

令和 7年 6月 13日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2024

課題番号：19K12289

研究課題名（和文）環境からの風覚刺激によるVR体験の強化

研究課題名（英文）Environmental Wind Feedback for Multisensory Immersion in Virtual Reality

研究代表者

羽田 久一 (Hada, Hisakazu)

東京工科大学・メディア学部・教授

研究者番号：00311788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、VR体験の臨場感を高めるために、風・熱・匂いといった非接触型の触覚刺激を提示するシステムを開発し、その有効性を検証した。ESP32やArduinoを用いたシステムにより、複数のデバイスをリアルタイムに制御可能なミドルウェアを構築した。実験では、風の方向と強さによる感覚変化や、赤外線ヒーターによる熱刺激の方向提示、匂いによる空間的認知の可能性を検討し、いずれもVR体験の臨場感向上に寄与することが確認された。さらに、風刺激を活用したりダイレクトウォーキングの補助や、落下感・浮遊感の強化にも有効であることが示され、VRにおける多感覚提示技術の発展に貢献した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の社会的意義は、身体に装置を取り付けることなく風・熱・匂いといった感覚を提示できる非接触型の技術により、より安全で快適なVR体験を実現できる点にある。身体的制約のある人でも無理なく使用でき、身体移動を伴う場合にも利用しやすいため、医療や教育、観光など幅広い分野への応用が期待される。また、風や匂いによる方向認知の活用は、災害時の避難支援や視覚障がい者の補助といったユニバーサルデザインにも貢献し得る。

研究成果の概要（英文）：This study developed and evaluated a system for enhancing the sense of presence in virtual reality (VR) experiences through non-contact tactile stimuli such as wind, heat, and smell. Utilizing ESP32 and Arduino microcontrollers, we constructed middleware capable of real-time control of multiple sensory devices. Through a series of experiments, we examined the perceptual effects of wind direction and intensity, the spatial presentation of heat via infrared heaters, and the potential for olfactory cues to convey directional information. The results demonstrated that all modalities contributed to an increased sense of immersion in VR. Furthermore, wind stimuli proved effective in supporting redirected walking and enhancing sensations of falling and floating, indicating the system's potential for advancing multisensory VR technologies.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：バーチャルリアリティ 遠隔触覚提示 風覚刺激 热刺激

1. 研究開始当初の背景

近年、Head-Mounted Display (HMD) を用いたバーチャルリアリティ (VR) 体験は、エンタテインメント、教育、医療等の多様な分野において急速に普及している。しかしながら、現在一般的に用いられている VR コンテンツの多くは視覚および聴覚に依存しており、触覚を含む多感覚提示に関する研究は依然として発展途上にある。触覚は VR における臨場感を高める上で有効な手段の一つであり、これまでに各種の触覚デバイスが開発されてきたが、それらの多くは装着型であり、装着の煩雑さや身体の可動性の制限といった課題を伴う。そこで、この問題を克服する手法として、非接触型の触覚提示として風覚刺激に着目した。風や熱といった皮膚表面に対する遠隔刺激は、装着型デバイスと比較してユーザの自由度を損なわず、より自然な動作を妨げない触覚体験を可能とする。

2. 研究の目的

VR 環境において、風や熱のような遠隔からの皮膚感覚（触覚）提示を行う方法は、装着型のデバイスと異なり、利用者の動作を妨げないためより自然な VR 体験を提供することができる。HMD 内に提示される視覚情報と、実際にファンによって生成される風の提示方向との間のクロスモーダル効果を利用することで、過去の研究にくらべ使用するファンの数を抑えつつ、複数方向からの風刺激を知覚させる技術的枠組みを構築する。このような感覚提示を行う場合にクロスモーダル効果を積極的に利用し、感覚提示装置の数を減らした状態で、あらゆる方向からの感覚を提示することがこの研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 環境からの風提示システムの開発

本研究では、VR 体験における臨場感の向上を目的として、風・熱・匂いといった非接触型の触覚刺激を提示するための技術的枠組みを構築し、システムとしての実装と検証を行った。ハードウェア構成としては、最大 4 台までの風覚提示装置を制御可能な環境を実現するため、USB 通信に対応した Arduino および Wi-Fi 通信機能を有するマイコン ESP32 を採用した。これにより、VR コンテンツと連携して動作するファン、ヒーター、匂い提示装置などの外部デバイスを、リアルタイムにアプリケーションから制御可能なシステム設計が実現された。

ファームウェアの開発においては、複数の出力デバイスを個別に制御するための機能を組み込み、拡張性と再利用性を重視した構造とした。これにより、VR 体験における多様な感覚刺激の組み合わせ提示を可能とする、柔軟かつ応用的なシステム基盤が整備された。

(2) 環境からの風提示による体験の強化

開発したシステムを用いて、VR 環境下における風覚・熱刺激・嗅覚刺激の提示が、体験の臨場感や方向感覚に与える影響について実証的な検証を行った。風覚刺激については、設置型および身体装着型のファンを用い、風向や風量の違いによる知覚変化を測定した。その結果、提示方向と強度の差異がユーザーの感覚認識に明確に影響を及ぼすことが確認された。

熱刺激に関しては、全周囲に赤外線ヒーターを配置することで、方向性のある熱感覚の提示が可能かどうかを評価した。実験の結果、特定の角度からの熱提示が被験者に明確に知覚されることが確認され、風覚と同様に熱刺激によっても空間的な臨場感を高めることができると示唆された。さらに、嗅覚刺激については、匂いの発生源に方向性を持たせた提示を実現し、被験者が左右のいずれから匂いが到来しているかを判別可能かどうかを検証した。その結果、一定の正答率に基づいて、嗅覚による方向認知が成立しうることが示され、視覚・聴覚以外の感覚を活用した VR 体験の拡張に有効である可能性が確認された。

4. 研究成果

(1) 全周囲からの非接触熱刺激提示に関する熱源配置の検討

VR 体験中にマルチモーダルな感覚刺激を提示する手法として、被験者の身体に直接装着するウェアラブルデバイスが用いられることが多いが、これらの装置は重量や圧迫感により体験の没入感を損なう恐れがある。そこで本研究では、HMD 以外の機器を装着せず、非接触で熱刺激を提示する手法を構築するため、遠隔からの熱源配置について検討を行った。

具体的には、カーボンヒーター4台を被験者の斜め前方および斜め後方に配置し、HMD内には熱源が存在するかのような視覚映像を表示する構成とした。実験の結果、これにより被験者は全周囲から熱刺激を受けているように認識することが可能であると確認された。また、同様の配置にファンを追加し、熱刺激と風刺激を同時に提示することで、被験者に対して暖風が全周囲から吹いているという錯覚を引き起こすことができた。これらの結果は、視覚と触覚の統合提示による臨場感の向上を示唆している。

(2) 風覚提示によるゲームプレイ中の臨場感の強化

VRゲームにおいて、キャラクターが高所から落下する、あるいは空中移動を行うといった状況では、視覚映像のみであってもプレイヤーは浮遊感や落下感をある程度体験することがある。そこで本研究では、プレイヤーに対して風を提示することで、これらの体性感覚がどのように変化するかを検証した。Unity上に、落下やジャンプなど浮遊感を喚起するようなステージを設計し、風を送るタイミングと連動させてプレイヤーに刺激を与えるシステムを構築した。被験者実験の結果、風刺激を提示した場合のほうが、落下感覚が強く感じられるとする回答が多数を占め、風による触覚提示が臨場感を高める有効な手段となり得ることが明らかとなった。

(3) 風向知覚特性を活用したリダイレクテッドウォーキングの検証

リダイレクテッド・ウォーキング (Redirected Walking, RDW) は、ユーザーに気づかれない程度のわずかな曲率や回転を歩行経路に加えることで、狭い現実空間内で広大な仮想空間を歩いていると錯覚させる技術である。視覚的誘導のみでこの手法を実現するには限界があるため、本研究では風刺激による触覚的補助が有効であるかを検討した。

風覚提示はユーザーの身体にデバイスを装着する必要がなく、遠隔から方向性を持った刺激を提示できる点で RDW との相性が良い。そこで、男女の平均身長に基づいて歩幅を設定し、風刺激の有無および曲率半径（最小 6m）を変数とした実験を行った。その結果、風刺激がある条件下では、より小さな曲率半径でも違和感を感じにくく、歩行の誘導が自然に行われる傾向が見られた。被験者の多くは、風のある条件で「映像操作による違和感が減少した」と回答しており、視触覚統合による RDW 支援の有効性が確認された。

(4) ウェアラブル嗅覚ディスプレイによる方向提示の可能性

VR環境における嗅覚提示の応用として、匂いが持つ方向認識機能に着目し、嗅覚による空間的誘導の可能性を検討した。特に、匂いは危険回避などの本能的行動と結びつきやすく、直感的な方向認知に利用できる感覚である。

本研究では、鼻の前方に設置したファンと超音波振動子を組み合わせたウェアラブル嗅覚ディスプレイを開発し、左右から異なる匂いを提示することで方向認識が可能かを検証した。装置は HMD と一体化する形で設計され、実験参加者には匂いの発生源が左右のどちらであるかを判断してもらった。その結果、全体で 77.5%の正答率が得られ、視覚や聴覚に頼らない方向提示手段として嗅覚刺激が有効である可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名

岡本 早織, 羽田 久一

2. 発表標題

ゲームプレイ中の風の強度による臨場感の変化

3. 学会等名

エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2022

4. 発表年

2022年

1. 発表者名

齋藤周, 羽田久一

2. 発表標題

ウェアラブル嗅覚ディスプレイによる方向誘導

3. 学会等名

映像表現・芸術科学フォーラム2023

4. 発表年

2023年

1. 発表者名

岡本 早織, 羽田 久一

2. 発表標題

風を用いたゲームプレイ中の落下感覚の向上

3. 学会等名

エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2021

4. 発表年

2021年

1. 発表者名

松村 楓, 羽田 久一:

2. 発表標題

伸縮可能なエアバッグを用いた箸VRの開発

3. 学会等名

エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2021

4. 発表年

2021年

1. 発表者名 正木友晶, 羽田久一
2. 発表標題 VRを用いたやり投体験システムの為の形状知覚特性の評価
3. 学会等名 映像表現・芸術科学フォーラム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 関口 雅人, 羽田 久一
2. 発表標題 巨人視点:高低差と大小差の比較
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本 早織, 羽田 久一
2. 発表標題 風を用いたゲームプレイ中の臨場感の向上
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村 楓, 羽田 久一
2. 発表標題 箸を介したVR上の物体とのインタラクション
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名
豊嶋 春華, 羽田 久一

2. 発表標題
リダイレクトドウォーキングにおける風向知覚の影響

3. 学会等名
映像表現・芸術科学フォーラム2021

4. 発表年
2021年

1. 発表者名
岡本 早織, 羽田 久一

2. 発表標題
風を用いたゲームプレイ中の臨場感の向上

3. 学会等名
映像表現・芸術科学フォーラム2021

4. 発表年
2021年

1. 発表者名
矢島 弘人, 羽田 久一

2. 発表標題
熱刺激、視聴覚刺激を用いた疑似的な不快感の誘発

3. 学会等名
映像表現・芸術科学フォーラム2021

4. 発表年
2021年

1. 発表者名
伊藤 岸輝, 羽田 久一

2. 発表標題
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

3. 学会等名
エンタテインメントコンピューティング2019

4. 発表年
2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-
6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関