



仮現運動による痛み錯覚の移動感提示装置の開発

水野 蒼太¹⁾, 許 佳禱²⁾, 長谷川 晶一³⁾, 家永 直人⁴⁾, 黒田 嘉宏⁴⁾

Souta MIZUNO, Jiayi XU, Shoichi HASEGAWA, Naoto IENAGA, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1, mizuno@lelab.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4 丁目 6 番 1 号)

3) 東京工業大学 科学技術創成研究院 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

4) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

概要: 知覚位置を移動可能な痛み感覚提示は、運動する物体による痛みや動作に応じた痛みを再現する上で重要である。例えば工業機械により擦傷が生じるときや腕を熱湯に浸したときなど、刺激知覚は動的かつ連続的である。本研究では動的かつ連続的な痛み錯覚提示手法の開発を目的とする。仮現運動をサーマルグリル錯覚の非接触提示手法に適用し、動的な錯覚提示を実現する。また、提示時間間隔の条件による連続性への影響を報告する。

キーワード: 温冷感覚提示、サーマルグリル錯覚、非接触提示、感覚移動感提示

1. はじめに

Virtual Reality (VR) や Augmented Reality の分野では、痛みを扱う感覚提示が注目されている。痛覚は人の知覚において危機を察知する重要な要素であり、VR を用いた危険な状況のための訓練 [1] や、ばく露療法 [2] に応用が期待される。従来、痛みの提示には電気刺激 [3] や熱を用いた錯覚である Thermal Grill Illusion (TGI) [4] などが用いられていた。TGI による痛み錯覚提示は高強度かつ非侵襲刺激であり VR の疑似感覚提示に有用である。しかし、従来の TGI 提示手法は主に静的な感覚提示 [5, 6] であり、動作に対応する動的な感覚提示は装置の物理的移動が提示に与える不自然さや、錯覚知覚時間などの要因から困難であった。例えば、危険訓練として、生産工場における危険は工業機械による擦傷などである。これは単一の刺激でなく動作を伴う連続的な刺激感が想定される。知覚位置を移動可能な痛み錯覚を動的な痛み錯覚と定義し、移動感にかかわる錯覚提示を適用することで動的な痛み錯覚を実現し、現実 に即した感覚提示を行う。動的提示手法として異なる 2 点の刺激により移動感を知覚する錯覚である仮現運動 (Apparent movement) [7] に着目した。これは刺激間に移動感を知覚する錯覚であり実際に刺激を移動した際に起こる知覚時間の遅れが影響しない移動感生起が可能となる。仮現運動には提示時間・刺激間距離・提示時間間隔 (Stimulus Onset Asynchrony ; SOA), 刺激強度などのパラメータが影響を与えるとされている。これに対し、TGI の提示手法として冷気流と光加熱を用いた非接触提示手法 [8] を用いる。冷気流と LED 光を用いた提示手法は、刺激提示応答性・提示分布形成に優れ、強度調整が容易であるといった点でパラメータ調整に有効である。本研究では仮現運動を TGI 提示において利用することで動的な痛み錯覚を生起する。概要を図 1 に表す。

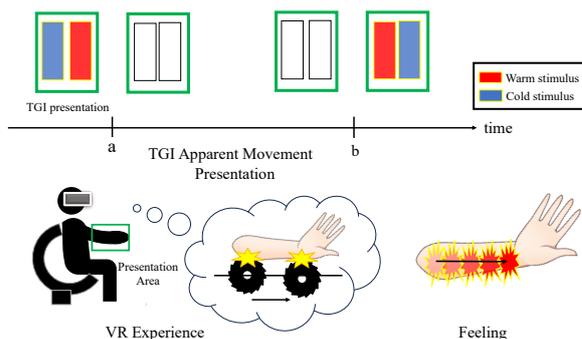


図 1: 仮現運動の TGI 応用 概要図

2. 関連研究

TGI に用いる温冷刺激の提示手法として、接触型提示では主としてペルチェ素子による提示 [4] があげられる。非接触提示手法としては、超音波ミストによる気化熱を用いた冷却手法とハロゲンランプを用いた加熱手法を用いた研究 [9] やボルテックスチューブによる冷気流と LED 光による光加熱を用いた提示手法 [8] がある。

仮現運動は 2 つの位置にある光点を適切な時間間隔で点滅させることで光点の継続的点滅とは見え、一つの光点が運動しているように見えるといった、視覚錯覚を起源とする錯覚現象である。この現象は触覚刺激においても生起が確認され [7], 異なる位置への刺激提示により移動感を生起するため方向指示・コミュニケーションの手段として応用が考えられている [10]。仮現運動は振動・電気刺激・温刺激 [11] において調査が行われてきたが、TGI については生起確認、応用可能性の検討はなされていない。本研究では、TGI における移動感生起の確認とその提示特性についての調査を行い、TGI を用いた動的な痛み錯覚提示の実現を目

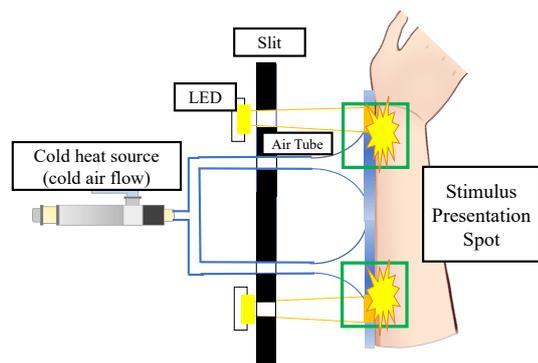
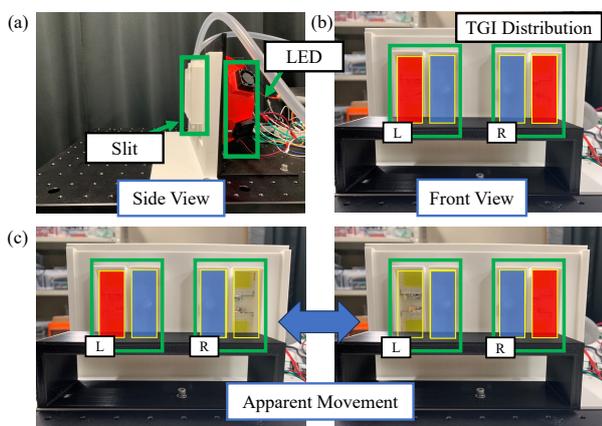


図 2: 提案装置構成図

図 3: TGI 移動感提示についての提案装置
(a) 側面図, (b) 提示部正面, (c) 仮現運動提示時の温冷刺激

指す。

3. 提案手法

非接触 TGI 提示システムの構成を図 2 に示す。装置は冷気流、LED、LED 冷却用ヒートシンク・ファン、スリット、固定具によって構成される。TGI 提示のための温冷分布を形成するため、温冷刺激源と提示部位の間にスリットを配置する。これにより冷気流・LED 光の広がりに対し、スリットで提示位置を操作し温刺激・冷刺激の空間分布を実現する。感覚の移動感を生起するために、非接触型 TGI 提示を両端に配置した装置を制作した。図 3 に示すように、温冷刺激を並列した TGI 刺激を左右交互に提示することで、仮現運動の理論に基づく移動感覚生起の調査を行う。刺激が左右対称である形とした。温冷刺激の提示は、従来の TGI 提示範囲内であり人体に侵襲を与えない温度範囲である 25 度から 42 度で行う。冷気流と LED により供給される熱量は流量、duty 比を変化させ制御する。

刺激間における運動錯覚である仮現運動のパラメータを参考に、移動感生起について提示対象を露出部位の中で最も広範な前腕とし、刺激強度・SOA の項目についての調整が可能なデバイスを設計した。これを用いて動的な痛み錯覚提示を実現する。

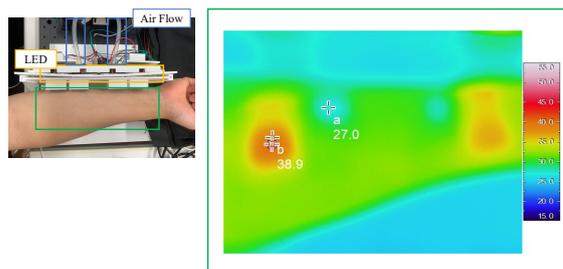


図 4: 非接触 TGI 提示による温度変化

4. 評価実験

非接触型 TGI 提示を用いた仮現運動による痛み錯覚の移動感提示についての調査を行う。仮現運動に影響を与えるとされた提示時間・刺激間距離・SOA・提示強度のうち、温度変化と提示部位の制約から SOA と提示強度について条件を変化させ調査する。まず、移動感生起の確認を行う。これにより、仮現運動における SOA による移動感生起の変化を調査する。次に、動作に対応した感覚提示の指標として、移動感の連続性を評価する実験を行う。これにより強度変化・SOA 変化による移動感の質的評価を行い、感覚提示に適切なパラメータを調査する。本実験では SOA パラメータを刺激間隔時間/提示時間の長さという割合で表記した。また、装置は冷気流をボルテックスチューブ (Tohin 製 AC-50)、平面高出力 LED を用い、3D プリンタ (JAPAN 3D PRINTER 製 Raise3D Pro2 Plus) によりスリットなど各部品を制作した。制御はマイコン (Arduino 製 A000066) とシリアル通信を行い、PWM 制御により LED・冷気流による提示を行う。このとき、所望の温度変化を達成するために、赤外線サーモグラフィカメラ (日本アビオニクス製 InfReC R450) を用いて事前に提示温度の調整を行う。ここで事前調査として提案装置による非接触 TGI 提示による温度変化 (duty 比 70%) を図 4 に示す。これにより腕の曲面に対しても目的とする温冷分布形成と温度変化を確認した。

4.1 実験 1: TGI の移動感生起確認

4.1.1 実験概要

本調査では仮現運動の理論に基づき TGI の移動感生起について確認する。調査では、移動感の生起について移動感を感じた・移動感を感じなかったの 2 者択一の回答を得た。刺激強度は温刺激が LED 光 duty 比 70%、冷刺激が冷気流の流量 25L/min であり、各刺激の提示時間は皮膚加熱を考慮し 4 秒とする。これについて SOA を変化させた。提示条件としては 3 つの刺激パターンを用意し、SOA をそれぞれ提示時間の 100%、50%、刺激位置の移動無し (左右同時提示) とした。SOA: 100%、50% では刺激提示を交互に行い切り替えは 4 回行われた。移動無しの場合には左右の刺激提示を同時に行い、提示時間と同じ 4 秒間のインターバルをとった。これらの提示は予熱を含め全体を 25 秒以内とした。移動感に関する認識の統制のため、実験を行う前に移動感の参考刺激として、提示部位である腕に気流による触刺激を用いた連続的・断続的な移動感提示を行った。具

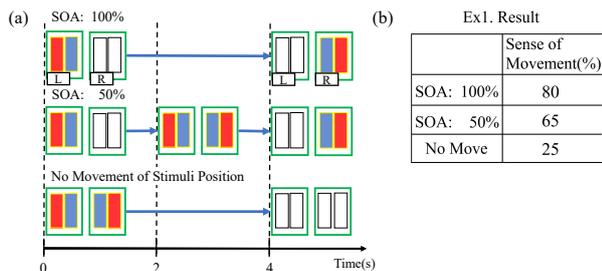


図 5: 実験 1 移動感生起調査 (a) 提示パターン (b) 結果

体的には提示条件にあわせ、4 秒間で腕の手首側と肘側を連続的に移動する刺激と、手首側の刺激点で 4 秒間提示したのち、肘側の刺激点で 4 秒間提示する断続的な刺激を提示した。刺激提示部位をホットプレートで加熱することで皮膚の初期温度を 32℃に統制した。

実験参加者は皮膚の初期温度統制、刺激提示、回答を繰り返し行い、各刺激パターンについて 5 試行ずつの計 15 試行を行った。まず、皮膚温度を一定に調整する。その後、装置前面に腕を置く。温冷刺激の提示は左右の提示部位に 4 秒ずつ交互に行われる。実験参加者はこれに対し、回答を行う。

4.1.2 実験結果

結果を図 5 に示す。結果より、痛み錯覚の移動感生起が確認できた。このとき、SOA:100%(重なり時間がない)の場合 80%、SOA:50%(重なり時間 2s)の場合 65%の割合で参加者が移動感を知覚した。移動なしの場合にも移動感生起が 25%程度確認されるが、提示部位の温まり方の差異によるものと考えられ多くの場合で移動感は知覚されなかった。

4.2 実験 2 : TGI の移動感連続性の評価

4.2.1 実験概要

本調査では仮現運動の理論に基づき、生起される移動感の連続性について調査する。調査項目として、移動感覚の連続性について 7 段階 (1: 非常に離散的 2: 離散的 3: やや離散的 4: どちらともいえない 5: やや連続的 6: 連続的 7: 非常に連続的) のリッカート尺度とした。実験参加者は 23 25 歳の男性 4 名であった。刺激提示条件は刺激強度 3 種類、刺激パターン 5 種類の計 15 条件について提示を行った。提示時間は 4 秒間とした。温刺激の刺激強度について LED 光を duty 比により 50%、70%、90%の強度比で変化させた。また、刺激パターンについて SOA を提示時間の 10%、30%、50%、70%、90%の条件とした。

実験 1 と同様に、移動感についての参考刺激として提示部位である腕に対し、気流による触刺激を用いた連続的・断続的な移動感提示を行った。皮膚の初期温度の統制として、刺激提示部位をホットプレートで加熱することで温度を一定 (32℃) とした。実験は皮膚の初期温度統制、刺激提示、回答を繰り返し行い、各刺激パターンについて 3 試行ずつの計 45 試行を行った。

4.2.2 実験結果

duty 比 50%、duty 比 70%、duty 比 90%のそれぞれの場合について、SOA の変化ごとに回答をまとめたものを図 6 に示す。結果より図中 (b) の duty 比 70%、SOA:30%の際に、特に移動感の連続性向上がみられた。また、duty 比 50%、70%の場合には SOA による変化がみられたが、90%の場合には知覚のぼらつきが大きくなっている。duty 比 50%、70%の場合において、SOA が 50%より長い場合に連続性の評価が低下する傾向がみられた。提示条件である duty 比、SOA ごとにまとめた連続性評価の平均値の値は、

duty 比 50%:3.75, 70%:4.33, 90%:4.63

SOA10%:4.53, 30%:4.5, 50%:4.5, 70%:4.03, 90%:3.63 となった。

5. 考察

実験 1 では移動感生起に関する調査、実験 2 では移動感の連続性に基づく質の評価を行った。実験 1 では SOA のみを変化させ、結果より SOA の増加により移動感を知覚しやすくなる傾向が見られた。実験 2 では、仮現運動の要素として、さらに LED による温刺激強度変化を加え SOA と強度の変化による移動感の質の変化を調査した。結果として、duty 比 50%、70%の場合には SOA による変化が見られた。しかし、duty 比 90%の場合には各条件における変化が小さかった。これは、TGI による高強度な刺激知覚により刺激範囲の認識が難しかったこと、提示終了後も感覚の残像が発生した可能性などが考えられる。そのため、SOA 条件と強度変化の影響調査として不適切な結果となった。次に、duty 比 50%、70%の結果において、全 SOA における結果の平均値は duty 比 50%で 3.75、70%で 4.33 となり、強度の上昇により全体として移動感の連続性は向上する傾向が見られた。duty 比 50%の場合には、(50-10)、(50-50)において連続性が知覚された。duty 比 70%の場合には、(70-10,30,50)において連続性が知覚され、(70-30)の場合において最も移動感の連続性が確認された。

実験 1, 2 の結果より移動感の生起率と連続性には傾向の違いが見られた。これは SOA が長いほど 2 つの独立した TGI 刺激による断続的な移動を感じ、SOA が短くなるほど 2 つの TGI 刺激が融合して感じやすくなり連続性は高く表れることを示す。そのため、VR におけるより現実に即した感覚提示を行うためには適切な提示条件を探す必要があり、本調査においては duty 比 70%、SOA:30%の場合が最も良い結果であると考えられる。

6. おわりに

本研究では動的かつ連続的な痛み錯覚提示手法の開発を目的とし、仮現運動の TGI への適用可能性とその知覚品質を調査した。結果として、動的かつ連続性のある TGI 提示の性質を傾向として確認することができた。しかし、本実験中での提示部位は腕のみであり、より広範囲への適用性が VR における感覚再現には求められる。そのため、今後

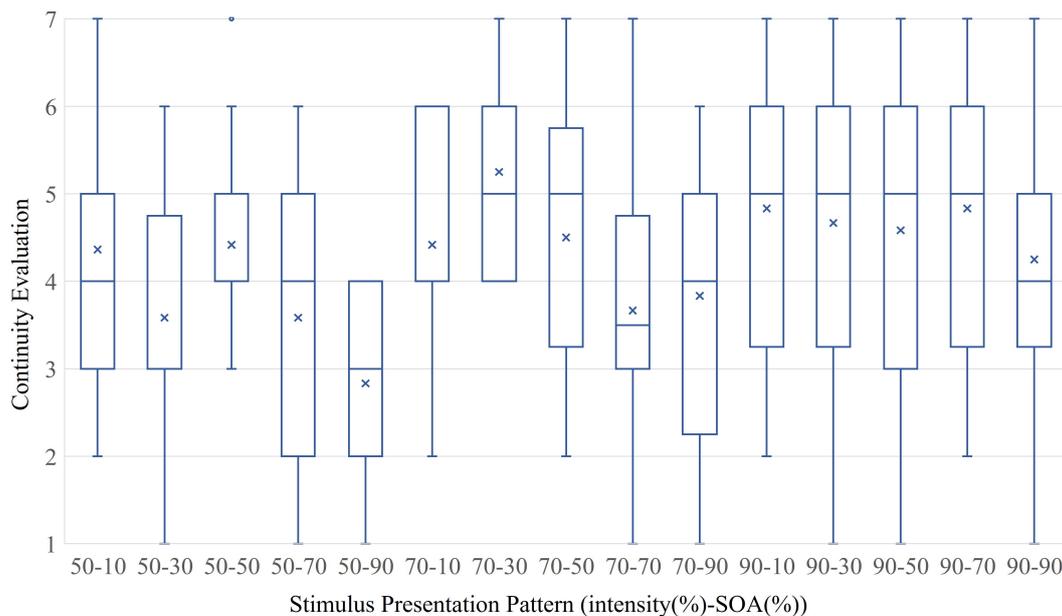


図 6: 実験 2 各強度における SOA の変化による連続性知覚評価

は TGI の動的提示を応用したコンテンツ制作を行い、将来的に没入感の高い VR 訓練・治療を行い、体験の質の向上に貢献する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03474, JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Ooi, T. Tanimoto, and M. Sano: "Virtual Reality Fire Disaster Training System for Improving Disaster Awareness", In Proceedings of the 2019 8th International Conference on Educational and Information Technology, pp.301-307, 2019.
- [2] P. Lindner, A. Miloff, W. Hamilton, L. Reuterskiöld, G. Andersson, MB. Powers, and P. Carlbring: "Creating state of the art, next-generation Virtual Reality exposure therapies for anxiety disorders using consumer hardware platforms: design considerations and future directions", Cognitive Behaviour Therapy, Vol.46, No.5, pp.404-420, 2017.
- [3] C. Asada, K. Tsutsumi, Y. Tamura, N. Hara, W. Omori, Y. Otsuka, and K. Sato: "Electrical Muscle Stimulation to Develop and Implement Menstrual Simulator System", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.33, Issue5, pp.1051-1062, 2021.
- [4] S. Patwardhan, A. Kawazoe, D. Kerr, M. Nakatani, and Y. Visell: "Dynamics and Perception in the Thermal Grill Illusion", IEEE Transactions on Haptics, Vol.12, No.4, pp.604-614, 2019.
- [5] R. Takamatsu, S. Izumi, K. Yoshikuni, K. Ibano, Y. Itoh, K. Sato, T. Sugahara, H. Kawaguchi: "Portable Itch-Relief Device Utilizing Thermal Grill Illusion" IEEE World Haptics 2023, 1 page, 2023.
- [6] 吉田 圭佑, 小川 剛史: "サーマルグリル錯覚を用いた辛味提示手法に関する検討", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 23 巻 3 号, pp.189-196, 2018
- [7] C. E. Sherrick and R. Rogers: "Apparent haptic movement", Perception & Psychophysics, Vol.1, pp.175-180, 1966.
- [8] 水野 蒼太, Xu Jiayi, 家永 直人, 長谷川 晶一, 黒田 嘉宏: "非接触痛み錯覚提示装置の開発", 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 4 pages, 2023.
- [9] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino, and H. Shinoda, "Spatiotemporal Pinpoint Cooling Sensation Produced by Ultrasound-Driven Mist Vaporization on Skin", IEEE Transactions On Haptics, VOL.14, NO.4, pp.874-884, 2021.
- [10] 岩崎泰典, 堀尾 寛, 和田親宗: "手のひらの冷覚知覚特性を考慮した仮現運動生成のための刺激呈示法", ライフサポート, 22, p.4, 2010.
- [11] T. Moesgen, H.N. Ho, and Y. Xiao: "Apparent Thermal Motion on the Forearm", Euro Haptics 2024, 13 pages, 2024.