

複合現実型視覚刺激が 温冷覚の知覚位置・知覚幅に与える影響

橋口 哲志^{*1} 柴田 史久^{*1} 木村 朝子^{*1}

**Psychophysical Influence on Position and Width of Temperature Perception
by Mixed-Reality Visual Stimulation**

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

Abstract --- In Mixed-Reality (MR) space, the visual appearance (shape, texture, etc.) of a real object can be changed by superimposing a virtual object on it. Therefore, by creating systematic differences between visual and haptic perceptions using MR technology, we can analyze their influence on temperature perception. In our research group, we defined the changes in the visual information of a real object in MR space as “MR visual stimulation” and examine the influence of the haptic sense using MR visual stimulation. For our research, we focused on the temperature perception of the skin. In the first step, we verified the influence presenting MR visual stimulation has on the perceived position of the temperature perception. In the experiment, we presented MR visual stimulation and temperature stimulation in different positions. We confirmed the influence this difference has on the temperature perceived position. Our results demonstrate that temperature perception is strongly affected by visual stimulation.

Keywords: Temperature Perception, Mixed-Reality, Psychophysical Influence.

1. はじめに

現実空間に仮想物体を実時間で融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、人工現実感 (Virtual Reality; VR) の発展系として注目を集めている。MR に関する研究の多くは、視覚的な MR の実現に向けられてきたが、その他の感覚も併せた多感覚融合を目指した研究が活発化している [1-3]。特に MR 技術と触覚刺激との組み合わせでは、VR 空間では実現できない視触覚融合の効果をj得る場合があり [3]、知覚心理学やヒューマンインタフェースの研究において興味深い研究対象となっている [4][5]。

MR 空間では、実物体に仮想物体 (CG) を実時間で重畳描画すること (以下、MR 型視覚刺激) によって、見た目と触感に差異を生じさせることができる。この差異が視触覚融合の効果を生み、各種触力覚に影響を与えることがわかっている [6-8]。

この視触覚融合の効果は、アート・エンターテインメント分野においても応用可能であり、新たな表現が可能となる。例えば、[9]では、MR 空間で前腕の数箇所に振動刺激を提示し、それに連動して虫が移動する CG を重畳描画することで、腕の上を虫が

このような感覚を実現している。他にも、[10] では、蜂が襲ってくる MR 型視覚刺激に同期して痛覚刺激を提示することで、少ない刺激提示装置で、より多くの箇所を蜂に刺されているように感じさせることができる。しかし、視触覚融合の効果を実際に応用するためには、どのような感覚で、どのような条件の場合に、どのような効果を生むのかといった基礎検討が重要となる。

これまでの研究で、MR 型視覚刺激が振動覚、痛覚の知覚位置に影響を与えることがわかっている。本論文で我々は、次なるターゲットとして、もう一つの皮膚感覚である温冷覚に着目した。温冷覚は、振動覚や痛覚と比べて受容器が少なく、視覚刺激の影響が大きい可能性がある。また、温冷覚の受容器である温点・冷点の数はそれぞれ異なることから、温覚・冷覚のいずれかは視覚刺激に影響を受けにくい可能性もある。

更に、触覚刺激の知覚位置に関する錯覚現象の1つであるファントムセンセーション (Phantom Sensation; PhS) [11] による提示についても合わせて確認する。この現象は、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する現象である。振動覚刺激や痛覚刺激では、この現象に MR 型視覚刺激を組み合わせることで、知覚位置が視覚に引きずられることがわかっており、少

^{*1} 立命館大学 情報理工学部

^{*1} Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

ない触覚提示装置を使ってより多くの位置に触覚を提示できるという利点がある [12]. 本研究では温冷覚の PhS (Thermal Phantom Sensation 以下, T-PhS と呼ぶ) についても同様に MR 型視覚刺激による効果を確認する.

2. 関連研究

温冷覚は, 触覚や痛覚とは独立な感覚として定義されており, 温冷覚刺激を感じる受容器として温点と冷点が存在する. 温点, 冷点は, 圧覚や痛覚などの受容器に比べると少ないため, 刺激箇所による検知閾は異なり, 年齢や性別などによる個人差も大きい [13]. また, 温冷覚提示方法は, 排熱の問題から応答性に問題があることが多く, 温冷覚刺激で定量的な実験を行うことが困難であった. そこで, 近年では新たな温冷覚提示方法に関する研究が進められている. Sato ら [14] が温冷覚の知覚特性を活かして, 温覚刺激と冷覚刺激を 4 つの対角に配置したペルチェ素子によって温冷覚提示の高速化を実現した. また, Sakaguchi ら [15] は, 温冷覚提示部に流れる水の流量を調節することで, ユーザの体温と水温の差を利用して冷感提示の応答速度を向上させた. このように温冷覚提示方法の諸問題を解決しているが, 機器の煩雑化や大型化の問題を解決しなければならない.

従来, 触覚研究では, 装置を簡易化するため, PhS という錯覚現象を活用してきた. この PhS という錯覚現象は, 皮膚上の 2 点に提示された刺激を単一の刺激として知覚する. よって, 刺激の組み合わせにより, 提示箇所を増加させることが可能となるため, 提示装置の個数を削減することができる. この錯覚現象は, 大原ら [16] が 2 つのペルチェ素子を用いて 37°C 以上の温度で刺激を与えれば, 温覚でも H-PhS (Heat Phantom Sensation) が発生することを確認している. また, ペルチェ素子に温度差をつけることで, 熱源像を知覚させる位置を変化させることができることを示している. このように錯覚現象を活用することで, 温冷覚提示についても簡易化が可能である.

近年では, ハードウェアや錯覚の現象の活用に加え, 感覚の相互作用を活用する事例が多くなってきた. 例えば, 視覚刺激による触力覚への影響を検討した研究として, “Tactoglove [17]” では, 振動覚に CG を重畳し仮想キャラクタの触覚を再現した. これは仮想キャラクタが手のひらの上を歩き回り, その足踏みの触覚を得るというものである. Niijima ら [12] は, 前腕に振動子を装着し, 拡張現実感を利用して体験者に視覚刺激を提示する実験を行った. 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た.

温冷覚と視覚刺激との相互作用に関する研究として, 武内ら [18] は遠赤外光プロジェクタと可視光プロジェクタを組み合わせた装置を開発した. 手掌に輝度が時間によって変化する円形の図形を提示することによって, 温覚が変化することを述べている.

また, 温冷覚の知覚位置は, T-PhS を活用すれば, より高い自由度をもって提示することができる. しかし, 元来の温冷覚の曖昧性と錯覚現象での知覚の組み合わせでは, 安定した提示が難しい. また, ペルチェ素子など接触型提示を行う際には, 温冷覚の知覚幅を自由に変更することは難しい. そこで, 視覚融合の効果が温冷覚の知覚位置または知覚幅に与える影響を検証していくことで, その効果の有効性について検証することができる.

3. 実験目的と準備

3.1 実験目的

MR 型視覚刺激が温冷覚の知覚位置または知覚幅に与える影響を分析する. まず, 知覚位置に与える影響に関しては, MR 型視覚刺激と温冷覚刺激を離れた位置に提示した場合, 温冷覚の知覚位置に与える影響を実験 1 で検証する.

また, 知覚幅に与える影響に関しては, MR 型視覚刺激の幅を変更した場合, 温冷覚の知覚幅を変化させることが可能か実験 2 で検証する. 提示方法としては, 通常通り 1 点で温冷覚を提示する場合と T-PhS による提示の 2 通りを両実験で, MR 型視覚刺激との組み合わせを検証する.

3.2 実験準備

【実験環境】

実験で用いる MR システムの構成を図 1 に示す. 実験では, ビデオシースルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MREAL Platform を用いた. 体験者の頭部及び実物体の位置姿勢情報は磁気センサ (POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK) から取得する. 体験者が MR 空間を観察する際, HMD のカメラキャプチャ画像に対して手領域の抽出を行い, その領域をマスキングすることで, 手領域に CG が重畳描画されないようにする.

【温冷覚提示】

MR 型視覚刺激を提示した際の視認しやすさを考慮して, 本実験では前腕を温冷覚の提示位置とする. それに加え, 温冷覚刺激の制御を考慮し, 温冷覚提示装置を卓上に固定した上で, 前腕の腹側に提示する (図 2). よって, 提示温度を一定に保つ単純な制御のみで, 温度の設定条件を統一した. そこで, 温冷覚提示装置には, 一定に保つ制御を有する

ペルチェ温度コントローラセット (VPE20-5-20S, 株式会社ビックス) を使用する (図 3). ペルチェ素子の大きさは 20×20mm で, これが 40×40mm の台に固定されている.

一般に, 触覚と温冷覚は相互作用することが知られており, 温冷覚が触覚刺激を提示した箇所に移動する錯覚現象 Thermal Referral (以下, TR) が生じる [19-21]. 本実験でも, ペルチェ素子を用いるため, 物理的な接触による触覚刺激を伴う. よって, 本実験でも TR が生じる可能性がある. そこで, 本研究では触覚刺激の条件をすべての実験間で統一し, 温冷覚刺激の設定温度や提示方法のみを変更することによって, 相対的に TR の影響を無視できるように実験を設計した.

提示温度に関しては, 人間の温度受容器について考える必要がある. 温度受容器には温受容器と冷受容器の 2 つがある. 温受容器は 32℃以上, 45℃以下で興奮し, 冷受容器は 10℃以上, 30℃以下で興奮すると言われている [22]. また, 45℃以上の温度, 10℃以下の温度を痛覚として認識してしまうため [23], これらの条件を満たす温覚刺激の範囲を 33℃ ~ 44℃, 冷覚刺激を 11℃ ~ 29℃とした. Stevens と Choo ら [24] による温度検知閾の測定実験において, 被験者に提示する温度に約 2℃の差をつけていた. そこで, 温覚刺激の最大温度である 44℃, 冷覚刺激の最低温度の 11℃を基準にして, 2℃刻みで提示温度を設定した. つまり, 温覚刺激を 40℃, 42℃, 44℃, 冷覚刺激を 11℃, 13℃, 15℃とした.

温冷覚提示装置の配置は, 前腕の中心に 1 台, 中心から手首側, 肘側にそれぞれ 60mm 離れた位置に 1 台ずつ, 計 3 台配置している (図 2). すべての実験を通して, この 3 つのペルチェ素子は同じ位置に配置されており, 温冷覚提示していないペルチェ素子は無関温度 (32℃) に設定している.

また, 被験者の肘と手首を支えるように, 手首と肘に手を置くための台 (ペルチェ素子は付いていない) を 1 台ずつ, 手首と肘の位置に配置している. この台に手首と肘を置くことによって, 前腕と温冷覚提示装置の接触部に過度な圧力がかからないように, 前腕とペルチェ素子が軽く接触する程度に設定した.

これらの設定温度で予備実験を行い, 各設定温度の差を知覚することを確認した. 実験スペース内の室温は, 一定の温度 (25℃) に設定し, 室温の変化による温度知覚への影響を配慮した.

【MR 型視覚刺激】

実験に使用する MR 型視覚刺激は, 長方形の仮想物体を提示する. これは, シンプルな形状の視覚刺激を用いることで, MR 型視覚刺激の提示位置や提

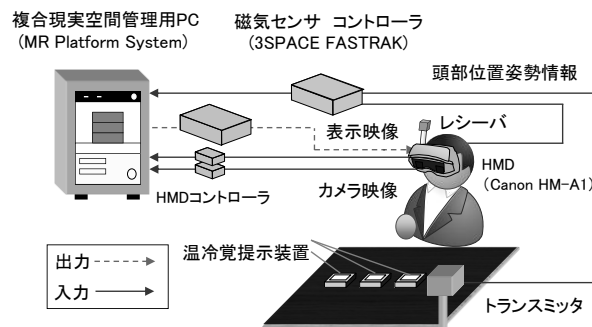


図 1 システム構成

Fig.1 System Configuration

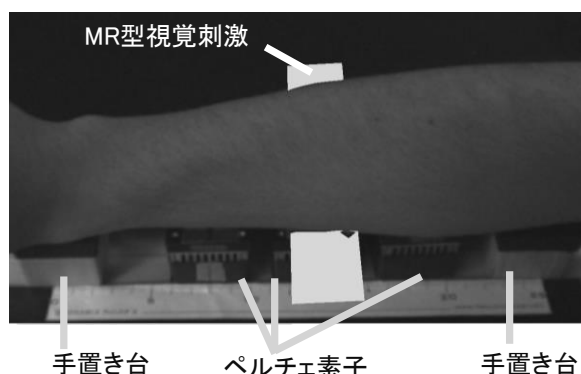


図 2 実験に使用した MR 型視覚刺激

Fig.2 MR Visual Stimulation Used in Experiments

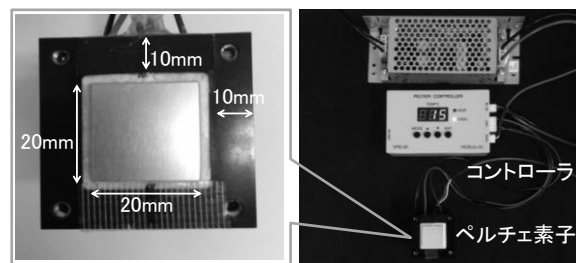


図 3 温冷覚提示装置

Fig.3 Temperature Controller Set

示幅を系統的に実験するためである.

長方形の長辺は, 図 2 のように前腕の幅よりも十分に長くなるよう 120mm に設定し, 短辺は各実験によって変更する. また, 長方形の色を温覚刺激の場合は赤色 (R: 255, G: 0, B: 0), 冷覚刺激の場合は青色 (R: 0, G: 0, B: 255) に設定した. これは, 被験者に暖色や寒色を提示することによって温度をイメージしやすくするためである. 色による温冷覚への影響が考えられるが, 冷覚の場合に赤色, 温覚の場合に青色を提示した際でも, 知覚温度や知覚位置に影響がなかった. このことから本実験では, 温冷覚刺激を体験者が判断しやすくするために色を変更した.

4. 実験1:MR型視覚刺激が温冷覚の知覚位置に与える影響

4.1 実験目的

MR型視覚刺激の提示位置を変更した場合、温冷覚の知覚位置に与える影響を検証する。また、提示方法も単純に温冷覚提示装置で1点に提示した場合とT-PhSによって提示した場合についても検証を行う。よって、提示温度もしくは提示方法によって、MR型視覚刺激の影響を分析する。

4.2 実験条件

実験1では、MR型視覚刺激の提示位置を変更した場合、温冷覚の知覚位置に与える影響を確認する。提示温度の条件は、冷覚刺激を11℃、13℃、15℃、温覚刺激を40℃、42℃、44℃とする。温冷覚の提示方法には、2通りの方法を用いる。1つの目は、単純に温冷覚提示装置で前腕の中心に1点で提示する方法であり、2つ目は、T-PhSを用いた提示方法である。T-PhSの刺激間距離は、予備実験により温冷覚刺激のみで錯覚の発生率が高く、最も刺激間距離が長い120mmを選定した。

MR型視覚刺激の条件は、中心から20mmごとに手首側・肘側に離していく。T-PhSによる提示では、中心から両側に60mm離れた位置に温冷覚を提示する。よって、MR型視覚刺激もこの範囲内で提示を行い、中心を含めて両側に20mm、40mm、60mmの計7種類を提示する（以下、視覚刺激のパターンは、図4のように手首側から①～⑦とする）。

本実験では、温冷覚の知覚位置を回答させるが、視覚刺激のみを手掛かりに回答する可能性がある。また、中心位置ばかりに温冷覚刺激が提示されると、その刺激のみを手掛かりに回答する可能性も有り得る。そこで、ダミー刺激を用いることによって、視覚のみもしくは温冷覚刺激のみで判断する可能性を回避する。

ダミー刺激には、温冷覚刺激に温覚にも冷覚にも感じない無関感覚に設定して、視覚刺激のみ提示する。人の無関感覚は、30～36℃と言われており [13]、予備実験で被験者全員が温覚にも冷覚にも感じないと回答した32℃をダミーの設定温度にした。この視覚ダミーは、図4の①、④、⑦に提示した。

また、この視覚ダミーに加えて、温冷覚刺激が中心以外の位置に提示していることを明示するために、温冷覚ダミーを用いた。刺激位置は、視覚刺激なしで中心位置に提示した場合と比較した場合、十分に判別可能である①と⑦の位置にMR型視覚刺激も同時に提示した。

よって、表1のように実験の試行パターンは96パターン、ダミー刺激（視覚・温冷覚）を15パタ

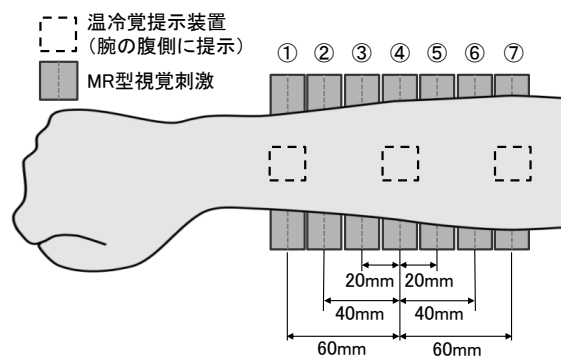


図4 実験1で使用するMR型視覚刺激の種類
Fig.4 Variety of MR Visual Stimulation Used in Experiment1

表1 実験1での提示パターン
Table 1 Variety of Stimulation Used in Experiment1

温度 (℃)	温冷覚刺激	MR型視覚刺激
11, 13, 15	④	① ~ ⑦
		無
40, 42, 44 (実験刺激)	①, ⑦ (T-PhS)	① ~ ⑦
		無
32(視覚ダミー)	①, ④, ⑦	①, ④, ⑦
11, 13, 15	①	①
		40, 42, 44 (温冷覚ダミー)
	⑦	

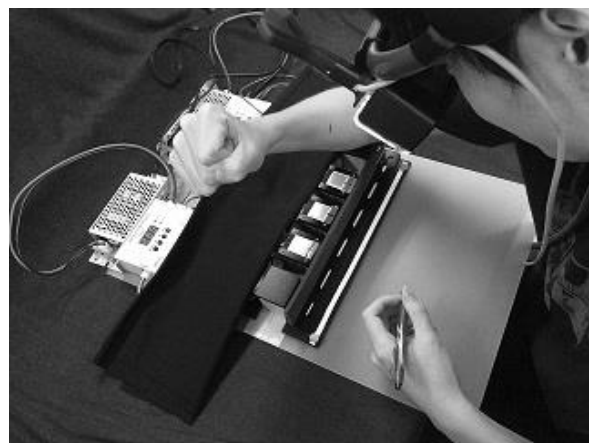


図5 実験風景
Fig.5 Experimental Scene

ーン使用する。なお、提示温度（温覚刺激、冷覚刺激）と提示方法（1点、T-PhS）を組み合わせ、4つの実験に分け、各実験にダミー刺激を加えた。実験では、すべての試行をランダムに提示した。温度の設定値は、被験者には確認できないようにしており、前試行の刺激が影響しないように試行間には十分な時間（1分以上）をとり、その都度、皮膚温度を計測して温度に変化がないことを確認した。なお、温覚刺激を被験者に提示する場合は赤い長方形、冷

覚刺激を被験者に提示する場合は青色の長方形を提示する。また、実験スペース内の室温を一定の温度 (25°C) に設定し、室温の変化による温度の知覚への影響をなくすようにしている。温冷覚の知覚位置を被験者に回答させるために、実験装置と平行に縦 5mm×横 300mm の白い紙を設置した。被験者は、この紙に温冷覚を感じた範囲の左端、右端を記す (図 5)。温冷覚ともに感じない場合は、「感じない」と回答してもらった。このように HMD からみた MR 空間内で直観的に回答できる回答方法にした。被験者は、20 代の学生 10 名 (男性 : 10 名) である。実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者の前腕の中心に印を付ける
- (2) 被験者に HMD を装着させる
- (3) 提示パターン (表 1) からランダムに選択する
- (4) 温冷覚提示装置の温度を設定し、設定温度に安定するまで待つ
- (5) 前腕を温冷覚提示装置の上に乗せると同時に MR 型視覚刺激を提示する
- (6) 被験者は白い紙に温冷感を知覚した範囲を記録する
- (7) 皮膚の温度変化の影響を排除するために十分なインターバル (1 分以上) を設ける

(8) 残りの組み合わせも (3)~(7) を繰り返す

4.3 実験 1 の結果

図 6 に 1 点での温冷覚刺激の場合、図 7 に T-PhS での温冷覚刺激の場合の実験結果を示す。縦軸は被験者が温冷覚を知覚した幅 (左側の縦棒)、および中心位置の平均値 (右側の横棒) を、横軸は MR 型視覚刺激の条件を示す。ただし、実験中 T-PhS を感じなかったケースが、全試行中 2 試行あったため、この 2 試行は実験結果からは除外している。また、視覚ダミーは全被験者が「感じない」と判断でき、温冷覚ダミーは、温冷覚の提示位置に感じていることから、実験条件の試行と差別化ができていた。

実験の結果、提示装置の設定温度を無関係温度 (32°C) とし、MR 型視覚刺激のみ①, ④, ⑦に提示した場合、全被験者が温冷覚を感じることはなかった。

図 6, 図 7 より、MR 型視覚刺激の位置と温冷覚刺激の位置を 60mm までずらした場合にも、温冷覚の知覚位置に影響を与えることを確認した。よって、MR 型視覚刺激が温冷覚の知覚位置に影響を与えていることがわかる。しかし、MR 型視覚刺激を手首、肘側の位置 (①, ⑦条件) まで離して提示し

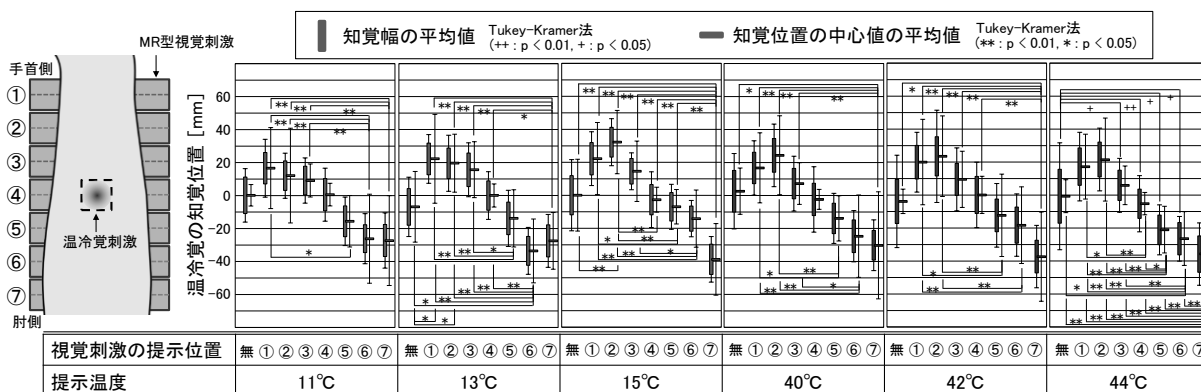


図 6 実験 1 の結果 (1 点での温冷覚刺激)

Fig.6 Result of Experiment1 (One Temperature Stimulation)

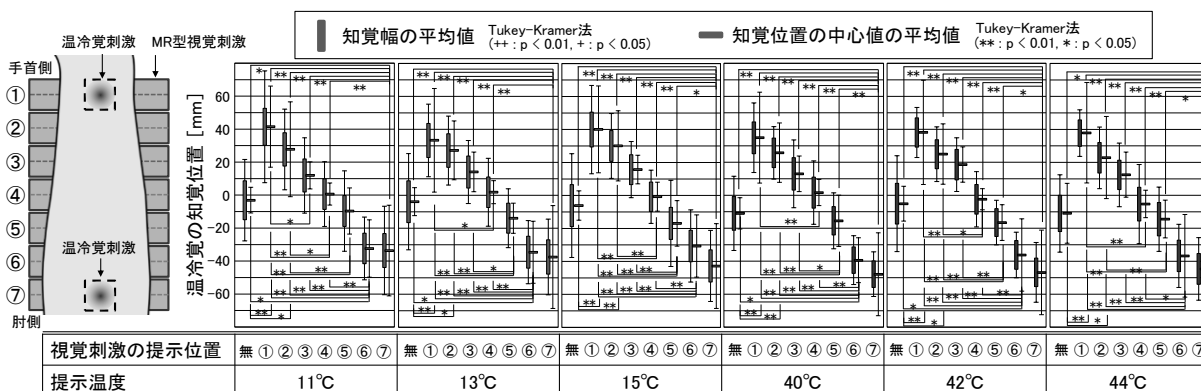


図 7 実験 1 の結果 (T-PhS での温冷覚刺激)

Fig.7 Result of Experiment1 (Thermal Phantom Sensation)

た場合、知覚される温冷覚は、視覚刺激の位置までは移動しなかった。これは、視覚刺激と温冷覚刺激の提示位置の差異が大きくなり、相対的に視覚の寄与が低下したためと考えられる [25]。

図 6, 図 7 より 1 点による提示よりも T-PhS による提示の方が MR 型視覚刺激の影響をより広範囲に受けることがわかる。1 点は中心位置が最大で 30mm 程度移動したが (図 6, 提示温度 15°C, 視覚刺激の提示位置②), T-PhS では、40mm に達している試行 (図 7, 提示温度 11°C, 視覚刺激の提示位置①) もある。これは、T-PhS の実際の温冷覚刺激の提示箇所と視覚刺激の提示位置が近くなり、視覚がより顕著に影響したと考えられる。被験者からは、「2 点ではなく 1 点として感じている」とのコメントもあり、T-PhS として温冷覚を知覚していることを確認した。

図 6 より MR 型視覚刺激を温冷覚刺激と同じ位置 (図の④の位置) に提示した場合、視覚刺激なし条件に比べると知覚幅が狭く知覚されている。一方、視覚刺激なし条件では、温冷覚提示装置の幅 (20mm) よりも広く知覚されている。特に 1 点で温冷覚刺激 44°C を提示したとき、視覚刺激なし条件に比べて、MR 型視覚刺激を③, ④, ⑤, ⑥に提示した場合の方が知覚幅を狭く感じている。このことから、MR 型視覚刺激が、温冷覚の知覚幅に影響を与える可能性がある。

また、図 6, 図 7 より温度条件間で比べると、視覚刺激を提示した場合、どの温度条件でも知覚幅はほとんど変わらなかった。当初は、受容器の分布が温点より冷点の方が多いため、温覚より冷覚の方が温度を曖昧に感じ、MR 型視覚刺激による影響が見られにくいのではないかと予測していた。しかし、温冷覚刺激ともに MR 型視覚刺激による知覚位置への影響に差はみられず、温点や冷点の受容器の分布よりも視覚刺激による影響を強く受けていることがわかる。

以上をまとめると、

- (i) 提示装置の設定温度を無関温度 (32°C) として MR 型視覚刺激のみを提示した場合は、温冷覚を感じることはなかった
- (ii) 全温度・提示条件において、温冷覚刺激の位置から MR 型視覚刺激を手首、肘側に最大 60mm 離して提示しても、温冷覚の知覚位置に影響を与える
- (iii) 全温度条件において、1 点で温冷覚刺激を行った場合よりも、T-PhS での温冷覚刺激の方が広い範囲で影響を受ける
- (iv) MR 型視覚刺激が温冷覚の知覚幅にも影響を与える
- (v) MR 型視覚刺激を提示した場合、温冷覚の知覚

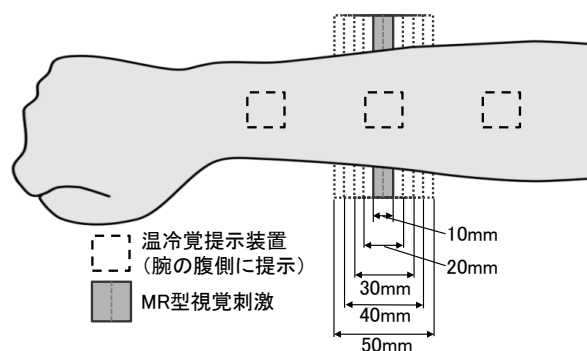


図 8 実験 2 で使用する MR 型視覚刺激の種類

Fig.8 Variety of MR Visual Stimulation Used in Experiment2

表 2 実験 2 での提示パターン

Table 2 Variety of Stimulation Used in Experiment2

温度 (°C)	温冷覚刺激	MR 型視覚刺激
11, 13, 15 40, 42, 44 (実験刺激)	④ (T-PhS)	10 ~ 50mm
		無
32(視覚ダミー)	①,④,⑦	10 ~ 50mm
		無

位置は、温度や温冷覚の違いにほとんど影響を受けない

5. 実験 2: MR 型視覚刺激が温冷覚の知覚幅に与える影響

5.1 実験目的

実験 1 において、MR 型視覚刺激を温冷覚刺激と同じ位置に提示した場合、温冷感の知覚幅に影響を与える傾向がみられた。実験 1 では、MR 型視覚刺激の幅は一定であったが、その幅を変更すれば温冷覚の知覚幅も変化する可能性がある。そこで、実験 2 では、MR 型視覚刺激の幅を変更することで温冷覚の知覚幅に与える影響を検証する。

5.2 実験条件

図 8 のように、MR 型視覚刺激を前腕の中心に提示し、その幅を 0mm (視覚刺激無し)、10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm と変更した場合、温冷覚の知覚幅に与える影響を検証する。提示温度は、実験 1 と同様に冷覚刺激が 11°C, 13°C, 15°C, 温覚刺激が 40°C, 42°C, 44°C とする。温冷覚の提示方法も実験 1 と同様の 2 通り (1 点, T-PhS) の方法を用いる。設置条件も同様である。よって、表 2 のように実験の試行パターンは 72 パターン、ダミー刺激 (視覚・温冷覚) を 3 パターン使用する。なお、提示温度 (温覚刺激, 冷覚刺激) と提示方法 (1 点,

T-PhS) を組み合わせ、4つの実験に分け、各実験にダミー刺激を加えた。実験では、すべての試行をランダムに提示した。

実験1と同様に、温冷覚提示装置にはダミーとして32°Cを設定する。なお、温覚刺激を被験者に提示する場合は赤い長方形、冷覚刺激を被験者に提示する場合は青色の長方形を提示する。また、実験スペース内の室温を一定の温度(25°C)に設定した。

実験1同様に、温冷感の知覚幅を被験者に回答させるために、実験装置と平行に縦5mm×横300mmの白い紙を設置した。被験者は、この紙に温冷覚を感じた範囲の左端、右端を記す。温冷覚ともに感じない場合は、「感じない」と回答してもらった。被験者は20代の学生10名(男性:10名)である。実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者の前腕の中心に印を付ける
- (2) 被験者にHMDを装着させる
- (3) 提示パターン(表2)からランダムに選択する
- (4) 温冷覚提示装置の温度を設定し、設定温度に安定するまで待つ

- (5) 前腕を温冷覚提示装置の上に乗せると同時にMR型視覚刺激を提示する
- (6) 被験者は白い紙に温冷感を知覚した範囲を記録する
- (7) 皮膚の温度変化の影響を排除するために十分なインターバル(1分以上)を設ける
- (8) 残りの組み合わせも(3)~(7)を繰り返す

5.3 実験結果

図9に1点での温冷覚刺激、図10にT-PhSでの温冷覚刺激の実験結果を示す。両実験を通して、温冷覚の知覚位置の中心からのずれは平均0.54mm(標準偏差:±6.46mm)で、中心位置が右や左に偏るケースは見られなかった。よって、図9, 10では見やすさを優先し、知覚幅の結果のみを比較した。図中の縦軸は被験者が知覚した温冷覚の知覚幅の平均値を示し、横軸は視覚刺激の幅を示す。ただし、実験中T-PhSを感じなかったケースが、全試行中3試行あったため、この3試行は実験結果からは除外している。また、実験1と同様に、視覚ダミーは全被験者が「感じない」と判断でき、温冷覚ダミーは、温冷覚の提示位置に感じていることから、実験条

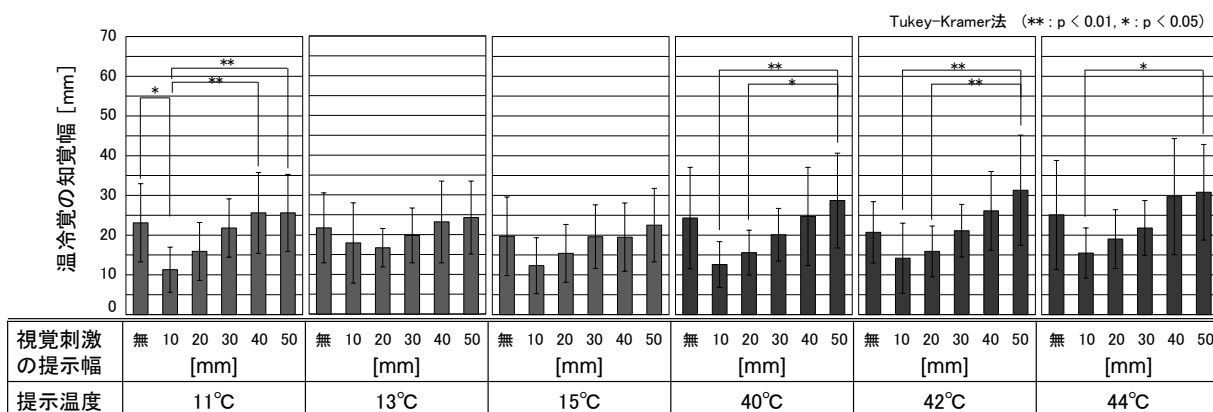


図9 実験2の結果(1点での温冷覚刺激)

Fig.9 Result of Experiment2 (One Temperature Stimulation)

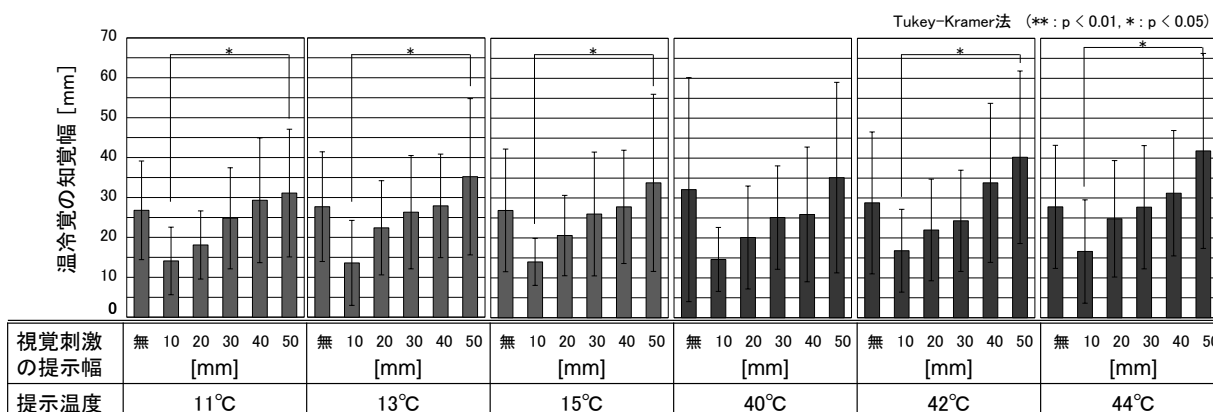


図10 実験2の結果(T-PhSでの温冷覚刺激)

Fig.10 Result of Experiment2 (Thermal Phantom Sensation)

件の試行と差別化ができていた。

実験の結果、各条件において、MR型視覚刺激の幅が温冷覚の知覚幅に影響を与えていることがわかる。特に有意差が見られたのは、図9、10の各条件でMR型視覚刺激の幅が10mmと50mmの場合のみであったが、他の視覚条件においても知覚幅が変化する傾向がみられた。

T-PhSによる提示(図10)では、温冷覚刺激を2点使用しており、実際の触覚刺激ではなく疑似的な触覚であるため、曖昧で幅広く知覚されることは予想通りであった。これに対して、1点に提示した場合(図9)でもMR型視覚刺激の幅に影響されており、T-PhSでなくても知覚幅を錯覚することがわかった。

図9、10において、MR型視覚刺激の幅が10mmや20mmの場合は、視覚刺激を提示しない場合よりも知覚幅が狭く感じる傾向にあった。これは、実験1の結果と同様に提示装置と接触している触感や実際の温冷覚提示よりも、視覚刺激による影響が大きいことを示唆している。

以上の結果をまとめると、

- (i) 全温度・提示条件において、MR型視覚刺激の幅に合わせて、温冷覚の知覚幅は変化する傾向にあった
- (ii) 全温度条件において、各MR型視覚刺激の幅で比較すると、1点による提示よりもT-PhSによる提示の方が知覚幅を広く知覚した
- (iii) 全温度・提示条件において、MR型視覚刺激の幅が10mmのとき、視覚刺激なし条件よりも温冷覚の知覚幅を狭く知覚した

6. 議論

実験1、実験2の結果から、以下のような知見が得られた。

- (a) MR型視覚刺激と温冷覚刺激との提示位置に差異が生じた場合、温冷覚の知覚位置が視覚刺激の提示位置に引きずられる
- (b) MR型視覚刺激の幅を変更すると、温冷覚の知覚幅も同様に変化する。特に温冷覚提示装置よりも狭くMR型視覚刺激の幅を提示した場合、温冷覚の知覚幅も狭く感じる
- (c) T-PhSによる提示でも、MR型視覚刺激が温冷覚の知覚位置または知覚幅に影響を与える。温冷覚刺激を1点に提示した場合と比較すると、視覚刺激によって変化する知覚位置の範囲は広がる
- (d) 以上の傾向は、温度や温覚・冷覚の影響をほとんど受けない

以上より、温冷覚の知覚位置・幅は、温冷覚受容器の数・温度にはほぼ左右されず、MR型視覚刺激の影響を受けていることがわかる。このことから、

著者らは視覚刺激による影響は、受容器によるものではなく、高次脳での処理で視覚情報と温冷覚情報が融合される際に影響を受けているのではないかと考えている。

また、ペルチェ素子のように、一定の接触面積を必要とする温冷覚提示装置であっても、MR型視覚刺激を提示することで、その知覚幅をより狭く錯覚させることが可能であることが示唆された。更に視覚の相互作用を応用することで、制御が困難である温冷覚提示での装置の小型化や制御の簡易化に貢献できる可能性が示唆された。

7. むすび

本研究では、皮膚感覚の1つである温冷覚に注目し、MR型視覚刺激を提示することによる温冷覚刺激の知覚位置または知覚幅に与える影響を検証した。具体的には、前腕の1点もしくはT-PhSによる温冷覚刺激を提示に対して、MR型視覚刺激を手首側から肘側まで仮想物体の位置を変更し、知覚位置に与える影響を検証した。また、MR型視覚刺激の幅を変更し、視覚刺激が知覚幅に与える影響を検証した。

本実験では、T-PhSによる提示では同じ温度を設定したが、提示する温度に差をつけることでも知覚位置が変化する。今後の展望として、MR型視覚刺激と設定温度を組み合わせることによって、更なる効果の向上を目指す。

謝辞

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」、基盤B「複合現実型視覚刺激によるR-V Dynamics Illusionの研究」による。また、実験に協力された中尾仁志氏、中島大貴氏、上羽諒氏に感謝する。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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 — 産業応用システムでの利用を想定した評価 —”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 325 - 333, 2009.
- [3] 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.
- [4] Y. Ban, T. Narumi, T. Fujii, S. Sakurai, J. Imura, T. Tanikawa, and M. Hirose: “Augmented Endurance:

- Controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality,” *Proceedings of CHI 2013*, pp. 69 - 78, 2013.
- [5] 金森俊雄, 岩井大輔, 佐藤宏介: “重畳投影する手映像の位置ずれによる形状触知覚変調”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 20, No. 3, pp. 263 - 266, 2015.
- [6] 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”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 2, pp. 271 - 278, 2011.
- [7] 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”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 16, No. 2, pp. 261 - 269, 2011.
- [8] 佐野洋平, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “動的に変化する複合現実型視覚刺激が重さ知覚に与える影響”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 19, No. 2, pp. 255 - 264, 2014.
- [9] 森尚平, 杉本一平, 永坂貴浩, 村田龍吾, 山元明彦, 田村秀行: “Mass of Roaches! - 振動と視覚的演出の同期による MR アトラクションの演出 -”, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 398 - 401, 2010.
- [10] 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.
- [11] G. von Békésy: “Sensory Inhibition,” *Princeton University Press*, 1967.
- [12] A. Nijjima, and T. Ogawa: “Visual Stimulation Influences on the Position of Vibrotactile Perception,” *AsiaHaptics 2014*, pp. 29 - 36, 2014.
- [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] K. Sato, and T. Maeno: “Presentation of Rapid Temperature Change using Spatially Divided Hot and Cold Stimuli,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 25, No. 3, pp. 497 - 505, 2013.
- [15] M. Sakaguchi, K. Imai, and K. Hayakawa: “Development of High-Speed Thermal Display using Water Flow,” *Human Interface and the Management of Information. Information and Knowledge Design and Evaluation. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 8521, pp. 233 - 240, 2014.
- [16] 大原淳, 加藤寛士, 橋本悠希, 梶本裕之: “温度によって生じるファントムセンセーション”, 第 14 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2009.
- [17] H. Sawada, Chang’an Jiang, and H. Takase: “TactoGlove - Displaying tactile sensation in tacto-gestural interaction-,” *Proceedings of Conference on Biometrics and Kansei Engineering 2011*, pp. 216 - 221, 2011.
- [18] 武内真梨奈, 吉川佑生, 岩井大輔, 佐藤宏介: “視覚融合投影インタフェースにおける視覚情報の動的変化が温覚に与える影響の基礎検討”, 第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 18, No. 4, pp. 527 - 530, 2013.
- [19] B. G. Green: “Localization of thermal sensation: An illusion and synthetic heat,” *Perception & Psychophysics*, Vol. 22, No. 4, pp. 331 - 337, 1977.
- [20] H. Ni Ho, J. Watanabe, H. Ando, and M. Kashino: “Mechanisms underlying referral of thermal sensations to the sites of tactile stimulation,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 31, No. 1, pp. 208 - 213, 2011.
- [21] 渡辺亮, 岡崎龍太, 梶本裕之: “相互温度参照現象 Thermal referral の身体部位依存性”, *日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014*, 1P1-J02, 2014.
- [22] 富永真琴: “温度受容の分子機構—TRP チャネル温度センサー—”, *日本薬理学雑誌*, Vol. 124, No.4, pp. 219 - 227, 2004.
- [23] 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.
- [24] J. C. Stevens, and K. K. Choo: “Temperature sensitivity of the body surface over the life span,” *Somatosens Mot Res* 15, pp. 13 - 28, 1998.
- [25] I. Rock, and C. S. Harris: “Vision and touch,” *Scientific American*, Vol. 216, pp. 96 - 104, 1967.

(2016年3月7日)

[著者紹介]

橋口 哲志 (正会員)



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, ハプティ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。