

文脈改変による痛みのマスキング（第2報） VR 環境下での有効性の検証

Pain Masking by Contextual Modification (Part 2) Validation of effectiveness in a VR environment

○学 小野田 響（電通大） 学 今 笙羽（電通大）
学 牛山 奎悟（電通大） 溝口 泉（電通大）
梶本 裕之（電通大）

Hibiki ONODA, The University of Electro-Communications, onoda@kaji-lab.jp
Shoha KON, The University of Electro-Communications, shoha.kon@kaji-lab.jp
Keigo USHIYAMA, The University of Electro-Communications, ushiyama@kaji-lab.jp
Izumi MIZOGUCHI, The University of Electro-Communications, mizoguchi@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Virtual reality (VR) has been identified as an effective tool for pain management. Traditional VR-based pain reduction methods typically focus on diverting attention from the pain stimulus. However, these methods are often ineffective for individuals who struggle with redirecting their attention. This study investigates the effectiveness of pain masking through contextual modifications within a VR environment. The experiment tested whether presenting cat scratch images in response to electrical stimuli simulating pain altered the stimulus threshold, interpretation of stimuli, discomfort levels, and pain perception. In experimental setting, the simultaneous presentation of cat images increased the threshold for discomfort and reduced both discomfort and pain perception for a given level of stimuli, compared to the simple presentation of electrical stimuli alone. These effects were less pronounced when a delay occurred between the stimuli and the images, suggesting that attention was not merely diverted to the cat.

Key Words: AR, contextual modification, Pain, Stimulus, VR

1. はじめに

バーチャルリアリティ（VR）は疼痛管理を行うツールとして有用であることが分かっている[1]。侵害刺激は一般に「ペインマトリックス」として知られる脳の皮質・皮質下領域を活性化することが知られているが[2]，VR 環境での多感覚信号がこの領域の処理リソースを消費することで，痛み信号の処理が軽減されるためとされている。

VR を用いた疼痛軽減の手法の多くは，被験者の注意をそらすことで，痛みや不安の軽減を行っている[3]。特に痛みを伴う医療処置中の疼痛知覚や不安感を軽減するために医療現場で多く研究されており[4]，小児を対象とした研究や[5]，慢性疼痛患者を対象とした研究においても数多く用いられている[6]。また，視覚的な VR 体験だけではなく複数の感覚を提示することで痛みや不快感を軽減する手法も提案されている[7]。注射に対する情動反応を調べる研究では，単に注射針を見ているより触覚インタラクションを伴う VR 条件の方が好まれ，ストレスや恐怖を感じる状況において多感覚情報が気晴らしを通して参加者の幸福感を高めるのに有効であることが示唆された[7]。

以上のように，これまでに提案されてきた VR を用いた疼痛管理の手法は一定の成果を上げている。一方でこうした方法は特定の人に対して効果が低いことが確認されている。特に注意をそらす手法に関しては，痛みを過度に恐れる人は注意をそらすこと自体が困難であり，効果が得にくいとされている[9]。したがって，刺激原因から注意をそらすことなく疼痛管理が可能な新たな手法が望まれる。注意をそらす以外の手法としては VR 空間中で被験者自身の見た目を変更することで痛みや不快感を軽減する手法も提案されているが[8]，痛み自体が不快な体験であることには変わらない。

本研究ではこの解決策として，刺激原因から注意をそらすことが困難な人でも利用できる「文脈改変」による痛み軽減

を利用する。これは痛みの原因を，視覚的に人間にとって不快ではないコンテンツに置き換えて見せることで，主観的な痛みを低減するというものである。我々は前報にてスマートフォンに映し出された猫の映像により，感じる痛みが低減されることを確認した[10]。一方で，刺激原因を置き換える本手法は，VR 空間のように没入感がより高い状況においてこそ有効性を発揮できるものと考えられ，また従来の VR 空間を利用した手法同様，VR 環境下での有効性が検証されることが望ましい。

そこで本稿では，文脈改変による痛み軽減手法の VR 環境下における有効性を調査する。電気刺激によって生じる痛みに対して，VR 空間で刺激原因の視覚的手掛かりとして「猫によるひっかかり動作」を表示することで，痛み原因の置き換えを行い，痛みの軽減効果を調査した。

2. セットアップ

実験1では不快感を生じる刺激の閾値が「猫によるひっかかり」の動画提示に影響を受けるかどうか検証した。実験2ではより詳細なアンケート調査により感覚がどのように変容したかを調査した。

実験装置は手のトラッキングを行うためのViveトラッカー，VR コンテンツを表示するための頭部搭載型ディスプレイ（Quest3, Meta）および制御用 PC，被験者に電気刺激を与えるための電気刺激装置で構成されている。実験中のセットアップを図 Fig. 1 に示す。

2.1 電気刺激装置

電気刺激装置は電気刺激により，被験者に痛み刺激を提示する。刺激元に電気刺激装置を選定した理由は，痛み感覚を容易に生成でき[11]，PC 上で電気刺激量のリアルタイム調整が行えるからである。刺激電極は直径 1mm，電極中心間距離は 2.5mm であり，64 点から構成されている。Fig. 2 右のように右手首に取りつけられた Vive トラッカーの真下に取り付けら

れており、パソコンから任意のタイミングで刺激を送ることができる。

刺激パターンは Fig. 2 の赤で囲まれた横一列の電極がほぼ同時に刺激される。厳密には電極は同時には 1 つだけが選択され陽極となり、他の電極すべてが陰極となる。これを高速で切り替えることで横一列のパターンが提示される。この列刺激が 0.03ms ごとに 1 列ずつ上方向に移動していくことで移動していく感覚を提示する。

本実験ではこの下から上への横一列の刺激の移動を 1 ループと定義する。1 ループにかかる時間は 0.3ms である。本実験ではパルス幅は 50us に固定し、最大 10mA までのパルスを与える。電気刺激装置は ESP32 マイクロコントローラにより制御されており、PC と USB2.0 によるシリアル通信を行っている。

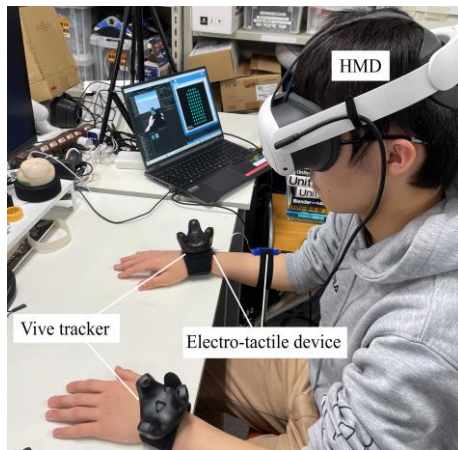


Fig. 1 Setup of experiments

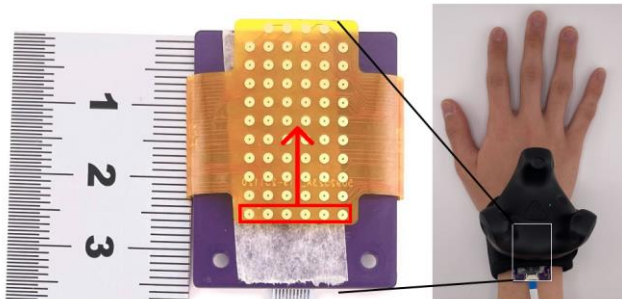


Fig. 2 Left: Stimulation electrodes. Right: Placement of the electrodes

2.2 VR 空間

HMD を用いて全身アバターと猫がいる VR 空間に参加者を没入させる (Fig. 3). VR 空間は Unity 3D ゲームエンジンで開発されている。この空間にはアバターと猫、椅子、机のみが表示されている。被験者は VR 空間中で頭の回転及び、手の移動をすることで体験に没入することができる。

3D アバターは両手と頭の計 3 点でトラッキングされた。下半身は現実空間と姿勢を合わせるために VR 空間の椅子に座った状態で固定された。頭は HMD の位置情報に基づいて、両手は両手首に取り付けた Vive トラッカーの位置情報に基づいてトラッキングされた。ただし、指の詳細なトラッキングまでは行えないため、被験者はなるべく VR 空間中でのアバターの手の形に実空間の手の形を合わせるように指示された。被験者の性差の影響を極力減らすためアバターは極力シンプルで中性的なものを採用した。

3D 空間中には猫が配置されている。この猫は右前足で被験者に対してひっかくモーションを行うことができる。この動画に対応して電気刺激を発生させることで電気刺激による刺激を猫にひっかかれたことによる刺激へと被験者の解釈を変更する。

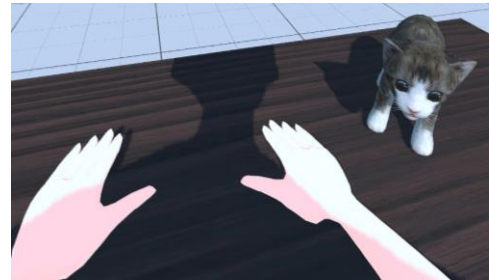


Fig. 3 VR space

2.3 被験者

21 歳から 24 歳までの被験者 13 名 (女性 2 名, 男性 11 名) が実験に参加した。本実験は、著者が所属する倫理審査委員会の了承を受けた。実験前に参加者は実験参加に同意を行った。

3. 実験 1 : 方法

実験 1 の目的は、不快感を生じる刺激の閾値が「猫によるひっかき」に影響を受けるかどうかの検証である。本実験では実際の条件に移る前にいくつかの作業が行われた。被験者は実空間で、HMD、Vive トラッカー、電気刺激装置を Fig. 1 のように装着した状態で椅子に座るよう指示された。VR 空間中での能動運動は主体感を高めることが知られているため [12], 本実験の前に VR 空間で空中に浮かんだ立方体を近いほうの手で触れることを繰り返すリーチング課題を 1 分間行った。その後被験者は机にいる猫のひっかき動作が、刺激電極が取り付けられている右手首に当たるように位置を調整するように指示された。

実験は 3 つの条件で構成された。各条件で 3 秒に 1 回 1 ループの電気刺激が被験者の右手首に与えられた。電気刺激の出力は 0mA から開始し最大 10mA である。電気刺激 1 ループごとに 0.1mA ずつ出力を上げた。それぞれの条件で被験者が不快だと口頭で発言したタイミングの電気刺激量を記録した。被験者は実験中電気刺激電極がある右手首に注目するように伝えられた。

実験条件は以下の 3 通りである。条件 1 は VR 空間中の机に猫を表示しない。条件 2 は VR 空間の机に猫を表示し、電気刺激のタイミングで被験者の右手首に対して猫がひっかく動作を行う。猫の動画は 1 回あたり 0.25 秒である。電気刺激パターンは条件 1 と同様である。条件 3 は条件 2 と同様 VR 空間に猫を表示し、電気刺激も行うが、猫のひっかく動作を電気刺激が与えられる 1 秒前に行うことで時間的な同期性の無い条件としている。これら 3 つの条件はランダムな順序で割り当てられた。以降これらの条件を順に nothing, cat, lag と呼称する。不快感を伴う実験であるため被験者の負担軽減のため、各条件は 1 回ずつ行われた。

4. 実験 2 : 方法

実験 2 の目的は、条件間の感覚の違いをより詳細なアンケート調査によって明らかにすることである。実験 1 では徐々に増大する刺激により不快感の閾値を求めたが、本実験では一定の刺激に対する感覚を回答させた。

本実験では実験の前に電気刺激の基準決めが行われた。実験 1 と同様にリーチング課題を行ったのち、猫を好きかどうか

かを 7 段階リッカート尺度で回答させた (1:全く好きではない, 7:好意的). その後, 実験 1 の nothing 条件 (VR 空間中に猫を表示せず 3 秒に 1 回 1 ループの刺激を 0.1mA ずつ上昇しながら行う条件) で不快感を生じる閾値を求めた. この記録された電気刺激量を本実験の電気刺激の基準とした, 以降の実験ではこの刺激を常に用いた.

実験は 3 つの条件で構成された. 条件ごとの VR 空間の描画, 刺激と猫の挙動の時間的タイミングは実験 1 と同様である. すなわち nothing 条件では猫を表示せず, cat 条件ではデスクに猫を表示し電気刺激のタイミングで猫のひっかき動作を表示し, lag 条件では電気刺激と猫の動作に明確な時間ずれが存在している. ただし電気刺激の量は実験 1 と異なり前述の基準で固定されている. 電気刺激は各条件で 5 ループ分行い, 3 秒ごとに 1 ループの電気刺激が与えられた. 電気刺激が与えられる場所は実験 1 と同様である.

各条件で電気刺激の後に以下の刺激の解釈や手の所有感 [13] についてのアンケートが行われた. すべて 7 段階リッカートスケールが用いられた. ただし今回はあらかじめ猫を表示していない条件で被験者が不快と伝えた電気刺激を基準としているため, Q3 に関しては nothing 条件の回答値を 4 としたうえで他の条件の数値を回答させるようにした.

- Q1: 刺激を電気刺激と感じたか (1:感じない, 7:感じる)
- Q2: 刺激を猫のひっかきと感じたか (1:感じない, 7:感じる)
- Q3: 刺激の不快感 (1:不快ではない, 7:著しく不快)
- Q4: 痛みの強さ (1:弱い, 7:強い)
- Q5: 猫がその場にいるように感じたか (1:感じない, 7:感じる)
- Q6: 刺激が猫のひっかきに対応しているように感じたか (1:対応していない, 7:対応している)
- Q7: バーチャルな手が本物の手になったように感じたか (1:感じない, 7:感じる)

実験 1 で不快感に関して質問しているのに対し, 実験 2 では不快感 (Q3) および痛み (Q4) を個別に質問している. これは痛みと不快感を別のものととらえる可能性に対処するためである. また刺激を猫のひっかきと感じたか (Q2) と刺激が猫のひっかきに対応しているか (Q6) を別の質問として設けたのは, 刺激の質が似ているか, 刺激の対応関係を感じられるか, という二つを別のものととらえる可能性に対処するためである.

5. 実験 1 : 結果

実験 1 で収集したデータに対して Shapiro-Wilk 検定を実施した. その結果有意差が認められたため ($p < 0.05$), 正規性が棄却された. そこで条件間に違いがあるかどうか調べるためにノンパラメトリック検定である Friedman 検定を行い有意差が確認された ($p < 0.05$). そこで各条件間に対して両側 Wilcoxon の符号順位検定による多重比較を実施し, Bonferroni 法による補正を行った.

不快感を生じた電気刺激量を条件ごとに比較した (Fig. 4). ただし, 実験中の映像の乱れから不適当だと判断した被験者はデータから除外した. nothing と cat の間には有意差が認められ ($p < 0.05$), nothing と lag の間には有意差が認められなかった. すなわち, 電気刺激の刺激タイミングと同期した猫のひっかき動画を提示することで, 不快感を生じる電気刺激量の閾値が高くなる一方で, 刺激と動画に明瞭な時間差を設けるとこの効果が低下することを示している.

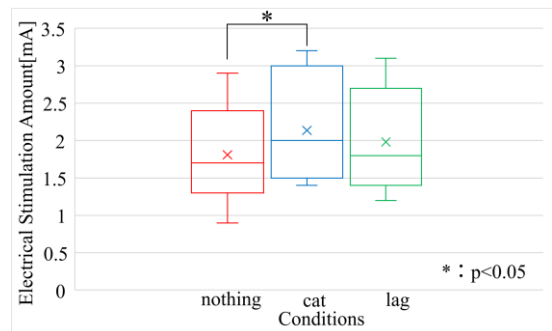


Fig. 4 Results of Experiment 1

6. 実験 2 : 結果

実験 2 の収集したデータは順序尺度に基づくリッカート尺度のデータである. そこでノンパラメトリック検定である Friedman 検定を行い有意差が確認された ($p < 0.05$). そこで各条件間に対して両側 Wilcoxon の符号順位検定による多重比較を実施し, Bonferroni 法による補正を行った.

Fig. 5 は条件ごとの回答値を質問項目ごとに示している. 本実験前に行われた猫の好き嫌い合いの結果は平均が 5.75 であり, 回答値が 4 を切る被験者がいなかったことから, 被験者の中には映像として提示された猫に忌避感を覚える人はいなかったと考えられる.

刺激を電気刺激と感じたかどうか (Q1) は nothing と cat の間でのみ有意差が認められた ($p < 0.05$). したがって, 電気刺激に同期したタイミングで猫のひっかき動画を提示することで, 刺激原因を電気刺激と解釈し難くなったと考えられる.

刺激を猫のひっかきと感じたかどうか (Q2) では nothing と cat, nothing と lag, cat と lag の間で有意差がみられた (順に $p < 0.01$, $p < 0.05$, $p < 0.05$). したがって, 電気刺激に同期したタイミングで猫のひっかき動画を提示することで, 刺激原因を猫のひっかきによるものだと解釈させられたと考えられる. また電気刺激と猫のひっかき動画に時間差を設けると, この解釈の強度は低下した.

刺激の不快感 (Q3) では nothing と cat, cat と lag の間で有意差がみられた (順に $p < 0.05$, $p < 0.05$). したがって電気刺激に同期したタイミングで猫のひっかき動画を提示すると不快感が減少する一方で, ラグを持たせるとかえって不快感は上昇した.

痛みの強さ (Q4) では nothing と cat の間で有意差がみられた ($p < 0.05$). したがって電気刺激に同期したタイミングで猫のひっかき動画を提示することで痛み知覚が低減されたと考えられる.

猫がその場にいるように感じたかどうか (Q5) では nothing と cat, nothing と lag, cat と lag の間で有意差がみられた (順に $p < 0.01$, $p < 0.01$, $p < 0.05$). したがって, VR 空間中に猫を配置することで猫がその場にいるように感じるが, 電気刺激に同期したタイミングで猫のひっかき動画を提示することでより臨場感を増加させられる可能性が示唆された.

刺激が猫のひっかきに対応しているように感じた (Q6) では nothing と cat, nothing と lag, cat と lag の間で有意差がみられた (順に $p < 0.01$, $p < 0.01$, $p < 0.01$). したがって, 今回の条件 cat と lag の違いである刺激時間差の有無を被験者が把握できていることが確認できた. 本項目は Q2 に類似した内容といえるが, 条件間にはより明確な違いが見られた.

バーチャルな手が本物の手になったように感じた (Q7) では各条件間で有意差は見られなかった. このため, 刺激や猫の動画によって VR 空間への没入感が変化するとは言えない

ことが確認された。

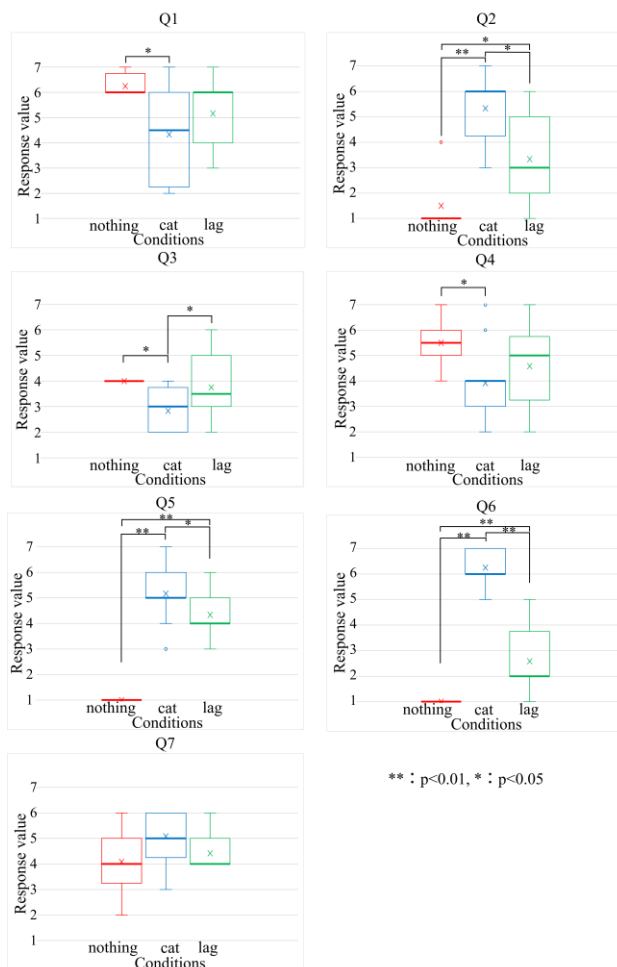


Fig. 5 Results of Experiment 2

7. 考察

実験 1, 2 の結果を通して刺激と動画が同じタイミングで提示された条件 cat では文脈変化の効果が表れている可能性が高い。5 人の被験者のコメントでは電気刺激に対応して猫のひっかき動画を提示することで刺激に納得感があったという意見がみられた。一方で動画と刺激の間に時間差を設けることで刺激と動画の間に違和感が生じ、ひっかきには感じなかったと回答した被験者もいた。条件 nothing は一番不快であると回答した被験者が何人かいた。これは猫そのものの有無もあるが、猫がいないことによってタイミングを予測するものがなくなったことも要因として考えられる。単に猫がいることで注意がそれ、痛みが軽減した可能性もあるが、上記の複数のコメント、および条件 lag では閾値の上昇が見られなかったことから、条件 cat の痛み軽減の要因として我々の提案する「文脈変化」の効果があったと考えられる。

実験 2 の結果から、条件 cat において刺激原因を猫のひっかきであるという解釈が成立していたことが分かる (Q1, 2, 6)。また条件 lag との比較から、時間的な同期性が重要であることもわかる。こうした、視覚と触覚の同期された提示が臨場感に高く貢献することは数多くの研究で良く知られている [14]。

なお、不快度や痛みの軽減度合いについては、実験前の猫の好き嫌いアンケートで 4 ないし 5 と回答したグループと 6 ないし 7 と回答したグループに分けると、nothing-cat 間

での差が、猫をより好きなグループで大きくなる傾向が見られた。ただし被験者を二分した際の人数が少ないため今回は統計処理を行っておらず、今後の検討課題である。

実験 2 の結果では lag 条件についての解釈が人によって分かれたのも特筆に値する。被験者からのコメントによると、条件 lag は事前の猫のアクションによって刺激を予測でき、それによって痛みが軽減されたとコメントした人がいた一方で、動画のタイミングで刺激が来ないためより痛いと感じたというコメントも見られた。前者の人では条件 lag の回答値は条件 cat に近く、後者の人では条件 nothing 時の回答値に近かった。これが条件 lag の分散が他の条件より大きい原因である可能性がある。

参考文献

- [1] A. S. Won, J. Bailey, J. Bailenson, C. Tataru, I. A. Yoon, and B. Golianu, "Immersive Virtual Reality for Pediatric Pain," *Children*, vol. 4, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2017.
- [2] A. Mouraux, A. Diukova, M. C. Lee, R. G. Wise, and G. D. Iannetti, "A multisensory investigation of the functional significance of the 'pain matrix,'" *NeuroImage*, vol. 54, no. 3, pp. 2237–2249, Feb. 2011.
- [3] V. Smith et al., "The Effectiveness of Virtual Reality in Managing Acute Pain and Anxiety for Medical Inpatients: Systematic Review," *Journal of Medical Internet Research*, vol. 22, no. 11, p. e17980, Nov. 2020.
- [4] L. D. Morris, Q. A. Louw, and K. Grimmer-Somers, "The Effectiveness of Virtual Reality on Reducing Pain and Anxiety in Bum Injury Patients: A Systematic Review," *The Clinical Journal of Pain*, vol. 25, no. 9, p. 815, Dec. 2009.
- [5] D. G. Rao et al., "Assessment of Efficacy of Virtual Reality Distraction in Reducing Pain Perception and Anxiety in Children Aged 6–10 Years: A Behavioral Interventional Study," *Int J Clin Pediatr Dent*, vol. 12, no. 6, pp. 510–513, 2019.
- [6] K. P. Wong, M. M. Y. Tse, and J. Qin, "Effectiveness of Virtual Reality-Based Interventions for Managing Chronic Pain on Pain Reduction, Anxiety, Depression and Mood: A Systematic Review," *Healthcare*, vol. 10, no. 10, Art. no. 10, Oct. 2022.
- [7] K. Chin, M. Thompson, and M. Ziat, "The Effect of Multimodal Virtual Reality Experience on the Emotional Responses Related to Injections," in *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, Online Streaming, --- Select a Country ---: SCITEPRESS - Science and Technology Publications*, 2021, pp. 128–134.
- [8] M. Matamala-Gomez, B. Nierula, T. Donegan, M. Slater, and M. V. Sanchez-Vives, "Manipulating the Perceived Shape and Color of a Virtual Limb Can Modulate Pain Responses," *Journal of Clinical Medicine*, vol. 9, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2020.
- [9] M. H. Johnson, "How Does Distraction Work in the Management of Pain?," *Current Science Inc*, vol. 9, no. 2, pp. 90–95, Mar. 2005.
- [10] 小野田響, 今笠羽, 高見太基, 牛山奎悟, 溝口泉, 梶本裕之 "文脈変化を用いた痛みのマスキング," 第 29 回バーチャルリアリティ学会大会, 2024.
- [11] Z. Zhou, Y. Yang, J. Liu, J. Zeng, X. Wang, and H. Liu, "Electrotactile Perception Properties and Its Applications: A Review," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 15, no. 3, pp. 464–478, Jul. 2022.
- [12] J. Piccione, J. Collett, and A. De Foe, "Virtual skills training: the role of presence and agency," *Heliyon*, vol. 5, no. 11, p. e02583, Nov. 2019.
- [13] M. Pyasik, G. Tieri, and L. Pia, "Visual appearance of the virtual hand affects embodiment in the virtual hand illusion," *Sci Rep*, vol. 10, no. 1, p. 5412, Mar. 2020.
- [14] P.-H. Han et al., "Haptic Around: Multiple Tactile Sensations for Immersive Environment and Interaction in Virtual Reality," in *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, in VRST '18*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, Nov. 2018, pp. 1–10.