

把持動作における指腹部への温冷呈示機能を具備した VR インターフェースの開発

五十嵐 まい (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, f9394@tsuruoka.kosen-ac.jp)

遠藤 健太郎 (鶴岡工業高等専門学校 教育研究技術支援センター, endo@tsuruoka-nct.ac.jp)

佐藤 司 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, tsato@tsuruoka-nct.ac.jp)

高橋 聡 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, takahashi-s@tsuruoka-nct.ac.jp)

穴戸 道明 (鶴岡工業高等専門学校 創造工学科, m-shishido@tsuruoka-act.ac.jp)

Development of VR interface with thermal feedback for fingertip grasping motions

Mai Igarashi (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Kentaro Endo (Technical Support Center, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Tsukasa Sato (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Sou Takahashi (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

Michiaki Shishido (Department of Creative Engineering, National Institute of Technology, Tsuruoka College, Japan)

要約

近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、教育分野でもその活用が進んでいる。とくに、初等・中等教育における実験実習は、生徒の関心と理解を深める上で重要な役割を担っており、これにVR技術を応用すれば、体験的な学習効果を維持しつつも、通常では再現が難しい状態のシミュレーションなどが可能になる。一方で、VRを教育現場で応用するにあたり、メディアリテラシーの多寡に依存しないデバイスの開発と、楽しさや豊かさを兼ね備えた高度な没入体験の提供が強く求められている。そこで、本研究では、ペルチェモジュールを用いた温冷呈示システムと、曲げセンサによる直感的な入力システムを搭載した、Thermal Grip VR Controller (TGV-C) の開発を行った。温冷呈示位置を母指と示指の指腹とし、中指の曲げセンサによって入力操作を行う。TGV-Cの温度変化機能に対するユーザの反応速度を評価した結果、温感呈示には5.27秒、冷感呈示には2.28秒遅延が存在することが明らかとなった。また、参照用として既存のコントローラ (Meta Quest Touch Plus コントローラ: MQT-C) との比較検証を行った結果、TGV-CはVR体験の没入感と臨場感を向上させ、使用中の身体的疲労を軽減することが分かった。しかし、製作費用や設計については改善の余地が残っており、今後は、教育分野への応用を見据え、化学実験VRへの応用、および、様々な属性のユーザに対する効果検証なども行う必要がある。

Abstract

Recently, the advancement of virtual reality (VR) technology has led to its increased utilization in the field of education. Particularly, experimental practices in primary and secondary education play an important role in enhancing students' interest and understanding. Applying VR technology to these practices enables the simulation of situations that are difficult to reproduce in real life while maintaining experiential learning effects. On the other hand, to implement VR in educational settings, it is crucial to develop devices that do not depend on media literacy and to provide highly immersive experiences that combine enjoyment and richness. In this study, we developed the Thermal Grip VR Controller (TGV-C), which incorporates a peltier module-based heating and cooling presentation system and an intuitive input system using a bending sensor. The temperature presentation positions are the pads of the thumb and index finger, and the input operation is performed using the bending sensor of the middle finger. Evaluation of users' reaction speed to the TGV-C's temperature change function revealed a delay of 5.27 seconds for warm sensation presentation and 2.28 seconds for cold sensation presentation. Furthermore, comparative verification with an existing controller (Meta Quest Touch Plus controller: MQT-C) indicated that the TGV-C enhances the sense of immersion and presence in VR experiences while reducing physical fatigue during use. However, there is still room for improvement in terms of production costs and design. Moving forward, it is necessary to consider the application to VR chemical experiments and to conduct efficacy verification for various user attributes, with a view to applying the TGV-C in the field of education.

キーワード

VR, ヒューマンコンピュータインタラクション, 温冷感覚, ダイレクトマニピュレーション, コントローラ

1. 緒言

近年、バーチャルリアリティ (VR) 技術の発展にともない、エンターテインメントやシミュレーションなどの様々な分野においてその技術が応用されている。とくに、教育分野では、

従来の教室や教科書では提供しにくい、あるいは不可能な体験を学習者に提供できることから、学校教育のICT化のひとつとして注目を集めている。翻って、初等・中等教育における実験実習は、生徒の関心と理解を深める上で重要な役割を担っている。これにVR技術を応用すれば、体験的な学習効果を維持しつつ、さらなる利点をもたらすことができる。仮想空間での実験実習は、消耗品を必要とせず、ヘッドマウントディスプレイのみで実施できることから、安全に配慮された

環境で繰り返し行うことができる。また、通常では実施するのが難しい実験も容易になることで、化学や物理学等の理系分野への興味を一層喚起することが期待される。

一方で、VRを教育現場で応用するにあたり、メディアリテラシーの多寡に依存しないデバイスの開発と、楽しさや豊かさを兼ね備えた高度な没入体験の提供が強く求められている。従って、教育現場などで使用されるコントローラは、VR体験の没入感を向上させつつも、誰でも扱えるような直感的な操作性を有していることが望ましい。例えば、HaptX Gloves G1のような、リアルな触覚とグリップ感をフィードバックするコントローラなどが登場しており、皮膚感覚を利用したVR技術の確立が盛んに行われている (HaptX, n.d.)。現在の皮膚感覚呈示可能なコントローラとしては、振動子を利用した触覚呈示が一般的であり、温度感覚を応用した事例はあまり例をみない。温度感覚のインタラクション技術は、シミュレーションにおいて、危機管理や生存といった本能的な感覚を呼び覚ますのに有効であり、既存のデバイスやコンテンツでは得られない特別な体験をユーザに提供することが期待される。こうした背景をふまえ、著者らは、VRの没入感を向上させることを目的とした温冷感のインタラクションシステムを検討し、直感的な把持操作を可能にするVRコントローラ (Thermal Grip VR Controller: TGV-C) の開発を行った。

本研究では、これまで十分に活用されていない温度感覚に着目し、指腹部への局所的な温度刺激でも、VRの没入感・臨場感の向上に有効であるかを検証した。加えて、TGV-Cの温度変化機能に対するユーザの反応速度を評価し、参照用として既存のコントローラ (Meta Quest Touch Plus Controller [Meta]: MQT-C) との比較、および感性評価を行った。

2. システムと装置

2.1 開発装置の要求仕様

図1にTGV-Cのシステム図を示す。TGV-Cは、温冷感のインタラクションシステムと、曲げセンサによる把持入力システムで構成される。手袋の中指部分に曲げセンサを挿し込み、曲がり具合に応じてUnityへ入力信号を送信する。また、タクトスイッチの押下にともない電流が流れ、ペルチェモジュールの温度が変化し続ける。この温度変化はスイッチの押下終了時まで継続される。

皮膚上には、温覚あるいは冷覚のみを引き起こす径1 mm以下の小領域 (温点、冷点) が存在する。これらの分布は部位によって差があることが知られており、冷点密度に関しては Strughold and Porz (1931)、温点密度に関しては Rein (1925)

による報告がある。また、上記報告より、指先よりも手掌部の方が温点・冷点の分布密度が高いことが判明している。従って、温冷呈示位置は手掌部付近であることが望ましいが、瀬尾ら (2009) の研究によると、15 mm × 15 mmのペルチェモジュールを用いた場合、親指掌側・母指球・薬指掌側の3つの部位における温度感覚特性に対し、顕著な差が見られないことが報告されている。また、把持動作に着目すると、最も早く物体に触れ、物体の熱を検知する部位は指先であるといえる。本研究では、VR空間内のアクションを「VRオブジェクトの把持」に限定しているため、手掌部付近ではなく指先に温度刺激を行った。

翻って、温度変化速度は、ペルチェモジュールの温度が閾値に達してから被験者がスイッチを押すまでの時間に影響しない (Yarnitsky and Ochoa, 1991) ことが知られている。本研究では、TGV-Cと使用者の間に存在する遅延の程度を計測するため、ペルチェモジュールの駆動直後から、ユーザが温冷感を認識するまでのタイムラグを反応時間と定義した。

馬場ら (2012) の研究では、一般的なゲームコントローラの形状を模したデバイスの側面にペルチェモジュールを嵌め、手掌部へ温冷呈示を行っている。それに対し、本研究では、温冷呈示位置が指腹部である点が異なる。加えて、既存の温冷呈示コントローラと比較した際の技術的優位性として、デバイスの形状がグローブ型である点が挙げられる。これは、ユーザのコントローラに対する意識を低減させ、よりシームレスで自然な温冷呈示を実現させる効果が期待される。

2.2 ハードウェアの構成

2.2.1 温冷感のインタラクションシステム

温冷感のインタラクションシステムは、ペルチェモジュール (ペルチェモジュール 20 (mm) × 20 (mm), ジーマックス)、マイクロコンピュータ (Arduino Uno Rev3, Arduino)、モータドライバ (TA7291P, 東芝)、タクトスイッチ (Tact Switches, COSLAND) で構成される。使用したペルチェモジュールは、最大電流 3.9 (A)、最大電圧 8.8 (V)、最大吸熱量 18.7 (W)、最大温度差 70 (°C) であり、ここに 1.5 (V) の単3電池を接続した。

ペルチェモジュールは、小型軽量でありながら駆動時に騒音や振動を発生させないことから、TGV-Cの温度可変機能を担う。また、本機における電流の極性反転には、モータドライバを使用した。被験者に対する過度な温度刺激を防ぐため、発熱面・吸熱面の切り替え、および温度刺激の停止をタクトスイッチで制御し、ペルチェモジュールを被験者の親指と示指に取り付けることで温冷感のインタラクションを試みた。

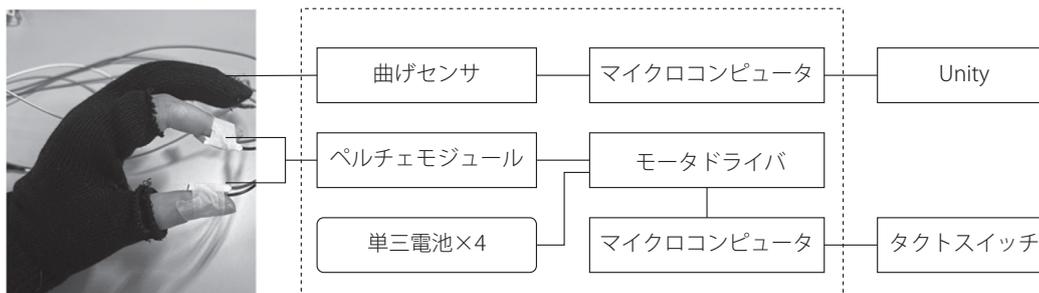


図1: TGV-Cのシステム図

2.2.2 把握入力システム

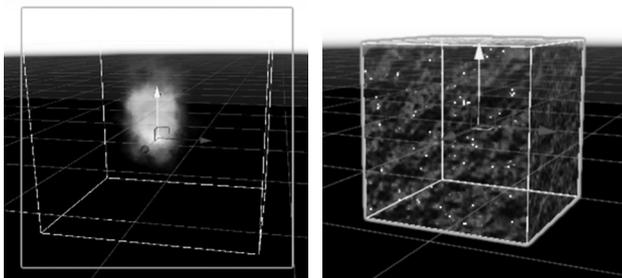
把持動作による入力システムは、曲げセンサ（手袋用曲げセンサ、Qwiic）、マイクロコンピュータ（Arduino Uno Rev3, Arduino）で構成される。曲げセンサは、Qwiicの手袋用曲げセンサからセンサ部分を分離して使用した。曲げセンサを中指の手背側に差し込むため、被験者の利き手に手袋を2枚着用させた。

また、被験者が把持動作を行う際、ある程度中指が曲げられた段階でそれを「把持」とみなし、その際の曲げセンサからのアナログ値を閾値とした。加えて、閾値に応じた適切な文字列を入力信号として出力することで、使用者の把持動作を検知した。なお、入力信号を文字列としたのは、通信の状態をUnity (Version 2022.3.47f1) で確認する際、視覚的にわかりやすくするためである。具体的には、次のように信号の送受信を行った。

- ・ 閾値未満であれば、「SWITCH_NOT_PRESSED」という文字列を連続的に出力する。
- ・ 閾値を超過すると、「SWITCH_PRESSED」という文字列を連続的に出力する。

2.3 実験用 VR

図2に実験用VRの画面を示す。図2 (a) では炎オブジェクト、図2 (b) では氷オブジェクトを示している。VR画面には各オブジェクトがある程度離れた位置に出現し、それぞれにXR Grab Interactable、Rigidbody、Box Colliderをアタッチしている、これにより、重力による物理演算を適用され、オブジェクトが操作可能な状態となる。



(a) 炎オブジェクト

(b) 氷オブジェクト

図2：実験用VRの画面

炎オブジェクトは、FX Fire Freeアセットを使用し、氷オブジェクトは、ノードで作成したICE材料をCubeオブジェクトに貼り付けることで作成した。ICE材料の各パラメータは、CellDensityが20、NoiseScaleが35、NoiseScale_Alphaが200、Metallicが0.25、Smoothnessが0.85とした。

MQT-CをUnityで使用するため、XR interaction Toolkitを使用し、左右のコントローラにXRI Default Left・Right Controller（デフォルトのボタン設定）を適用した。MQT-Cには振動機能が備わっているが、現実に近い把持動作を再現するため今回は使用しない。

図3に、TGV-Cの通信プロセスを示す。TGV-CをVR空間に認識させるには、ArduinoとUnity間でシリアル通信を行う必要があるため、今回はArdityアセットを利用した。また、C#でスクリプトを作成し、通信プロセスを構築した。なお、

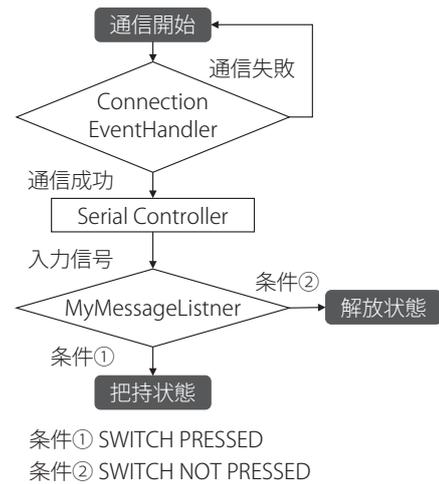


図3：TGV-Cの通信プロセス

Ardityは、System.IO.Ports.SerialPort クラスを使用するため、API互換レベルを.NET Frameworkに変更した。

スクリプト内に定義した通信速度とArduinoの通信速度が同じであることを確認し、Unityで操作対象となるオブジェクトをアタッチすることで通信が可能となる。また、各スクリプトの詳細は次のとおりである。

(1) MyMessageListener

VRオブジェクトの把持・解放処理を行う。受信信号がSWITCH_PRESSEDであればオブジェクトを把持状態に、SWITCH_NOT_PRESSEDであれば、解放状態にする。なお、オブジェクトが目の前に固定され、ユーザと連動して移動可能な状態を把持状態、目の前にあったVRオブジェクトが足元に落下した状態を解放状態と定義した。

(2) SerialController

Unityのシリアルポートを通じて、ArduinoとUnityのシリアル通信を行う。シリアルポートから入力信号を受信し、それをMyMessageListenerに渡す。

(3) ConnectionEventHandler

シリアル通信の接続イベントを処理し、接続が成功したかどうかを判断する。正常に接続されればSerialControllerが処理を開始し、失敗であれば再度接続を試みる。

3. 実験方法

3.1 実験1：温度変化とユーザの反応速度の評価

被験者は、手に病気や怪我のない健康な若年群とし、男性9名、女性2名の計11名(20.0±0.6歳)とした。土井ら(2009)の研究によると、若年群と高齢群では温冷反応時間に差があるため、今回は若年群のみを対象とした。

図4に実験1の手順を示す。実験準備として、被験者の指先の表面温度をサーモグラフィ（FLK-Ti125、Fluke）で測定した。被験者には示指でペルチェモジュールを押さえたのち、ヘッドホンを装着した。また、準備が終了次第閉眼させ、スイッチ操作による温冷の誤認を防いだ。

指先が温かい・冷たいと感じた際に申告するよう指示し、被験者が反応するまで温度上昇・降下を継続した。ここで、

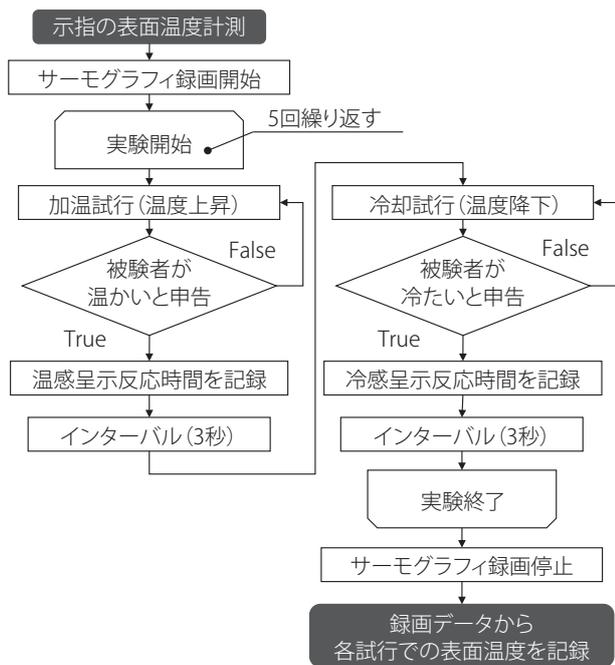


図4：実験1の手順

極性を急激に反転させる行為はペルチェモジュールの故障に繋がるため、温冷の切り替えには3秒以上のインターバルを設け、サーモグラフィ上で表示される表面温度が、高・低温領域から中温領域に変化していることをその都度確認した。上記の試行を温冷呈示ごとに5回繰り返し、被験者の反応時間と反応した際のペルチェモジュールの温度を記録した。

3.2 実験2：TGV-Cと既存品の比較および感性評価

被験者は、手に病気や怪我のない健康な若年群とし、男性19名、女性5名の計24名(19.1±2.0歳)とした。実験1と同様の理由から、若年群のみを対象に実験を行った。被験者のうち、54.2%はVRの使用経験がなかったことから、実験準備として、Meta Quest3を着用した状態で、5分以上の動画を視聴させた。

図5に、実験2の手順を示す。被験者には各コントローラの使用方法を簡単に説明し、MetaQuest3とTGV-Cを装着させた。加えて、「VR空間に現れた炎と氷をそれぞれ3回把持

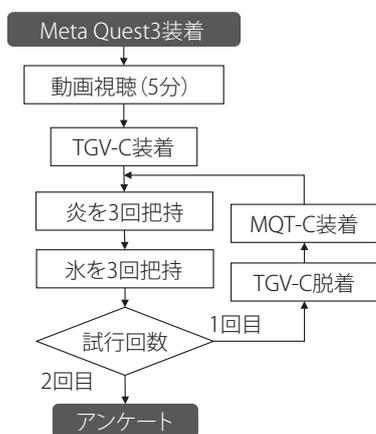


図5：実験2の手順

する。」というタスクを課し、各オブジェクトに応じた温冷呈示を行った。実験1において、温感呈示反応時間が極端に遅れたユーザは指の表面温度が低い傾向にあったため、VR実験では炎のタスクを先に実行させた。オブジェクトを把持するタイミングは被験者の任意としたが、保有時間は2～5秒程度とした。これは実験1から得られた結果に基づいており、被験者に火傷や凍傷の恐れがないよう倫理的配慮を考慮して設定している。また、被験者がTGV-Cでタスクを達成したのち、MQT-Cで同様のタスクを実行させた。

表1に評価アンケートの質問項目を示す。実験終了後に、没入感や臨場感、そして操作性に関するアンケートを実施した。本アンケートはFSS (Flow State Scale (Jackson and Marsh, 1996)) とPQ (Presence Questionnaire (Witmer et al., 2005)) に基づいて作成し、本研究に適切でない項目を削除して使用した。Q1～Q7は5段階のリッカート尺度で評価し、Q8とQ9はどちらかのコントローラを選択する方式とした。また、Q10では、実験における温冷呈示の適切性を確認した。

表1：評価アンケートの質問項目

| | | |
|------|------------------------------------|-----|
| Q1. | 「物体を掴む」というアクションを自分の思い通りにコントロールできた。 | 操作性 |
| Q2. | 入力手法に混乱しませんでしたか。 | 操作性 |
| Q3. | コントローラの操作にすぐに慣れましたか。 | |
| Q4. | 現実世界の行動とVR空間の行動が一致していると感じた。 | |
| Q5. | 指示されたタスクを行うことに完全に集中していた。 | 没入感 |
| Q6. | 環境や他のことに気を取られることなく、VRを体験できた。 | 臨場感 |
| Q7. | VR体験に没頭していた。 | |
| Q8. | 臨場感をより感じるのどちらか。 | |
| Q9. | 身体的疲労をより感じるのどちらか。 | その他 |
| Q10. | 温冷呈示は適切だったか。 | |

3.3 倫理的配慮

被験者への身体侵襲を防ぐため、フルプルーフとして物理スイッチを採用した。また、分析においては、連結不可能匿名化したデータを使用したため、個人情報の保護は十分になされている。さらに、実験への参加・中止は本人の意思に委ねられており、被験者の心理的苦痛をもたらさないものと想定される。被験者には、予め実験の趣旨、目的や方法および実験から得られたデータを統計として扱う際、個人が特定されることがない点を口頭および書面で説明し、十分な理解を得た。なお、本研究は学内倫理審査委員会に諮り、非該当であることを確認した。

4. 実験結果

4.1 温度変化とユーザの反応速度の評価

実験前の示指の表面温度は平均28.2℃±3.6であった。また、実験中の最大値温度差は温感で+10.5℃、冷感で-7.4℃、最高温度は37.2℃、最低温度は19.4℃だった。

図6に実験結果、図7にユーザの反応時間の平均と標準偏

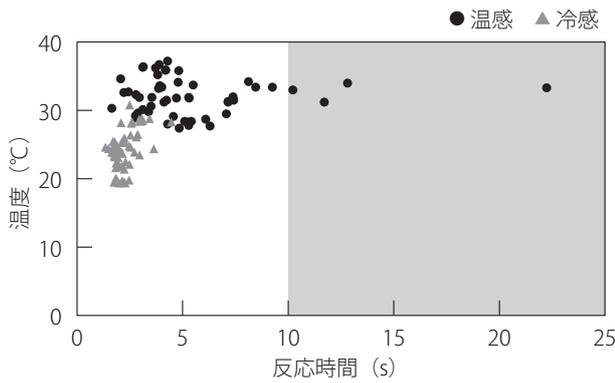


図6：実験結果

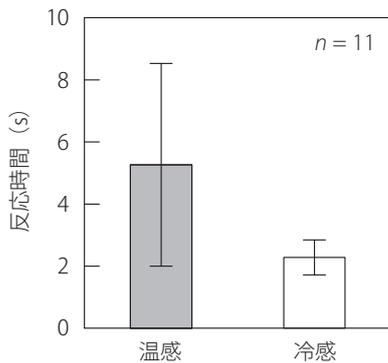


図7：ユーザの反応時間の平均と標準偏差

差を示す。実験結果より、指先に温感呈示を行う場合、5.27秒ほどでその温度変化を感じ取れることが分かった。一方で、冷感呈示は、2.28秒程度で被験者が反応することが確認された。温感呈示に関して、反応10秒以上かかる試行が4回確認され、これに起因して温感呈示反応時間の標準偏差が大きくなった。該当する被験者は、いずれも実験前に計測した示指の表面温度が平均よりも低い傾向にあった。

4.2 TGV-C と既存品の比較および感性評価

図8に、Q1～Q7の評価を示す。全ての項目において、TGV-Cの評価がMQT-Cを上回った。また、Q1～Q7にWilcoxonの符号付き順位検定を行った結果、Q5以外の間では有意差が認められた($p < 0.05$)。

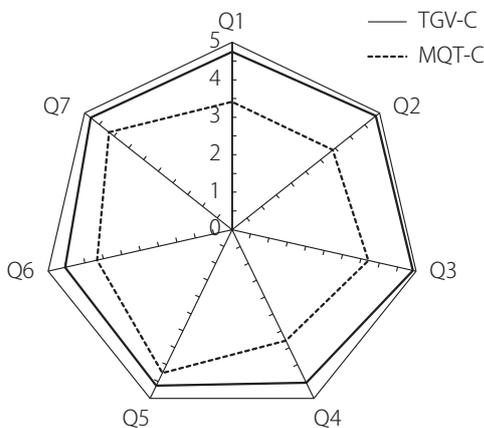


図8：Q1～Q7の評価

図9に、Q8とQ9の回答割合を示す。図9(a)がQ8の結果、図9(b)がQ9の結果を表している。Q8では100%の被験者がTGV-Cを支持した。また、Q9では、58.3%がMQT-C、37.5%がTGV-C、4.2%がどちらも変わらないと回答した。

Q10「温冷呈示は適切だったか。」では、評価値が4.54となったことから、実験においてTGV-Cは適切な温冷呈示を行っていたといえる。

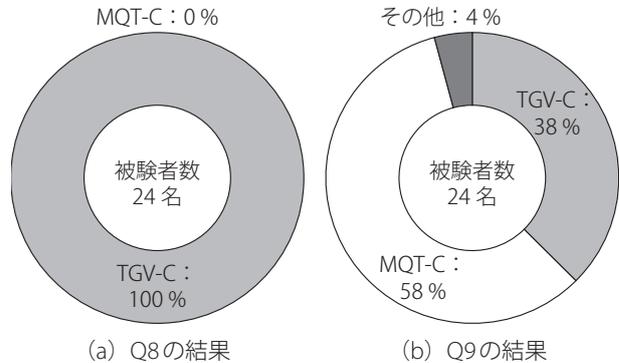


図9：Q8とQ9の回答割合

5. 考察

5.1 温度変化とユーザの反応速度

冷感呈示反応時間に注目すると、温感呈示反応時間よりも2倍程度早く被験者が反応している。これは、冷点の分布密度が、温点よりも高いことによる影響だと推察される。また、反応に10秒以上要した温感試行が4回確認され、該当者はいずれも実験前の示指の表面温度が平均よりも低い傾向にあった。人間の温度感覚は外部温度に影響を受けることが知られており、実験1においても、室温や、人の入退室によって発生する風に影響を受けたのではないかと推察する。また、ストレス性の体温上昇や、実験室の温湿度が一定に維持されていなかったことも要因だと考えられる。TGV-Cの実用化を視野に入れた際、使用時の環境やユーザの属性によって、温冷感の応答性が著しく低下するのは好ましくない。従って、今後は、極端な遅延が発生するユーザおよび環境条件を明らかにし、ユーザの属性や使用環境に依存しない温冷呈示システムを検討する必要がある。

5.2 TGV-C と既存品の比較および感性評価

5.2.1 没入感

Q4「現実世界の行動とVR空間の行動が一致していると感じた。」と、Q7「VR体験に没頭していた。」という項目では、TGV-Cの方が高い評価を得た(Q4：TGV-C = 4.54, MQT-C = 3.29)、(Q7：TGV-C = 4.79, MQT-C = 4.17)。このことから、TGV-CにはVR体験中のユーザに一体感を与え、没入感を高める効果があると推察される。MQT-Cはコントローラを持ち続けるという行動制限をユーザに課すが、TGV-Cはその限りではなく、VR環境とユーザをシームレスに接続しているといえる。一般的に、VRが持つ三要素として「三次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」が知られているが、TGV-Cの把持入力システムは、その中の自己投射性を高めるものであり、実験において没入感を向上させた要因だと考えられる。

5.2.2 臨場感

Q8「臨場感をより感じたのはどちらか。」という項目では、100%の被験者がTGV-Cを支持した。把持動作に着目した場合、TGV-Cの温冷呈示はユーザへの相互作用をほぼリアルタイムで引き起こすことができる。2～5秒程度の遅延はあるものの、これは、TGV-Cが一般的なVRコントローラよりも高い「実時間の相互作用性」を有していることとし、実験における臨場感の向上に強い影響を与えたことを示唆している。このことから、指腹部への温冷呈示と把持入力システムは、従来のVR体験を改善するのに十分な効果があると言える。

加えて、一部の被験者からは、「指先の温度が上昇していくことに多少の恐怖を感じた。」という意見がみられた。これはTGV-C特有の恐怖体験であり、学校教育における化学や物理学等の実験において、学習体験をより効果的にする手段として期待できる。

5.2.3 操作性

Q2「入力手法に混乱しませんでしたか。」とQ3「コントローラの操作にすぐに慣れましたか。」という項目でも、TGV-Cに優位な結果となった(Q2:TGV-C=4.88, MQT-C=3.42)、(Q3:TGV-C=4.92, MQT-C=3.71)。TGV-CはQ3の評価が特に高く、ユーザが短時間で操作を習得できることが示唆された。MQT-Cを適切に扱うにはある程度のメディアリテラシーが要求されるが、TGV-Cはその限りではない。このことから、TGV-Cはメディアリテラシーの多寡によらず、直感的な操作性を有していると言える。

一部の被験者から、「TGV-Cのペルチェモジュールが平坦であるため、指先に違和感を覚えた。」という意見が挙がった。ペルチェモジュールをフレキシブルな素材に変更することは可能だが、一般的なものよりも価格が高価である点を考慮しなければならない。現在の製作費用(片手分)は、約39,000円であり、実用化を目指す上でこれ以上の増額は望ましくない。従って、制御システムや設計を見直し、製造コストの削減を目指すとともに、指先に違和感を与えない仕様を考えるなどの工夫が必要である。

5.2.4 身体的疲労

Q9「身体的疲労をより感じるのはどちらか。」という項目では、58.3%の被験者がMQT-C、37.5%がTGV-C、4.2%がどちらも変わらないと回答した。TGV-CがVR体験中の身体的疲労を軽減したのは、操作に対する混乱が比較的少なかったためだと推察する。

また、一部の多汗を自認する被験者から、「手袋を装着することに躊躇いを感じた。」という意見が挙がった。現在の設計では、親指、示指、中指以外の動作に不要な部位も手袋で被覆しており、グローブ型から指サック型に変更することで改善が見込まれる。

6. 結論

本研究では、これまで十分に活用されていない温度感覚に着目し、指腹部への局所的な温度刺激でも、VRの没入感・臨場感の向上に有効であるかを検証した。加えて、TGV-Cの温

度変化機能に対するユーザの反応速度を評価し、参照用として既存のコントローラ(MQT-C)との比較、および感性評価を行った。得られた結果の要約を以下に示す。

- (1) TGV-Cがユーザの指腹部に温度刺激を与える場合、最低でも必要な温冷呈示時間は、温感呈示で5.27秒、冷感呈示で2.28秒であった。
- (2) TGV-Cの直感的な入力システムは、自己投射性を向上させるものであり、VRの没入感を向上させた。また、入力操作に対する混乱が軽減されたことから、使用中の身体的疲労を抑制する効果が期待できる。
- (3) 指腹部への温冷呈示は、実時間の相互作用性を向上させるものであり、VRの臨場感を向上させた。

引用文献

- Witmer, B. G., Jerome, C. J., and Singer, M. J. (2005). The factor structure of the presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 14, pp. 298-312.
- HaptX (n.d.). HaptX Gloves G1 (Retrieved February 3, 2025 from <https://haptx.com/gloves-g1/>).
- Rein, H. (1925). Über die Topographie der Warmempfindung. Beziehungen zwischen Innervation und torischen Endorganen. *Zeitschrift für Biologie*, Vol. 82, pp. 513-535.
- Strughold, H. and Porz, R. (1931). Die Dichte der Kalpunkte auf der Haut des Menschlichen Körpers. *Zeitschrift für Biologie*, Vol. 91, pp. 563-571.
- Jackson, S. A. and Marsh, H. W. (1996). Development and validation of a scale to measure optimal experience: The flow state scale. *Journal of Sport Exercise Psychology*, Vol. 18, pp. 17-35.
- Yarnitsky, D. and Ochoa, J. L. (1991). Warm and cold specific somatosensory systems: Psychophysical thresholds, reaction times and peripheral conduction velocities. *Brain*, Vol. 114, pp. 1819-1826.
- 瀬尾明彦・西川冬瑠・土井幸輝 (2009). ヒトの手掌部の温冷感覚の評価とその活用法の検討. *日本感性工学会論文誌*, Vol. 9, pp. 111-117.
- 土井幸輝・西川冬瑠・串山久美子・馬場哲晃・瀬尾明彦 (2009). 温冷感覚特性と加齢効果. *ジェロンテクノロジー研究フォーラム2009, ISG 日本支部研究発表会*, pp. 25-28.
- 馬場哲晃・笠松慶子・土井幸輝・串山久美子 (2012). 温冷呈示を利用したビデオゲームインタラクションにおける手法の検討と開発. *情報処理学会論文誌*, Vol. 53, pp. 1082-1091.

受稿日：2025年3月3日

受理日：2025年5月26日

発行日：2025年6月30日

Copyright © 2025 Society for Science and Technology



This article is licensed under a Creative Commons [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International] license.

<https://doi.org/10.11425/sst.14.25>