

複合現実型視覚刺激による触印象への影響 ～痛覚への影響～

片岡 佑太^{*1} 橋口 哲志^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

Psychophysical Influence on Tactual Impression by Mixed-Reality Visual Stimulation

--- Psychophysical Influence on Pain Stimulation ---

Yuta Kataoka^{*1}, Satoshi Hashiguchi^{*1}, Fumihisa Shibata^{*1}, and Asako Kimura^{*1}

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

近年、「人工現実感 (Virtual Reality; VR)」の分野において、触覚提示技術は目覚ましい発展を遂げてきた。一方、VR の発展形である「複合現実感 (Mixed Reality; MR)」の分野においても、触覚提示に関する研究が盛んに行われている。MR 空間では触覚提示部に仮想物体 (CG) を実時間で重畳描画でき、視触覚融合の効果を得ることができる[1]。例えば、“TactoGlove”では振動刺激部に CG キャラクターを重畳描画し、CG キャラクターだけを動かすと、追従して触覚刺激を感じる[2]。このように仮想空間と実空間の組み合わせによって、新たな表現が可能であり、その中でも触覚刺激は振動刺激を用いた事例が多い[2][3]。振動刺激の提示方法として、錯覚現象の 1 つであるファントムセンセーション (PhS; Phantom Sensation) がよく用いられ、これは皮膚上の 2 点を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現象である。この現象に、視覚刺激を組み合わせると、触覚刺激の知覚位置が変化することが報告されており[4]、視覚刺激を用いることで、触覚刺激が実在しない場所でも提示できることがわかっている。

しかし、PhS は振動刺激だけでなく、電気刺激や温冷刺激でも確認されており[5][6]、これらの触覚刺激も視覚刺激を用いることで提示領域を拡張できる

可能性がある。そこで、我々は温冷刺激において視覚刺激による影響を検証し、振動 PhS と同様に視覚刺激による知覚位置の変化を確認した[7]。この先行研究において対外発表を行ったところ、温冷刺激と密接に関連する痛覚においても同様の現象が起こるのかという意見を得た。通常、痛覚は明瞭な刺激であることが多く[8]、視覚刺激によって影響を受けにくい可能性がある。また、疑似体験において痛覚を導入することによって、裂傷を負うことなく痛みを学習することができ、不快感や恐怖感への事前教示などにも応用できる可能性がある。

そこで、まず視触覚融合の効果を簡易的に確認するために、MR アトラクションとして痛覚を用いた[9]。この MR アトラクションでは、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提示を行った (図 1)。電気刺激は温冷刺激同様に PhS が起こる刺激の 1 つであり[5]、痛覚提示が可能な刺激である。また、蜂のような局所的な痛みに類似し



図 1 技術展示の体験風景

Fig.1 A Scene from a Demonstration

*1 立命館大学情報理工学部

*1 College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

た刺激を提示できる。そこで、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)で技術展示を行い、約170名が我々のMRアトラクションを体験した。体験者の感想として、「痛覚提示部より多く刺された感覚があった」や「蜂のCGが痛さを増幅させている」という意見を得た。このことから、視覚刺激によって提示領域を拡張するだけでなく、痛さも増幅する可能性がある。

よって、本研究ではこれらの知見を深める第一歩として、視覚刺激による痛覚の提示領域の拡張性に着目し、系統的実験によって明らかにする。

2. 目的と実験準備

2.1 目的と実験対象

実験は、皮膚上の1点または2点に痛覚を提示する実験を行う。1点に痛覚を提示する実験では、痛覚の知覚位置が視覚刺激で変化するか確認する。また、2点に痛覚提示する実験では、痛覚においてPhSが発生するのか、PhSが発生するならば、2点の提示位置をどの程度離すことができるのか、そして視覚刺激によってPhSの知覚位置が変化するか確認する。これらの実験を行うため、まず予備実験で痛覚となる刺激を決定する実験を行う。

2.2 刺激種類の検討

痛覚のうち、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。MR空間で痛覚を活用するには、大型の装置や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。これらの条件を満たす痛覚提示方法として、制御が容易であり、電極を容易に着脱可能である電気刺激を採用した。

2.3 実験環境

実験で利用したシステムの構成を図2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3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。また、図3に示すような厚さ1mmの黒色ゴムシートに穴をあけ、導線(0.12mmφ, 10芯)を通した。そして、導線に電流を流すことによって痛覚を提示している。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の中央と一致するように装着する。その際に腕に電極部が密着するように固定した。尚、被験者が電極の位置を予想できないように、電極の位置を隠した。

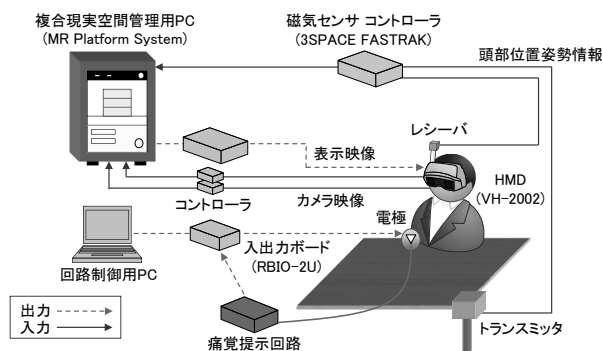


図2 システム構成

Fig.2 Configuration of System

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: 1A 逆電圧: 1000V

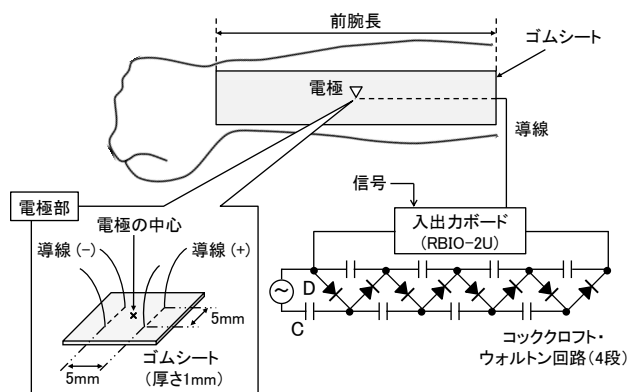


図3 痛覚提示の仕組み

Fig.3 Mechanism of Pain Inducer

視覚刺激を提示するうえで、ビデオスルー型のHMD(Canon, VH-2002)及び、MR空間の管理用コンピュータ(Canon, MR Platform System)を用いた。また、HMDの位置姿勢情報の取得には磁気センサ(POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK)を用いた。これによってトランスミッタとHMDの相対的な位置姿勢情報を取得し、視覚刺激の提示位置の調整を行った。

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。

3. 予備実験

3.1 実験内容

予備実験として、被験者が主観的に痛覚と感ずる刺激を決定する。実験では、被験者に刺激を提示するうえで、電極を前腕の中心(0mm)を基準に、手首・肘側に各70mmの範囲(電極の中心間の距離:

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	

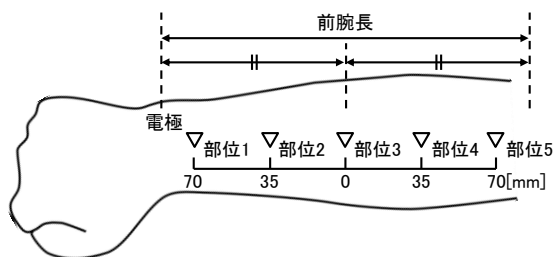


図 4 予備実験における電極の配置

Fig.4 Electrodes Arrangement Used in the Preliminary Experiment

35mm) で均等に配置した (図 4). そして, 前腕 (橈骨点から橈骨茎突点間の有毛部) の中央で測定した 5 種類のパルス状の電気刺激 (表 2) を提示する. 恒常法に基づいて刺激を提示し, 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である.

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 4)
- (2) 5 部位に 5 種類の電気刺激 (表 2) 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で回答する
- (4) (2), (3) を 3 度繰り返す

尚, 1 試行間の間隔は約 30 秒であり, 以降の実験においても同条件である.

3.2 実験結果と考察

結果を図 5 に示す. 縦軸は部位毎の痛覚を知覚した割合を示し, 横軸は提示した刺激の種類を示す. 結果から以下の傾向が得られた.

- (i) 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
- (ii) 前腕の 5 部位に対する痛覚の感じ方に大きな差は無い

刺激#1, #2 など, 刺激強度が弱いときは痛覚が知覚されにくい傾向があった. しかし刺激#4, #5 では多くの被験者が痛覚を感じており, 明らかに痛覚を

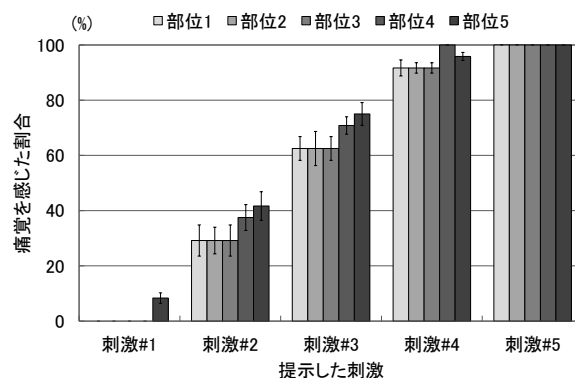


図 5 予備実験の結果

Fig.5 Result of Preliminary Experiment

感じるというコメントも多かった. 刺激#4 ではいずれの部位においても 90%以上の被験者が痛覚を感じているが, 本実験では, 被験者が痛覚を確実に知覚する刺激#5 を痛覚刺激として使用する.

4. 本実験

4.1 実験 1: 痛覚に対する触知覚精度の検証

4.1.1 実験内容

実験 1 では, 視覚刺激を痛覚の提示位置と同位置に提示することで, 痛覚の知覚精度が向上するか検証した. 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記入させた. 実験条件は痛覚のみの場合と視覚刺激を用いた場合の 2 通り行った. 視覚刺激は直径 10mm の赤い球の CG (R: 255, G: 0, B: 0) を痛覚の提示位置と同位置 (電極の中心と球の中心を合わせる) に提示した. 視覚刺激は注視しやすい赤色で, 形状による影響をできるだけ無くすために球とした. 被験者は 20 代の男性 8 名で, 実験手順は以下の通りである.

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 4)
- (2) 5 部位に刺激#5 をランダムに提示する
- (3) 痛覚の知覚位置をマークさせ, 痛覚の知覚位置と提示位置との距離を計測する
- (4) 5 部位に対して 1 回ずつ測定後, (2), (3) を 3 度繰り返す
- (5) (4) の後, 痛覚の提示位置と同位置に視覚刺激を提示し, (2)~(4) を行う

尚, 視覚刺激を提示しない場合においても HMD を装着した. 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

結果を図 6 に示す. 縦軸は痛覚の提示位置と知覚位置との距離を示し, 横軸は痛覚を提示した部位を

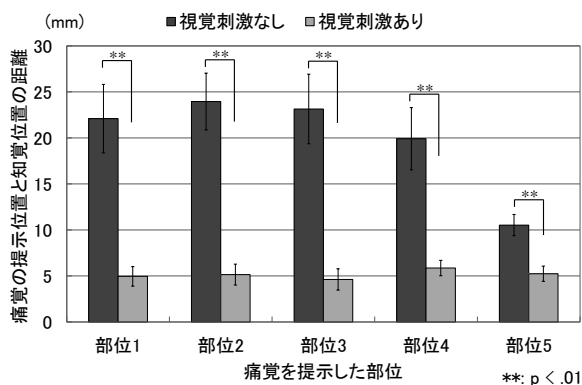


図 6 実験 1 結果

Fig.6 Result of Experiment 1

示す。結果から、視覚刺激を提示しない場合は、提示位置から 10~25mm 程度の距離が生じていたが、視覚刺激を同位置に提示した場合、5mm 程度まで距離が減少し、知覚精度が向上した。視覚刺激の有無によって、痛覚の提示位置と知覚位置との距離に有意差があるか 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。これにより、痛覚の提示位置と同位置に視覚刺激を提示することで、痛覚の知覚精度が向上することがわかった。

4.2 実験 2: 視覚刺激が痛覚の知覚位置に及ぼす影響

4.2.1 実験内容

実験 2 では前腕の中心に痛覚を提示すると同時に、視覚刺激を中心から 10~50mm の位置に提示する (図 7)。そして、被験者に痛覚を知覚した位置をマークさせ、視覚刺激によって痛覚の知覚位置をどの程度変化させることが出来るか検証した。尚、提示する視覚刺激やマーク方法は実験 1 と同条件である。被験者は 20 代の男性 7 名で、実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 7)
- (2) 前腕の中心に刺激#5 の痛覚を提示し、同時に中心から手首・肘側の 10, 20, 30, 40, 50mm の位置に視覚刺激をランダムに提示する
- (3) 被験者に痛覚の知覚位置をマークさせ、痛覚の提示位置と知覚位置の距離を計測する
- (4) (2), (3) を 3 度繰り返す

4.2.2 実験結果

結果を図 8 に示す。縦軸は痛覚の提示位置と知覚位置の距離を示し、横軸は前腕の中心からの視覚刺激の距離を示す。結果から、以下の傾向が得られた。

- (i) 視覚刺激と痛覚を提示した位置が近い場合、視覚刺激の方に知覚位置が変化しやすい
 - (ii) 視覚刺激と痛覚を提示した位置が遠い場合、視覚刺激の方に知覚位置が変化しにくい
- (i) に関しては、視覚刺激による錯覚が発生したこ

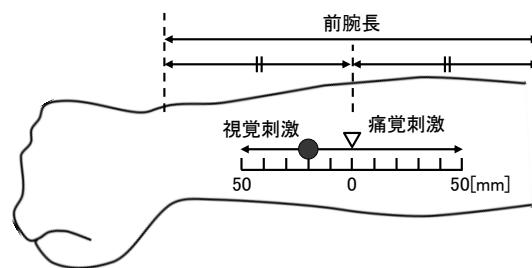


図 7 実験 2 における電極の配置

Fig.7 Electrodes Arrangement Used in the Experiment 2

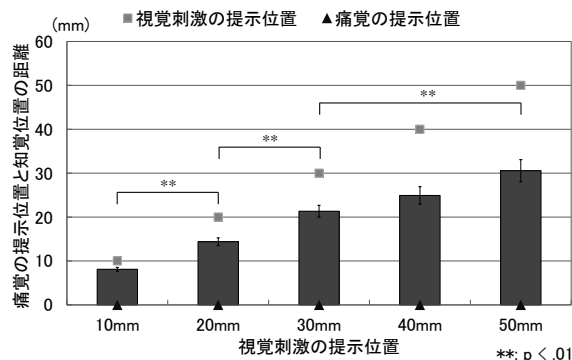


図 8 実験 2 結果

Fig.8 Result of Experiment 2

とを示しており、視覚刺激を提示した位置に近いほど、この傾向が顕著に見られた。また (ii) に関しては、痛覚の提示位置と視覚刺激の位置の齟齬が大きくなったことにより、知覚統合において視覚への信頼度が下がり、視覚に依存しづらくなったためと考えられる [10]。

視覚刺激の位置によって、痛覚の提示位置と知覚位置の距離に有意差があるか 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 のときに有意水準 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。しかし、40mm からは 20mm 毎でしか視覚刺激による有意な傾向が見られなかった。このことから、痛覚の提示位置から視覚刺激を 30mm より遠く離すと、視覚刺激の影響力が小さくなることを確認できた。

4.3 実験 3: 視覚刺激が PhS の知覚に及ぼす影響

4.3.1 実験内容

実験 3 では痛覚 PhS における視覚刺激の影響を検証する。まず 2 点に痛覚を提示するが、前腕の中心を基準に、2 点の電極間の距離が 20, 40, 60, 80, 100mm になる位置に電極を配置し、痛覚を提示した (図 9)。実験条件は視覚刺激がない場合とある場合で行い、痛覚 PhS の発生を確認した。尚、視覚刺

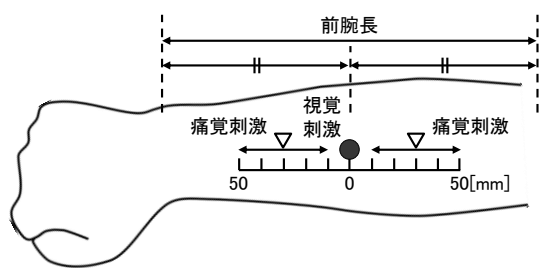


図 9 実験 3 における電極の配置

Fig.9 Electrodes Arrangement Used in the Experiment 3

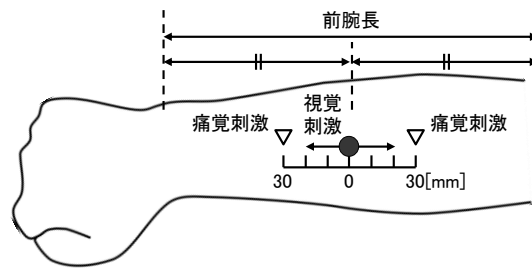


図 11 実験 4 における電極の配置

Fig.11 Electrodes Arrangement Used in the Experiment 4

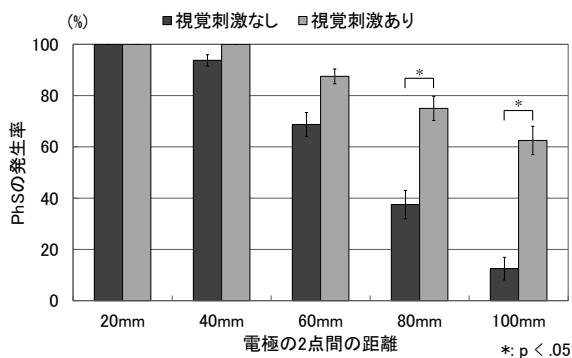


図 10 実験 3 結果

Fig.10 Result of Experiment 3

激の種類は実験 1 と同じ CG を提示する。被験者は 20 代の男性 8 名で、実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 9)
- (2) 電極間の距離が 20, 40, 60, 80, 100mm の順で 2 点に刺激#5 の痛覚を提示し、被験者に痛覚を 1 点か 2 点のどちらに感じたか回答させる
- (3) 反対に 100, 80, 60, 40, 20mm の順で 2 点に刺激 #5 の痛覚を提示し、同様に痛覚を 1 点か 2 点のどちらに感じたか回答させる
- (4) 痛覚提示と同時に、視覚刺激を前腕の中心に提示し、(2), (3) を行う

尚、(4) については別日に実験を行った。また、実験 1 と同様、視覚刺激を提示しない場合においても HMD を装着し、実験条件を統一した。

4.3.2 実験結果

結果を図 10 に示す。縦軸は痛覚 PhS が知覚された確率、横軸は 2 点の電極間の距離を表している。結果から以下の傾向が得られた。

- 視覚刺激を提示しない場合、60mm 程度の距離までは痛覚 PhS を知覚しやすい
- 視覚刺激を提示する場合、100mm 程度の距離までは痛覚 PhS を知覚しやすい

(i) に関して、提示する刺激が痛覚の場合でも、電極間の距離が 60mm 以内であれば、痛覚 PhS を 60% 以上の確率で知覚した。しかし、2 点の電極間の距離が 80mm 以上の場合は、痛覚 PhS がほとんど知

覚されなかった。これは実験 2 の結果と同様に、視覚刺激の位置と電極間の距離の齟齬が大きくなったためと考えられる。(ii) に関しては、視覚刺激を提示することで痛覚 PhS を知覚できる距離や知覚率が向上した。視覚刺激の有無によって、PhS の知覚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。このことから、視覚刺激を付与することによって、痛覚 PhS の知覚率を向上することがわかった。

4.4 実験 4: 視覚刺激が PhS の知覚位置に及ぼす影響

4.4.1 実験内容

実験 4 では、痛覚 PhS を発生させた際に、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検証した。実験 4 において痛覚 PhS を発生させる 2 点間の電極の距離は、実験 3 で視覚刺激の有無による有意差が無く、最長で提示できる 60mm を電極間の距離とした。

実験では図 11 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 の位置に視覚刺激を同時に提示した。提示する視覚刺激の種類やマーク方法は実験 1 と同条件である。被験者は 20 代の男性 7 名で、実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者の右前腕に電極を配置する (図 11)
- (2) 2 点に刺激#5 の痛覚を提示し、痛覚 PhS を発生させると同時に、0, 10, 20mm の位置にランダムに視覚刺激を提示する
- (3) 被験者に痛覚の知覚位置をマークさせ、電極間の中心と知覚位置の距離を計測する
- (4) (2), (3) を 3 度繰り返す

尚、PhS が感じられなかった試行については実験の試行から除外する予定であったが、実験 4 においてそのような被験者はいなかった。

4.4.2 実験結果

結果を図 12 に示す。縦軸は電極間の中心と知覚位置の距離を表し、横軸は前腕の中心からの視覚刺激の距離を表す。結果から、2 点の電極間の距離が

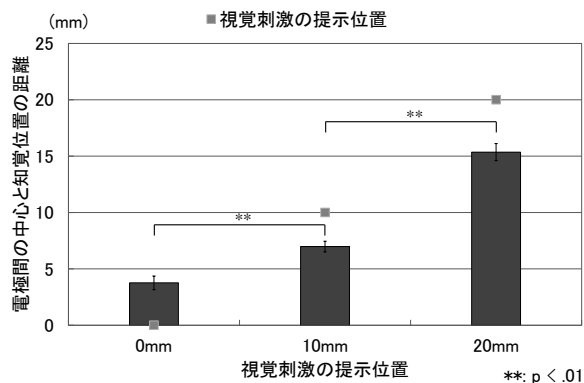


図 12 実験 4 結果

Fig.12 Result of Experiment 4

60mm であれば、電極間の中心から 20mm の範囲で視覚刺激によって知覚位置が変化することがわかった。視覚刺激の位置によって、電極間の中心と知覚位置の距離に有意差があるか 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、視覚刺激による影響が有意に出ていた。これによって、実験 2 と同程度の距離を視覚刺激によって変化することがわかった。

5. まとめと今後の展望

実験結果を分析した結果、以下の知見が得られた。

- 実験 1 より、痛覚と同位置に視覚刺激を提示することで、痛覚の知覚精度が向上する
- 実験 2 より、1 点に痛覚を提示し、視覚刺激を痛覚の提示位置から 30mm より遠く離すと、視覚刺激の影響が小さくなる
- 実験 3 より、60mm 程度であれば触覚のみで痛覚 PhS が発生する。また、視覚刺激を提示することで、痛覚 PhS の知覚距離が 80~100mm 程度まで向上する
- 実験 4 より、電極間の距離が 60mm で痛覚 PhS を発生させた際、電極間の中心から 20mm の範囲であれば視覚刺激を提示することで、痛覚の知覚位置を変化させることが可能

本研究では、種々の触覚知覚の中でも痛覚に着目し、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、1 点に痛覚を提示した際、視覚刺激が痛覚の知覚位置に影響を及ぼすことを確認した。また、2 点に痛覚を提示することで痛覚 PhS が発生することや、視覚刺激を提示することで PhS の発生距離、知覚位置に影響を及ぼすことも確認できた。いずれの方法においても、視覚刺激の位置によって変化する傾向であったので、どちらの方法においても視覚の影響を考慮した場合、共通の設計をできることが示された。また、刺激位置

が明瞭な痛覚において、視覚刺激による影響を受けにくいという予想に反して、視覚刺激による影響が見られた。

今後は、実験条件を変更しながら系統的に研究を行っていく予定である。例えば、今回は痛覚として電気刺激を採用したが、他の痛覚提示方法では錯覚の発生に差異が生じることが予想される。また、痛覚の強度を変更することで、痛覚の知覚や痛覚 PhS にどのような影響を及ぼすかについても、引き続き実験を行っていく予定である。

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」による。

参考文献

- [1] Y. Ban, T. Narumi, T. Fujii, S. Sakurai, J. Imura, et al.: "Augmented Endurance: Controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality," Proc. Conf. on Human Factors in Computing Systems, pp. 69 - 78, 2013.
- [2] H. Sawada, Chang'an Jiang, and H. Takase: "TactoGlove -Displaying tactile sensations in tacto-gestural interaction-," Proc. Conf. on Biometrics and Kansei Engineering, pp. 216 - 221, 2011.
- [3] M. Nakahara, I. Kitahara, and Y. Ohta: "Sensory property in fusion of visual/haptic cues by using mixed reality," Conf. Symp. on Haptic Interfaces, pp. 565 - 566, 2007.
- [4] A. Niijima and T. Ogawa: "Influence analysis of visual stimuli on localization of tactile stimuli in augmented reality," Proc. Conf. on Virtual Reality, pp. 105 - 106, 2012.
- [5] 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.
- [6] J. Oohara, H. Kato, Y. Hashimoto, and H. Kajimoto: "Presentation of positional information by heat phantom sensation," Proc. Conf. on Haptics, pp. 445 - 450, 2010.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 片岡佑太, 中西雄大, 齊藤純哉, 橋口哲志, 木村朝子, 柴田史久: "Hornet Attacks! —痛覚刺激を導入した複合現実感アトラクション—", 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.
- [10] M. O. Ernst and H. H. Bulthoff: "Merging the senses into robust percept," Trends in Cognitive Science, Vol. 8, No. 4, pp. 162 - 169, 2004.