



# 視覚刺激と触覚刺激の提示時間のずれが 痛覚に与える影響の分析

Influence of Time Lag Between Visual and Tactile Stimuli on Pain Perception

松井俊祐<sup>1)</sup>, 松室美紀<sup>2)</sup>, 柴田史久<sup>2)</sup>, 木村朝子<sup>2)</sup>

Shunsuke MATSUI, Miki MATSUMURO, Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

2) 立命館大学 情報理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

**概要**：複数の感覚の相互作用により触覚に変化が生じることがあり、近年ではその分析に人工現実や複合現実感技術が活用されている。特に、痛みに関しては、視覚刺激により生成された予測に基づき、その知覚が変化するとされている。そこで本稿では、複合現実型視覚刺激と触覚刺激提示のタイミングの2種類の要因を操作することにより、痛みへの予測と実際に知覚する痛みとの齟齬が、知覚する痛みの強さに与える影響を分析した。

**キーワード**：痛覚、複合現実感、クロスモーダル

## 1. はじめに

近年で、クロスモーダル効果と呼ばれる、複数の感覚の相互作用により生じる錯覚の分析に、人工現実 (Virtual Reality; VR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術が活用されている。特に、痛みに関しては、痛みを知覚するメカニズムの解明や、病気やけがに伴う痛みの軽減のため、視覚情報による痛み知覚の変化に関する多くの研究がなされている。

例えば、Hoffmanらは、火傷を負った患者に対して、VR技術を用いて雪の空間にいる状況を疑似体験させ、その結果、VRを用いた仮想世界の疑似体験が、知覚する痛みを弱めることを示した [1]。また、片岡らは、MRによる視覚刺激が痛みの知覚位置に与える影響を分析している [2]。同研究では、視覚刺激を痛みの提示箇所とずらし提示することで、痛みの知覚位置が視覚刺激に引きずられることが示された。

これらの痛み知覚の変化は、視覚刺激に基づき生成された予測により引き起こされると考えられる。複数の先行研究において、予測が痛みの知覚に影響することが示されている [3][4]。視覚情報は、いつ・どこに・どの程度の強さで痛みが来るのかという予測の形成において非常に重要な情報である。

特に、仮想空間で視覚は最も重要な情報取得の手段となる。視覚刺激と痛みの関連を分析することにより、痛みの軽減に効果的な視覚刺激の操作が明らかになれば、

様々な応用が期待できる。本研究では、視覚刺激により形成される予測と実際に提示される痛み刺激との間に食い違いが生じた際に、痛みの知覚がどのように変化するかを確認する。

本研究ではMRを用いて実験を行う。観察する身体と実際の身体との類似性は痛みの知覚に影響することが示されており [5]、また、痛みの予測はそれまでの経験に基づき生成される。このことから、現実の身体に視覚刺激を重畳描画することで、より効果的に痛みの予測の生成が可能であると考えられる。

以上より、本稿では、MR型視覚刺激を操作することにより生じる痛みへの予測と実際に知覚する痛みとの齟齬が、知覚する痛みの強さにどのように影響するかを分析する。

## 2. 関連研究

Höfleらは、痛覚刺激と同期して提示する仮想物体の外観と言語を用いた事前の教示から形成される痛みへの予測が、痛みの知覚にどのような影響を与えるのかを分析している [3]。仮想物体には、痛みを予測させる刺激として針が、痛みを予測させない刺激として綿棒が用いられた。また、強い電気刺激と弱い電気刺激の2種類を用意し、針に対して強い刺激を多く、綿棒に対し弱い刺激を多く提示する条件、および、その逆の条件が設定された。参加者にはその割合が事前に教示されている。仮想物体

を仮想の手に接近させていき、接触するタイミングで痛覚刺激を提示した結果、仮想物体の外見に関わらず、事前の教示によって強い電気刺激と関連付けられた場合に、知覚する痛みが強くなることが示された。

一方で、Hauck らは痛みへの予測を変化させる手法として、時間的な要因に着目した [4]。参加者には、聴覚刺激による手掛かりから 2 秒、4 秒、6 秒のいずれかの遅延時間でレーザー刺激が提示されることが教示された。この操作によって、遅延時間の増加は痛覚刺激が提示される確率を高め、参加者に痛みをより強く予測させることが期待される。この実験の結果、知覚する痛みの強さは遅延とともに増加することが分かった。

これらの研究は、予測にあった強さやタイミングで刺激が与えられた時に、より強い痛みが知覚されることを示している。しかし、Höfle らの研究では、痛覚刺激を提示する実験者からの刺激の強さの教示によって、仮想物体の外観の影響が打ち消されてしまった可能性がある。また、Hauck らの研究では、参加者が痛覚刺激を提示されるまでの時間の候補を知っていたため、予想外のタイミングでの痛覚刺激の提示については検討されていない。

そこで、実験では、痛覚刺激と対応づける仮想物体として、痛みをイメージさせる視覚刺激と痛みをイメージさせない視覚刺激を用いて、痛みが来ると予測されるタイミングとは時間的にずらして痛覚刺激を提示することで、知覚する痛みの変化を分析する。

### 3. 実験準備

#### 3.1 MR 機器構成

実験で使用する MR システムの構成を図 1 に示す。MR 空間を構築するために、ビデオシーズルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MREAL Platform System (Canon, MP-110) を使用した。これにより、参加者は現実中存在する自身の手と仮想の視覚刺激をリアルタイムで観察することができる。また、参加者が自身の手を観察中に頭部を動かしたときの影響を受けないよう、磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) を用いて頭部の位置姿勢情報を取得した。本システムは 30fps で動作しており、予備実験において時間的遅れ・ずれは感じないということを確認している。

#### 3.2 提示する痛覚刺激

本研究では、手の甲中央部に対して痛覚刺激を提示し、知覚する痛みがどのように変わるのかを分析する。痛覚刺激としては、簡便かつ安定した刺激提示が可能な電気刺激を採用した。図 2 に本実験のために作成した痛覚刺激を提示する装置を示す。

電気刺激の強度は本研究と同様の CW 回路を使用していた片岡らの実験条件を踏襲し、電圧 320V、電流 1.8mA とした [2]。また、実験で提示する痛覚刺激は、パルス幅 0.15 秒の人体に有害な生理的影響を与えない電気刺激で

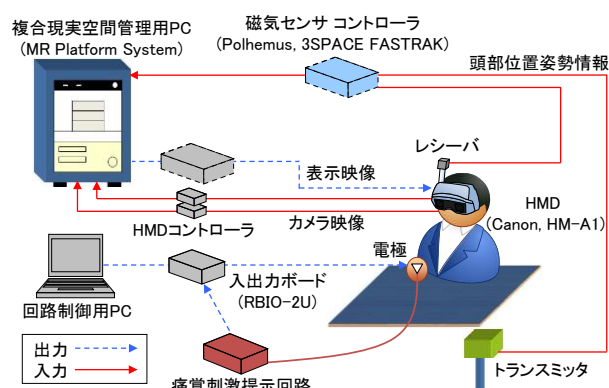


図 1 MR システムの構成

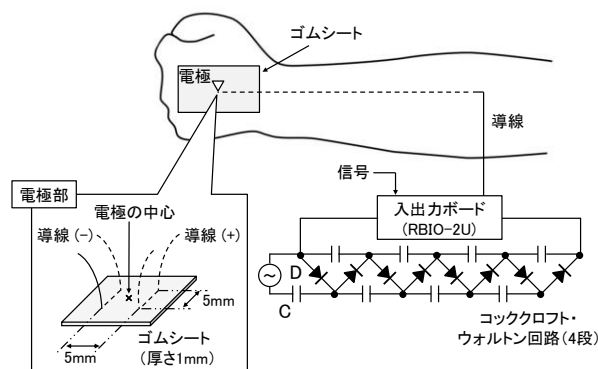


図 2 痛覚刺激を提示する装置

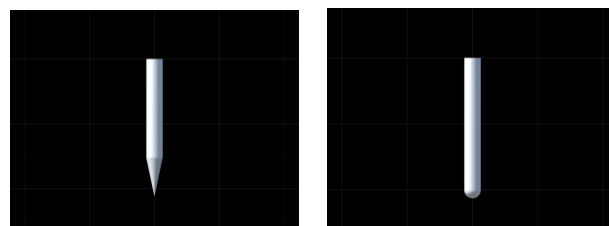


図 3 提示する視覚刺激

ある [6]。

#### 3.3 提示する視覚刺激

視覚刺激としては、痛みを予測させる刺激として先端を尖らせた鋭い刺激、痛みをイメージさせない刺激として先端を丸くした鈍い刺激を用意した (図 3)。これらの視覚刺激は色と長さを統一しており、先端部分の形状のみを変更した。大きさは HMD の視野角に収まる程度であり、実験中、参加者が問題なく視覚刺激の観察ができることを確認している。

なお、用意した 2 つの視覚刺激に関し、実験前に印象調査を行い、鋭い刺激が痛みをイメージさせ、鈍い刺激が痛みをイメージさせないことを確認している。

### 4. 実験

#### 4.1 目的

実験では、鋭い刺激または鈍い刺激を提示し、痛みが来ると予測されるタイミングとは時間的にずらして痛覚刺激を提示することで、知覚する痛みの変化を分析した。

#### 4.2 方法

実験には成人 15 名が参加した。実験を開始する前に、内容の説明を行い、参加同意書への署名を取得した。実験で使用する電気刺激を提示し、全ての参加者が痛みを知覚することを確認している。

参加者に HMD を装着し、背筋を伸ばした状態で椅子に座らせた。左手を机の上に置いた状態で、あごをあご台に置かせて頭の位置を固定した (図 4)。その際、参加者が自身の手と視覚刺激を観察しやすいよう、自分であご台の高さを調整した。

各試行では、まず 2 種類の視覚刺激の内、いずれかを画面上部に提示し、参加者に観察させた。そして、実験者の合図により、視覚刺激を左手の甲中央部に向けて接近させた。視覚刺激は 5 秒経過した後、先端部分が左手の甲中央部に接した位置で静止した (図 5)。なお、視覚刺激が静止する位置については、試行ごとに調整を行い、常に一定とした。

視覚刺激を提示している間のいずれかのタイミングで痛覚刺激が提示された。参加者は、痛みを知覚した際に右手に把持したボタン装置を押下した。ボタンを押すと同時に視覚刺激が消去され、参加者は HMD を外し、痛みの評価を行った。評価には、Visual Analog Scale (VAS) 法を採用した [7]。100mm の横線の左端を「痛みなし」右端を「想像できる最大の痛み」とし、知覚した痛みの強度に当てはまる位置に印を付けさせた。

試行ごとに 2 分間の休憩をとり、試行開始前に残効が残っていないかを口頭で確認した。参加者の手に残効が確認された場合、その影響がなくなるまで参加者に追加で 1 分間の休憩を取らせた。

なお、痛みに関して参加者には「痛覚刺激は視覚刺激が手に接触するタイミングで提示されるが、タイミングがずれる場合もある。また、痛覚刺激を提示しないダミー刺激が存在する」ことが教示された。

#### 4.3 条件

視覚刺激は鋭い刺激と鈍い刺激の 2 種類である。痛覚刺激を提示するタイミングは、実験者の合図から 1 秒後、3 秒後、5 秒後、7 秒後、9 秒後のいずれかとした。視覚刺激は 5 秒で手に接触するため、接触の 4 秒前、2 秒前、0 秒 (接触時)、2 秒後、4 秒後に当たる。参加者には、痛覚刺激のタイミングが予測されることを防ぐため、痛覚刺激を提示するタイミングや、パターン数については教示をしなかった。

また、痛覚刺激が提示されるタイミングを参加者が予想できないように、痛覚刺激を提示しないダミー試行を含めた。ダミー試行は各視覚刺激に対して 2 回ずつ含まれたため、参加者 1 人あたり計 4 回であった。参加者には、事前にダミー刺激が存在することは教示したが、いつダミー刺激が提示されるのかについては教示しなかった。

実験は各パターン 1 回ずつ行うため、参加者 1 人あたりの試行回数は  $2 \times 5$  (視覚刺激の種類  $\times$  視覚刺激と痛み

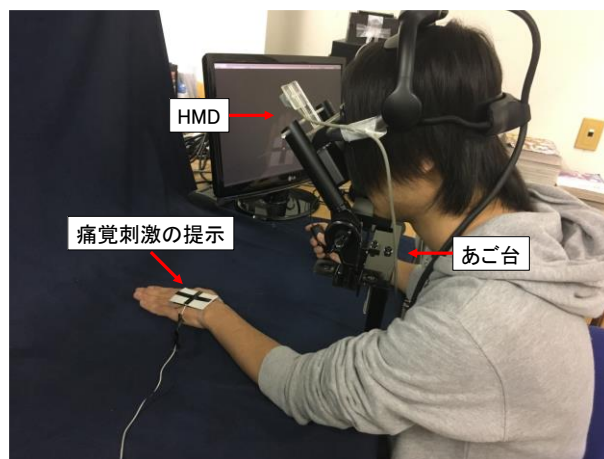
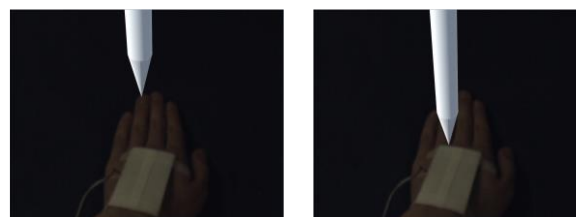


図 4 実験の様子



(a) 合図から 1 秒後

(b) 合図から 3 秒後



(c) 合図から 5, 7, 9 秒後

図 5 視覚刺激の動作

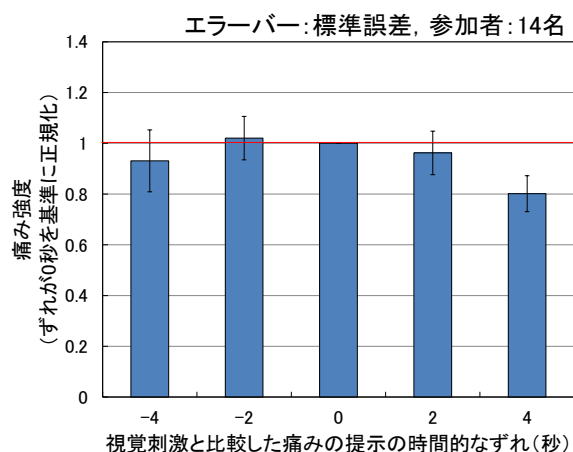
の提示の時間的なずれ) = 10 回、これにダミー刺激 4 回を加えた計 14 回である。参加者ごとに各条件がランダムな順で提示された。

#### 4.4 結果・考察

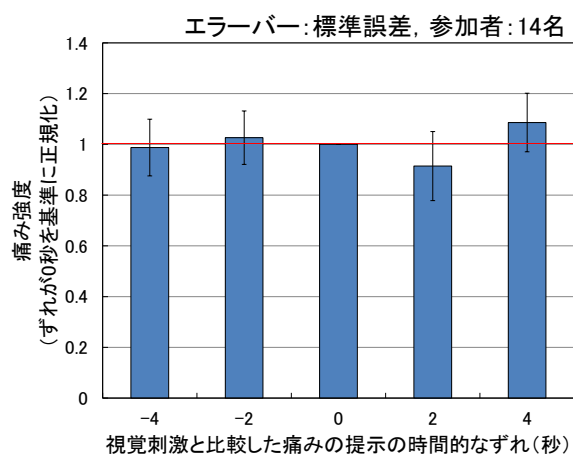
痛み強度は、左端から参加者のつけた印までの距離を測定し、視覚刺激ごとに正規化した。ずれ 0 秒において記入された距離を 1 とし、1 より大きければずれ 0 秒より強い痛みを、1 より小さければずれ 0 秒より弱い痛みを知覚したことを示す。

参加者 15 名の内、正規化後の結果が平均から大きく乖離していた参加者 1 名を分析から除外した。参加者 14 名の実験結果を図 6 に示す。図 6(a) は鋭い刺激、図 6(b) は鈍い刺激で知覚された痛みの強度を表している。

それぞれの視覚刺激について、分散分析を実施した。その結果、鋭い刺激について痛覚刺激提示の時間的なずれの主効果 ( $F_{(4, 52)} = 1.626, p = 0.1817$ ) は有意ではなかった。しかし、図 6(a) を見ると、グラフは、ずれ 0 秒付近を頂点とした山形を描いている。そこで、主効果は有意に達しなかったものの、時間的なずれと痛み強度の関連性を調べるため、多重比較を実施した。その結果、ずれが 4 秒の時よりも、ずれが 2 秒のとき ( $p = 0.026$ ) およびずれがないとき ( $p = 0.043$ ) の痛みがより強く評価さ



(a) 鋭い刺激の痛み強度



(b) 鈍い刺激の痛み強度

図 6 実験結果

れていた。以上から、鋭い視覚刺激では痛み刺激提示の時間的なずれが小さいほど、痛みが強まる傾向が観察される。

鈍い刺激においても、ずれの時間の主効果は有意ではなかった ( $F_{(4, 52)} = 0.681, p = 0.608$ )。図 6(b) より、鋭い視覚刺激の場合と異なり、グラフから特定の形状は観察されなかった。確認のために実施した多重比較においても、どの対においても、差異は有意ではなかった ( $ps > 0.100$ )。

鋭い刺激を提示した際のみ、視覚刺激が手に接触する寸前から、接触するタイミングで他の条件より強い痛みが知覚された。これは、鋭い刺激が手に接触するときに痛みを引き起こすことを経験的に学習しており、視覚刺激が手に接近するにつれて、痛みへの予測が高まったからであると考えられる。さらに、参加者には、痛み刺激は、基本的に視覚刺激が手に接触するタイミングで提示されることが教示されており、これも同様に痛みへの予測を高めたと考えられる。この結果は、痛みへの予測と知覚する痛みに関する関連研究 [4] の結果と同様の傾向である。

特に、視覚刺激が手に接触した 4 秒後の条件で知覚する痛みが弱かった。この理由として、参加者が接触後にしばらく痛覚刺激が与えられなかったため、痛み刺激がないこ

とを予測した可能性がある。参加者には、痛覚刺激を提示しないダミー刺激が存在することが教示されている。そのため、視覚刺激が手に接触して以降、それがダミー刺激であり、痛みがないことを予測するようになったため、痛みの強度が低下したと考えられる。

一方、鈍い刺激が提示された場合、痛みの提示の時間的なずれが痛みの知覚へ与える影響は確認されなかった。鈍い刺激は痛みをイメージさせないため、そもそも痛みに対する予測が弱かったことが原因としてあげられる。つまり、鈍い刺激が手に接触するタイミングにおいても、痛みの予測が弱く、痛みの提示の時間的なずれによる影響が小さかったと考えられる。

## 5. むすび

本稿では、MR 型視覚刺激を操作することにより、痛みへの予測と実際に知覚する痛みとの間の齟齬が、知覚する痛みの強さにどのように影響するのかを分析した。視覚刺激には、痛みをイメージさせる刺激とさせない刺激を用意した。これらの視覚刺激を用いて、視覚刺激が手に接触するタイミングと時間的にずらして痛覚刺激を提示し、痛みの強度を測定した。結果として、より強い痛みが予測される視覚刺激およびタイミングで、主観的な痛みの強度が強まることが分かった。今後はさらに視覚刺激の詳細に着目し、視覚刺激の種類や影による影響を分析する予定である。

## 参考文献

- [1] HG. Hoffman, DR. Patterson, GJ. Carrougher and SR. Sharar: "The effectiveness of virtual reality based pain control with multiple treatments," *Pain*, Vol. 17, No. 3, pp. 229-235, 2001.
- [2] 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 2, pp. 275-283, 2014.
- [3] M. Höfle, M. Hauck, AK. Engel and D. Senkowski: "Viewing a needle pricking a hand that you perceive as yours enhances unpleasantness of pain," *Pain*, Vol. 153, No. 5, pp. 1074-1081, 2012.
- [4] M. Hauck, J. Lorenz, R. Zimmermann, S. Debener, E. Scharein and AK. Engel: "Duration of the cue-to-pain delay increases pain intensity: a combined EEG and MEG study," *Experimental Brain Research*, Vol. 180, No. 2, pp. 205-215, 2007.
- [5] 三浦勇樹, 橋口哲志, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: "複合現実空間での前腕の半透明表現が痛覚に与える影響の分析", *情報処理学会研究報告*, Vol. 2018-HCI-176, No. 15, pp. 1-6, 2018.
- [6] IEC/TS 60479-1 Ed. 4.0: "Effects of current on human beings and livestock -Part 1: General aspects," *International Electrotechnical Commission*, 2005.
- [7] 嶋田琢磨, 七堂利幸: "Visual Analog Scale (VAS) 運用時における独立記入方式と非独立記入方式の比較", *鍼灸研究 Journal*, Vol. 1, No. 2, 2014.