



振動・熱刺激を用いたしびれ感覚の提示による衝撃感の向上

Enhancing Impact Sensation Through Presenting Tingling Sensation
Using Vibro-Thermal Feedback

藤田 光¹, 細井 十楽¹, 伴 祐樹¹, 割澤 伸一¹

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, 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: VR において衝撃感提示に関する多くの研究が行われてきたが、衝撃後の残効に関する研究は少ない。本研究では、残効の一つであるしびれ感覚を再現する振動・熱提示の効果を検証する。野球の打撃を再現した仮想環境と振動・撃力・熱提示が可能なデバイスを作成し、実験を実施した。結果、振動・熱提示がしびれ感覚を再現し、衝撃感を向上させることが確認された。特に高周波の振動がしびれ感覚と衝撃感のリアリティ向上に有意に作用した。

キーワード: 衝撃感, しびれ, 残効, 触覚

1. はじめに

近年 Virtual Reality (VR) 分野では、ユーザー体験向上のため多様な触覚刺激が研究されている。現実世界は衝撃、力、温度など多岐にわたる触覚感覚で構成されており、その強度もまた幅広い。VR 体験のリアリティと没入感の向上のためには、これらの要素を再現することが肝要である。

特に衝撃感の提示は、スポーツゲームや安全教育などの VR アプリケーションにおいて、ユーザーの没入感を高める上で重要な役割を持つため注目されており、様々な研究が取り組まれている。従来の研究では、振動触覚提示や電氣的筋肉刺激 (EMS) などの手法を用いて衝撃感を提示する方法が探求されてきた [1, 2]。これらのアプローチは衝突の瞬間の物理刺激に着目したものであり、実際の衝撃感に似た刺激を提示することができる。しかし強度の高い衝撃感を提示しようとする、実装コストの上昇、安全性の懸念などの課題に直面する。

一方で、強い衝撃後に体内で感じる残効に着目した研究はほとんど行われていない。ここでいう残効とは、強い刺激が加えられた後に体内で感じる様々な感覚を指し、例えば強い打撃の後に手に感じるしびれなどが含まれる。本研究では、高強度の衝撃感を物理的に再現する代わりに、体内で発生する残効を提示することで、衝撃感の知覚強度とリアリティを向上させることができると考えた (図 1)。このアプローチは既存の衝撃感提示手法と組み合わせることで適用することが可能である。

本研究の目的は、振動および熱刺激を用いてしびれ感覚を提示する手法を検討し、衝撃感提示における残効提示の有効性を検証することである。ユーザースタディを通して、設計した振動および熱刺激がしびれ感覚を効果的に提示で

きるかどうか、またこのしびれ感覚の提示が衝撃感のリアリティと知覚強度を向上させるかを検証した。

本研究の主な貢献は次の通りである。第一に、衝撃感提示や触覚の分野において、残効を提示するという新しい概念を導入したことである。第二に、振動および熱刺激がしびれ感覚を効果的に提示し、衝撃感のリアリティと知覚強度を向上させることを実験的に確認したことである。

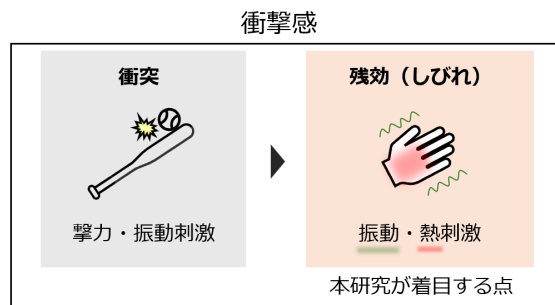


図 1: 物理刺激を用いた残効の提示による衝撃感の向上。

2. 手法

本研究は、野球のヒッティング体験を例に残効提示の効果を検証することとした。このシチュエーションは多くの VR アプリケーションや触覚提示研究で利用されている。

さて、ヒッティング体験における強い衝撃感の時系列的に主に 2 つの要素に分けることができる。衝突の瞬間に知覚される感覚と、その後続いて知覚される残効、しびれ感覚である。ここでは、前者を「衝突感」、後者を単に「残効」と呼ぶことにする。また、しびれ感覚を強い衝撃による二次痛、灼熱痛と考えれば、しびれ感覚はさらに、手の

ひらがピリピリする感覚（「ピリピリ感」）と熱い感覚（「熱感」）に分けて考えることができる。本研究では、これらの各要素を別々に提示することを考える。

2.1 触覚提示の設計

まずは衝突感の提示について考える。本研究では Park らの先行研究に基づき、ソレノイドアクチュエータとボイスコイルアクチュエータを組み合わせる衝突感を提示する [1]。ソレノイドアクチュエータは、比較的強くインパルス的な撃力を生成する役割を果たす。ボイスコイルアクチュエータは衝突感のうち高周波の振動を再現する。

次に、残効の提示を考える。本研究では、残効であるしびれ感覚の構成要素のうち、ピリピリ感についてはボイスコイルアクチュエータによる振動触覚提示で、熱感についてはペルチェ素子による熱提示で再現することを目指す。

ピリピリ感の提示について、我々の知る限りにおいて先行研究における知見がないため、「特定の周波数の正弦波振動¹を手で提示することで生起できる」という仮説に基づいて予備的検証を行った。結果、高周波の振動はしびれ感覚のピリピリ感を生起しやすく、低周波の振動は生起しにくいことが示唆された。これに基づき、本実験では 500 Hz と 50 Hz の二つの周波数パターンをテストすることにした。振動提示の長さについては 5 秒間とした。

続いて熱感についてであるが、我々の知る限りにおいて先行研究における知見がないため、残効提示研究の初端として仮に「手のひらの初期温度+3°C」とすることとした。理由としては、個々の手のひらの温度や環境の違いを考慮すると一定の温度の提示は適切ではないこと、また 3°C という上昇幅については、手のひらで知覚できる温度変化を超えており [3]、他の触覚分野の研究でよく用いられていることが挙げられる。熱提示は 4 秒間持続した。

さて、残効提示において、衝突感提示との時間差は重要である。なぜなら、刺激が発生してから知覚されるまでの時間は触覚モダリティによって異なるからである。本研究では衝撃によるしびれのピリピリ感を振動で提示するなど、ある触覚モダリティの再現のために別の感覚を用いているため、時間差を適切に設定する必要がある。その際は、神経生理学的な知見により、神経伝達の過程を理解することが役に立つ（表 1）。まずはピリピリ感について考える。実際の打撃で発生するものは、神経線維の種類、伝達速度、手のひらから脳までの距離が 1 m 程度であることを考えれば、知覚されるまでおよそ 1 秒である。一方で、振動で提示するピリピリ感は、ほぼ瞬時に知覚されると言える。よって、振動触覚提示は衝突の瞬間から 1 秒程度遅らせる必要があると言える。続いて、熱感について考える。実際のものと提示するもので受容器は異なるが、伝達する神経線維は同じ種類であり、知覚されるまでの時間も同程度である。よ

¹正弦波の他に矩形波・のこぎり波・三角波を予備的に検証したが、触感にはほとんど差が感じられなかった。それどころか、矩形波・のこぎり波についてはボイスコイルアクチュエータの騒音が増加したため正弦波を選択した。

て、熱提示は衝突の瞬間と同じタイミングで始める必要があると言える。（図 2）

	ピリピリ感（実際）	ピリピリ感（提示）
原因	衝撃	振動刺激
受容器	ポリモーダル受容器	機械受容器 (RA1/RA2)
神経線維	C 線維	A- α , β 線維
伝達速度	遅い (0.5-2.0 m/s)	速い (50-100 m/s)
知覚までの時間	約 1 秒	ほぼ瞬時

	熱感（実際）	熱感（提示）
原因	衝撃	熱刺激
受容器	ポリモーダル受容器	温度受容器
神経線維	C 線維	C 線維
伝達速度	遅い (0.5-2.0 m/s)	遅い (0.5-2.0 m/s)
知覚までの時間	約 1 秒	約 1 秒

表 1: 各感覚の伝達経路と知覚までの時間 [4].

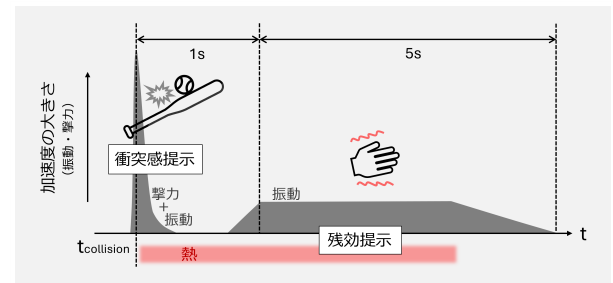


図 2: 本研究の触覚提示の設計.

2.2 実験用デバイス

提案手法の有効性を実験的に検証するために、振動、撃力、熱を提示できるバット型デバイスを開発した（図 3）。長さ 190 mm、幅 36 mm、高さ 46 mm で、構成部品を含む総重量は 357 g である。振動触覚提示用のボイスコイルアクチュエータ、撃力提示用のソレノイドアクチュエータ、熱提示用のペルチェ素子、サーミスタ、冷却ファンおよびヒートシンク、そして VR トラッカーを搭載している。

3. 実験

本セクションでは、提案した触覚提示手法がしびれ感覚を提示できるかどうか、またその手法が衝撃感のリアリティと知覚強度にどのような影響を与えるかを検証するために実施したユーザースタディについて述べる。

実験には 24 名の参加者（男性 18 名、女性 6 名、平均年齢 24.9 歳）が参加した。実験参加者は HMD (VIVE XR Elite) とホワイトノイズが流れるノイズキャンセリングイヤホン (BOSE QuietComfort Ultra Earbuds) を装着した。バット型デバイスと VR コントローラー (VIVE Controller for XR Series) を用いて操作を行った（図 4）。

3.1 実験デザイン

実験は被験者内計画で行い、実験参加者は仮想環境でバットでボールを打つタスクを実行した。タスクは基準タスクと評価タスクの 2 種類あり、基準タスクでは衝突感のみを

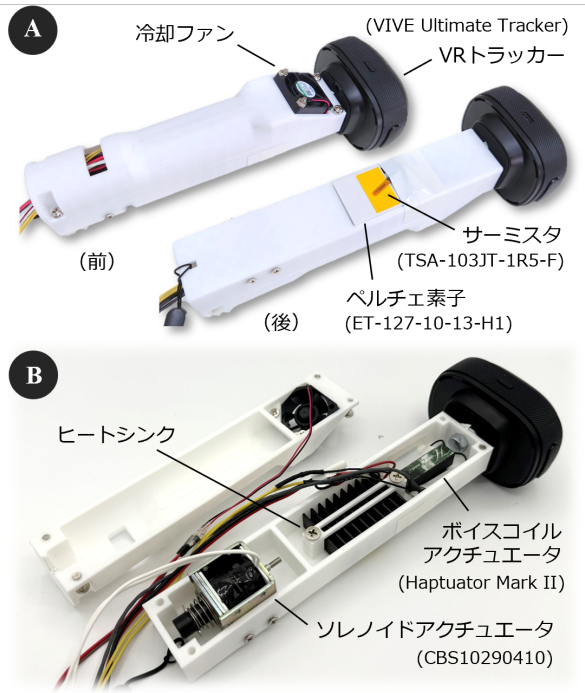


図 3: 実験実施のために開発したバット型デバイス。
(A) デバイス外観. (B) 内部構造.

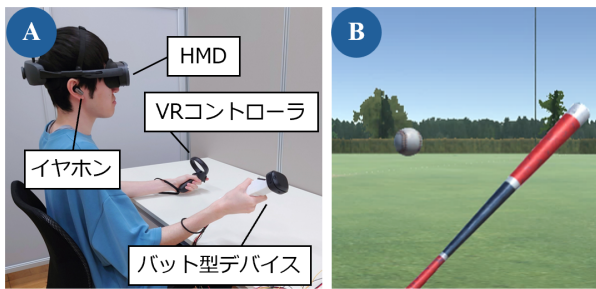


図 4: (A) 実験のようす. (B) 実験用の仮想環境.

提示, 評価タスクでは残効提示を追加した. 実験参加者は各タスク後に「しびれの強さ」「衝撃のリアルさ」「感じた衝撃の強さ」をマグニチュード推定法で評価した. その際, 基準タスクで得た感覚を 100 として回答するよう指示された.

実験条件は, 残効提示における振動触覚提示 (なし, 低周波, 高周波) と熱提示 (なし, あり) の 6 条件で, 全ての条件で衝突感提示は一定であった.

3.2 実験手順

実験参加者は椅子に座り, 右手にバット型デバイス, 左手に評価入力用の VR コントローラを持って実験を開始した. 実験は事前アンケート, 練習セッション, 本セッション, 事後アンケートの 4 つの部分で構成された. 練習セッションでは, 実験参加者はデバイスに慣れるために何度かボールを打ち返した. 本セッションでは基準タスクと評価タスクを交互に実行し, 評価タスク後には感覚を数値で評価して入力した. タスクは 12 回 (基準タスクと評価タスクを各 6 回) を 1 セッションとし, 1 分間の休憩を挟んで 3 セッション行った. 各セッション内で全ての条件が 1 回ずつ評価さ

れるように設定され, 条件の提示順序はランダムであった. すなわち, 実験参加者は各条件について 3 回評価を行った. 実験全体の所要時間は約 45 分であった.

3.3 結果

結果の分析を行うにあたり, まず各評価値の正規性を Shapiro-Wilk 検定で確認した. 「しびれの強さ」および「感じた衝撃の強さ」の評価値は正規分布から有意に逸脱していたため, ノンパラメトリックなデータに対して二元配置分散分析 (ANOVA) を行うための整列ランク変換 (ART) [5] を実施した. 「衝撃のリアルさ」の評価値は正規分布に従っていたため, データを Z スコアに変換してから ANOVA を実施した. その後, 各項目について事後検定を行った.

図 5 に, 各質問項目に対する条件ごとの評価値の分布を示した. 表 2 には各分散分析, 事後検定の結果をまとめた.

「しびれの強さ」については, 振動提示と熱提示がいずれも有意な主効果を示した. 交互作用効果は認められなかった. また Bonferroni 補正を用いた Wilcoxon の符号付順位検定の結果, 全ての条件ペア間で有意差が確認された. 「衝撃のリアルさ」については, 振動提示のみ有意な主効果を示した. Holm-Bonferroni 法による補正の下行った事後検定の結果, 振動提示の全ての条件ペア間で有意差が確認された. 「感じた衝撃の強さ」については, 振動提示と熱提示がいずれも有意な主効果を示した. 交互作用効果は認められなかった. また Bonferroni 補正を用いた Wilcoxon の符号付順位検定の結果, 振動提示の低周波条件と高周波条件の間を除いた 3 つの条件ペア間で有意差が確認された.

また, 事後アンケートでは 87.5% の実験参加者がしびれを感じたと報告した. さらに同じく 87.5% が「ボールを打った瞬間の衝撃の強さ」が実験中に変化していたと回答した. これは, 衝突の瞬間の物理刺激の強度は一定であった中で, 残効の提示により知覚強度が変化したことを示している.

		しびれの強さ	衝撃のリアルさ	感じた衝撃の強さ
主効果	振動提示	$F_{2,115} = 78.0$	$F_{2,46} = 14.4$	$F_{2,115} = 20.8$
	熱提示	$F_{1,115} = 15.7$	$F_{1,23} = 1.63$	$F_{1,115} = 26.6$
交互作用	振動提示×熱提示	$F_{2,115} = 0.38$	$F_{2,46} = 1.39$	$F_{2,115} = 0.20$
事後検定	振動なし<低周波	$Z = 4.29$	$Z = 3.39$	$Z = 3.40$
	振動なし<高周波	$Z = 4.29$	$Z = 4.44$	$Z = 4.11$
	低周波<高周波	$Z = 3.07$	$Z = 2.36$	$Z = 0.06$
	熱なし<熱あり	$Z = 3.11$	-	$Z = 3.89$

交: 交互作用効果 : $p < .01$, : $p < .05$

表 2: 各評価値に対する分散分析, 事後検定の結果.

3.4 考察

実験を通して, 振動および熱刺激を用いてしびれ感覚が効果的に提示されたことが確認された. 振動が提示された場合, 実験参加者は一貫してしびれ感覚を 100 以上と評価した. また高周波振動は低周波振動よりも強いしびれ感覚を引き起こした. 熱提示もしびれ感覚に寄与したが, 単独

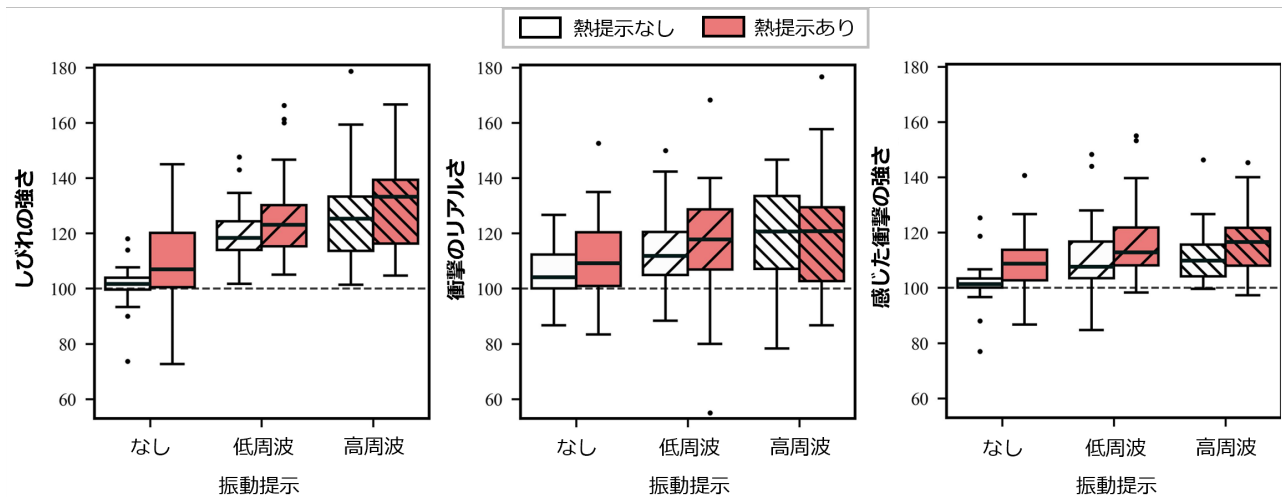


図 5: 実験結果の箱ひげ図. 中央値から四分位範囲の 1.5 倍以上離れたデータを外れ値としている.

で提示された場合は効果の変動が大きく、評価値の範囲が広がった。この変動は、一部の実験参加者が熱提示のみではしびれ感覚を十分に感じ取れなかったことを示唆している。振動提示と熱提示の交互作用効果は有意ではなかったものの、両方のモダリティが独立してしびれ感覚の知覚に寄与していた。この結果は、異なる種類の触覚提示を組み合わせることで、よりリアルな体験が作り出せる可能性を示している。

衝撃感のリアリティは、特に高周波振動によって有意に向上した。しびれ感覚が高周波振動によって強化されたことから、リアリティの向上は単なる情報量の増加ではなく、しびれ感覚の提示の質に起因するものであると考えられる。一方、熱提示は衝撃感のリアリティの向上には寄与しなかった。興味深いことに、野球経験の少ない実験参加者は熱提示によってリアリティが向上したと報告する傾向があり、実世界における経験が少ない実験参加者にとっては、熱提示が衝撃のイメージに一致していた可能性がある。

知覚された衝撃の強度は、振動および熱刺激の両方によって有意に向上した。しびれ感覚とは異なり、低周波振動と高周波振動の間に有意な差は見られず、知覚強度の向上は残効提示の存在自体に強く関連していることが示唆された。既存の衝撃感提示手法（残効提示なし）と比較して、衝突感提示に高周波振動と熱刺激を追加した条件では、知覚された衝撃の強度が大幅に向上した。（17ポイントの向上。）

総括すると、実験での数値評価と事後アンケートの結果から、振動および熱刺激がしびれ感覚を提示し、そしてそれが衝撃感のリアリティおよび知覚強度を有意に向上させることが確認された。本研究は、既存の衝撃感提示手法と残効提示を組み合わせることで、よりリアルで没入感の高い VR 体験を提供できることを示している。

4. おわりに

本研究では、振動および熱刺激を用いたしびれ感覚の提示が、衝撃感のリアリティと知覚強度を向上させることを

示した。特に高周波の振動がしびれ感覚の提示と衝撃感のリアリティに大きな効果を持つことが確認され、これにより残効提示が没入感の高い VR 体験を提供するための有効な手法であることが明らかになった。一方で、振動と熱の最適な提示方法や適切なパラメータ設定といった課題が残されており、今後の研究での解明が求められる。それでもなお、本研究は残効提示の有効性を強調するものであり、スポーツや衝撃感を伴う他の VR アプリケーションにも応用可能なほか、痛み、熱、力覚等、衝撃感以外の他の触覚提示分野にも拡張できる可能性を示唆するものである。

参考文献

- [1] Chaeyong Park, et al. Realistic haptic rendering of collision effects using multimodal vibrotactile and impact feedback. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 449–454, 2019.
- [2] Pedro Lopes, et al. Impacto: Simulating physical impact by combining tactile stimulation with electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, p. 11–19, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [3] Louise Hagander, et al. Quantitative sensory testing: Effect of site and skin temperature on thermal thresholds. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, Vol. 111, pp. 17–22, 02 2000.
- [4] Eric R Kandel, et al. *Principles of neural science*, Vol. 4. McGraw-hill New York, 2000.
- [5] Jacob O. Wobbrock, et al. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, p. 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.