



サーマルグリル錯覚の非接触時分割提示手法

龍 子源¹⁾, 伊藤 天翔¹⁾, 長谷川 晶一²⁾, 家永 直人³⁾, 黒田 嘉宏³⁾

Ziyuan LONG, Takato ITO, Shoichi HASEGAWA, Naoto IENAGA, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

2) 東京科学大学 総合研究院 (〒 226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

3) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要: 温冷刺激を交互に配置して無害な温度域で発生させる非侵襲痛み錯覚は消防訓練などへの応用が期待される。しかし、長時間提示では皮膚の過度な加熱や冷却が課題となる。本研究は皮膚温度を一定範囲内に保ちながら持続的な痛み錯覚を提示する手法の開発を目的とする。具体的には、従来の空間的交互配置に加え、同一部位に非接触の温冷刺激を時分割で交互に提示する。本発表では皮膚温度変化と痛み知覚の評価結果を報告する。

キーワード: サーマルグリル錯覚, 温冷感覚提示, 非接触提示, 時分割提示

1. はじめに

サーマルグリル錯覚 (Thermal Grill Illusion, TGI) とは、38–42 °C の温刺激と 18–22 °C の冷刺激を皮膚上に空間的に交互に同時提示すると、実際に皮膚や組織に物理的損傷が発生していないにもかかわらず、灼熱感や痛みの感覚を引き起こす現象である。近年、LED による光加熱とボルテックスチューブによる冷気流を組み合わせた非接触型 TGI 提示装置が報告され [1], エンタテインメント, 教育・訓練, 医療への応用が期待されている。しかし、温冷刺激を並列に長時間提示すると、図 1 に示すように、皮膚表面を連続的に加熱あるいは冷却することにより、過度な温度変化が避けられないという課題が存在する。また、提示温度を一定にして温冷刺激を提示する場合でも、皮膚の深部まで温度変化が伝わることで発生する [2]。皮膚温度を保ちながら持続的な TGI を生じる提示手法はまだ確立されていない。そこで本研究は、長時間の安全な TGI 提示を目指し、皮膚温度を一定範囲内に保ちながら、持続的な TGI 提示の実現を目的とする。そのため、従来の空間的交互配置に加え、同一部位への温冷刺激を時分割で交互提示する手法を提案する。接触型提示に比べて、非接触提示は装置に残留した熱が意図せずユーザに伝わる恐れがなく、提示の即応性や切り替えの柔軟性に優れている [3]。さらに、VR や AR への応用で非接触型は拘束感がないことから、本研究では非接触型の提示方式を採用する。

2. 関連研究

TGI が発生する神経メカニズムとして、Craig ら [4] は脱抑制理論 (Disinhibition Theory) を提唱した。この理論では、皮膚の冷たさに反応する感覚神経 COLD が痛みを伝える多感覚性の痛み神経 HPC (Heat-Pinch-Cold) を通常は抑制しているが、温刺激が加わることで COLD ニューロ

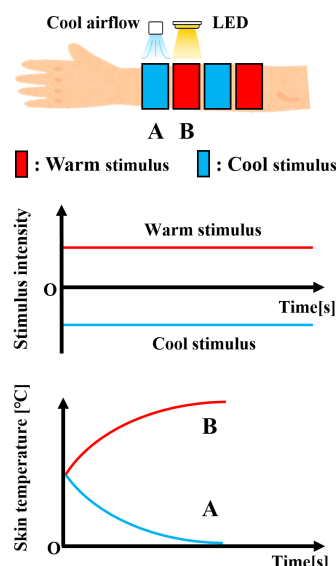


図 1: 従来手法の皮膚温過熱と過冷却

ンが抑制され、その結果 HPC ニューロンの活動が活性化されて痛みが生じるとされている。また、TGI の接触型提示手法として、Karmakar ら [5] は、ペルチェ素子及び高熱伝導性の銅製ヒートパイプを用いた接触型熱格子提示装置を構築し、温冷刺激の温度差に応じた TGI の強度を評価する心理物理実験を実施した。さらに、得られた結果に基づいて、脱抑制理論に基づく数理モデルを構築し、TGI の強度予測を試みた。Patwardhan ら [2] は、ペルチェ素子で制御する交互温冷アルミ棒から成る接触型装置を用いて、温冷刺激の温度差に応じた TGI 主観強度と反応時間を評価する実験を行い、刺激の温度差が大きいほど TGI 主観強度が高く反応時間が短い傾向を示した。さらに、Pennes の生体組織熱伝達方程式に基づいて構築した数理モデルにより TGI

感覚強度の変化を説明し得ることが示唆された。この研究により、提示温度を一定にしても、皮膚の深部まで温度変化を伝わるのが発生するので、長時間提示の場合に皮膚表面と深部の温度変化を制御する必要がある。一方、Mizuno ら [1] は LED 加熱及び冷気流を用いた非接触型の TGI 提示装置を仮現運動と組み合わせることで、動的な TGI 体験を提案した。これにより、仮想的な移動刺激に伴う痛みを提示可能な新たな触覚フィードバック手法を実現した。これらの先行研究により、TGI のメカニズムが調査されるとともに、接触型及び非接触型の提示手法が確立されてきた。しかし、これらの手法はいずれも短時間提示を対象としており、長時間提示に関する検証は行われていない。長時間提示において、皮膚表面を連続的に加熱あるいは冷却することにより、過度な加熱や冷却が生じる可能性があり、持続的な TGI を生じさせる提示手法はまだ確立されていない。

一方、温度感覚の長時間提示において、皮膚温度を一定範囲内に保ちつつ温冷刺激を提示する手法が研究された。Manasrah ら [6] は加熱と冷却の速度を非対称に設定した接触型温冷刺激を皮膚に適用することで、平均的な皮膚温度を変化せずに持続的な加熱感覚を提供できることを示した。この手法では、知覚閾値以下の緩やかな冷却と、急速な加熱を交互に行うことで、持続的な温覚錯覚を実現した。さらに、非接触の冷覚提示手法として、Xu ら [3] は冷気流と可視光 LED を用いて、同一皮膚部位に対して加熱と冷却を交互に提示することで、皮膚温度をほぼ一定に保ちながら、持続的な冷覚を提示した。これらの研究は、TGI の長時間提示の実現に向けた有用な知見を提供している。

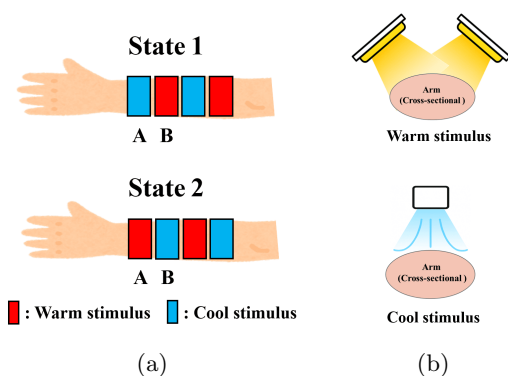


図 2: (a) 2 種類の提示状態, (b) 温冷刺激の提示方法

3. TGI の非接触時分割提示手法

3.1 提案手法

本研究は長時間にわたって、皮膚温度を一定範囲に保ちつつ持続的な TGI 提示を実現することを目的として、従来の空間的交互配置に加え、同一部位への温冷刺激を時分割に交互提示する手法を提案する。具体的には図 2a に示すように、前腕背面に状態 1 と状態 2 の提示状態を繰り返すことにより、同一部位への温冷刺激の時分割提示を行う。図 2b に示すように前腕背面に対して、温刺激は LED、冷刺激は

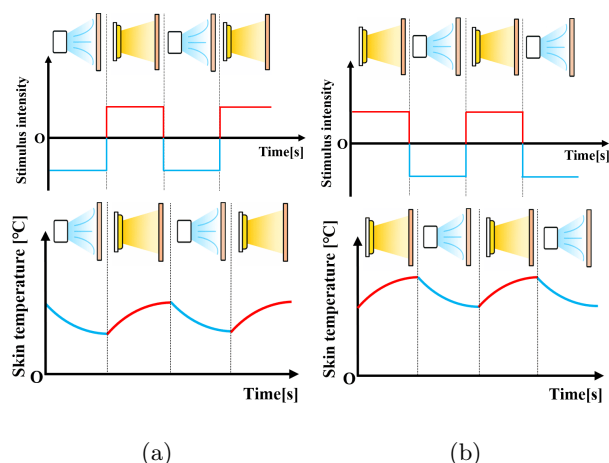


図 3: 同一部位への時分割提示と皮膚温度変化: (a) A 部位の温冷刺激と温度変化, (b) B 部位の温冷刺激と温度変化

冷気流を用いて提示する。提案手法による時分割提示では、図 2a の A 部位と B 部位への温冷刺激時分割提示と皮膚温度変化を図 3 に示す。

3.2 提示装置

提案手法において、図 2a に示す状態 1 と状態 2 の繰り返しを行うために、提示装置は図 4 のように構築した。温刺激の提示には平面パワー LED (Coairrwy 製 High Power Chip LED 50 W) を使用し、LED 冷却にはヒートシンク (Tuloka 製) とファン (YCCFAN 製 YDM2510C05) を使用した。冷刺激の提示にはコンプレッサ (高儀 ACP-39SLB) で 0.3-0.6 MPa の圧縮空気を発生し、ボルトックスチューブ (Tohin 製 AC-50) を駆動して冷気流を発生した。冷気流の流量は比例電磁弁 (Asco 製 Positice-Flow-202-02) で制御した。LED と冷気流の配置用パーツは 3D プリンタ (Raise3D Pro2 Plus with PLA filament) で作成した。LED 光と冷気流の強度はマイコン (Arduino Uno R4) を通じてシリアル通信で制御した。また、定常電源 (WANPTEK WPS605H) を用いて電圧 30 V で LED に給電し、AC-DC 電源 (CURE SMPS-24-K02) を使用し、電圧 24 V で電磁弁に給電した。

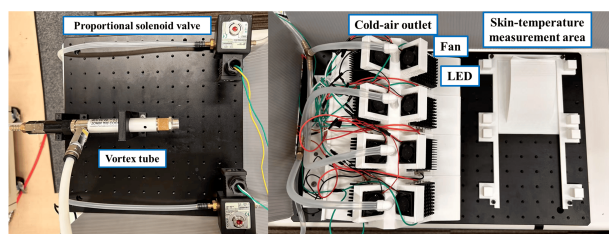


図 4: 提示装置

4. 温度変化の計測: 連続的な温冷刺激提示

事前実験では、温冷刺激を一定時間、連続して提示した場合の温度変化を確認するため、提示前後における皮膚温度を計測し、その差分を算出した。事前実験には著者 2 名が参加した。具体的には、図 4 に示す装置を用い、1 名に対

し図 2a に示す状態 1 の TGI 刺激を 6 s 間提示した。皮膚温度はサーマルカメラ (日本アビオニクス製 InfReC R450) で計測した。前腕部の初期皮膚温度は 31.4 °C, 事前実験時の室温は 24.0 °C であった。刺激提示前後の皮膚温度分布を図 5 に示す。結果から顕著な温度変化がみられた。6 s の提示により, LED による皮膚温度の上昇は 3.4 °C であり, 冷気流による皮膚温度の降下は-1.6 °C であった。以上より, 初期状態の皮膚温度と比較すると, 連続的な温冷刺激提示では皮膚温度に顕著な変化が生じることが示され, 長時間連続して TGI を提示する際には過熱及び過冷却の抑制が重要な課題である。

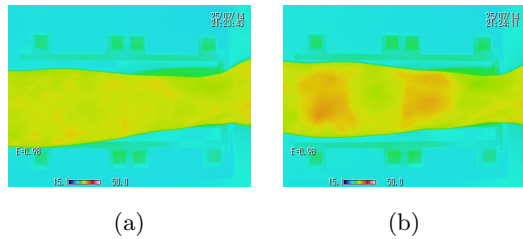


図 5: 連続的な温冷刺激提示前後の皮膚温度変化：(a) 提示前, (b) 提示後

5. TGI 強度と感覚の持続性評価

提案する非接触時分割 TGI 提示が持続的な TGI を生むかを検証し, その強度と持続性を評価するため, 事前実験を行い, 著者 2 名が参加した。図 2a に示す状態 1 と状態 2 を交互に提示する 4 種の提示パターンを表 1 に示す。各パターンにつき, 室温 24 °C 下で 120 s の連続提示をそれぞれ 1 回実施した。事前実験の流れは図 6 に示す。提示前後の皮膚温度はサーマルカメラで測定し, 刺激による温度変化を可視化した。TGI 強度は各パターンごとに 5 段階 (1: 痛くない 2: あまり痛くない 3: どちらとも言えない 4: やや痛い 5: 痛い) で主観評価し, 持続性は温冷刺激提示を行いながら TGI を感じた間のみボタンを押してもらい, その押下時間を記録して持続性を評価した。

表 1: 交互提示の提示パターン

Pattern	State 1 [s]	State 2 [s]
1	0.5	0.5
2	1.0	1.0
3	1.5	1.5
4	2.0	2.0

5.1 皮膚温度変化

図 7 に示すのは 1 名の事前実験参加者に対して, 4 種類のパターンを提示した前後の提示部位の温度分布である。図示した前腕表面皮膚の全体は提示部位であり, その部位の温度変化を評価した。事前実験参加者 2 名の初期状態の平均皮膚温度は 31.3 °C と 33.5 °C であった。計測の結果により, 120 s の提示時間に対し, 皮膚全体の温度分布として,

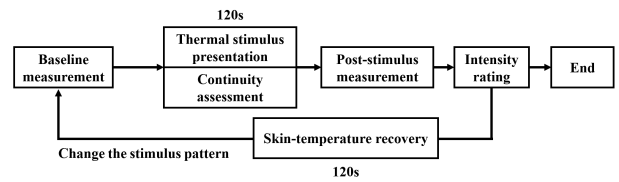


図 6: TGI 強度と感覚の持続性評価

矩形分布ではなく, 温冷刺激の提示方法の異なりによって, 中心部により低く, その近傍はより高い温度が観測された。しかし, 温刺激による皮膚温度上昇の提示パターンによる変動は ± 1.4 °C, 冷気流による皮膚温度降下の提示パターンによる変動は ± 1.0 °C であり, 提示パターンによる明らかな違いは見られなかった。4 種類の時分割提示パターンによる皮膚温度上昇と降下を計測し, その平均をそれぞれ計算すると, 事前実験参加者 2 名に対して, LED による温度上昇は平均 5.3 °C と 4.0 °C であり, 冷気流による温度降下は平均-1.0 °C と-1.8 °C であった。図 5 に示す従来手法による定常提示 (提示時間 6 s, 温度上昇 3.4 °C, 下降-1.6 °C) と比較すると, 事前実験では刺激時間を 20 倍 (120 s) に延長しても, 温冷刺激による皮膚温度の上昇と降下に顕著的な増加は見られなかった。したがって, 提案手法は皮膚温度の制御において有効性を有すると考えられる。ただし, 皮膚温度の変動幅をさらに抑制するためには, 温冷刺激の提示方法を今後一層改良する必要がある。

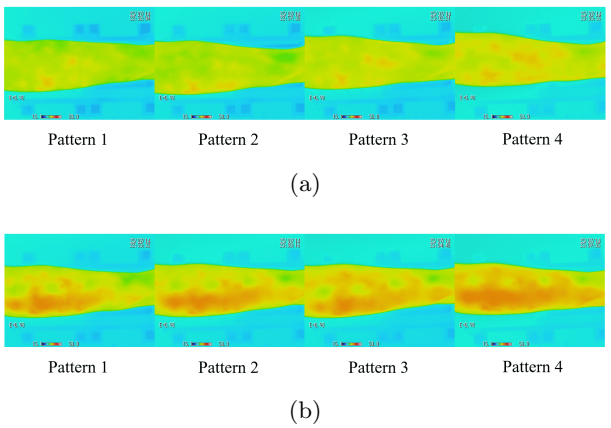


図 7: 皮膚温度分布：(a) 提示前皮膚温度, (b) 提示後皮膚温度

5.2 TGI の知覚強度評価

各時分割提示パターンによる TGI の知覚強度を評価した結果を図 8 に示す。結果より, 提案手法は提示パターンを変えても一貫して中度以上の TGI を誘発できると示唆される。ただし, 事前実験での TGI 感覚強度評価は各提示パターンにおける全体的な TGI 感覚の強度のみ評価を行った。今後, リアルタイムで TGI の強度を評価可能な測定手法を将来の実験に導入し, 各時間点における感覚強度を詳細に分析する必要がある。

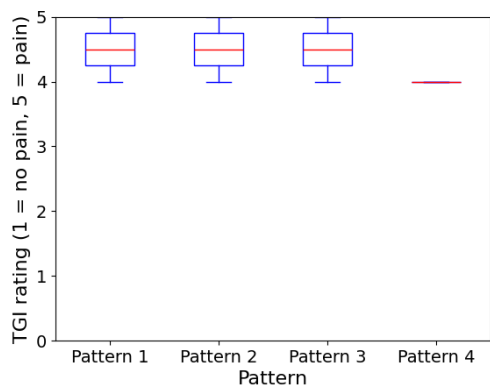


図 8: TGI の知覚強度

5.3 TGI 感覚の持続性評価

各時分割提示パターンによる TGI 感覚の持続性を事前実験参加者 1 名に対する評価結果を図 9 に示す。図に示す縦軸の 1 と 0 は TGI 感覚の有無を表す。

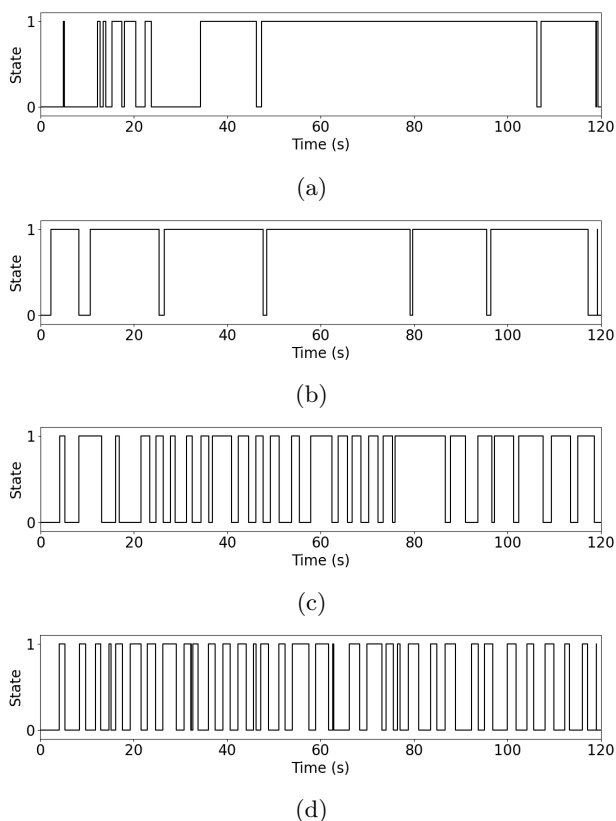


図 9: TGI 感覚の持続性評価：(a) パターン 1, (b) パターン 2, (c) パターン 3, (d) パターン 4

事前実験において、提案手法で提示された対称的な刺激、すなわち状態 1 及び状態 2 の切り替え速度が速いほど、持続的な TGI 感覚が得られることが明らかとなった。具体的に、パターン 1, 2, 3, 4 における感覚の持続性を比較した結果、状態 1 と状態 2 を 0.5 s 及び 1 秒間隔で切り替える場合、初期段階においては感覚の途切れが見られたものの、

約 40 s 経過後には比較的長時間持続する TGI 感覚が得られることが確認された。特に、これらの結果は今後のさらなる研究に資するものであり、例えば感覚の途切れが生じた時点を温冷刺激を提示するなど、最適なサーマルグリル錯覚の時分割提示手法を確立することが可能となると考えられる。

6. まとめ

本稿では、同一皮膚部位に対して温冷刺激の非接触時分割 TGI 提示手法を提案し、TGI の強度と持続性を評価した。その結果、すべての提示パターンで中程度以上の TGI が生じ、感覚の持続性は提示手法における切り替え速度に依存することが示唆された。適切な刺激強度と切り替え速度により皮膚温度を一定範囲に保ちつつ、持続的な TGI 感覚を長時間維持できる可能性が示唆された。今後は刺激強度と提示パターンの最適化により、より安定した長時間提示方法を目指す。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 水野 蒼太, 許 佳 禕, 長谷川 晶一, 家永 直人, 黒田 嘉宏: “仮現運動による痛み錯覚の移動感提示装置の開発,” 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 4 pages, 2024.
- [2] S. Patwardhan, A. Kawazoe, D. Kerr, M. Nakatani, Y. Visell: “Dynamics and Perception in the Thermal Grill Illusion,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 12, No. 4, pp. 604–614, 2019.
- [3] J. Xu, S. Hasegawa, K. Kiyokawa, N. Ienaga, Y. Kuroda: “Integration of Independent Heat Transfer Mechanisms for Non-Contact Cold Sensation Presentation With Low Residual Heat,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 16, No. 4, pp. 770–784, 2023.
- [4] A. Craig, M. Bushnell: “The thermal grill illusion: unmasking the burn of cold pain,” *Science*, Vol. 265, No. 5169, pp. 252–255, 1994.
- [5] S. Karmakar, M. K. Vasudevan, M. Muniyandi: “Modeling and Simulation of Thermal Grill Illusion Using Neurophysiological Theory,” *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC) 2023*, pp. 216–222, 2023.
- [6] A. Manasrah, N. Crane, R. Guldiken, K. B. Reed: “Asymmetrically-Applied Hot and Cold Stimuli Gives Perception of Constant Heat,” *Proceedings of the IEEE World Haptics Conference (WHC) 2017*, pp. 484–489, 2017.