



VR 訓練の効果向上に向けた振動・熱刺激による 残効提示を用いた拍動性疼痛の提示

Enhancing VR Training Through Pulsatile Pain Presentation
Using Vibrotactile and Thermal Aftereffects Stimulation

土川優理¹⁾, 鷹背慧¹⁾, 藤田光¹⁾, 細井十楽¹⁾, 伴祐樹¹⁾, 割澤伸一¹⁾

Yuri TSUCHIKAWA, Kei TAKANOHASHI, Hikaru FUJITA, Juro HOSOI,

Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, tsuchikawa_yuri@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, takanohashi_kei@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, fujita_hikaru@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, jhosoi@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 近年, Virtual Reality (VR) を用いた職業やスポーツの訓練が行われているが, 訓練効果を向上させるためにはバーチャル空間における身体所有感が重要である. 本研究では, バーチャル空間での作業中のミスによる怪我をシミュレーションし, 振動・熱刺激を残効として提示することで拍動性の疼痛を錯覚させる手法を提案する. 実験の結果, 振動提示が疼痛感覚と VR 体験のリアリティを向上させる傾向がみられた. また, 痛みの強さ, 体験のリアリティ, および身体所有感の間には正の相関が見られ, 残効を用いた痛みの提示が VR 訓練の効果向上に寄与する可能性が示唆された.

キーワード: VR 訓練, 痛覚, 残効, 振動提示, 熱提示, 触覚

1. はじめに

近年, Virtual Reality (VR) 技術は目覚ましい発展を遂げ, 多様な分野での応用が進んでいる. VR 技術の応用先は多岐にわたるが, 中でも職業やスポーツの訓練における活用は, 現実世界が抱える課題を解決する手段として大きな可能性を秘めている.

一方で, VR を用いた訓練が現実世界での技能向上に効果的に寄与するためには, VR 空間への没入感やリアリティが重要な要素となる. とりわけ, 自身の体を用いて作業を行うような職業訓練では, VR 空間内のアバタを自己の身体として認識する感覚, すなわち身体所有感が重要な役割を果たす. 映像情報と自身の身体感覚が一致しない場合, 身体所有感は低下し, 訓練効果が損なわれる可能性がある.

身体所有感を向上させるための試みとして, 振動や電氣的筋肉刺激 (EMS) などを用いた身体への触覚提示に関する研究はこれまでも行われてきた [1, 2]. これらの手法は, VR 空間内での映像と同期して触覚刺激を提示することで視覚と身体感覚の統合を図るアプローチをとっており, 刺激が発生する瞬間に注目したものである. 一方で, VR 訓練におけるタスク失敗時のリアルな痛みフィードバックを考えたとき, 高強度の刺激の提示は人体へのリスクを伴うため, 安全に提示できる刺激の強度には限界がある.

そこで我々は, 痛みが発生した後の感覚である「残効」を, 振動・熱刺激を用いて仮想的に提示することで疼痛感覚を強

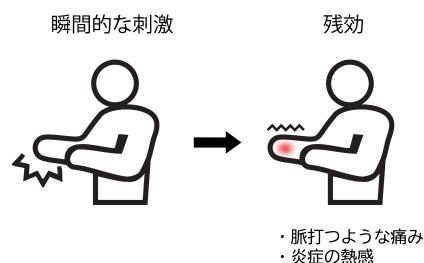


図 1: 痛みにおける残効の模式図

化する手法を提案する (図 1). この手法は, 残効として仮想的に提示された刺激が先行して提示された刺激と統合されることにより実際よりも強烈な刺激が提示されたと錯覚するという仮説に基づいており, 残効感覚の提示によって衝撃感の強化を試みる研究も行われている [3]. 本研究の目的は, VR における高強度の疼痛感覚の再現において, 残効として振動・熱刺激を提示することで疼痛感覚を強化する手法を検討し, 同時に残効の提示が身体所有感に与える影響を検証することである.

2. 関連研究

この章では, VR 技術を訓練に応用した研究, および VR 体験の質の向上のために痛みのフィードバックを用いている研究を紹介し, 本研究の位置付けを明らかにする.

2.1 VR を用いた訓練

先述の通り、VR 訓練は現実世界の抱える課題を解決する手段として有用である。

例えば、アーク溶接は要求される技能が高く、初心者が行うには多大な危険が伴う。Liang らは、力学ディスプレイを用いないシンプルなアーク溶接の VR 訓練システムを開発し、訓練参加者の現実世界での技能向上を示した [4]。

また、核施設におけるグローブボックス作業のような、環境自体が高リスクを持つような訓練においても VR 訓練は有効な手段となりうる。Hornsby らは、核施設のデジタルツイン環境を用いたグローブボックス作業の VR 訓練システムを開発し、現実と同程度の精度で訓練が可能であることを示した [5]。一方で、参加者が VR 環境に慣れるまではタスク完了に倍程度の時間がかかったことも報告されている。

2.2 痛みのフィードバック

Kono らは、VR 空間における頭部への衝撃を、振動と電気刺激を用いてフィードバックを行うデバイスを開発し、触覚刺激が恐怖や痛みといった情動的な感覚を誘発することを示した [1]。また、Gao らは、ウェアラブルデバイスに装着したペルチェ素子を用いてサーマルグリン錯覚 (TGI) を起こすことで痛覚提示を行うデバイスを開発し、これによって参加者の覚醒レベルと身体所有感が有意に向上したことを報告している [2]。TGI とは、近接した位置に温・冷刺激を同時に提示すると灼熱痛様の感覚を錯覚する現象のことであり、この現象を用いた疼痛感覚の提示手法は既存研究で用いられている [6]。

これらの研究は、痛みが発生する瞬間のみに注目しているという点で本研究の提示する手法とは異なっている一方、残効としての触覚提示によっても情動的な感覚や身体所有感が生起される可能性を示唆している。

2.3 残効提示を用いたフィードバック

残効の仮想的なフィードバックを行う手法に関しても、少数ながら研究がある。Fujita らは振動・熱刺激を残効として提示するバット型のデバイスを開発し、特に高周波の振動が打撃後のしびれ感覚と衝撃感のリアリティ向上に有意に作用することを示した [3]。本研究では、残効感覚としての脈打つような痛み (拍動性疼痛) に注目し、振動・熱刺激を用いてこの感覚を再現することで先行する疼痛感覚を強化することを目的としている。

3. 提案手法

本研究では、VR 空間で「怪我を負う」場面を例に、振動・熱刺激を用いた仮想的残効提示によって疼痛感覚および身体所有感を強化する手法を提案する。負傷後に継続すると想定される残効感覚として、(1) 拍動性疼痛の拍動感、(2) 炎症に伴う局所的な熱感、の 2 種を対象とする。

3.1 痛みのメカニズム

提案手法を述べる前に、人体が怪我をした際に生じる痛みの発生メカニズムについて詳述する [7]。

刃物等による組織損傷は機械的刺激 (mechanical stimu-

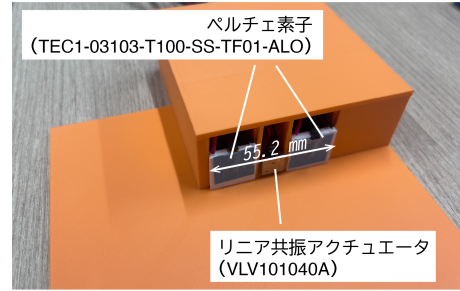


図 2: 触覚提示デバイス

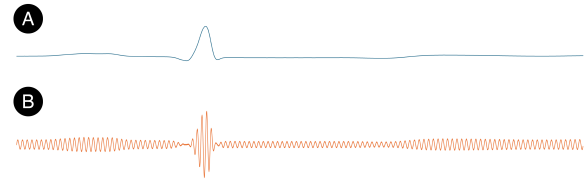


図 3: 拍動 1 周期分の (A) 信号波. (B) AM 変調波.

lation/stimulus) と呼ばれ、人体が持つ痛み刺激を感知する侵害受容器のうち、主として高閾値機械受容器とポリモーダル受容器がこの機械的刺激に反応する。これらで受容された刺激は末梢神経線維を介して脊髄後角へ伝達されるが、高閾値機械受容器由来の入力は主として A δ 線維 (5 ~ 15 m/s)、ポリモーダル受容器由来の入力は C 線維 (0.5 ~ 2 m/s) を経由する。伝達速度により鋭い早期痛覚と遅れて生じる灼熱・鈍痛が区別され、一次痛・二次痛と呼ばれる。本研究の手法は、負傷後に持続し拍動性に知覚されやすい二次痛に着目する。

怪我によって損傷した組織の細胞膜からは、ロイコトリエンやプロスタグランジンなどの血管を拡張する作用を持つ炎症メディエータと呼ばれる化学物質が放出される。血管が拡張し血流が増えると患部では発熱が生じるが、炎症メディエータや組織の温度上昇はポリモーダル受容器の活動性を高め、結果として血管の拍動による刺激を拍動性の疼痛として知覚されると考えられる。

3.2 各感覚の再現

怪我によって生じる一次痛の再現には TGI を用いる。TGI による一次痛の再現は今回新しく提案される残効提示の手法とは異なり、怪我をした瞬間の痛みを提示するためのものである。この刺激は残効に対し先行するものであり、残効感覚が統合されるために必要不可欠であると考えられる。

残効感覚の再現に関して、炎症による発熱の擬似的な再現にはペルチェ素子を、拍動性疼痛による拍動感の擬似的な再現にはリニア共振アクチュエータ (LRA) を用いる。

3.3 デバイスとパラメータの設計

提案手法の有効性を実験的に検証するために、振動・熱刺激を右手の人差し指側面に提示可能な物理デバイスを作成した (図 2)。このデバイスは、振動提示を行うための LRA、TGI および残効としての熱提示を行うためのペルチェ素子、冷却用のヒートシンクと小型ファン、およびサーミスタを

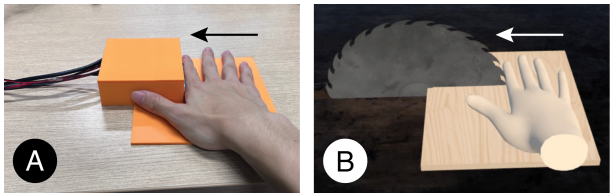


図 4: (A) 物理デバイス。(B) VR 映像。

搭載している。

TGI の提示と炎症を再現するための熱提示には同じペルチェ素子を用い、TGI では提示部位の初期温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ を 2 秒間、残効としての熱感の提示では提示部位の初期温度の $+5^{\circ}\text{C}$ を 8 秒間提示することとした。我々の知る限りにおいて切創を生じた直後の患部温度に関する詳細な研究は行われていないため、残効として熱提示を用いた先行研究を参考に提示温度を設定した [3]。

拍動性疼痛における拍動感を再現するための振動提示においては、身体所有感をより効果的に生起するために被験者自身の拍動を計測し用いるのが最もよいと考えられるが、本研究では事前に用意された心電の波形を用いて振動提示を行うこととした。振動波形を作成するにあたり MIT-BIH Arrhythmia Database に掲載されている心電データを用い [8]、使用する LRA の共振周波数である 170 Hz の正弦波を搬送波、心電の第二誘導 (MLII) を信号波として、AM 変調波を作成した (図 3)。

4. 実験

本章では、残効としての振動・熱刺激の提示が痛みの感覚および身体所有感に与える影響を検証するための予備実験を実施した。

実験には 6 名 (男性 6 名、右利き 5 名、左利き 1 名、平均年齢 23.8 歳) が参加し、実験参加者はヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD / Meta Platforms, Inc. Meta Quest 3) とノイズキャンセリングヘッドホン (SONY 社、WH-1000XM3) を装着した。

4.1 実験デザイン

VR の仮想環境においてテーブルソーを用いた木材の切断作業を模擬し、実験参加者は回転する丸鋸に手が触れるまで図 4 の矢印の方向に手を動かし、怪我を負うシチュエーションを体験した。VR 空間の作成には Unity を使用し、実験参加者の手の動きに追従してアバタの手と木材が動くよう設計した。

実験は被験者内計画で行い、実験条件は残効感覚の提示における振動提示の 3 水準 (なし、一定の振動、拍動を模した周期的な振動) と熱提示の 2 水準 (なし、あり) の組み合わせからなる 6 条件とした。一定の振動を提示する条件を含めたのは振動の提示自体が疼痛感覚や身体所有感に影響を与える可能性を考慮したためであり、この条件における振動の振幅は MLII を用いて作成された AM 変調波の最大振幅の半分、周波数は共振周波数の 170 Hz とした。全

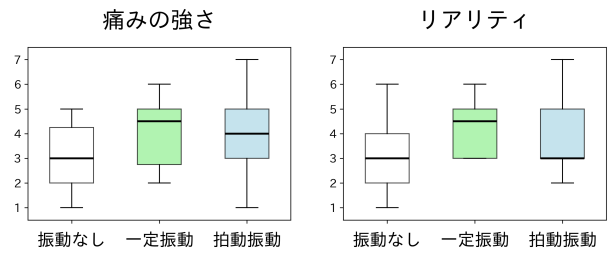


図 5: 痛みの強さ、リアリティを示す箱ひげ図 (n=6)

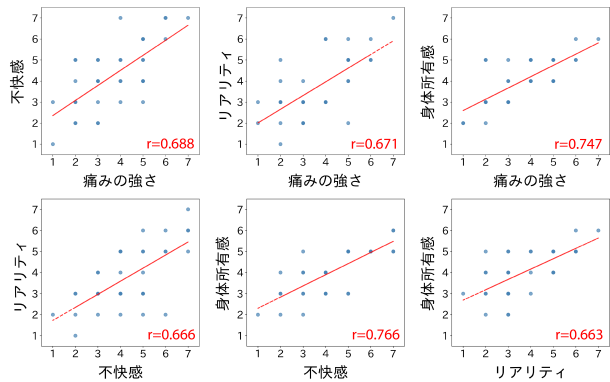


図 6: 評価項目間の散布図と回帰直線

条件において、残効感覚に先行する刺激として実験参加者の手が丸鋸に触れた瞬間に従来手法である TGI による痛みの提示を行った。

4.2 実験手順

実験は事前アンケート、本セッション、事後アンケートの 3 つの部分で構成された。

本セッションでは、実験参加者は VR での体験後に評価アンケートとして「痛みの強さ」「不快感」「体験のリアリティ」「身体所有感」を 7 段階のリッカート尺度に基づいて評価した。また、自由記述方式で「痛みの感じ方の言語表現」「体験全体を通して感じたこと」を回答した。痛みの感じ方の言語表現に関しては、Short-Form McGill Pain Questionnaire 2 (SF-MPQ-2) における 22 通りの言語表現の日本語版 [9] を例として提示し、それ以外の表現や複数表現の回答も可能とした。VR での体験と評価アンケートを 1 セットとし、これを実験条件分繰り返した。実験参加者は、各条件につき 1 回ずつ評価を行った。条件の提示順序は、振動・熱刺激をどちらも提示しない TGI のみの条件をはじめに提示し、それ以外の条件は順序効果を考慮してランダムに提示した。

実験全体の所要時間は約 30 分であった。

4.3 結果

熱・振動それぞれの要因における主効果を確認するため、整列ランク変換 (Aligned Rank Transform, ART) [10] を施した二元配置分散分析 (ANOVA) を行った。その結果、痛みの強さにおける振動提示、およびリアリティにおける振動提示においては有意な主効果が見られた (痛みの強さ: $F = 6.883$, $p = 0.008$, リアリティ: $F = 6.995$, $p = 0.007$)。これら 2 つにおいて Benjamini-Hochberg 法 (BH 法) に

よる補正を用いて多重比較検定を行ったところ、いずれの振動条件間の比較においても有意差は確認できなかったが、全体として振動提示条件では痛みの強さとリアリティを高める傾向が見られた（図5）。振動提示における他の質問項目、また熱提示においては全ての項目で有意な主効果は見られなかった。

痛みの強さ、不快感、体験のリアリティ、および身体所有感の4項目の間の比較においてピアソン相関係数を求めたところ、いずれの組み合わせにおいても中程度以上の正の相関が見られた（図6）。

4.4 考察

実験を通して、残効としての振動提示がVRでの体験における痛みの強さおよびリアリティに効果的に寄与する可能性が示唆された。振動・熱刺激の提示は身体所有感の向上において有意な差を示さなかったが、痛みの強さと身体所有感の間に強い相関（ $r = 0.747$ ）が見られたことから、本研究における提案手法が身体所有感へ作用する可能性は依然として検証の余地がある。特に、痛みや不快感といった情動的な感覚とVR体験のリアリティや身体所有感といった認知・認識との間の関連性は非常に興味深く、一方的な主従関係ではなく互いに影響しあっている可能性があると考えられる。

想定していたよりも残効感覚の提示による効果量が小さかった理由としては、慣れの影響が大きいと考えられ、特に残効を提示しないTGIのみの条件を最初に提示したため、この条件における各項目の評価が他の条件と比べて高く評価されている可能性がある。

熱提示においては条件間で有意な主効果が見られなかったが、これは本実験ではTGIと残効の熱提示の両方において同一のペルチェ素子を使用したため、先行して提示されるTGIにおける熱提示後の排熱性能が実験結果に影響を与えたためだと考えられる。

評価アンケートにおける「体験全体を通して感じたこと」の項目では、丸鋸との接触時に提示されるTGIが冷感と温感の別々の感覚として知覚されたという回答が複数見られた。本実験の触覚提示デバイスではLRAが直接実験参加者の手に触れるようにするため2つのペルチェ素子の間隔を約14.2mm空けて間にLRAを配置していたが、冷感・温感が関節を跨いで提示されたことによってTGIを感じにくくなっていた可能性がある。残効提示の手法は仮想的に提示された残効感覚が先行する刺激に統合される形で感覚を強化するという仮説に基づいており、先行する刺激の強度が不十分であった場合は残効の提示が効果を持たないことを示唆している。

5. おわりに

本研究では、振動・熱刺激による仮想的な残効の提示がVR体験における疼痛感覚および身体所有感に与える影響を検証し、振動提示の有無が痛みの強さおよび体験のリアリティに影響を与える傾向があることを示した。また、「痛

みの強さ」「不快感」「体験のリアリティ」「身体所有感」はいずれも密接に関わり合っていることを明らかにし、痛みを強化する手法がVR訓練の効果向上に繋がる可能性を示唆した。

一方で、本研究における実験では提案手法の有意性は示されておらず、提示部位の検討やパラメータの調整は大きな課題である。また、提案手法以外の部分における刺激提示の設計にも課題が残っており、今後の研究では様々な要因を考慮した体験デザインを設計していく必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP25K03163 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Kono, Michinari, et al. (2018, November). In-pulse: inducing fear and pain in virtual experiences. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1-5).
- [2] Gao, Haichen, et al. (2024, December). ThermOuch: A Wearable Thermo-Haptic Device for Inducing Pain Sensation in Virtual Reality through Thermal Grill Illusion. In *SIGGRAPH Asia 2024 Conference Papers* (pp. 1-12).
- [3] Fujita, Hikaru, et al. (2025, March). Presenting Tinging Aftereffects Using Vibro-Thermal Feedback to Enhance Impact Sensation in Virtual Reality. In *2025 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 505-515). IEEE.
- [4] Liang, Xin, et al. (2014). Simple virtual reality skill training system for manual arc welding. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 26(1), 78-84.
- [5] Hornsby, Jared H., et al. (2025). VR haptics for glove-box operations training. *Frontiers in Virtual Reality*, 6, 1560713.
- [6] Karmakar, Subhankar, et al. (2023). Thermal illusions for thermal displays: a review. *Frontiers in human neuroscience*, 17, 1278894.
- [7] 肥田朋子ら. (2006). 痛みのメカニズムと理学療法 痛みについて理解を深めよう: 愛知県理学療法士会誌 18・2, 55-62.
- [8] Moody, George B., & Mark, Roger G. (1992). MIT-BIH arrhythmia database.
- [9] 圓尾知之ら. (2013). 痛みの評価尺度・日本語版 Short-Form McGill Pain Questionnaire 2 (SF-MPQ-2) の作成とその信頼性と妥当性の検討. *Pain Research*, 28(1), 43-53.
- [10] Wobbrock, Jacob O., et al. (2011, May). The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 143-146).