

額電気刺激による温度感覚提示の検討

○齋藤 大雅 (電気通信大学), 張 建堯 (電気通信大学),
亀岡 嵩幸 (電気通信大学), 梶本 裕之 (電気通信大学)

Examination of Thermal Sensation Using Forehead Stimulation

○Taiga SAITO (UEC), Jianyao ZHANG (UEC),
Takayuki KAMEOKA (UEC), and Hiroyuki KAJIMOTO (UEC)

Abstract: We propose a new way of presenting thermal sensation to the forehead, by using electrical stimulation. This is based on our discovery that when applying electrical stimulation to the forehead, thermal sensation occurs in rare cases. We conducted an evaluation experiment and found that cathodic current stimulating frequently gives cold sensation, and the sensation is highly correlated with pressure sensation.

1. はじめに

近年、安価な HMD の普及により HMD を装着することを前提とした VR コンテンツが増加している。VR 空間で高い没入感を実現するために視覚・聴覚の再現に加えて、触覚などの別のモダリティを提示することが有効である[1]。

触覚体験を HMD 使用時に簡便に実現するため HMD 自体に触覚提示装置を内蔵することが多数提案されている[2][3]。中でも温度感覚は臨場感を向上させるうえで重要であり、様々な温度感覚提示ディスプレイが研究されている。例えば、Peiris らはペルチェ素子を HMD のクッション部に内蔵し、VR 環境温度の提示と方向指示を行った[4]。また、Liao らは水流による温度提示と触覚提示を同時に行った[5]。

しかし従来の温度提示時手法は、HMD 内部に熱がこもり放熱が難しく急激な温度変化に対応できない、提示装置が大きくなる、触覚提示により HMD がずれるといった問題がある。これらの問題を解決するためには、物理的な手法で温度提示することなく温度感覚を提示することが有効であると考えられる。Brooks らはカプサイシンやユーカリプトール等の化学物質を用いた科学的提示方法を提案している[6]。しかし化学物質による提示では錯覚による温度感覚提示の効果が消えるまでに時間がかかるという別の問題が生じると考えられる。

我々はこうした問題に対して、時間応答性の高い電気刺激を用いた額への温度感覚提示を利用することを提案する。我々は経験的に額電気刺激によって温度感覚が稀に生じることを発見していた。我々は前報において被験者 1 人に対して額電気刺激による温度感覚提示について調査した[7]。本報告では、被験者 10 名に対して額電気刺激によって温度感覚が生起するか調査し

た。額電気刺激により温冷間を安定的に提示できれば、HMD 内部に熱がこもらず省スペース、省電力な装置で温度、振動、圧覚提示を一つのデバイスで行える可能性がある。

2. 実験

2.1 実験装置

電気刺激は Fig. 1 に示す 61 点の円形電極を等間隔に六方最密充填配置した電気刺激装置で行った。電気刺激装置は Kajimoto らの装置を利用した[8]。各電極の直径は 1.2mm、電極間中心距離は 2mm で、電気刺激のパルス幅は 0.5ms、パルス周期は 11.0ms で行った。

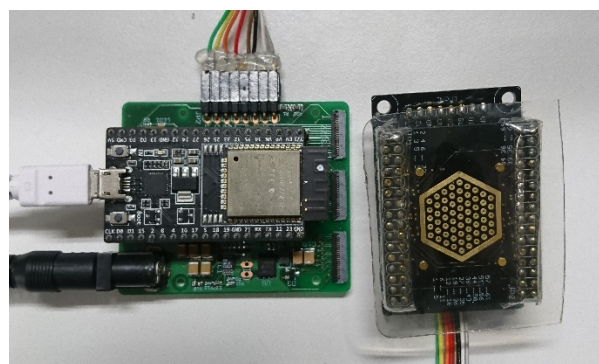


Fig. 1. Electrotactile display (Left: Microcomputer, Right: A circuit of 61 array electrodes)

2.2 実験

2.2.1 予備実験

本実験を始める前に予備実験として電気刺激によって温度感覚が最も生起する点を調査した。Fig. 2 のように額中央に 1mm のゲル (積水化成 G グレードゲル) を

挟み電気刺激装置をバンドで装着して 61 点に電気刺激を行った。ゲルそのものによる冷感生起の影響を少なくするために装置を額に装着し、ゲルの冷たさを感じなくなった後に予備実験を行った。

Fig. 3 のように電気刺激は電極 1 点ごとに 1mA の陰極刺激を行い、冷覚が生起するか回答し、回答後刺激点を移動して 61 点の中から温度感覚が生起する点を調査した。次に冷覚が生起した点ごとの温度強度を 0 (常温) から 9 (氷に触れている) の 10 段階で回答し、最も冷感を生起する点を調査した。同強度の冷覚が生起する点があった場合はその点同士を順次に刺激して比較を行い、最も強く冷覚が生起する 1 点を見出した。

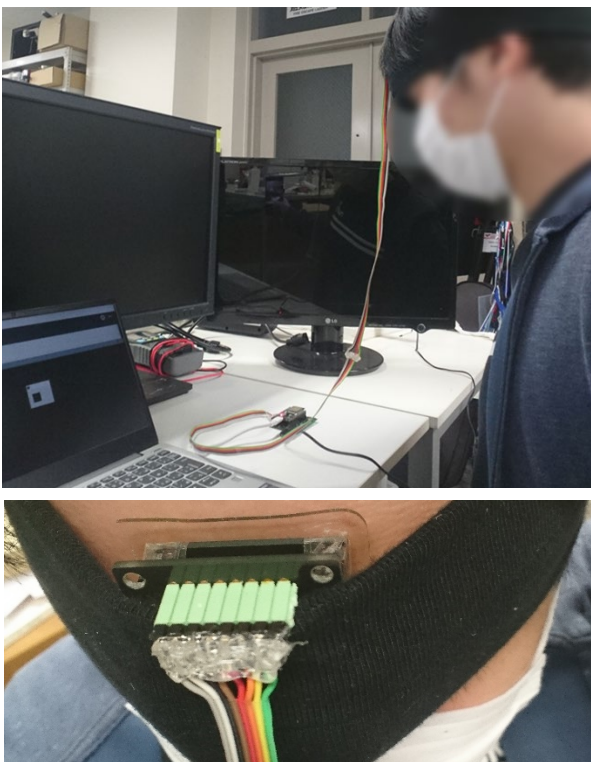


Fig. 2. Experiment Environment (Upper: External Appearance, Lower: Applied part)

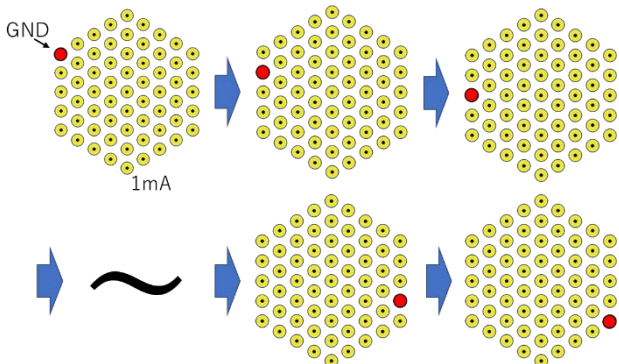


Fig. 3. Movement of stimulus points

2.2.2 本実験

本実験は、温度感覚が最も強く生起した点を刺激点として、刺激点に 5 種類の電流値 (1, 1.5, 2, 2.5, 3mA) を各 5 試行ずつ、計 25 試行をランダムな順番に提示した時の被験者に生じる温度感覚を調査した。各試行では、電気刺激を 5 秒間提示後に刺激を止めて温度強度 (0: 常温—9: 氷に触れている感覚)、振動強度 (0: なし—9: 携帯のバイブレーションに触れている感覚)、圧覚強度 (0: なし—9: 指で強く押した感覚) についてそれぞれ 10 段階で評価した。なお本実験は電気通信大学倫理委員会の審査を経て実施された (管理番号 20024)

3. 実験結果

被験者は健全な男女 10 名 (男性 9 名, 女性 1 名) で行った。そのうち予備実験では温度感覚が生起したが、本実験では温度感覚がほとんど生起しなかった男性 1 名を外れ値として除外した。

温度感覚が生じる場所 (ここでは冷点と呼ぶことにする) の数は人により異なり、冷点数の平均は 13.9 点だった。冷点数の分布を Table 1 に示す。電極総数の 61 点中に最小で 2 点, 最大で 34 点に冷覚が生起する人がいた。ここで冷点の数が平均以上の集団と平均未満の集団で、電気刺激によって感じた温度強度を比較したものを Fig. 4 に示す。人数が少ないため検定は行っていないが、冷点の数が平均以上の場合に電流値に比例して温度感覚が上昇していることが見て取れる。

Table 1. Distribution of the number of occurrences relative to the number of cold points

冷点数	~10	~20	~30	~40
人数	4	2	2	1

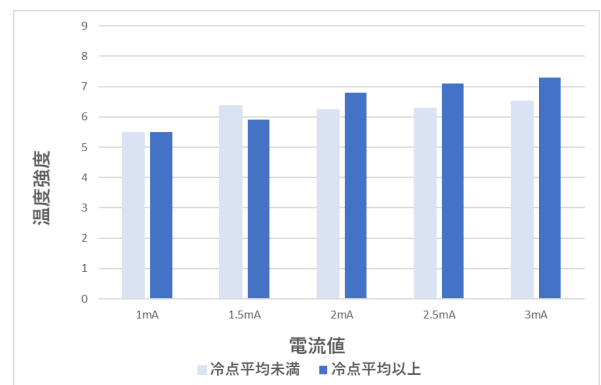


Fig. 4. Increase or decrease in temperature intensity due to differences in the number of cold points

全体平均の各主観値評価を Fig. 5 に示す. 全体平均では電流値に比例して温度, 振動, 圧覚感覚が緩やかに増加していた. また, 被験者ごとに傾向を見ると, 電流値が増加するにつれて温度感覚が上昇傾向にある人が 5 名, 下降傾向にある人が 2 名, 上昇後下降する人が 2 名いることが明らかになった. 上昇後下降する人は, 振動, 圧覚強度も電流値の増加に伴い上昇後下降していた. 傾向ごとの主観値評価を Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 に示す.

全被験者の各電流値で生じた温度強度, 圧覚強度, 振動強度の各主観値評価に対するそれぞれの相関図を Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す. 温度強度と圧覚強度の相関係数は 0.792 と強い正の相関を示した. なお同様の相関を温度強度と振動強度, 圧覚強度と振動強度との間で観察した所, 相関係数は 0.362, 0.463 であった.

額電気刺激による冷覚生起は, 氷を額に押し当てた時の広がるような冷たさではなく, 針を押し付けられた部分だけ冷たい局所的な冷たさで生起したというコメントが多かった.

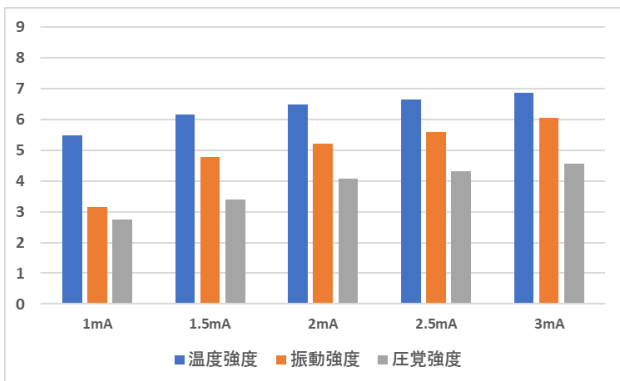


Fig. 5. Overall mean (Average of 9 people)

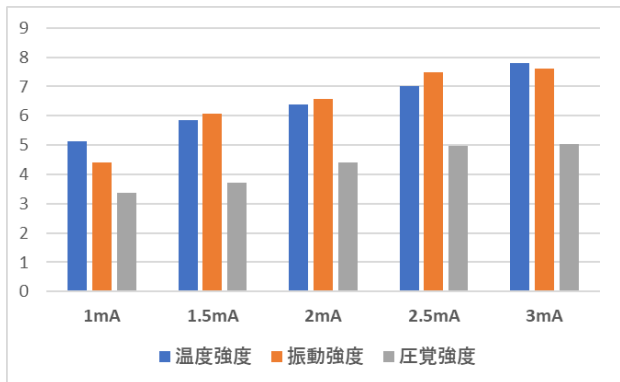


Fig. 6. Upward trend (Average of 5 people)

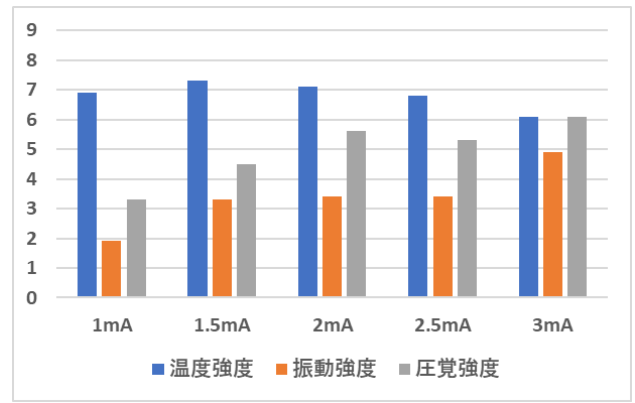


Fig. 7. Downward trend (Average of 2 people)

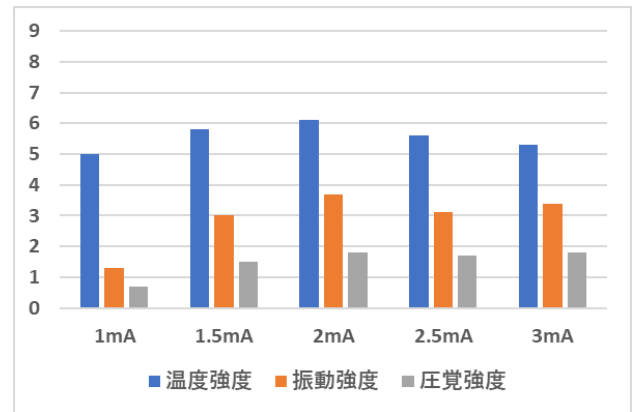


Fig. 8. Upward and downward trend (Average of 2 people)

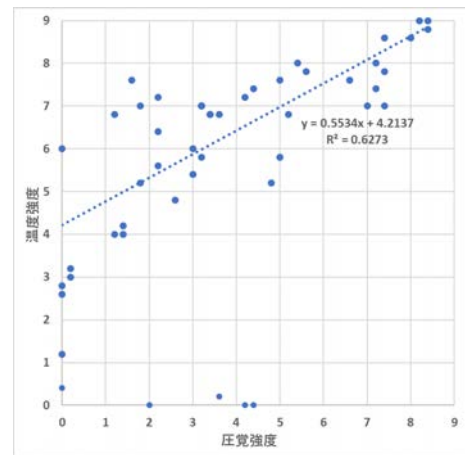


Fig. 9. Correlation between temperature intensity and pressure intensity

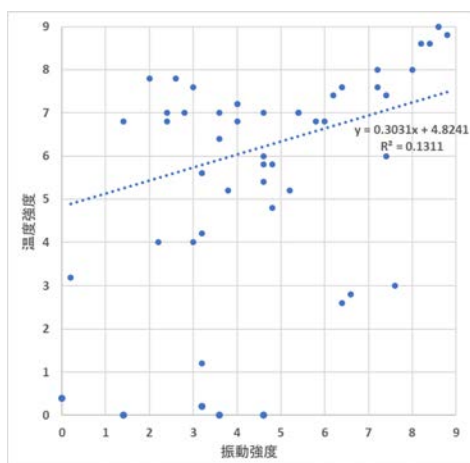


Fig. 10. Correlation between temperature intensity and vibration intensity

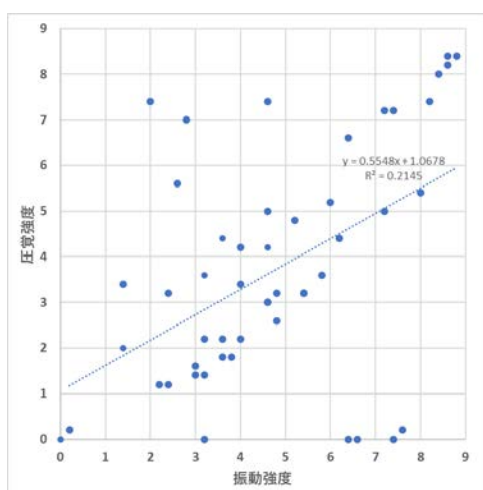


Fig. 11. Correlation between pressure intensity and vibration intensity

4. 考察

実験の結果から、圧覚強度と冷覚の温度感覚強度に相関があることが示唆された。相関図は異なる電流値の実験結果を併せたものであるため、電流の増加に伴う一般的な感覚の増加によって生じた疑似相関も含まれると考えられる。この点は今後精査する必要があるが、現時点では圧覚強度と冷覚強度に関連があると仮定した時に考える原因について考察する。まず圧覚は温度に強く影響されるのに対し[9]、30Hz程度の低周波振動感覚は温度の影響をほとんど受けないことが知られている[10]。また冷たいものを重く感じるという錯覚現象は古くから知られている[11]。このことから2つの感覚の間に心理的な相互作用が発生している可能性が考えられる。ただし、「冷たいものを重く感じる」ことはよく知られているものの、「重いものを冷たいと感じる」ことは知られておらず、例えば今回の実験セット

アップで電極を押すことで圧迫してもそれによって冷覚は生じないので、あくまで今回生じた冷覚は圧覚を錯覚したものではないと考えられる。

一方電気刺激においては、刺激電流の極性と生起感覚に関連があり、陰極刺激では圧覚が振動感覚より優位となり、陽極刺激では振動感覚が圧覚より優位となることが知られている[12][13]。今回の実験に先立つ予備的検討では冷覚は陰極の時に生じやすいことがわかっていたため、今回の実験では陰極刺激を利用した。このことから電気刺激される神経の性質（軸索の向きや末端の電氣的境界条件など）が、冷覚と圧覚で類似していた可能性があると考えられる。

本実験では人により冷覚が生じる個数や場所、温度強度が大きく異なることが観察された。これは、人により額の皮膚の厚さや冷点の数が異なることが影響していると考えられる。また電流の増加に伴う温度感覚の変化に3つの傾向があることが観察された。一般的に電気刺激では電流量に伴って感覚は単調増加する傾向にあるが、そうならない場合がある理由として、温度感覚が他の圧覚や振動感覚によってマスクされる場合があることが考えられる。

5. おわりに

額電気刺激によって冷覚を生起する冷点の数や場所、電気刺激条件には個人差があるが、電気刺激により冷覚が生起することが確認できた。また圧覚強度と温度強度との間に相関があることが示唆された。

今回の調査により電気刺激により冷覚を生じる点には個人差があることがわかった。したがって電気刺激により温度感覚提示を行うためには、温度感覚が生起する点をキャリブレーションすることが重要である。今後の課題として冷点を素早く見つける手法の確立と冷点部位の法則性を見出すことが考えられる。また、得られた知見に基づき電気刺激冷覚提示装置をHMDに内蔵し、アプリケーションへの応用を行っていく。

謝辞 本研究はJSPS 科研費JP20K20627の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Dangxiao Wang, Kouhei Ohnishi, Weiliang Xu, "Multimodal Haptic Display for Virtual Reality: A Survey," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 67, NO. 1, 2020.
- [2] Victor Adriel de Jesus Oliveira, Luca Brayda, Luciana

- Nedel, Anderson Macie, "Designing a Vibrotactile Head-mounted Display for Spatial Awareness in 3D Spaces," IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, VOL. 23, NO. 4, 2017.
- [3] Takayuki Kameoka, Yuki Kon, Takuto Nakamura, Hiroyuki Kajimoto, "Haptopus: Haptic VR Experience Using Suction Mechanism Embedded in Head-Mounted Display," SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality, 2018.
- [4] Roshan Lalintha Peiris, Wei Peng, Zikun Chen, Liwei Chan, Kouta Minamizawa, "ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays," in CHI, 2017.
- [5] Yi-Ya Liao, Ya-Fang Hong, Ping-Hsuan Han, Ju-Chun Ko, "LiquidMask: Utilizing Liquid-based Haptic for Multiple Tactile Sensation in Immersive Virtual Reality," SIGGRAPH 2019.
- [6] Jas Brooks, Steven Nagels, Pedro Lopes, "Trigeminal-based Temperature Illusions," in CHI, 2020.
- [7] 齋藤大雅, 張建堯, 龜岡嵩幸, 梶本裕之, "額電氣刺激による温度感覚提示の予備的検討," 日本バーチャルリアリティ学会, 2020.
- [8] Hiroyuki Kajimoto, "Electro-tactile Display with Real-time Impedance Feedback," EuroHaptics 2010, pp. 285–291, 2010.
- [9] K. A. Provins, Rosemary Morton, "Tactile discrimination and skin temperature," JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY, 1960.
- [10] Barry G. Green, "The effect of skin temperature on vibrotactile sensitivity," Perception & Psychophysics, VOL.21, pp243-248, 1977.
- [11] Johann P. Kuhtz-Buschbeck, Johanna Hagenkamp, "Cold and heavy: grasping the temperature-weight illusion," Experimental Brain Research, pp. 1107-1117, 2020
- [12] Vibol Yem, Hiroyuki Kajimoto, "Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation," IEEE Trans. on Haptics, Vol.10, pp.130-134, 2017.
- [13] Hiroyuki Kajimoto, Naoki Kawakami, Taro Maeda, Susumu Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence(ICAT99), Tokyo, Japan, 1999.