



複合現実空間における痛覚提示に関する諸考察

Some Considerations on Displaying Pain Stimulation in Mixed Reality Space

片岡 佑太, 橋口 哲志, 柴田 史久, 木村 朝子
Yuta Kataoka, Satoshi Hashiguchi, Fumihisa Shibata, and Asako Kimura

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: 本研究では複合現実空間において痛覚提示を行うことにより, 表現力の向上を目指している。種々の触覚に関する研究の中で, 痛覚提示は振動覚や温冷覚ほど進んでおらず, あまり着目されていない。我々は, まず電気刺激を用いた痛覚提示装置を使用して, 前腕の痛覚強度を導き出す基礎実験を行った。次に, 痛覚におけるファントムセンセーション (PhS) の再現性を確認した。PhS が発生すれば, より少ない提示装置でより広域な提示が可能となる。また, 複合現実感技術により, 痛覚の PhS の提示位置付近に仮想物体を重畳描画することによって, 痛覚の知覚にどのような影響があるのかを確認する実験を行った。

キーワード: 複合現実感, 痛覚, ファントムセンセーション

1. はじめに

複合現実感 (Mixed Reality; MR) は現実世界と仮想世界を継ぎ目無く融合する技術である。我々はこれまでに MR 技術を積極的に活用し, 現実世界に仮想物体 (CG) が重畳描画された MR 型視覚刺激が触力覚に及ぼす影響について実験, 分析を行ってきた [1][2]。木村ら [1] は, 実物体と重心位置の異なる CG 画像を重畳描画した場合, 重心位置が MR 型視覚刺激に引きずられ, 知覚される重心位置が変化する錯覚現象を発見した。また, 平野ら [2] は, 硬さ知覚に注目し, MR 型視覚刺激による外観変化が硬さ知覚に影響することを確認した。

一方, 種々の触覚研究が行われる中で, 痛覚提示は振動覚や温冷覚ほど進んでいない。先行研究として荻野ら [3] は, 被験者に注射器のような痛さを想起させる写真を提示し, 痛覚に関与する脳の血流が上昇することを確認した。このことから, 視覚が痛覚に影響を及ぼす可能性は十分にあると考えられる。

そこで本研究では, MR 型視覚刺激を付与することで, 痛覚の知覚にどのような影響を及ぼすのか確認することを目指す。その第 1 歩として, 本稿では, 広い分野に活用できるように, 簡易な痛覚提示装置を利用し, これにファントムセンセーション (Phantom Sensation; PhS) の原理と MR 型視覚刺激を併用することで, より広範に痛覚提示が可能であることを確認する。

2. 痛覚提示方法の検討

2.1 刺激種類の選定

痛覚は, 温冷刺激, 機械刺激, 電気刺激など, 様々な要

因によって発生する。アート&エンターテインメント分野などで痛覚刺激を利用することを想定すると, その提示装置は, 以下のような条件を満たすことが望ましい。

- ・制御が容易である
- ・装置の着脱が簡便に済む
- ・自由に身体を動かすことができる

これらの条件を満たす痛覚提示方法として, 我々は電気刺激を利用する。電気刺激は提示する電流圧の制御が容易である。また, 電極を直接身体へ装着するだけなので, 簡易に取り外しができ, 固定型の装置と比べて自由に身体を動かすことが可能となる。しかし, 電極を身体の様々な部位に装着すると, 配線などが複雑になり, 断線など機器の破損に繋がる。加えて, 電極が多い分, 電流が 1 点に集中しやすくなり, 身体に悪影響を及ぼす問題点が挙げられる。そこで, 我々は痛覚における PhS の利用を検討した。

2.2 PhS の特性

PhS は皮膚上の 2 点を同時に刺激すると, その中間に 1 点の刺激として知覚される錯覚現象である。谷江ら [4] は, 電気刺激による PhS の発生を確認しており, この研究では, 上腕二頭筋上に電極を装着し, 定電流の刺激パルスを提示すると, 知覚される刺激位置が変化したことが確認されている。また, 新島ら [5] は, 振動刺激による PhS において, 前腕の 2 点に振動子を装着し, 拡張現実感技術を利用して視覚刺激を提示する実験を行っている。同研究では, 視覚を提示する位置によって, 知覚される振動 PhS の位置を制御可能であることが確認されている。

このように PhS に関する様々な研究が行われているが, 振動覚や温冷覚によるものが大半であり, 痛覚提示は触覚

研究の中でも未開拓である。特に痛覚における PhS や、MR 型視覚刺激が痛覚に及ぼす影響など、明らかになっていないことは多い。そこで、本研究では、痛覚においても PhS が発生するのか、MR 型視覚刺激が痛覚 PhS の発生にどのような影響を及ぼすのかについて、実験を通して明らかにする。痛覚 PhS の発生や、痛覚 PhS に MR 型視覚刺激が影響を及ぼすことを確認できれば、前節で挙げた問題点を解決する一つの手立てを、MR 空間における表現力の向上に繋がることを期待できる。

3. 実験の目的と環境

3.1 実験目的

実験は、痛覚刺激において PhS が発生するのか、PhS が発生するには、痛覚刺激の提示位置をどの程度離すことができるのか、そして MR 型視覚刺激が痛覚 PhS にどのような影響を与えるのかについて確認することを目的として実施する。そのために、まず予備実験で、痛覚 PhS の発生を検証する上で、前腕の部位による痛覚強度を確認する実験を行う。

3.2 実験環境

実験で使用するシステムの構成を図 1 に、痛覚を提示する装置に使用した部品と装置の概要を表 1、図 2 に示す。

実験で使った痛覚提示装置は、交流電源をコックロフト・ウォルトン回路 (CW 回路) で電圧の高い直流電源に変換し、この回路から流れる電流を入出力ボード (共立電子産業 RBIO-2U) を通してコンピュータ制御することにより実現した。長さ 10mm、幅 3mm の導線を通して皮膚に電流を流すことで痛覚を提示している。

また本実験では、MR 型視覚刺激を提示するためにビデオスルー型の HMD (Canon VH-2002) 及び MR 空間の管理用 PC (Canon MR Platform System) を用いる。HMD を装着することで、カメラの映像に重畳描画された MR 型視覚刺激 (CG) を見ることができる。被験者の頭部位置姿勢情報の取得には 3 次元磁気センサ (Polhemus 3SPACE FASTRAK) を使用した。

本実験で MR 型視覚刺激と触覚の融合を図るためには、HMD を装着した際に、容易に視認できる位置に痛覚を提示する必要がある。そこで、今回の実験では、視認が容易

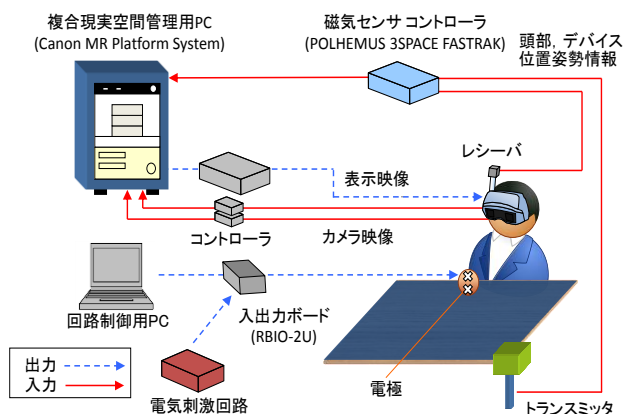


図 1 システム構成

な前腕 (腕の手首から肘までの部位) を対象とした。尚、実験では電気刺激を用いて痛覚を提示するが、被験者には実験を行う上で、電流による痛覚が生じるということについて事前に許可を得た。

また、種々の触覚は、視覚刺激に影響されることが知られている。他の視覚刺激による影響を抑えるため、実験を行う場所を暗幕で覆い、机の上にも実験で使用する実物体のみ配置した。

4. 予備実験

4.1 実験内容

まず基礎実験として、痛覚の提示部位によって感じ方に大きな差があるのかを検証するために、前腕の部位による痛覚の強度差を確認する実験を行った。実験は図 3 のように、前腕の 5 つの部位に対して、様々な強度の電気刺激 (表 2) を提示する。前腕に装着する 5 つの電極は、前腕の長さを l [mm] とすると、それを 4 等分した位置に配置する。装着した電極は、肘側から手首側に向かって順に部位 1 ~ 部位 5 とする。

電気刺激を提示することで、被験者が感じる痛さを定量

表 1 痛覚提示用回路に用いた部品

部品名	詳細
コンデンサ (C)	耐圧: 1000V, 容量: 1500pF
ダイオード (D)	順電圧: 1.1V, 順電流: 1 A 逆電圧: 1000V

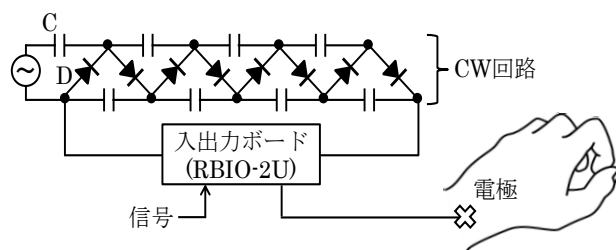


図 2 痛覚提示装置の仕組み

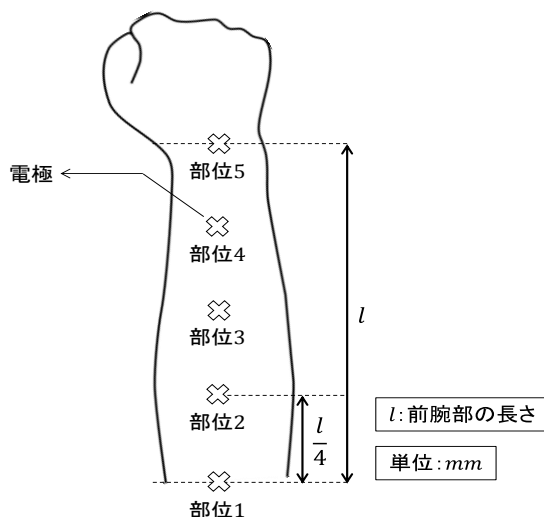


図 3 予備実験における電極の配置

表 2 実験で使用した電気刺激の種類

電気刺激の種類	電圧 (V)	電流 (mA)
刺激#1	30	0.2
刺激#2	70	0.6
刺激#3	110	1.0
刺激#4	150	1.4
刺激#5	190	1.8

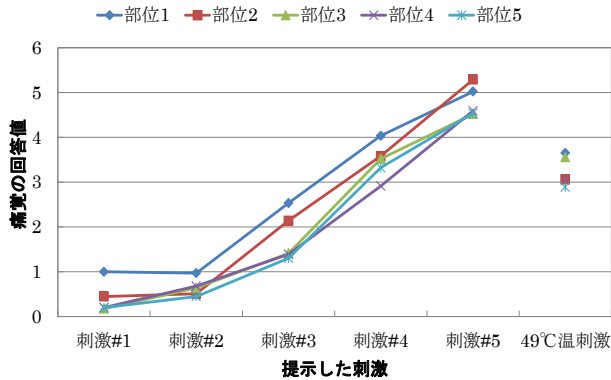


図 4 予備実験の結果

化するために、マグニチュード推定法を用いて、痛さを数値で回答させた。マグニチュード推定法とは、被験者にある種の刺激を提示し、その刺激の強さを数値によって回答させる方法である。今回は、痛みを感じなかったときは0と回答させ、痛みを感じた場合、痛みの度合いに応じた数値を回答させた。尚、回答する数値に上限は設けない。

また、電気刺激による痛みと比較するため、温度刺激による痛覚提示も行った。大峰ら [6] は前腕において、約47～49℃の温度を提示することで痛みを感じると報告している。温度刺激と電気刺激では、刺激の種類は異なるが、痛さという尺度は同じである。そこで、15mm×15mmのペルチエ素子（海渡電子）を、49℃まで上昇させたものを前述の前腕の5部位に接触させ、その時に感じた痛みの強さを同様に回答させた。

被験者は20代の成人9名で、実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者の前腕の長さを測定し、図3のように5つの部位を定める
- (2) 5種類の電気刺激（表2）を、5つの部位それぞれにランダムに提示し、その痛さを数値で回答させる。提示する時間は0.15秒間とした
- (3) 49℃のペルチエ素子を、5つの部位それぞれにランダムに提示し、同様に痛さを数値で回答させる。提示する秒数は2秒間とした

4.2 結果と考察

実験結果を図4に示す。図の縦軸は痛さの回答値の幾何学平均値、横軸は刺激の種類を表す。実験結果から以下の3つのことが分かった。

- 前腕の5部位に対する痛覚の感じ方に大きな差は無い
- 前腕の5部位に対して、刺激の強さと痛覚の回答値に

は相関がある

(iii) 49℃のペルチエ素子を接触させた際の回答値は、刺激#4を提示したときの電圧とほぼ同程度の値となる

(i) (ii) に関して、前腕の部位による刺激の強さと痛覚の回答値の相関係数 r は、全ての部位において $r > .82$ であり、両者には高い相関があることが分かった。また、刺激#1や刺激#2など、刺激強度が弱いときは、痛覚の回答値に大きな変化が見られなかった。これは、比較的弱い刺激では、被験者の皮膚の抵抗により、痛覚として知覚されにくかったためと考えられる。

(iii) に関して、温度刺激を用いて痛覚刺激を提示した場合は、刺激#4と同程度の回答値であった。文献 [6] で、49℃の温度を提示することで痛みを感じると報告されていることから、同程度の回答値となった刺激#4で、被験者は痛覚を感じていると考えられる。更に刺激の大きい刺激#5では、全被験者が、5つの部位すべてにおいて、49℃の温度刺激よりも高い値を回答しており、痛みを感じるというコメントもあったことから、本実験では、被験者が痛さを確実に知覚する刺激#5を使用することにする。

5. 本実験

5.1 実験内容

以下の3つの条件下で痛覚 PhS を提示し、痛覚において PhS が発生するかどうか、PhS が発生する場合、痛覚刺激間の距離との関係、更に、MR型視覚刺激を提示することで痛覚 PhS の発生に影響を及ぼすかを確認する。

- MR型視覚刺激がない状態で、「正面を注視」して痛覚 PhS を確認
- MR型視覚刺激がない状態で、「前腕を注視」して痛覚 PhS を確認
- MR型視覚刺激がある状態で、「前腕を注視」して痛覚 PhS を確認

本実験でも、被験者の前腕上の2点に電極を貼り、痛覚を提示する。予備実験で前腕の部位によって痛覚の感じ方に大きな差が見られなかったことから、本実験では、前腕の中心部分を基準に2つの電極を並置した。具体的には、図5のように前腕の長さを1[mm]とすると、肘側・手首側から1/2[mm]の距離が前腕における中心の位置となる。また、2点の電極の距離の離し方に関しては、中心から20mmずつ電極を離していき、電極の距離が、140mmになるまで離す。140mmに到達したら、逆に20mmまで距離を狭めていく。その際の、PhSの発生を確認すると共に、どの程度の距離まで PhS が発生するのかを測定した。MR型視覚刺激を提示する際、前腕の中心に提示する。

被験者は20代の成人10名で、実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者の前腕の中心位置を測定する
 - (2) 前腕の中心から、電極間の距離が20mmになる2箇所
- に電極を装着する
- (3) 電気刺激#5を提示し、被験者に PhS が発生したか回答させる。この際、実験条件 (a) (b) (c) でランダムに

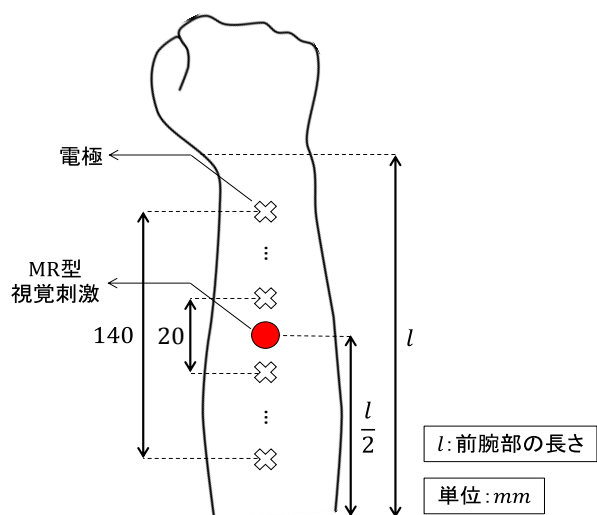


図5 本実験における電極の配置

実施する。(c)のMR型視覚刺激を提示する条件下では前腕の中心部に赤い球のCGを重畳描画する(図6)

- (4) 電極の位置を肘側・手首側にそれぞれ10mmずつ離し、電極間の距離が140mmとなるまで(3)を繰り返す
- (5) 次に、電極の位置を前腕の中心方向にそれぞれ10mmずつ近づけ、電極間の距離が140mmから20mmとなるまで、(3)を繰り返す

5.2 結果と考察

実験結果を図7に示す。図の縦軸は痛覚PhSが発生する確率、横軸は2つの電極間の距離を示している。実験結果から以下の3つのことが分かる。

- (i) 電極の距離が離れるほど、痛覚PhSは発生しにくい
- (ii) 40mmの距離までは、(a)(b)(c)いずれの条件でも、高い確率で痛覚を1点に知覚している
- (iii) MR型視覚刺激があると痛覚PhSが発生しやすい

(i) に関して、視覚刺激がない場合でも、電極間の距離が60~80mmまでであれば、痛覚PhSが30%以上の確率で発生していた。しかし、2点の電極が100mm以上離れると痛覚PhSはほとんど発生しなかった。電気パルスや振動の刺激では、提示する距離が離れるほどPhSが発生しにくく[4][5]、痛覚でも同様に提示距離が影響していると考えられる。

また、Weinsteinは、人間の前腕における2点弁別閾は40mmほどで、40mmまでは2点を刺激しても1点として感じる」と報告している[7]。(i)(ii)の結果から、痛覚に関しても同様の傾向を確認することができる。

また、視覚刺激が人間の触知覚に影響を与えることは既に知られているが、(iii)の結果から、痛覚に関しても、MR型視覚刺激を付与することで痛覚PhSの発生確率が上昇することを確認した。

6. むすび

本研究では、種々の触知覚の中でも痛覚に着目し、痛覚における基礎的な特性や痛覚PhSの発生について、実験・

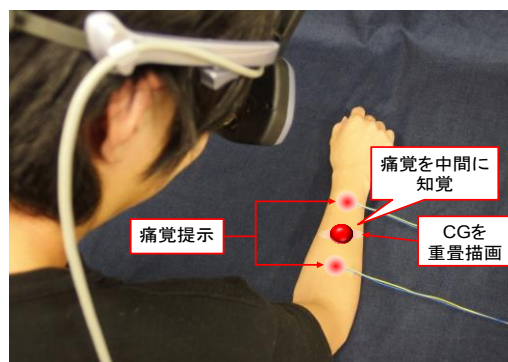


図6 本実験の様子

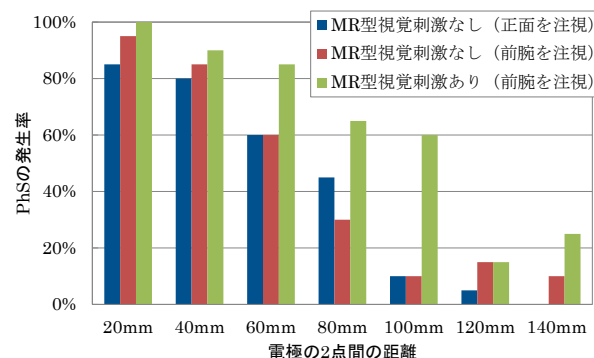


図7 本実験の結果

考察を行った。その結果、1) 電気刺激を用いた痛覚において痛覚PhSが発生すること、2) 痛覚PhSが発生する場合の電極間の距離、3) MR型視覚刺激を提示することで痛覚PhSの発生確率が上昇することを確認した。

今後は、痛覚PhSの知覚位置がMR型視覚刺激に誘導されるかに関しても調査を行う予定である。

本研究の一部は、科研費・基盤研究B「複合現実型視覚刺激が及ぼす触印象に関する研究」による。

参考文献

- [1] 木村朝子, 柚田明弘, 面迫宏樹, 柴田史久, 田村秀行: “Shape-COG Illusion: 複合現実感体験時の視覚刺激による重心知覚の錯覚現象”, 日本VR学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [2] 平野有一, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “Dent-Softness Illusion: 複合現実型視覚刺激による硬さ知覚への影響”, 同上, pp. 271 - 278, 2011.
- [3] 荻野祐一, 根本英徳, 斎藤繁, 後藤文夫, 乾幸二, 柿木隆介: “痛みの感情側面と痛覚認知”, JJSPC, Vol. 15, No. 1, pp. 1 - 6, 2008.
- [4] 谷江和雄, 舘暉, 小森谷清, 阿部稔: “電気パルス刺激における強度差ファントムセンセーション像の位置弁別特性”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 4, pp. 91 - 98, 1979.
- [5] 新島有信, 小川剛史: “拡張現実感における視覚刺激位置が触知覚位置に与える影響の分析”, 日本VR学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 73 - 78, 2012.
- [6] 大峰洋子, 青木千賀子, 伊藤典子, 岩田敦子, 岩田ゆかり, 大石理恵, 加藤智香子, 河上敬介, 辻井洋一郎: “386. 環境温度変化による皮膚痛覚閾値の変動”, 理学療法学, Vol. 17, p. 386, 1990.
- [7] S. Weinstein: “Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex, and laterality,” The Skin Senses, pp. 223 - 261, 1968.