



MR 型視覚刺激の提示が Hot-Cold Confusion に 与える影響の分析

芳井創¹⁾, 橋口哲志²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

Hajime YOSHII, Satoshi HASHIGUCHI, Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2 - 150)

2) 立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2 - 150)

概要: Hot-Cold Confusion は、前腕に温覚刺激と冷覚刺激を交互に提示することで、温覚刺激を冷たく、冷覚刺激を温かく知覚する現象である。この錯覚現象は、刺激の提示間隔、提示面積などの触覚刺激を変更した場合にも発生することが確認されている。温度感覚は他の感覚からも影響を受けることが知られており、特に視覚刺激は温度の高低・知覚位置に影響を与えることが確認されている。そこで、本稿では温度提示位置に視覚刺激を重畳描画することによって本現象にどのような影響を与えるのかについて実験・分析を行った。その結果、温度条件と視覚条件の組み合わせによって Hot-Cold Confusion の発生傾向に有意な差が確認された。

キーワード: 温冷覚, 多感覚知覚, 錯覚現象, Mixed reality

1. はじめに

温度感覚では、Thermal sensation [1] や Thermal grill illusion [2] など、多くの錯覚現象が知られている。その中で Arai らは前腕の 3 点に温覚刺激と冷覚刺激を交互に提示した際に、温かい刺激を冷たく、冷たい刺激を温かく知覚する現象「Hot-Cold Confusion」を発見した[3]。この現象の発生要因を明らかにするために、提示間隔や提示温度[4]、提示面積や提示部位[5][6]の変更、触感の有無[7]など条件を系統的に変えて、多くの実験が行われてきた。

温度感覚は他の感覚からも影響を受けることが知られており、特に視覚刺激は温度の高低・知覚位置に影響を与えることが確認されている。Shoko Kanaya らは、Augmented Reality (AR) 環境下でラバーハンドに氷片／プラスチック片の CG を重畳描画し、実際の腕には冷覚刺激を提示する実験を行い、視覚刺激の種類によって知覚される温度が変わることを確認した[8]。D. Eckhoff ら[9]は AR 環境下で、ユーザーの手が炎に包まれる映像を重畳描画した際に、通常温度よりも低い温度提示で、痛みを感じ始めることを確認した。また、橋口ら[10]は、視覚刺激が温冷覚の知覚位置や幅に影響を与えることをした。

そこで、本研究では Hot-Cold Confusion における視覚刺激と温冷覚刺激との関係に着目して、温度提示位置に視覚刺激を重畳描画することによって本現象の発生傾向がどのように変化するかについて実験・分析を行った。

2. 提示刺激

2.1 温冷覚刺激

実験では、温冷覚刺激を提示するためにペルチェ素子とペルチェ温度コントローラ (VPE-20-5V, VPE-35-5V, 株式会社ビックス) を用いた。ペルチェ素子の大きさは 40×40 mm であり、温度の提示位置は、先行研究 [11] に習い、右前腕腹側の中央と、中央から 40 mm 離れた手首側、肘側の計 3 箇所とする (図 1)。卓上に設置した温度提示装置の上に右前腕を乗せることで、3 箇所同時に温度を提示する。実験で提示する温度は、人間の温度受容器の特性を考慮して設定した。温受容器は 32 度以上 45 度以下で興奮し、冷受容器は 10 度以上 30 度以下で興奮する [12]、高すぎる温度や低すぎる温度を提示すると痛覚として認識されること [13] が知られている。そこで実験で提示する温度を、冷覚は 11 度、温覚は 44 度とした (以降の実験では、温覚刺激の 44 度を提示する場合を H、冷覚刺激の 11 度を提示する場合を C と標記する)。

実験での温冷覚の提示パターンは、先行研究[4]・[7][11]で Hot-Cold Confusion が発生しやすかった温冷覚刺激を交互に提示する HCH と CHC に、全て温覚刺激を提示するダミー刺激 (HHH) を加え、計 3 種類とした。

2.2 視覚刺激

本実験では視覚刺激の提示に Microsoft HoloLens2 を

用いた。視覚刺激としては、図2に示すような縦8cm、横4cmの長方形の色付きのオブジェクト3つを表示し、右前腕を温冷覚刺激装置の上に乘せた際にペルチェ素子の真上、かつ腕の上側表面に並ぶ位置に配置した。オブジェクトの色は、赤が温かい、青が冷たいという連想関係 [14] から、赤と青の2色を採用した。実験の際の3箇所の色の提示組み合わせのパターンは、色を交互に提示させる赤青赤、青赤青の計2種類とした。

3. 実験

3.1 実験目的

実験では、Hot-Cold Confusion が生起する際の提示温度と視覚刺激の色の関係性を確認した。視覚刺激の影響を分析するため、視覚条件は視覚刺激ありが2種類(赤青赤、青赤青)と視覚刺激なしの計3条件を用意した。

3.2 実験環境・手順

図3に実験で使用するシステムを示す。温冷覚提示装置(ペルチェ素子)以外は参加者から見えないように布で覆った状態で実験を行った。実験室の温度は $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度は40~60%とした。

実験参加者は成人男女15名(男性13名、女性2名)であった。すべての参加者は実験開始前に、前腕の一箇所に温度提示を行い、温度を正しく知覚できることを確認している。この際、この一箇所以外の2箇所のペルチェ素子では無感温度を提示した。30度から36度の範囲の温度は、人間には温度を知覚できない無感温度として知られており[15]、ここでは32度を提示した。実験開始前に各参加者からインフォームドコンセントを得た。

1 試行の流れは以下の通りであった。

- (1) 実験参加者はHMDを装着する
- (2) 実験者はサーモグラフィ(Seek Compact, Seek thermal Inc.)から、実験参加者の前腕の温度を確認
- (3) 実験参加者は、前腕の中央を3つの温冷覚提示装置の真ん中に合わせ、実験者の合図と同時に腕を装置に接地させ、20秒後に装置から腕を離させる
- (4) 実験参加者はHMDを外し、知覚した温度を3.3で述べる方法で回答する。回答は左手で行い、右腕は中心が温度提示装置の中央に位置するようにおく。
- (5) 右腕の体温が、実験開始時に測定した温度に戻るまで、3分以上の十分な休憩をとる

2種類の温度条件と3種類の視覚条件の計6試行にダミー刺激を加えた全7試行に対して、順序効果を考慮したランダムな試行順で、(1)~(5)を繰り返した。実験は2日間に分けて行った。

3.3 評価手法

前述の手順(4)で、知覚した温度は、タブレットPC(Surface Go 3 8VA-00015)上で回答させた。画面に表示された前腕のイラスト上で、温かい、冷たいと感じた箇所を、それぞれ指でなぞって赤色、青色に塗るよう教示した。この際、感じた温度の度合いを区別するために、温度をより温かく、冷たく感じた箇所には色を重ね塗りさせ、「非

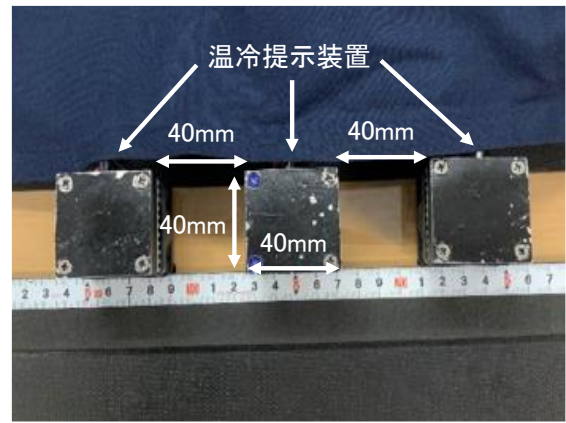


図1 温冷覚刺激の提示装置

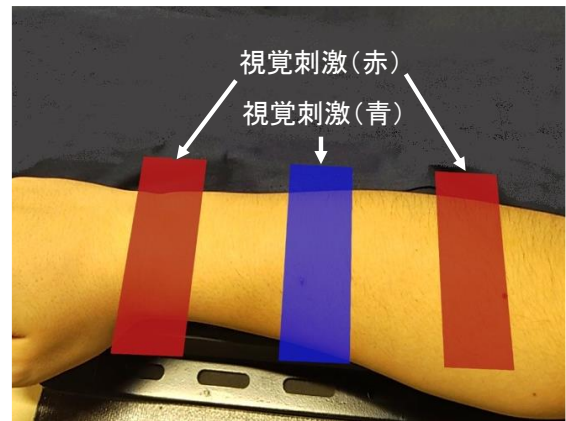


図2 視覚刺激の提示

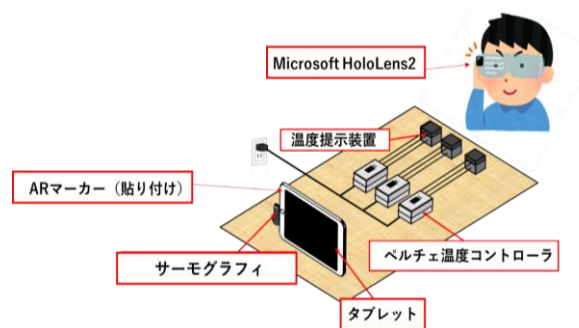


図3 実験環境

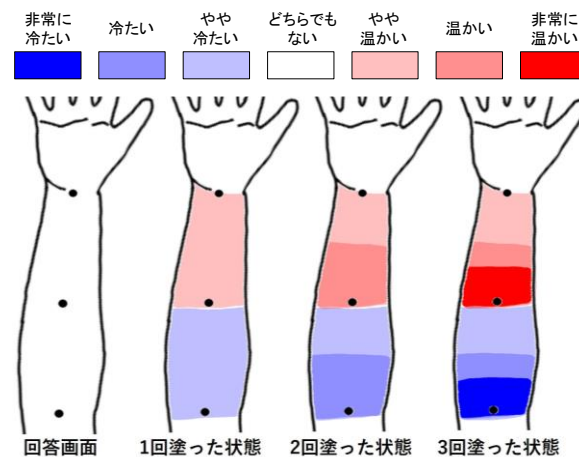


図4 回答方法

常に冷たい」「冷たい」「やや冷たい」「どちらでもない(白)」「やや温かい」「温かい」「非常に温かい」の7段階で回答させた(図4)。温度を感じなかった場合には何も塗らずに白色のままにしておくように教示した。また、色を塗る際の参考になるように、実験開始前に、イラストの3つの黒点に対応する参加者の腕の3箇所にペンでマークをつけた。

3.4 結果

3.3の回答から、提示箇所ごとの誤解答の割合を算出する。算出にあたっては、3つの黒点の両端を上下端としてイラストの腕の長さを5等分し、上端(手首)・中央・下端(肘)の3箇所(現実世界では温冷覚提示装置と接触する部分)の回答のみを対象とした。そして、手首・中央・肘の各領域において、各実験参加者が着色した面積が提示した温度(温かい/冷たい)と合致する割合(正答率)と反対に知覚する割合(誤認率)、どちらでもないと回答した割合(未回答率)を求めた。このとき、現実世界でH(温覚刺激)が提示されている場合には、「やや温かい」「温かい」「非常に温かい」の色で着色されていれば正答、「やや冷たい」「冷たい」「非常に冷たい」の色で着色されていれば誤答と見なす。C(冷覚刺激)の場合はその逆である。

Hot-Cold Confusion は「誤認」にあたる。

図5, 図6に、提示パターンごとに、手首, 中央, 肘側での正答率と誤認率と未回答率の平均値を算出した結果を示す。

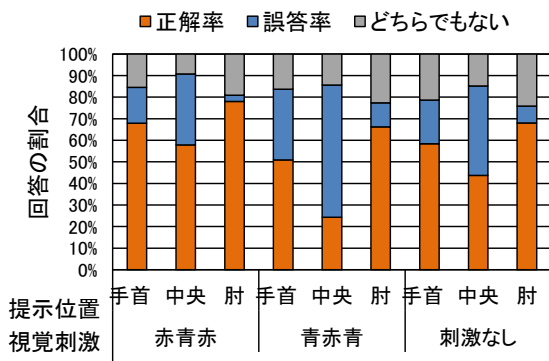


図5 提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合(HCH)

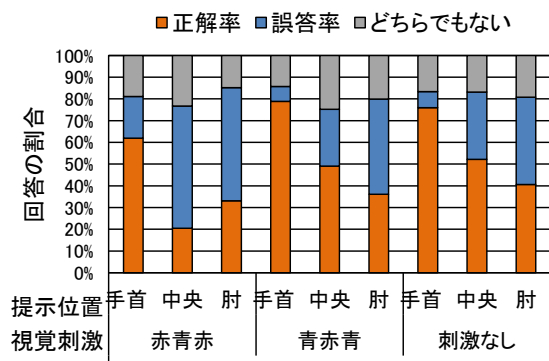


図6 提示箇所ごとの温度知覚に対する回答の割合(CHC)

HCH 条件での誤認率に対して ANOVA with ART[16]を行ったところ、表1のように視覚刺激と提示部位の2つの要因に主効果が認められた。この2つの要因に交互作用は認められなかった。そのため、下位検定で holm 法を用いて多重比較を行ったところ、表2のように赤青赤と青赤青の間で有意差 (p=.011), 視覚刺激なしと青赤青の間で有意傾向(p=.096)が確認できた。また提示部位に関しても同様に下位検定を行い、すべての組み合わせに有意差がみとめられた(手首・中央:p<.001, 手首・肘:p<.001, 中央・肘:p<.001)。

CHC の条件も HCH 条件と同様に検定を行った結果、表4のように視覚刺激と提示部位の2つの要因に主効果が認めれ、2つの要因間に交互作用は認められなかった。こちらも下位検定で holm 法を用いて多重比較を行ったところ、表5のように視覚刺激なしと赤青赤 (p<.001), 赤青赤と青赤青(p<.001)の間で有意差が確認できた。また提示部位に関しても同様に下位検定を行い、手首と中央 (p<.001), 手首と肘 (p<.001)の間に有意差が認められた。

表1 ANOVA with ART の結果 (HCH)

| | F | Df | Df.res | Pr(>F) |
|-------|--------|----|--------|--------|
| 視覚 | 4.604 | 2 | 112 | 0.012 |
| 部位 | 27.119 | 2 | 112 | <.001 |
| 視覚:部位 | 2.0134 | 4 | 112 | 0.097 |

表2 多重比較の結果 (HCH: 視覚刺激)

| | 視覚刺激なし | 青赤青 | 赤青赤 |
|-----|--------|-----|-----|
| 青赤青 | + | - | - |
| 赤青赤 | n.s | * | - |

n.s: 有意差なし, +: p < 0.1, *: p < 0.05, **: p < 0.01
以下同様

表3 多重比較の結果 (HCH: 部位)

| | 手首 | 中央 | 肘 |
|----|----|----|---|
| 中央 | ** | - | - |
| 肘 | ** | ** | - |

表4 ANOVA with ART の結果 (CHC)

| | F | Df | Df.res | Pr(>F) |
|-------|--------|----|--------|--------|
| 視覚 | 6.619 | 2 | 112 | 0.0019 |
| 部位 | 27.193 | 2 | 112 | <.001 |
| 視覚:部位 | 1.256 | 4 | 112 | 0.29 |

表5 多重比較の結果 (CHC: 視覚刺激)

| | 視覚刺激なし | 青赤青 | 赤青赤 |
|-----|--------|-----|-----|
| 青赤青 | n.s | - | - |
| 赤青赤 | ** | ** | - |

表6 多重比較の結果 (CHC: 部位)

| | 手首 | 中央 | 肘 |
|----|----|----|---|
| 中央 | ** | - | - |
| 肘 | ** | ** | - |

4. 考察

まず、視覚刺激によらない、提示部位毎での結果に注目すると、1条件を除き各提示部位間において有意差が見られ、各部位での誤回答傾向や確率は概ね先行研究[3][11]と一致していた。また温度条件 (HCH/CHC) によって誤答率が高い部位が異なっているが、これは温点と冷点の部位ごとでの分布に偏りがあることが原因ではないかと考えられる。

次に、視覚刺激と温冷感覚との関係に注目すると、視覚刺激と温冷覚刺激で逆の情報を提示した場合、具体的にはHCHの温冷覚刺激に青赤青の視覚刺激を重畳した場合やCHCの温冷覚刺激に赤青赤の視覚刺激を重畳した場合に誤認率が上昇し、他条件と有意差が見られた。つまり、温冷覚刺激と異なる印象の色を視覚刺激として提示した場合に本現象が起りやすくなっていることがわかる。何らの研究でも、異なる色で同じ温度の物体に触れると、青い物体のほうが温かく感じやすいことが確認されている[14]。温冷覚刺激と一致しない視覚刺激が特に中央の提示位置のような回答に自信のない箇所に影響を与えた可能性がある。

5. むすび

本稿ではHot-Cold Confusionにおける温冷覚刺激と視覚刺激の関係を分析するため、先行研究で行ってきた温冷覚刺激に加えて、視覚刺激を提示し、前腕全体に対して知覚した温度を回答させる実験を行った。その結果、視覚刺激の項目と視覚刺激と温冷覚刺激の相互作用の項目で、温冷覚刺激と逆の視覚刺激を提示した場合に、Hot-Cold Confusionで有意差が発生しやすくなることが確認された。この結果はHot-Cold Confusionの発生傾向に視覚刺激という要因が影響していることを示唆している。

しかし、温冷覚刺激と一致する視覚刺激を提示した場合には有意差が見られなかったことから、特定の条件のみで視覚刺激の影響がみられることがわかった。

今回の実験では視覚刺激の色を赤と青に変えただけであるが、その他の要素についてもどのような視覚刺激がHot-Cold Confusionの発生に影響するのか、今後さらなる分析が必要である。

参考文献

- [1] B. G. Green: Localization of thermal sensation: "An illusion and synthetic heat," *Perception & Psychophysics*, Vol. 22, No. 4, pp. 331 - 337, 1977.
- [2] P. Bach, S. Becker, D. Kleinböhl, and R. Hölzl: "The thermal grill illusion and what is painful about it," *Neuroscience letter*, Vol. 505, No. 1, pp. 31 - 35, 2011.
- [3] K. Arai, M. Matsumuro, S. Hashiguchi, F. Shibata, and A. Kimura: "Hot-cold confusion: Inverse thermal sensation when hot and cold stimuli coexist in a thermal localization task," *Perception*, Vol. 50, No. 6, pp. 508 - 523, 2021.
- [4] 新井啓介, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "温冷覚刺激の複数箇所提示により生じる温冷逆転現象の分析(2) ~刺激位置の間隔を変更した場合について~", 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol. 22, No. HDC19, pp. 33 - 36, 2017.
- [5] 奥川夏輝, 橋口哲志, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: "刺激の提示面積が温冷感覚誤認現象に与える影響の分析", 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5A-01, 2019.
- [6] S. Hashiguchi: "Analysis of Hot-Cold Confusion on Fingers," *Journal of Robotics and Mechatronics*; Vol. 33, No. 5, pp. 1117 - 1127, 2023.
- [7] 辻勇太, 藤光翼, 松室美紀, 柴田史久, 木村朝子: "接触刺激がHot-Cold Confusionに与える影響の分析", 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1E3-4, 2021.
- [8] S. Kanaya, Y. Matsushima, and K. Yokozawa: "Does Seeing Ice Really Feel Cold? Visual-Thermal Interaction under an Illusory Body-ownership," *PLOS ONE*, Vol. 7, pp. 1 - 7, 2012.
- [9] D. Eckhoff, C. Sandor, G. L. Y. Cheing, J. Schnupp, A. Cassinelli: "Thermal pain and detection threshold modulation in augmented reality," *Frontiers in Virtual Reality*, Vol. 3, pp. 1 - 10, 2022.
- [10] 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "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", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 503 - 511, 2016.
- [11] 羽田野将大, 辻勇太, 松室美紀, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: "Hot-Cold Confusionにおける各温度の知覚分布に関する分析", 第28回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2A2-06, 2023
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 何昕霓: "物体の温度知覚に色情報が与える影響", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol. 20, 33A-2, 2015.
- [15] 岩村吉晃: "タッチ (神経心理学コレクション)", 医書院, 2001.
- [16] L. A. Elkin, M. Kay, J. J. Higgins, and J. O. Wobbrock: "An Aligned Rank Transform Procedure for Multifactor Contrast Test," *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.754 - 768, 2021.