



ウェアラブルな温冷覚多点提示システム TherModule の基礎検討

前田智祐¹⁾, 倉橋哲郎¹⁾

1) 株式会社豊田中央研究所 ヒューマンサイエンス研究領域 温感覚解析プログラム
(〒480-1192 愛知県長久手市横道 41-1, {tmaeda, kurahashi}@mosk.tytlabs.co.jp)

概要:

身体の数部位に対してウェアラブルかつ温冷覚提示可能な TherModule を提案する。従来研究では、単数部位、複数部位であっても提示箇所が限定的であった。TherModule では、身体的な運動や感覚を阻害せず、映像や物体等と使用者のインタラクションの範囲を拡張できると考えている。本稿では、TherModule の試作と TherModule の温冷覚提示による映像体験の向上に関する実験を行った。その結果、TherModule によって映像体験が向上することが示唆された。

キーワード： 触覚, 温冷覚, ウェアラブル, 身体性

1. はじめに

眼鏡や補聴器のように常時装着型（ウェアラブル）デバイスは、人間の能力を補綴・拡張するための手段として有効である。今後、身体的な運動や感覚を阻害せず、高い没入感を与えることのできるウェアラブルデバイスを用いて、体験や経験をより拡張することへの期待が高まっている。

触覚研究では、VR 空間における没入感向上のために振動覚、圧覚、温冷覚のインターフェース研究が行われている。特に、振動覚と圧覚を利用した触覚ディスプレイを対象とした研究が多く存在する。振動覚と圧覚は応答性が高いため [1]、全身や身体の数部位に振動覚を与える研究 [2] や圧覚を提示する研究 [3] に発展しており、様々な感じ方に対する制御方法への知見が得られつつある。一方で、温冷覚は、振動覚と圧覚に比べて応答性が低く、曖昧な感覚であったため、インターフェースとして積極的に利用する研究は少ない。しかし、温冷覚は社会性や感情に結びついているとされている研究報告があり [4][5]、VR 空間における没入感や体験を向上させる手段として有効であると考えられる。

そこで本研究では、温冷覚の特徴を利用し、高い没入感や感情変化を与え、感覚を拡張する体験を提供できるウェアラブルな温冷覚多点提示システム、TherModule を提案する。TherModule では、アクセサリを身に着ける手首、前腕、足首を温冷覚提示の対象部位とし、身体の大範囲に対する温冷覚提示と身体動作を阻害しないインタラクションの実現を目論んでいる。図 1 に TherModule とその想定するアプリケーションを示す。本稿では、TherModule の試作結果、映像体験向上の評価実験の結果を報告する。

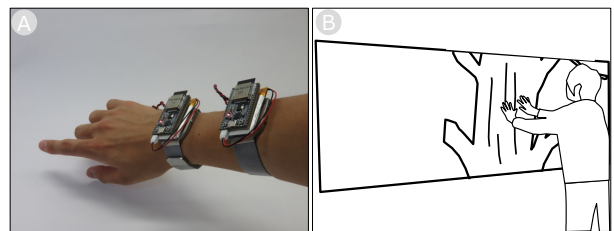


図 1: (A) TherModule のプロトタイプ (B) 想定するアプリケーション: ディスプレイに表示されたコンテンツに合わせた温冷覚提示

2. 関連研究

本節では、装着型の温冷覚提示に関する研究動向について述べ、それらの解決されていない問題・課題と本研究の位置付けを明確にする。

2.1 単数部位における温冷覚提示

従来研究では、温冷覚を提示する部位として、顔、指、手のひら、前腕、首、手首、足首、耳が検討されている。まず顔に対しては、HMD 内部にペルチェ素子を埋め込むことで、映像に合わせた温冷覚提示を行い、VR 空間への没入感を向上させた研究が存在する [6][7]。次に指に対しては、透過式眼鏡型ディスプレイの映像に合わせて触感情報を重畳させる方法が提案されている。指に巻いたベルトを DC モーターによって制御することで、振動覚と圧覚を提示し、爪の上の乗せたペルチェ素子によって温冷覚提示を行い、実物体の触感を変容させる [8]。同様の形態では、指腹の両側にペルチェ素子で温冷覚提示し、指腹へ温冷覚を誘起させる方法も提案されている [9]。このアプローチでは、指腹への触覚刺激を阻害しない利点がある。また、手のひらに温冷覚を与えたときの印象調査から温冷感インターフェースのガイドラインが研究されている [10]。前腕に対しては、前腕の

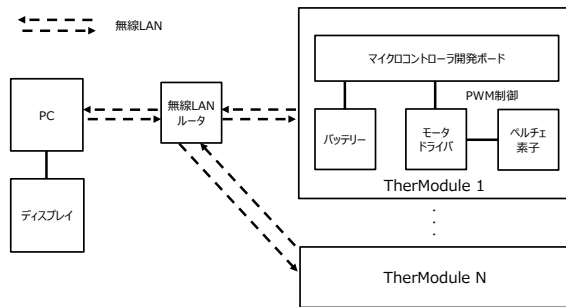


図 2: システム構成

2ヶ所にそれぞれ温覚と冷覚を同時に提示することで痛みを感じるサーマルグリル錯覚 [11] はよく知られている。前腕に温冷覚を提示し、その情報からナビゲーションする方法が提案されている [12]。最後に、耳に対しては、温冷覚を与えた状態で音楽を聴くと、その音楽の印象が変化すると報告がされている [13]。イヤーマフ型のデバイスを使用し、場所に応じて温冷覚提示することで、人の行動を制御しようとする研究が行われている [14]。

2.2 複数部位における温冷覚提示

複数部位への温冷覚提示として、首と手首には温覚提示、胸囲には振動覚提示することで、ゲームや映画における没入感を向上させる研究が存在する [15]。さらに 3D プリントによって作成されるギプスを用い、個人の身体に合わせ、デバイスを装着する研究も行われている [16]。

2.3 本研究の位置付け

前述の従来研究では、単数部位のみ、あるいは装着が容易でない状態で複数部位に温冷覚を提示するものであった。身体的な運動や感覚（身体性）が十分に考慮されておらず、外部環境とのインタラクションが限定的である。ウェアラブルでワイヤレスなシステムにより、身体性を阻害せず、各部位に温冷覚提示を容易に与えられるシステムの具現化は、VR 空間、実空間とのインタラクションや没入感の向上を期待できると考えられる。よって本研究の目的を以下の 2 点とした。(1) 身体性を阻害せず、身体各部位に温冷覚を多点提示するシステムを提案する。(2) 温冷覚によるインタラクションの拡張を可能にする。

3. システムの設計・試作

3.1 システム構成

システムのメインコンポーネントは TherModule、無線 LAN、PC である。TherModule では、ペルチェ素子による温冷覚提示を行う。無線 LAN による通信で PC から TherModule の制御信号を送信する。使用する通信プロトコルは Open Sound Control (OSC) である。OSC は UDP 通信であるため、通信が速い特徴を持っている。PC では、TherModule の温冷覚制御信号の生成や映像コンテンツの再生を行う。システム構成を図 2 に示す。

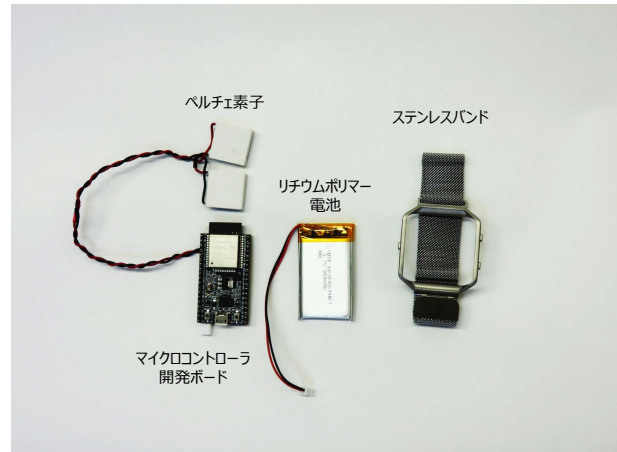


図 3: 試作したハードウェア

3.2 ハードウェア設計

図 2 に示した TherModule 内の構成機器について説明する。無線通信による温冷覚提示を行うため、無線 LAN と Bluetooth が使用できるマイクロコントローラ開発ボード (Espressif System 社製 ESP32 DevKitC) を使用した。温冷覚提示はペルチェ素子 (日本テックモ社製 TEC1-03103) を使用した。ペルチェ素子のサイズは 20 mm × 20 mm であり、2 個のペルチェ素子を直列に接続した。ペルチェ素子の駆動には、小型のモータドライバ (Pololu 社製 BD65496MUV) を使用した。ペルチェ素子の安定的な作動には放熱が必要になる。この放熱機能と装着部位への柔軟性を実現するために、マグネットで締結可能なステンレスバンドを使用した。放熱を強化するために、マグネット付のヒートシンクを追加することも可能である。今回使用したバッテリーは、リチウムポリマー電池 (Data Power Technology 社製 DTP603048) を使用した。TherModule の重さは 91g である。ペルチェ素子表面の最大温度は 66 °C、最低温度は 6.9 °C であった。温覚における時定数 (最大・最低温度の 67% になる時間) は 5.8 秒、冷覚提示における時定数は 3.8 秒であった。本システムは、温覚・冷覚ともに約 4 °C/秒の提示ができる。試作したハードウェアを図 3 に示す。

3.3 ソフトウェア設計

TherModule で温冷覚提示を制御するために Max7(Cycling⁷ 74 社製) を用いて温冷覚制御ソフトウェアを開発した。各モジュールに対して、ペルチェ素子の電流値を制御できる。温冷覚提示の制御用 GUI を図 4 に示す。また、映像提示には TouchDesigner (Derivative 社製) を用いた。

4. 実験

本システムを用いて、映像体験向上の評価実験を行った。TherModule の装着部位は、両手首、両前腕、両足首の 6 箇所とし、以降、実験の詳細を説明する。

4.1 実験参加者

18 名の健常成人 (男性 10 名、女性 8 名、年齢 21-29 歳) が、書面による同意書を提出した後に、本実験に参加した。本実験は、豊田中央研究所の実験計画倫理審査で承認され

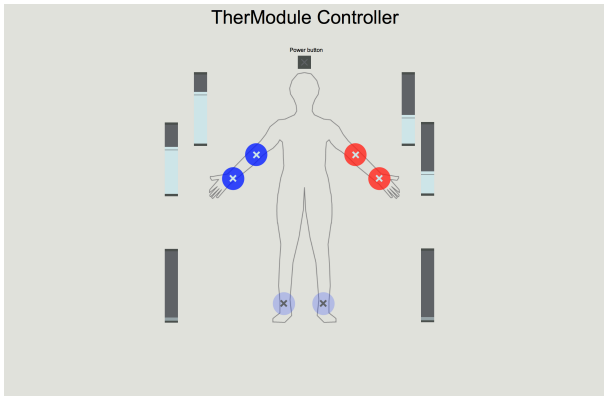


図 4: 作成した GUI

た後に適切に実施された。

4.2 温冷覚提示による映像体験の向上

映像体験の向上実験の映像には、ウォーター 슬라이ダーの映像¹を用い、映像に合わせて冷覚提示を行った。映像出力は 60 インチディスプレイを使用し、解像度は 1280 × 720 であり、リフレッシュレートは 60fps である。

実験参加者を映像提示のみの群 (Visual, 以降 V 群), 映像および冷覚提示 (Visual + Thermal, 以降 VT 群) の群の 2 群に分ける。2 群の男女比は同じである。実験参加者は、実験の前に Self-Assessment Manikin[17] (SAM) を用いて現在の感情を紙媒体によって主観評価した。SAM の評価には、Pleasure (感情価), Arousal (覚醒度), Dominance (支配度) が含まれている。次に、実験参加者は椅子に座った状態で TherModule を手首, 前腕, 足首に装着した。このとき、手首は内側, 前腕は手首と肘の中心かつ内側に、足首は踵側にペルチェ素子が接触するように調整した。本実験では、視覚と冷覚のみの提示を行うため、ノイズキャンセリングヘッドフォン (BOSE 社製 Quietcomfort 35 II) を装着し、実験には防音室を使用した。このとき、室温は 24 °C に統制した。なお、V 群の実験参加者には TherModule の装着のみで、冷覚提示をしない。映像は 10 秒間提示し、水に飛び込む瞬間の 1 秒前から冷覚を 4 秒間提示した。刺激提示後に、再度 SAM による主観評価を実施した。実験の様子を図 5 に示す。

4.3 実験結果と考察

図 6 に実験結果を示す。横軸は各指標、縦軸は SAM における各指標の平均値、標準偏差を示している。2 群間で実験後の SAM による主観評価値の差異をもって、映像体験の向上の程度を評価した。群間の差異の解析はウィルコクソンの順位和検定にて実施した。その結果、VT 群は V 群と比較すると、Pleasure と Arousal において高い点数になっており、両群間での差異は有意であった ($p < 0.01$)。Dominance では、両群に大きな差異は見られない ($p > 0.15$)。本実験の結果は、映像体験において、TherModule を用いて温冷覚提示を行うと、Pleasure や Arousal が向上し、映像体験や

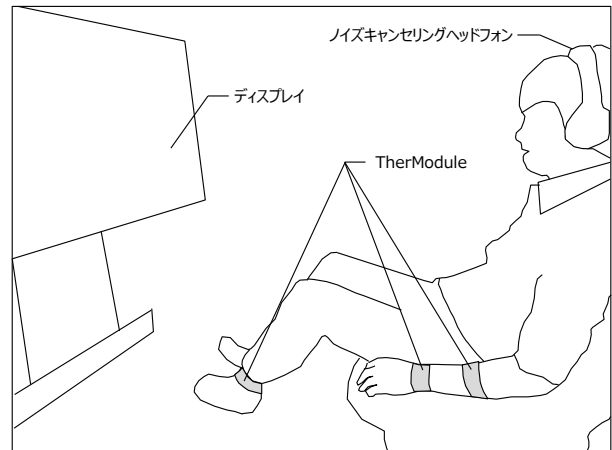


図 5: 実験の様子

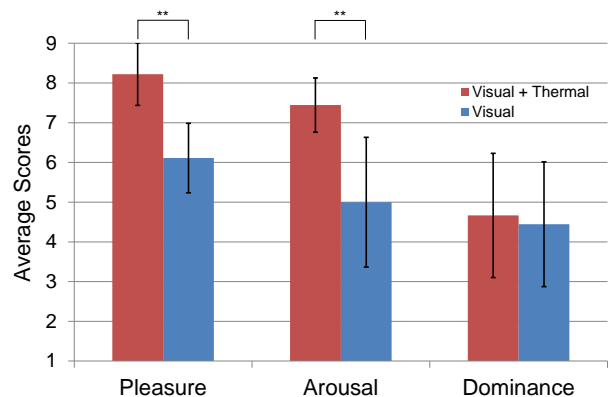


図 6: 実験結果

臨場感が向上することを示唆している。

本実験では、椅子に座った状態で複数部位に冷覚提示を行った。今後、身体動作が伴う場面への適応を予定している。体験・経験の没入感や臨場感をより向上させるためには、現状、温冷覚の提示の仕方 (デザイン) に関する知見が不足している。今後、映像との時間差、温冷覚の提示デバイス間での時間差・提示順序、身体動作の状態に応じた時間差・提示順序などの効果を実験的に明らかにしていく予定である。時空間的な温冷覚提示を検討し、体験・経験の没入感や臨場感の向上、よりインタラクションを拡張させるための温冷覚デザインを進めていく。

5. むすび

本研究では、身体性を阻害せずに、身体の各部位に温冷覚提示が可能な TherModule を試作した。また、そのシステムを用いた映像体験の向上に関する評価を行った。今後は身体的動作が伴った場合の体験・経験を向上させるために時空間的な温冷覚の提示方法を検討し、温冷覚における Haptic Design の実現を目指す。

¹<https://www.istockphoto.com/jp/en/video/speed-water-slide-gm101229305-4187948>

参考文献

- [1] Ricardo Jota, Albert Ng, Paul Dietz, and Daniel Wigdor. How fast is fast enough?: a study of the effects of latency in direct-touch pointing tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2291–2300. ACM, 2013.
- [2] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Kouta Minamizawa, Benjamin Outram, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In *ACM SIGGRAPH 2016 VR Village*, p. 20. ACM, 2016.
- [3] 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*, p. 320. ACM, 2018.
- [4] Yoona Kang, Lawrence E Williams, Margaret S Clark, Jeremy R Gray, and John A Bargh. Physical temperature effects on trust behavior: The role of insula. *Social cognitive and affective neuroscience*, Vol. 6, No. 4, pp. 507–515, 2010.
- [5] Joshua M Ackerman, Christopher C Nocera, and John A Bargh. Incidental haptic sensations influence social judgments and decisions. *Science*, Vol. 328, No. 5986, pp. 1712–1715, 2010.
- [6] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, and Kouta Minamizawa. Thermovr: Exploring integrated thermal haptic feedback with head mounted displays. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5452–5456. ACM, 2017.
- [7] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, and Kouta Minamizawa. Exploration of cuing methods for localization of spatial cues using thermal haptic feedback on the forehead. In *World Haptics Conference (WHC), 2017 IEEE*, pp. 400–405. IEEE, 2017.
- [8] Takaki Murakami, Tanner Person, Charith Lasantha Fernando, and Kouta Minamizawa. Altered touch: miniature haptic display with force, thermal and tactile feedback for augmented haptics. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, p. 53. ACM, 2017.
- [9] Katsunari Sato. Augmentation of thermal sensation on finger pad using stimuli for finger side. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 512–520. Springer, 2016.
- [10] Graham Wilson, Gavin Davidson, and Stephen A Brewster. In the heat of the moment: subjective interpretations of thermal feedback during interaction. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2063–2072. ACM, 2015.
- [11] Ryo Watanabe, Ryuta Okazaki, and Hiroyuki Kajimoto. Mutual referral of thermal sensation between two thermal-tactile stimuli. In *Haptics Symposium (HAPTICS), 2014 IEEE*, pp. 299–302. IEEE, 2014.
- [12] Jordan Tewell, Jon Bird, and George R Buchanan. Heat-nav: Using temperature changes as navigation cues. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1131–1135. ACM, 2017.
- [13] Shimon Akiyama, Katsunari Sato, Yasutoshi Makino, and Takashi Maeno. Thermon: thermomusical interface for an enhanced emotional experience. In *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, pp. 45–52. ACM, 2013.
- [14] Takuji Narumi, Akagawa Tomohiro, Young Ah Seong, and Michitaka Hirose. Characterizing the space by thermal feedback through a wearable device. In *International Conference on Virtual and Mixed Reality*, pp. 355–364. Springer, 2009.
- [15] Faisal Arafsha, Kazi Masudul Alam, and Abdulmotaleb El Saddik. Emojacket: Consumer centric wearable affective jacket to enhance emotional immersion. In *Innovations in Information Technology (IIT), 2012 International Conference on*, pp. 350–355. IEEE, 2012.
- [16] Xiaoting Zhang, Guoxin Fang, Chengkai Dai, Jouke Verlinden, Jun Wu, Emily Whiting, and Charlie CL Wang. Thermal-comfort design of personalized casts. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 243–254. ACM, 2017.
- [17] 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.