルートをもう一

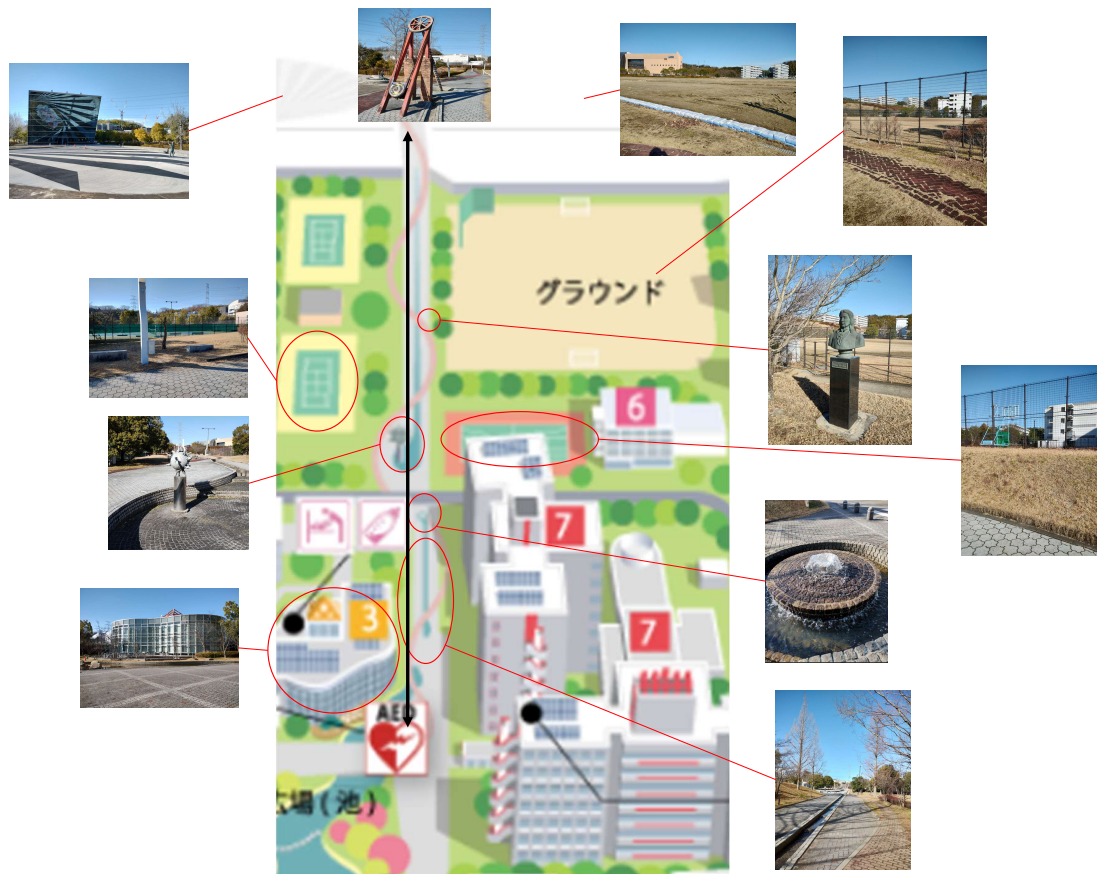


図 6.1: 実験時に使用したマップ

周する。

6.5 評価方法

リアルタイムテレプレゼンスシステムの評価方法としてアンケートを用いる。アンケートは5章の実験と同じアンケートを用いて、屋内体験者に回答を指示した。ただし、映像酔いについては5章の実験結果や開発段階中のテストから提案システムを用いた体験において映像酔いは発生し辛いことが確認できていたため、本実験では省略した。

6.6 実験結果と考察

男性 5 人・女性 3 人，計 8 名，4 ペアが実験に参加した．体験者 1 ペアあたりの所要時間は約 110 分であった．アンケート項目に関しては風覚提示のあり・なしの効果を確認するため，対応のある t 検定を行った．アンケート全項目において，with wind display は風覚提示ありの条件，without wind display は風覚提示なしの条件である．各アンケート項目結果のグラフ内の記号については，†: $p < 0.1$ ，*: $p < 0.05$ ，**: $p < 0.01$ を，エラーバーは標準誤差を示している．

6.6.1 自分が体験場所以外に存在する感覚と風の現実感

図 6.2 は体験者自身が体験場所以外に存在する感覚，図 6.3 は風の現実感に関するアンケート回答について示したものである．風の現実感に関するアンケートでは，風覚提示のありなしに有意差が確認された．しかし，5 章の実験結果と異なり，プレゼンスに関して有意差が確認されなかった．これは，実験時に屋外環境で，4 m/s を超えるような風が吹くことが時折あり，提案システムで再現できる風速域を超えることがあったからであると考えられる．参加者からのコメントでは，弱い風の際はファンから届く風が分散されて届くため自然の風に近いように感じるが，強い風の際はファンからの風であるという認識が強く感じたというコメントがあった．このことから，風が適切に分散するような機構を追加するなど，風の強さに関わらず体験者が屋外に吹いている風のように感じさせる提示方法を工夫する必要がある．

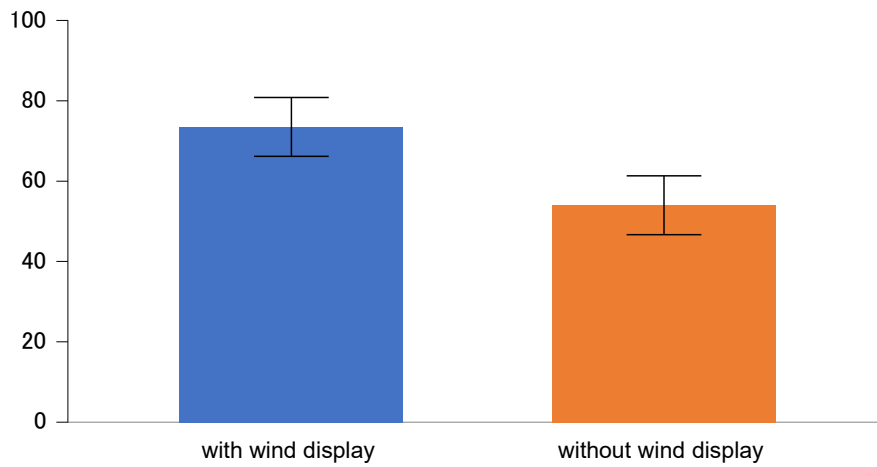


図 6.2: 今ここ以外の場所にいるように感じたか (リアルタイムシステム評価実験)

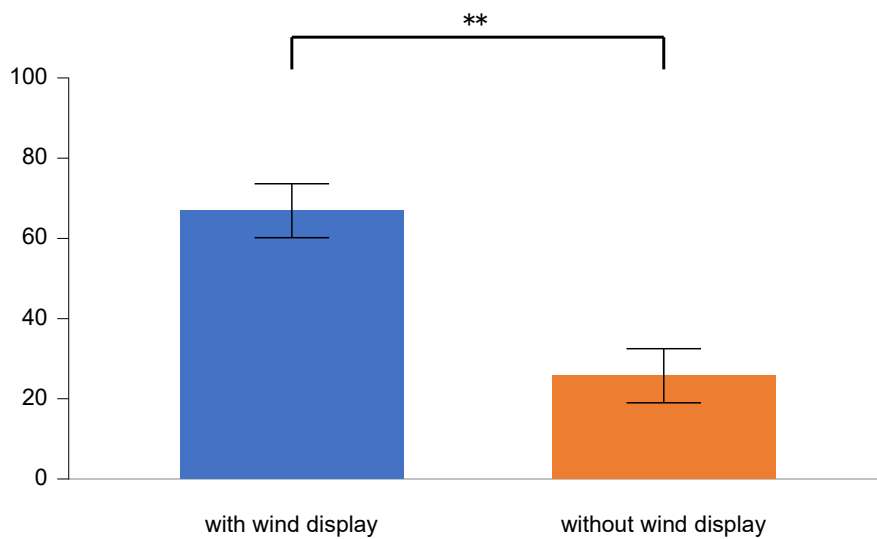


図 6.3: 風は現実と同じように感じたか (リアルタイムシステム評価実験)

6.6.2 感情価・覚醒度

図 6.4,6.5 に感情価と覚醒度に関する被験者のアンケート回答結果を示す。感情価に関しては、風覚提示ありのほうがポジティブな感情の方向に有意差が確認され

た。これは、5章の実験結果と同様な効果が今回の実験でも得られたことから、提案システムを用いて映像に加えて風覚提示を行うことで、映像のみに比べて快適性を感じる体験を提供することが可能であると言える。一方で、覚醒度に関しても風覚提示ありの条件で覚醒度が上がることが示された。これは体験者のコメントで、映像のみの場合、変化が少ない映像なので眠気がするが、風覚提示が加わると触覚的な変化もあり、眠気を感じづらかったといった意見があった。これらのことからリアルタイムの視聴覚配信に風覚提示を加えることは屋外の現地で感じる感覚を屋内の体験者に与えられる可能性が示唆された。

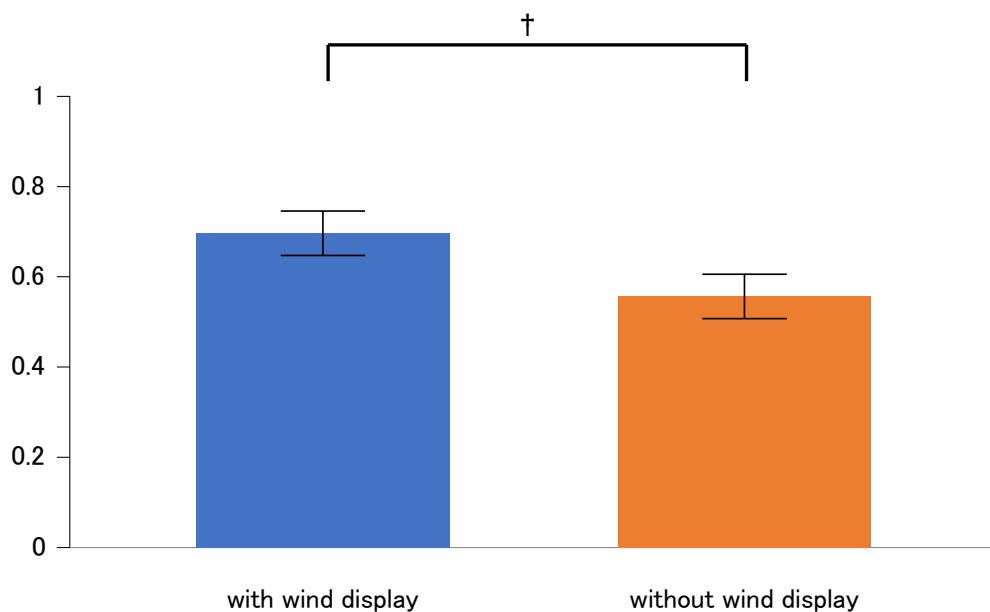


図 6.4: 感情価 (リアルタイムシステム評価実験)

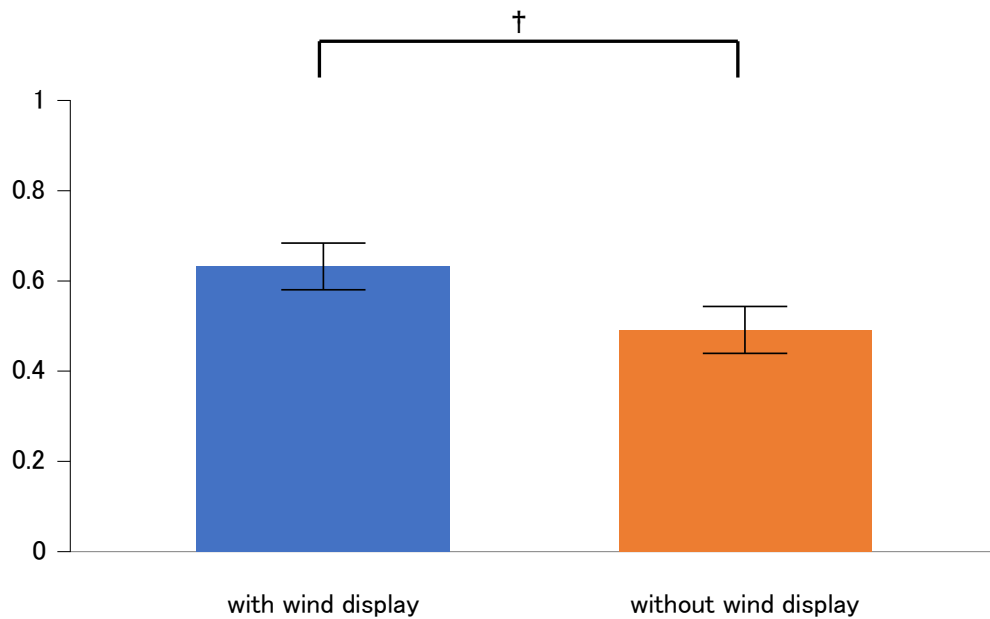


図 6.5: 覚醒度 (リアルタイムシステム評価実験)

6.6.3 コプレゼンス

図 6.6–6.9 にコプレゼンスに関するアンケート回答結果を示す。本実験においても、すべてのアンケート項目において、風覚をリアルタイムで共有する効果は確認できなかった。特に相互注目に関するアンケート図 6.7 では、風覚提示なしのほうが相手に対する注目をよりしていた結果となった。5 章と同様な結果となったため、提案システムを用いて風覚提示を行うことによってコプレゼンスを向上させることは難しいと言える。コプレゼンスは、相手の社会的存在感を近くに感じるかどうかを評価している項目も多くある。今回の実験では通信が不安定な時間帯があったため、すべてのペアで会話を禁止していたが、コプレゼンスに関する項目をより詳細に調査するために、今後会話できる状態で実験を行う必要がある。

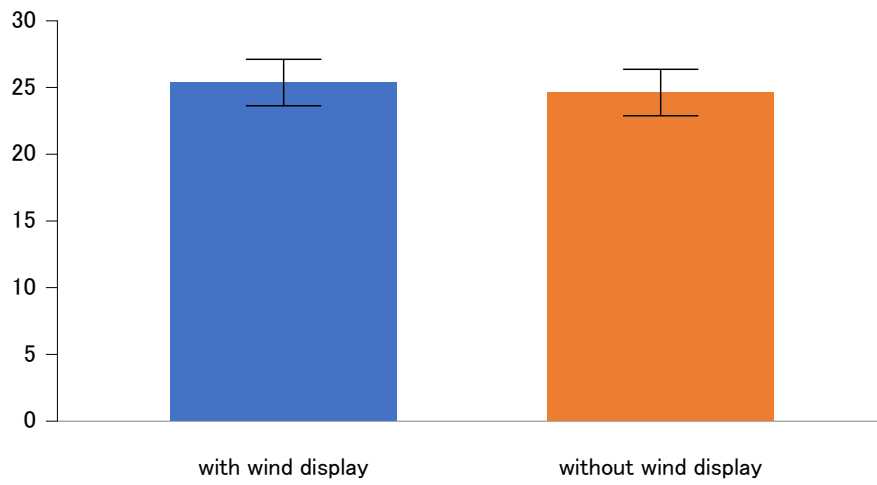


図 6.6: 相互認識に関するアンケート (リアルタイムシステム評価実験)

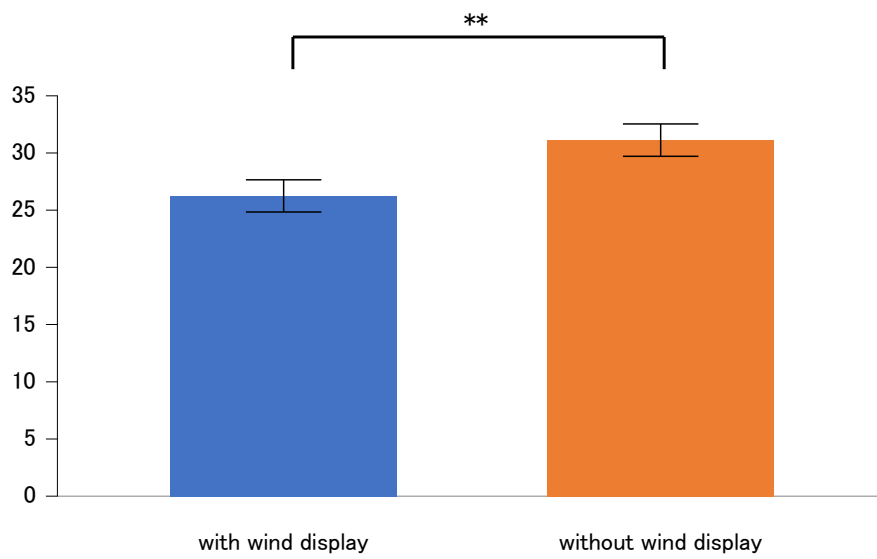


図 6.7: 相互注目に関するアンケート (リアルタイムシステム評価実験)

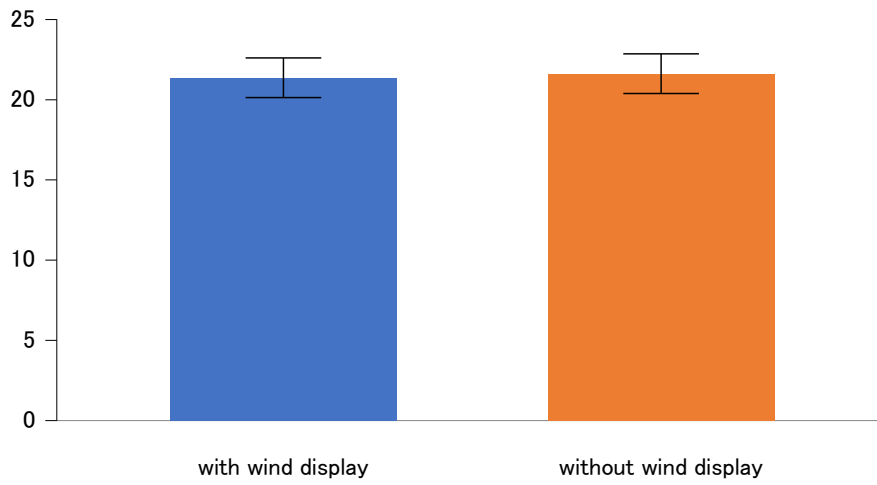


図 6.8: 共感に関するアンケート (リアルタイムシステム評価実験)

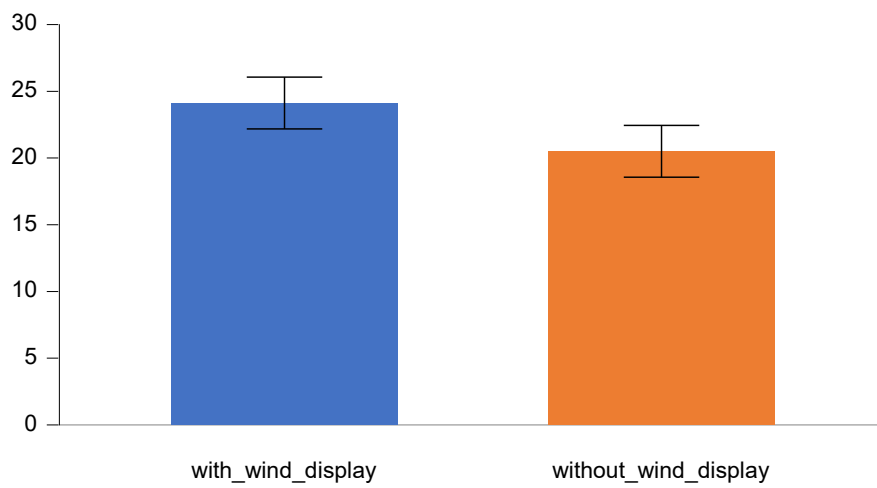


図 6.9: 相互理解に関するアンケート (リアルタイムシステム評価実験)

第7章 おわりに

本研究では、歩行などの移動を伴った屋外の映像を記録するとともに屋外に吹く風をセンシング方法および屋内体験者にそれらをディスプレイする風覚のテレプレゼンスシステムを提案した。そして、提案システムにおいて、非リアルタイムで映像とともに記録した風覚を提示することで得られる効果の評価を行った後、リアルタイムで映像とともに風覚を提示するシステムを少人数で評価を行った。実験結果より、提案する非リアルタイムシステムにおいて風覚提示を追加することによってプレゼンスの向上・体験を受けた際の快適性の向上がアンケートによる主観評価から確認された。提案する風覚のテレプレゼンスシステムを用いることで屋内体験者に映像提示のみに比べ、体験場所以外の場所にいるような感覚をより与えたり、屋外活動によって得られるリラックス効果を与えられたりする可能性が示された。また、リアルタイムで視聴覚・風覚を共有できる通信部分を備えたシステムの開発を行い、動作テストを行った。実験の結果、市販のモバイル WI-FI の通信速度でも遅延が3秒程度で視聴覚・風覚ともに配信可能であるシステムであることを確認した。

以上により、先行研究と比較してセンシングの容易さを向上させることを実現した上で、屋内体験者に風覚を提示することで、体験のプレゼンスの向上や屋外で感じられる快適性の付与に関して、提案システムは有用であるといえる。提案システムを使用することで、屋外活動で得られるリフレッシュ効果を得られることが期待できる。また、風覚によって、リアルタイムシステムを用いることで先述したリフレッシュ効果などの心身の効果を体験者が感じつつ、会話できる環境を整えることで他者との協調や同調の効果の高まりがコミュニケーションをとるが期待される。

今後の発展として、リアルタイムで視聴覚・風覚を共有できるシステムの通信環境や風覚提示手法の改善、屋外にいる感覚を向上させるために風以外にも気温などの温度の再現や湿度の再現といった風覚以外の感覚を提示システムの追加などが望まれる。

謝辞

本研究の遂行、及び論文の作成にあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。サイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川 清 教授には、研究活動において数多くのご支援、ご鞭撻、また日常生活など研究活動以外の面での助言もいただきました。心より感謝の意を表します。本研究の副査を担当いただき、学内発表にて有益なご助言をいただきました、ヒューマンロボティクス研究室 和田 隆広 教授に御礼申し上げます。サイバネティクス・リアリティ工学研究室 内山 英昭 准教授には、研究活動のご指導、ご鞭撻だけでなく、研究室内の備品の管理やネットワーク関連の申請等、研究を円滑に行うための事務作業にご協力いただきました。この場をお借りして感謝いたします。サイバネティクス・リアリティ工学研究室 磯山 直也 助教には、研究活動のご指導以外にも、日常生活の中で学生により近い立場で些細な相談に乗っていただき、たくさん助言いただきました。ここに感謝いたします。サイバネティクス・リアリティ工学研究室 Monica Perusquía-Hernández 助教には、研究活動の中で特に、実験デザインでの相談や実際に実験に使用する映像の撮影に多大なご協力いただきました。この場をお借りして御礼申し上げます。学生生活の遂行に際して、必要な事務処理など多岐にわたりご協力いただきました、サイバネティクス・リアリティ工学研究室秘書 佐藤 好枝 様に感謝いたします。また、表情筋・心電センサ・解析ソフトウェアをお貸しいただいた島津製作所 様やそのセンサの使用法、解析等について助言いただいた理化学研究所の佐藤 弥 様に厚く御礼申し上げます。本学での学生生活を一緒に過ごしたサイバネティクス・リアリティ工学研究室の先輩、後輩の皆様へ感謝いたします。特に、研究・実験に際しての助言や、学生生活における不安などを、暖かく聞いていただいた萩森 大貴 先輩に感謝いたします。サイバネティクス・リアリティ工学研究室の同期となった皆様には学生生活を送る上で大変お世話になりました。ありがとうございます。皆様のご支援のおかげでとても楽しく充実した毎日を送ることができ、かけがえのない思い出となりました。最後に私の長い学生生活を温かく見守り、多くの支援をいただいた家族に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 若野貴司, 末吉勝則, 石川治. 屋外自然空間を用いたレクリエーション療法 4 症例の効果. 人間・植物関係学会雑誌, Vol. 10, No. 2, pp. 27–33, 2011.
- [2] 原田和弘, 井澤修平, 中村菜々子, 吉川徹, 赤松利恵, 池田大樹, 久保智英. 労働者における他の人で行う運動とストレス反応およびメンタルヘルス不調との関連. 体力科学, Vol. 71, No. 5, pp. 417–429, 2022.
- [3] 松田暁, 味八木崇, 暦本純一. 伸縮機構と全周囲映像を用いた身長可変型テレプレゼンスロボットの提案. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 20, No. 3, pp. 289–300, 2018.
- [4] Yasamin Heshmat, Brennan Jones, Xiaoxuan Xiong, Carman Neustaedter, Anthony Tang, Bernhard E Riecke, and Lillian Yang. Geocaching with a Beam: Shared Outdoor Activities Through a Telepresence Robot with 360 Degree Viewing. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, 2018.
- [5] Mi Feng, Robert W. Lindeman, Hazem Abdel-Moati, and Jacob C. Lindeman. Haptic ChairIO: A System to Study the Effect of Wind and Floor Vibration Feedback on Spatial Orientation in VEs. In *2015 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 149–150, 2015.
- [6] 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*, pp. 1–2. 2018.
- [7] 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, 常盤拓司, 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 (「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.
- [8] 小坂崇之. WindStage(WindDisplay & WindCamera). 芸術科学会論文誌,

Vol. 8, No. 2, pp. 57–65, 2009.

- [9] Darren Walton, V. Dravitzki, and Michael Donn. The Relative Influence of Wind, Sunlight and Temperature on User Comfort in Urban Outdoor Spaces. *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, Vol. 42, pp. 3166–3175, 09 2007.
- [10] Henrique Andrade, Maria-João Alcoforado, and Sandra Oliveira. Perception of temperature and wind by users of public outdoor spaces: relationships with weather parameters and personal characteristics. *International journal of biometeorology*, Vol. 55, No. 5, pp. 665–680, 2011.
- [11] 坂田礼子, 石川美穂, 古橋拓也, 代田光宏, 松本崇, 神宮英夫. 風発生装置の送風に対する“爽快感”の測定. *日本官能評価学会誌*, Vol. 18, No. 2, pp. 89–95, 2014.
- [12] Mi Feng, Arindam Dey, and Robert W Lindeman. The effect of multi-sensory cues on performance and experience during walking in immersive virtual environments. In *2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 173–174. IEEE, 2016.
- [13] ML Heilig. Sensorama Simulator USA Patent 3050870, 1962.
- [14] 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*, pp. 122–128, 2004.
- [15] Sylvain Cardin, Daniel Thalmann, and Frederic Vexo. Head Mounted Wind. In *proceeding of the 20th annual conference on Computer Animation and Social Agents (CASA2007)*, No. CONF, pp. 101–108, 2007.
- [16] Ping-Hsuan Han, Yang-Sheng Chen, Chiao-En Hsieh, Hao-Cheng Wang, and Yi-Ping Hung. Hapmosphere: Simulating the Weathers for Walking Around in Immersive Environment with Haptics Feedback. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 247–252. IEEE, 2019.
- [17] Felix Hülsmann, Julia Fröhlich, Nikita Mattar, and Ipke Wachsmuth. Wind and Warmth in Virtual Reality: Implementation and Evaluation. In *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*, pp. 1–8,

2014.

- [18] 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.
- [19] Alberto Betella and Paul FMJ Verschure. The affective slider: A digital self-assessment scale for the measurement of human emotions. *PloS one*, Vol. 11, No. 2, p. e0148037, 2016.
- [20] Wataru Sato, Koichi Murata, Yasuyuki Uraoka, Kazuaki Shibata, Sakiko Yoshikawa, and Masafumi Furuta. Emotional Valence Sensing Using a Wearable Facial EMG Device. *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, pp. 1–11, 2021.
- [21] 気象観測ガイドブック. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/guidebook.pdf. (Accessed on 08/26/2022).
- [22] 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.
- [23] 橋本渉, 今枝良司. 人間の指先における微風の知覚特性に関する研究. 信学技報, MVE, Vol. 106, No. 91, pp. 35–40, 2006.
- [24] Robert S Kennedy, Norman E Lane, Kevin S Berbaum, and Michael G Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The international journal of aviation psychology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220, 1993.
- [25] Frank Biocca, Chad Harms, and Jenn Gregg. The networked minds measure of social presence: Pilot test of the factor structure and concurrent validity. In *4th annual international workshop on presence, Philadelphia, PA*, pp. 1–9, 2001.

発表リスト

- [1] 青木大典, 萩森大貴, ペルスキアエルナンデス モニカ, 磯山直也, 内山英昭, 清川清, 風覚のテレプレゼンスのための風のセンシングとディスプレイシステムの基礎検討, IEICE-MVE, Vol.122, No.200, pp. 46-51, 2022.
- [2] 杉野森拓馬, 青木大典, 大塚真帆, 宮脇亮輔, 磯山直也, 内山英昭, 清川清, 人間は液体と固体の両方になり得るか?, 第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, IVRC-17, 2021.