

# 複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響

片岡 佑太\*<sup>1</sup> 橋口 哲志\*<sup>1</sup> 柴田 史久\*<sup>1</sup> 木村 朝子\*<sup>1</sup>

## Psychophysical Influence on Perception of Pain Stimulus by Visual Superimposition

Yuta Kataoka\*<sup>1</sup>, Satoshi Hashiguchi\*<sup>1</sup>, Fumihisa Shibata\*<sup>1</sup>, and Asako Kimura\*<sup>1</sup>

**Abstract --- Our study centers on providing tactile feedback in Mixed Reality (MR) environment. While most studies focus on the use of vibration and temperature to provide tactile feedback, vibration and temperature are not the only sensations a human can perceive. In this study, we focus on the psychophysical influence of MR visual stimulation on pain sensation. We conducted an experiment where we induce pain on the subject's forearm and display visual stimulation on a different position than where we induced the pain. We found out that the position where the subjects perceived pain, differs from the actual position according to the displayed visual stimulation.**

**Keywords: Mixed Reality, Pain Stimulation, Psychophysical Influence, Visual Stimulation**

### 1. はじめに

これまで複合現実感 (Mixed Reality; MR) 技術の研究やその応用の大半は、視覚的な MR の実現に向けられてきた。実物体や単純な触力覚デバイスを用い、視覚的に CG 画像を重畳描画することで MR 空間において触覚を利用した試みもある [1-3] が、これらはいずれも視覚的な MR の臨場感を向上させるための補助的な役割に留まっていた。

一方、人の触力覚は視覚からの刺激の影響を受けることが知られており、我々は MR 環境における実物体の外観変化 (以降、「MR 型視覚刺激」と呼ぶ) が触印象に与える影響について系統的に実験を行ってきた [4-9]。先行研究 [4][5] では、実物体に同形状のテクスチャ画像を重畳描画した MR 型視覚刺激が粗さの知覚に与える影響を検証し、実物体とは異なる材質の画像を MR 提示した場合、触覚的にもその素材感を与えることができることを示した。また、実物体に重心位置の異なる仮想物体を重畳描画することで重心を錯覚する現象 [6][7] や、硬さの異なる仮想物体を重畳描画することで硬さの変化を錯覚する現象 [8] などを発見した。

我々は、次なる試みとして痛覚に注目した。MR アトラクションにおける疑似体験として痛覚を導入することができれば、裂傷を負うことなく痛みを体験することができ、不快感や恐怖感への事前教示などに応用できる可能性もある。また、体感型ゲーム

などへの応用も期待できる。

現状、高い自由度で痛覚を提示するためには、身体のような部位に痛覚提示装置を装着する必要がある。しかし、体験者に取り付けることができる装置の数は有限であり、複数の痛覚提示装置を装着することによる物理的、心理的負担も考えられる。もし、MR 型視覚刺激によって痛覚刺激の知覚位置を制御することが可能であれば、少数の装置で広域に痛覚を提示することができるようになり、装着する痛覚提示装置の削減に繋がる。

我々は、このような考えのもと、痛覚を提示する MR アトラクションを試作し、2013 年 9 月 18 日～20 日に開催された「第 18 回 日本バーチャルリアリティ学会大会」(於グランフロント大阪) で技術展示を行った [10]。約 170 名が体験したこの MR アトラクションでは、図 1 に示すように蜂に襲われる感覚を疑似体験させるために、電気刺激による痛覚を提示した。このアトラクションでは痛覚における 2 点弁別閾の特性を利用して、3 か所に痛覚提示装置を装着し、体験者へは 5 か所の痛覚提示を行った。



図 1 技術展示の体験風景

Fig.1 A Scene from a Demonstration

\*1) 立命館大学大学院情報理工学研究所

\*1) Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

展示の結果、「装置を装着した 3 か所よりも多く刺された感覚があった」といったコメントが得られ、少ない痛覚提示装置で、より広域に痛覚を提示できることが示唆された。

ただし、MR 型視覚刺激が痛覚刺激にどのような影響を与えるかや、痛覚刺激における 2 点弁別閾の特性などについては、まだ不明な点が多い。通常、痛覚は明瞭な刺激であることが多く [11]、刺激位置の知覚精度も他の刺激と比べると、比較的高いといわれている。このため、痛覚は MR 型視覚刺激に影響を受けにくいという可能性がある。

そこで、本論文では、痛覚提示を行う際に MR 型視覚刺激を付与することで、痛覚の知覚位置にどの程度影響を及ぼすか、また、痛覚 2 点弁別閾内において視覚刺激を提示した場合の知覚位置への影響について確認する基礎実験を行う。以下、本稿ではこれらの実験、結果、考察に関して述べる。

## 2. 関連研究

痛覚は人間の皮膚感覚の一種であり、外部からの刺激に対する警告信号として伝達される防御機構の役割を担う。そのため、他の感覚機構と異なり、知覚は順応しないことが知られている [12]。そもそも痛覚は侵害刺激によって発生する発痛物質が自由神経終末に達することによって、痛覚と知覚されるが、痛覚に対する知覚特性やメカニズムに関して、明らかになっていないことも多い [13]。

痛覚の要因として、機械的な刺激の中でも強い圧迫や切る、刺すなどといった高閾値で生じる場合や、温度が一定の閾値を超えることによって生じる場合 [14]、化学刺激や電気刺激で生じる場合などがある。

医学分野では種々の研究がなされており、その研究の歴史は長い。また、VR 分野への応用についても取り組まれている。例えば、擬似的な痛覚を感じさせる研究として、Craig ら [15] によって発見された “Thermal Grill Illusion” が有名である。これは、温冷刺激を皮膚上に同時に提示することで擬似的な痛覚を感じるというものである。また、VR 技術を利用して痛覚を緩和する研究も行われている [16]。このように、痛覚に関わる種々の研究がなされているが、痛覚刺激の知覚位置を変化させる研究例は少ない。

痛覚はその刺激強度ゆえに、活発に神経活動が行われるため [17]、刺激種によっては知覚位置が明瞭であり、その精度が高いことが考えられる。そのため、痛覚刺激は MR 型視覚刺激に影響を受けにくいという可能性が危惧される。

MR 型視覚刺激による触知覚への影響を検討した

研究は我々の先行研究以外にもいくつか行われている。“TactoGlove” では、振動覚に CG を重畳し、仮想キャラクタの触感覚を再現している [18]。中原ら [19] は MR 技術と HMD を用い、実物体に角ばった仮想物体や丸みを帯びた仮想物体を重畳描画することで物体の知覚を変化できると報告している。また、Ban ら [20] は実物体に重畳描画する CG 画像の色が重さ知覚に影響することを明らかにしている。さらに、Niijima ら [21] は、前腕に振動子を装着し、拡張現実感を利用して被験者に視覚刺激を提示する実験を行っている。同研究では、振動の知覚位置が視覚刺激によって変化することが確認されている。

このように、MR 型視覚刺激を利用した視触覚融合は、触力覚に関して多く研究が行われているが、MR 型視覚刺激が痛覚刺激に及ぼす影響についてはまだほとんど確認されていない。

知覚される触刺激の位置をコントロールするその他の方法として、Békésy [22] によって発見された Phantom Sensation (PhS) が知られている。これは皮膚上の 2 点を同強度で同時に刺激することで、その中間に 1 点の刺激として知覚される錯覚現象であり、これまでに振動覚を中心として多くの研究が進められてきた [23-25]。

振動覚の他にも、電気刺激や温冷覚による PhS の研究も行われており、谷江ら [26] は電気刺激による PhS、Oohara ら [27] は温刺激による PhS について報告している。また、PhS の効果と視覚刺激を併用し、足裏に振動 PhS を発生させることで、プロジェクタで映された仮想的な床面の質感や傾斜などを表現する研究も行われている [28]。

我々の先行研究 [10] では、痛覚刺激による 2 点弁別閾の特性を利用しているが、MR 環境下での痛覚刺激の弁別閾や MR 型視覚刺激が与える影響などは明らかになっていない。

そこで、本研究では、痛覚刺激や MR 型視覚刺激を利用することで、知覚される痛覚の位置がどのように影響を受けるかを確認することを目指す。

## 3. 目的と実験準備

### 3.1 目的

実験 1 では、1 点に痛覚刺激を提示し、MR 型視覚刺激を提示することで痛覚の知覚位置が変化するかを確認する。また、実験 2 では、2 点に痛覚刺激を提示し、痛覚における 2 点弁別閾を確認する。

さらに、MR 型視覚刺激を提示したときに、1 点に痛覚刺激を提示する場合（実験 1）と 2 点に痛覚刺激を提示する場合（実験 2）で、違いがあるのかどうかを確認する。

表 1 痛覚提示回路に用いた部品  
Table 1 Components Used in the Pain Inducer Circuit

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

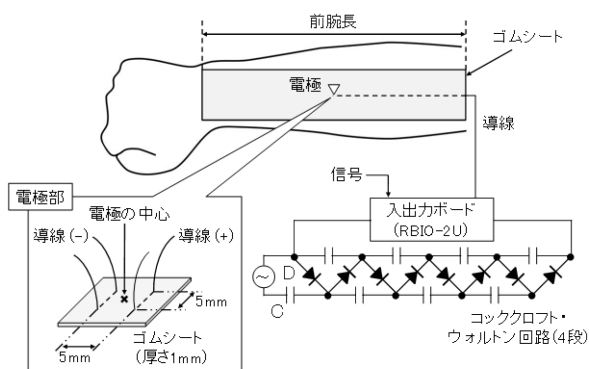


図 2 痛覚提示の仕組み

Fig.2 Mechanism of Pain Inducer

### 3.2 実験準備

#### 【痛覚刺激】

痛覚刺激と知覚される刺激のうち、皮膚に対する刺激には、熱、機械、化学、電気刺激など様々なものがある。ただし、MR空間で痛覚を活用するには、大型の装置や PHANToM [29], SPIDAR [30] などの接地型の装置は好ましくない。また、皮膚に裂傷を負うような刺激や、注射針のような皮膚侵入を許容するものは使用できない。

本研究では、これらの条件を満たす痛覚提示方法として、制御と装置の着脱が容易に可能となる電気刺激を採用した。

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。実験では電気刺激の発生装置として、コッククロフト・ウォルトン回路を用いて昇圧した電流を入出力ボード（共立電子産業, RBIO-2U）に通してコンピュータ制御した。

電極は、厚さ 1mm の黒色ゴムシートに穴を空け、導線（0.12mm 径, 10 芯）をこの穴に通して固定する。穴を空ける位置は、実験毎に異なっている。そして、導線に電流を流すことで、痛覚を提示する。電極付きのゴムシートは人の平均前腕長に近い縦 240mm, 横 50mm のものを使用し、ゴムシートの中央が前腕（橈骨点から橈骨茎突点間の有毛部）の中央と一致するように、また前腕に電極部が密着するように固定する。尚、被験者が電極の位置を予想できないように、電極の位置をテープで覆い隠している。

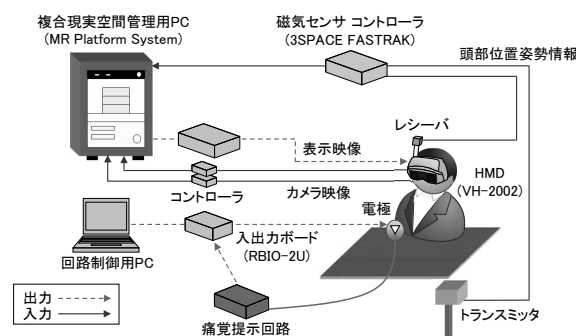


図 3 システム構成

Fig.3 Configuration of System

#### 【MR型視覚刺激】

痛みからイメージされる視覚刺激として、鋭利な針状の物体などが考えられるが、本論文では、まずは痛みを誘導しないシンプルな視覚刺激による影響から検討を始めることにした。よって、本実験で使用する MR 型視覚刺激には、注視しやすく、形状による影響の少ない直径 10mm の赤い球の仮想物体 (R: 255, G: 0, B: 0) を採用した。

#### 【実験装置・環境】

実験で用いる MR システムの構成を図 3 に示す。実験で使用するシステムは、ビデオスルー型 HMD (Canon, VH-2002) および MR Platform System である。体験者の頭部の位置姿勢情報は磁気センサ (POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK) から取得する。実験中は、被験者の腕を予め設定した位置に固定した。

実験では他の視覚刺激による影響を抑えるため、周囲を暗幕で覆い、被験者を椅子に着座させたうえで、机上には実験で使用する実物体のみ配置した。

尚、被験者には実験を行う前に口頭・文書によるインフォームドコンセントを行い、署名による承諾を得たうえで実験を行った。また、各実験間で 1 日以上以上の間隔を空けて行った。実験を実施する際は、事前に痛みに関する説明を十分に言い、テスト刺激を提示した後、不快感や嫌悪感がないかを聴取したうえで、細心の注意を払って実施した。

### 3.3 予備実験

#### 【実験目的と方法】

本実験で使用する痛覚刺激を決定するために、被験者が主観的に痛覚と感じる刺激強度を確認した。

予備実験で提示した電気刺激は、表 2 に示す 5 種類で、いずれもパルス幅 0.15 秒の人体に有害な生理的影響を与えない電気刺激 [31] である。表 2 中の電圧値は、図 2 のコッククロフト・ウォルトン回路に印加した電圧の値で、電流値は 1 名の被験者の前腕の中央で測定した参考値である。また電極は図 4 に示すように、被験者の前腕の中心 (0mm) を基準

表 2 実験で使用した電気刺激の種類  
Table 2 Types of Electrical Stimulation  
Used in the Experiment

電気刺激の種類	電圧 (V)	電流 (mA)	パルス幅 (sec)
刺激#1	160	0.2	0.15
刺激#2	200	0.6	
刺激#3	240	1.0	
刺激#4	280	1.4	
刺激#5	320	1.8	

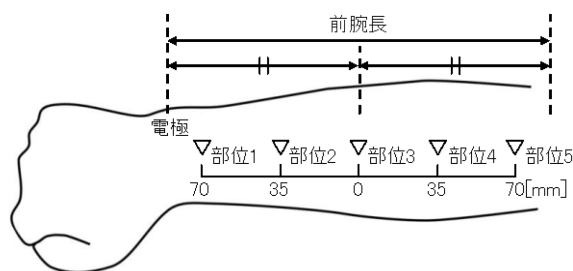


図 4 予備実験における電極 (痛覚刺激) の配置  
Fig.4 Electrodes Arrangement (Pain Stimulation)  
Used in the Preliminary Experiment

に 5 つの部位, 手首・肘側に各 70mm の範囲 (電極の中心間の距離: 35mm) で均等に配置した。

痛覚刺激は, 恒常法に基づき提示し, 被験者に痛覚を感じたか, 感じないかを回答させることで, 痛覚の閾値を調査した. 被験者は 20 代の男性 8 名で, 実験手順は以下の通り.

- (1) 被験者の右前腕 5 部位に電極を配置する (図 4)
- (2) 5 部位×5 種類の電気刺激 (表 2) の 25 パターンから 1 パターンをランダムに提示する
- (3) 被験者は痛覚を感じたか, 感じないかのいずれかを回答する
- (4) (2)(3) を 25 種類すべてのパターン×3 回の全 75 試行繰り返す

尚, 1 試行間の間隔は約 30 秒で, 以降の実験でも同条件である.

**【結果と考察】**

結果を図 5 に示す. 縦軸は, 部位毎に痛みとして知覚された割合の被験者平均と分散, 横軸は提示した刺激の種類 (強度) を示している.

図より, 以下の傾向が確認できる.

- ・前腕の 5 部位に対して刺激強度が強いほど痛覚を感じる割合が増える
- ・提示部位毎での, 痛覚と知覚される刺激強度の差はほとんどない

刺激強度が弱い場合 (刺激#1, #2) は痛みとして

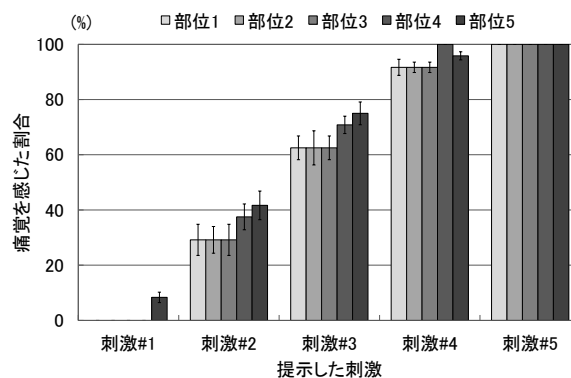


図 5 予備実験結果

Fig.5 Result of Preliminary Experiment

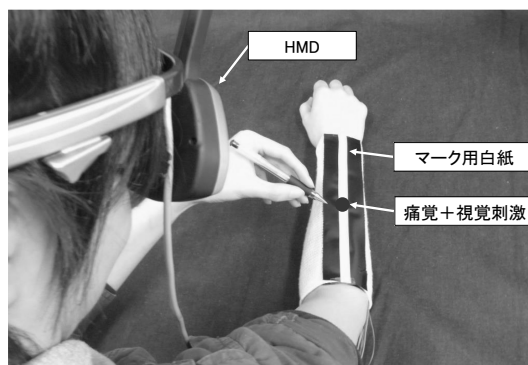


図 6 実験風景

Fig.6 Experimental Scene

知覚されにくかったが, 強い場合 (刺激#4, #5) ではほとんどの被験者が痛みを感じると回答しており, 「明らかに痛みを感じる」というコメントも多かった. 刺激#4 でも部位によらず 90%以上の被験者が痛みを感じていたが, 以降の実験では, 痛みを確実に提示することができる刺激#5 を痛覚刺激として使用する.

4. 実験 1: MR 型視覚刺激の痛覚知覚への影響

4.1 実験 1-1: 痛覚と視覚の提示位置が同じ場合

4.1.1 実験目的と方法

実験 1-1 では, 痛覚の提示位置と同位置に MR 型視覚刺激を提示した場合に, 痛覚の知覚精度がどのように変化するか確認する.

被験者には予備実験と同様の電極配置で, 5 部位にランダムに痛覚を提示する. その際, ゴムシートと同じ全長の白い紙をシート中央に付け, 痛覚を感じた位置をマークさせる. 実験条件は痛覚のみの場合と MR 型視覚刺激も提示する場合の 2 通り行った. MR 型視覚刺激は直径 10mm の赤い球の仮想物体である. 実験風景を図 6 に示す. 被験者は 20 代の男性 8 名で, 実験手順は以下の通り.

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 4)

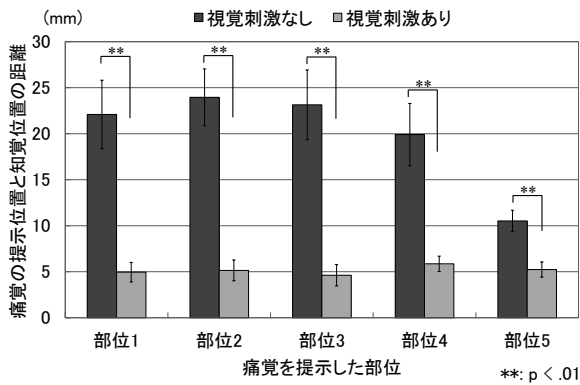


図7 実験 1-1 結果

Fig.7 Result of Experiment 1-1

- (2) 5 部位に刺激#5 をランダムに提示する
- (3) 被験者に痛覚を知覚した位置をマークさせる
- (4) 5 部位に対して、痛覚の提示位置と知覚位置の距離を 1 回ずつ計測する
- (5) (2)~(4) を 3 度繰り返す
- (6) 痛覚の提示位置と同位置に MR 型視覚刺激を提示し、(2)~(5) を行う

尚、MR 型視覚刺激を提示しない場合においても HMD を装着している。また、HMD を通して腕を見る際、頭部から腕を真下に見下ろすように視点位置を調整し、実験条件を統一した。

#### 4.1.2 実験結果と考察

結果を図 7 に示す。縦軸は提示した痛覚と被験者が知覚した痛覚の位置の距離の平均と分散を、横軸は痛覚を提示した部位を表す。図より、MR 型視覚刺激を提示しない場合は、提示位置から 10~25mm 程度の誤差が生じており、部位 5 の方が部位 1 よりも誤差が小さい。即ち、肘に近い方が手首に近い場合よりも痛覚知覚の精度が高いことがわかる。

一方、MR 型視覚刺激を同位置に提示した場合、5mm 程度まで誤差が減少し、知覚精度が向上している。MR 型視覚刺激の有無に対して t 検定を行ったところ、全ての部位において有意水準 1% の有意差が見られた。

### 4.2 実験 1-2：痛覚と視覚の提示位置が異なる場合

#### 4.2.1 実験目的と方法

MR 型視覚刺激を痛覚の提示位置と異なる位置に提示した場合に、知覚される痛覚の位置がどのように変化するか確認する。

実験 1-2 では、痛覚刺激は前腕の中心 (0mm) に提示し、MR 型視覚刺激を中心から 10~50mm ずらした位置に提示する (図 8)。そして、被験者に痛覚を知覚した位置をマークさせ、MR 型視覚刺激によって痛覚の知覚位置が変化するか確認する。尚、提示する MR 型視覚刺激および被験者によるマーク方

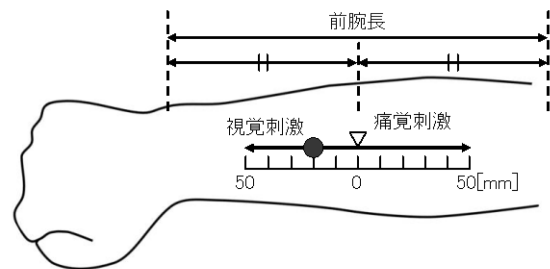


図8 実験 1-2 における電極 (痛覚刺激) の配置

Fig.8 Electrodes Arrangement (Pain Stimulation)

Used in the Experiment 1-2

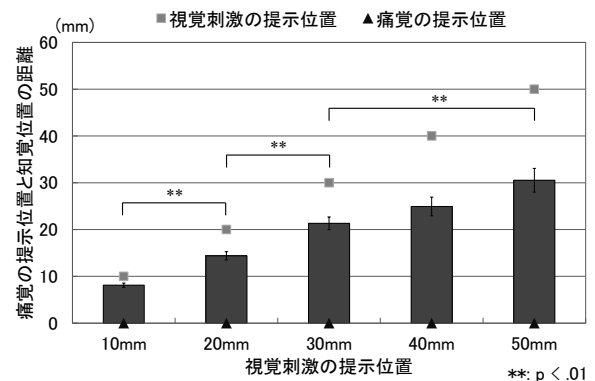


図9 実験 1-2 結果

Fig.9 Result of Experiment 1-2

法は実験 1-1 と同様である。被験者は 20 代の男性 7 名で、実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 8)
- (2) 刺激#5 の痛覚を前腕の中心に提示し、MR 型視覚刺激を前腕の中心から手首/肘側に 10, 20, 30, 40, 50mm ずらして (計 10 か所) 提示する。提示位置は、ランダムに決定する
- (3) 被験者に痛覚を知覚した位置をマークさせ、痛覚の提示位置と知覚位置の距離を計測する
- (4) 10 か所の視覚刺激提示位置につき、それぞれ 3 回ずつ (2)(3) を繰り返す

#### 4.2.2 実験結果と考察

結果を図 9 に示す。縦軸は提示した痛覚と被験者が知覚した痛覚の位置の距離の平均と分散を表す。横軸は視覚刺激の提示部位を表す。図より、知覚される痛覚位置が、MR 型視覚刺激に引きずられていることが確認できる。t 検定を行ったところ、視覚刺激の距離が 10mm と 20mm, 20mm と 30mm, 30mm と 50mm の間で、有意水準 1% の有意差が見られた。同じ痛覚に対して、視覚刺激の提示位置が 30mm までは 10mm 毎に視覚刺激による影響に有意差が見られたが、40mm 以降は 20mm 毎でしか有意差が見られなかった。このことから、痛覚の提示位置から視覚刺激の距離が 30mm を超えると、

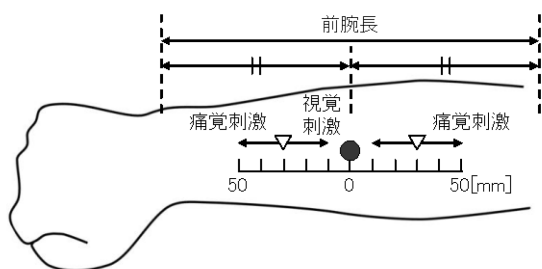


図 10 実験 2-1 における電極 (痛覚刺激) の配置  
**Fig.10 Electrodes Arrangement (Pain Stimulation)**  
 Used in the Experiment 2-1

MR 型視覚刺激の影響力が小さくなる可能性が示唆される。

## 5. 実験 2 : 痛覚 2 点弁別閾及び複合刺激の定位

### 5.1 実験 2-1 : 痛覚 2 点弁別閾の確認

#### 5.1.1 実験目的と方法

実験 2-1 では、2 点に提示された痛覚刺激が 1 点に知覚される痛覚 2 点弁別閾の条件を、MR 型視覚刺激がない場合とある場合について確認する。

実験は、2 点弁別閾を求める際に広く利用される極限法 [32] に基づき実施した。2 点に提示する痛覚刺激は、前腕中央を中心に、電極間の距離が 20, 40, 60, 80, 100mm となるように配置する (図 10)。MR 型視覚刺激は実験 1 と同様で、MR 型視覚刺激の提示位置は、前腕の中央とする。被験者は 20 代の男性 8 名で、実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 10)
- (2) 最初は、MR 型視覚刺激なしの条件で、電極間の距離が近い順 (20, 40, 60, 80, 100mm の順) に、刺激#5 の痛覚刺激を 2 点に提示する
- (3) 被験者は、各試行に対して痛覚を 1 点、2 点どちらに感じたかを回答する
- (4) 次に、電極間の距離が遠い順 (100, 80, 60, 40, 20mm の順) に順番を変えて、(3)を繰り返す
- (5) 更に、MR 型視覚刺激を前腕の中心に提示し、(2)~(4)を行う

尚、(5) については別日に実験を行った。また、実験 1-1 同様、MR 型視覚刺激を提示しない場合も被験者は HMD を装着し、実験条件を統一した。

#### 5.1.2 実験結果と考察

結果を図 11 に示す。縦軸は 2 点に提示された痛覚刺激を 1 点と知覚した確率の被験者平均と分散、横軸は 2 点の電極間の距離を表している。

図より、以下の傾向が得られた。

- ・ MR 型視覚刺激がない場合、60%以上の確率で痛みを 1 点と弁別する最大距離は 60mm となる
- ・ MR 型視覚刺激がある場合、60%以上の確率で痛

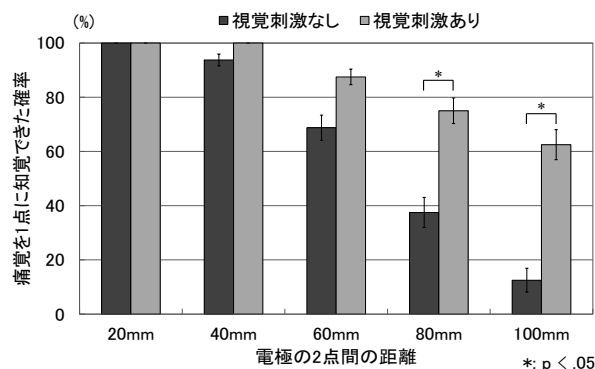


図 11 実験 2-1 結果

**Fig.11 Result of Experiment 2-1**

みを 1 点と弁別する最大距離は 100mm となり、2 点弁別閾は増大する

- ・ MR 型視覚刺激の有無によって、痛覚を 1 点に知覚した確率に有意差があるか t 検定を行ったところ、80mm と 100mm に有意水準 5% の有意差が見られた

以上より、MR 型視覚刺激を提示することによって、2 点弁別閾が増大することがわかった。

### 5.2 実験 2-2 : MR 型視覚刺激が痛覚定位に及ぼす影響

#### 5.2.1 実験目的と方法

実験 2-2 では、痛覚 2 点弁別閾内において、MR 型視覚刺激の提示位置を変更することで、痛覚の知覚位置が変化するか確認する。本実験での 2 点間の電極の距離は、実験 2-1 で MR 型視覚刺激の有無による有意差がなく、最長で提示できた 60mm とした。

実験では図 12 のように、前腕の中心を基準に電極間の距離が 60mm になる 2 点に痛覚刺激を提示する。その際、前腕の中心 (0mm) を基準に、手首/肘側に 10, 20mm の位置に MR 型視覚刺激をずらして提示する。提示する MR 型視覚刺激はこれまでの実験と同じである。被験者は 20 代の男性 7 名で、実験手順は以下の通り。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 12)
- (2) 2 点に刺激#5 の痛覚刺激を提示し、前腕の中心から手首/肘側にそれぞれ 0, 10, 20mm の位置 (計 5 か所) に MR 型視覚刺激を提示する。提示位置は、ランダムに決定する
- (3) 被験者は、各試行に対して痛覚を 1 点、2 点どちらに感じたかを回答する
- (4) 1 点に知覚した場合、位置をマークさせ、電極間の中心と痛覚の知覚位置の距離を計測する
- (5) 5 か所の視覚刺激の提示位置につきそれぞれ 3 回ずつ (2)~(4) を繰り返す

#### 5.2.2 実験結果と考察

知覚された痛覚位置の結果を図 13 に示す。縦軸は電極間の中心と知覚された痛覚位置との距離の平均

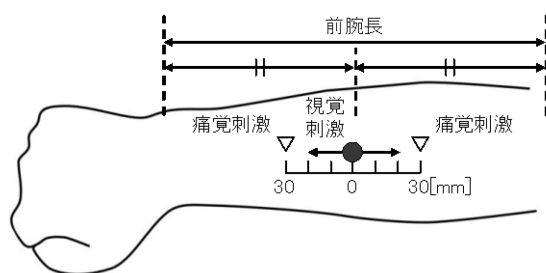


図 12 実験 2-2 における電極（痛覚刺激）の配置

Fig.12 Electrodes Arrangement (Pain Stimulation)

Used in the Experiment 2-2

と分散を表し、横軸は電極間の中心からの MR 型視覚刺激の距離を表す。尚、実験 2-2 で実施した全ての試行において痛覚を 2 点に感じる回答はなかった。

結果より、2 点の電極間の距離が 60mm のとき、今回実施した電極間の中心から 0~20mm の範囲では、知覚される痛覚位置が MR 型視覚刺激に大きく引きずられることがわかる。t 検定を行ったところ、視覚刺激の距離が 0mm と 10mm, 10mm と 20mm のときに有意水準 1% の有意差が見られ、20mm 以内であれば、MR 型視覚刺激による影響が有意に表れている。また、視覚刺激の提示位置が 0mm の場合の結果に注目すると、痛覚の知覚位置が視覚刺激の提示位置から数 mm ずれていることがわかる。これは 2 点弁別閾の錯覚精度の影響と考えられる。実験 2-2 と同じ触覚提示条件で視覚刺激を提示しない実験を別途行ったところ、痛覚の知覚位置は 2 点間の中心（実験 2-1 で視覚刺激を提示した位置）から 15mm 程度ずれていた。実験 2-2 では、視覚刺激を提示した結果、このずれが 5mm 未満と軽減された。

以上のことから、痛覚 2 点弁別閾内において、MR 型視覚刺激を加えることで、実験 1-2 とほぼ同程度の視覚誘導を行えることが確認できた。

## 6. 考察

今回の実験で利用した電気刺激による痛覚刺激およびその強度、前腕への提示という条件下での、本論文の実験結果をまとめると、以下のようになる。

- 実験 1-1 より、痛覚と同位置に MR 型視覚刺激を提示した場合は、痛覚を提示した位置の知覚精度が向上する
- 実験 1-2 より、痛覚刺激を 1 点に提示し、MR 型視覚刺激を痛覚の提示位置からずらして提示した場合、知覚される痛覚の位置が視覚刺激に引きずられる。ただし、30mm より遠く離すと、MR 型視覚刺激の影響が徐々に小さくなる
- 実験 2-1 より、痛覚刺激のみ 2 点に提示した場合は、2 点間の距離が 60mm 以内であれば痛覚

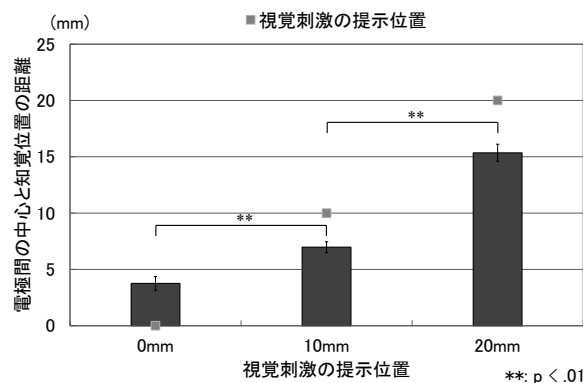


図 13 実験 2-2 結果

Fig.13 Result of Experiment 2-2

を 1 点に高い確率で知覚する。また、MR 型視覚刺激を提示することで、この 2 点間の距離は 80~100mm まで拡大する

- 実験 2-2 より、痛覚 2 点弁別閾内において、MR 型視覚刺激を提示すると、知覚される痛覚の位置が視覚刺激に引きずられる

実験 1, 2 より、刺激位置が明瞭な痛覚では、視覚刺激による影響を受けにくいという当初の予想に反して、MR 型視覚刺激による痛覚刺激の知覚に影響が見られた。また、実験 1-2, 2-2 では別々の方法で痛覚の知覚位置を変化させることを試みたが、その結果、1 点に痛覚を提示する場合でも、2 点に痛覚を提示する場合でも、MR 型視覚刺激を提示することで、痛覚の知覚位置の変化を同様に確認した。

## 7. むすび

本研究では、種々の皮膚感覚の中で痛覚に着目し、MR 型視覚刺激が及ぼす痛覚の知覚位置への影響について実験、考察を行った。その結果、以下の 3 点を確認した。

- 刺激位置の知覚精度が高いといわれている痛覚においても、MR 型視覚刺激に誘導される
- MR 型視覚刺激を提示することで痛覚 2 点弁別閾が増大する
- MR 型視覚刺激を提示することで痛覚 2 点弁別閾の定位位置に影響を及ぼす

今後は、痛覚強度、提示方法の変更による痛覚知覚や痛覚 2 点弁別閾への影響の考察、振動や温度など、他の触覚刺激との比較、針のような痛みを連想する視覚刺激の導入について研究を進める予定である。

## 謝辞

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」、科研費・若手研究 B「複合現実空間における痛覚・温冷覚提示に関する研究」による。

## 参考文献

- [1] 大島登志一, 山本裕之, 田村秀行: “実体触知機能を重視した複合現実感システムー自動車インテリア・デザイン検証への応用ー”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 79 - 87, 2004.
- [2] 石黒祥生, 大槻麻衣, 比嘉恭太, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “Watch the Birdie!ー三感融合型複合現実感アトラクション”, 同上, Vol. 12, No. 3, pp. 259 - 268, 2007.
- [3] H. Tamura, H. Yamamoto, and A. Katayama: “Mixed reality: Future dreams seen at the border between real and virtual worlds,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 64 - 70, 2001.
- [4] 家崎明子, 杉田明弘, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実型視覚刺激による触印象への影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 2, pp. 129 - 139, 2008.
- [5] 鍵本麻美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実型視覚刺激と聴覚刺激が触印象に与える影響ー産業応用システムでの利用を想定した評価ー”, 同上, Vol. 14, No. 3, pp. 325 - 333, 2009.
- [6] 木村朝子, 杉田明弘, 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”, 同上, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [7] 面迫宏樹, 木村朝子, 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 (第2報)”, 同上, Vol. 18, No. 2, pp. 117 - 120, 2013.
- [8] 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, Vol.16, No. 2, pp. 271 - 278, 2011.
- [9] 中尾仁志, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “複合現実型視覚刺激が熱ファントムセンセーションに与える影響に関する研究”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-16-11, p. 217, 2013.
- [10] 片岡佑太, 中西雄大, 斉藤純哉, 橋口哲志, 木村朝子, 柴田史久: “Hornet Attacks!ー痛覚刺激を導入した複合現実感アトラクションー”, 第18回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33D-3, pp. 592 - 593, 2013.
- [11] 熊本栄一, 藤田亜美: “末梢から脊髄後角へ入力する痛み情報の制御: シナプス伝達と神経伝導の修飾”, 日本疼痛学会誌, Vol. 26, No. 4, pp. 197 - 214, 2011.
- [12] C. R. Chapman, K. L. Casey, R. Dubner, K. M. Foley, R. H. Gracely, *et al.*: “Pain measurement: an overview,” *Pain*, Vol. 22, No. 1, pp. 1 - 31, 1985.
- [13] 岩村吉晃: “タッチ(神経心理学コレクション)”, 医学書院, 2001.
- [14] A. Dhaka, V. Viswanath, and A. Patapoutian: “Trp ion channels and temperature sensation,” *Annual Review of Neuroscience*, Vol. 29, pp. 135 - 161, 2006.
- [15] A. D. Craig and M. C. Bushnell: “The Thermal Grill Illusion: Unmasking the burn of cold pain,” *Science*, Vol. 265, No. 5169, pp. 252 - 255, 1994.
- [16] K. Sato, S. Fukumori, T. Matsusaki, T. Maruo, S. Ishikawa, H. Nishie, *et al.*: “Nonimmersive virtual reality mirror visual feedback therapy and its application for the treatment of complex regional pain syndrome: An open-label pilot study,” *Pain Medicine*, Vol. 11, No. 4, pp. 622 - 629, 2010.
- [17] E. D. Adrian: “The basis of sensation: The action of the sense organs,” *Christophers*, 1928.
- [18] H. Sawada, Chang'an Jiang, and H. Takase: “TactoGlove - Displaying tactile sensations in tacto-gestural interaction -,” *Proc. ICBAKE 2011*, pp. 216 - 221, 2011.
- [19] 中原守勇, 北原格, 大田友一: “複合現実感における視覚と触覚の融合効果を利用した物体形状提示に関する実験的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1, pp. 25 - 36, 2008.
- [20] Y. Ban, T. Narumi, T. Fujii, S. Sakurai, J. Imura, T. Tanikawa, *et al.*: “Augmented Endurance: Controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality,” *Proc. CHI 2013*, pp. 69 - 78, 2013.
- [21] A. Nijijima and T. Ogawa: “Influence analysis of visual stimuli on localization of tactile stimuli in augmented reality,” *Proc. VR 2012*, pp. 105 - 106, 2012.
- [22] G. von Békésy: “Neural funneling along the skin and between the inner and outer hair cells of the cochlea,” *Acoustical Society of America*, Vol. 31, No. 9, pp. 1236 - 1249, 1959.
- [23] D. S. Alles: “Information transmission by phantom sensations,” *Trans. on Man-machine Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 85 - 91, 1970.
- [24] A. Barghout, J. Cha, A. El Saddik, J. Kammerl, and E. Steinbach: “Spatial resolution of vibrotactile perception on the human forearm when exploiting funneling illusion,” *Proc. HAVE 2009*, pp. 19 - 23, 2009.
- [25] L. Rahal, J. Cha, A. E. Saddik, J. Kammerl, and E. Steinbach: “Investigating the influence of temporal intensity changes on apparent movement phenomenon,” *Proc. VECIMS 2009*, pp. 310 - 313, 2009.
- [26] 谷江和雄, 舘暲, 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.
- [27] J. Oohara, H. Kato, Y. Hashimoto, and H. Kajimoto: “Presentation of positional information by heat phantom sensation,” *Proc. EuroHaptics 2010*, pp. 445 - 450, 2010.
- [28] 白井暁彦, 佐藤勝, 草原真知子, 久米祐一郎: “足インターフェイスによる複合現実感アミューズメントシステム: ファンタスティックファントムスリッパ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 4, pp. 691 - 698, 1999.
- [29] T. H. Massie and J. K. Salisbury: “The PHANToM haptic interface: A device for probing virtual objects,” *Proc. ASME Winter Annual Meeting Symp. on Haptic Interfaces*, Vol. 55, pp. 295 - 299, 1994.
- [30] M. Sato: “Development of string-based force display: SPIDAR,” *Proc. VSMM 2002*, pp. 1034 - 1039, 2002.
- [31] IEC/TS 60479-1 Ed. 4.0: “Effects of current on human beings and livestock –Part 1: General aspects,” 2005.
- [32] A. Nicotra and PH. Ellaway: “Thermal perception thresholds: assessing the level of human spinal cord injury,” *Spinal Cord*, Vol. 44, pp. 617 - 624, 2006.

(2013年12月17日受付)



[著者紹介]

片岡 佑太 (学生会員)



2014年立命館大学情報理工学部情報コミュニケーション学科卒。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。複合現実型視覚刺激が触印象に与える影響に関する研究に従事。本学会学術奨励賞受賞。

橋口 哲志 (正会員)



2005年職業能力開発総合大学校福祉工学科卒業。2007年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士前期課程修了。2013年九州大学大学院芸術工学府博士後期課程修了。現在、立命館大学情報理工学部メディア情報学科特任助教。触覚ディスプレイ、バーチャルリアリティ、複合現実感の研究に従事。博士(工学)。本学会論文賞受賞。

柴田 史久 (正会員)



1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て、2003年4月より立命館大学理工学部助教授。同大学情報理工学部准教授を経て、現在、同教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング、複合現実感等の研究に従事。本学会複合現実感研究委員会幹事。IEEE、電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会等の会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。

木村 朝子 (正会員)



1996年大阪大学基礎工学部卒。1998年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手、立命館大学理工学部助教授、科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て、2009年4月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。現在、同教授。博士(工学)。実世界指向インタフェース、複合現実感、ハプテックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会、情報処理学会、ヒューマンインタフェース学会、ACM、IEEE各会員。本学会学術奨励賞・論文賞、ヒューマンインタフェース学会論文賞、情報処理学会山下記念研究賞等受賞。