



ペルチェ素子を用いた温熱覚提示装置の開発

Development of a Thermal Sense Presentation Device Using Peltier Modules

川田涼馬¹⁾, 橋本泰成¹⁾

Ryoma KAWATA, Yasunari HASHIMOTO

1) 北見工業大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165, m1852300040@std.kitami-it.ac.jp, hashimya@mail.kitami-it.ac.jp)

概要: VR からの感覚フィードバックの一つとして, 温熱覚の提示法が注目されている. 本研究では, ペルチェ素子を用いて VR 使用者の手に局所的に熱を与え, その熱量を VR 内の手と仮想的な「火」の距離に応じて変化させるシステムをフィードフォワード制御で実現した. これにより従来のシステムよりも応答性を高めることを狙った. また被験者 4 名で試用させ, 視覚フィードバックが体感温度に与える影響を調査した.

キーワード: 触覚, 温熱覚, ペルチェ素子

1. はじめに

VR における触覚の研究は, 特に触覚の心理的 5 要素である柔硬や粗滑, 乾湿, 温冷, 痛みを提示する研究が進んでいる. 例えば, 熱覚に関する先行研究 [1][2]では, レーザーや可視光 LED を使って熱を提示した. 冷覚[3]に関しては VR ではないが動画とペルチェ素子を組み合わせたシステムが提案されている. また, 振動覚[4]や圧覚[5]を与える取り組みも報告されている.

こうした要素技術を研究段階から製品や汎用デバイスに昇華させるためには, 振動覚や圧覚, 温熱覚または他の感覚を再現する装置は可能な限り小さくすることが望まれる.

そこで, 将来的に小型でウェアラブルな VR 温熱覚デバイスを開発する前段階として, 本研究ではペルチェ素子を熱源とするラバーハンドイリュージョン (以下 RHI) 誘発型のシステムを試作し, その性能について論じることを目的とした.

VR 研究における一般的な計測では, 製作した装置の物理特性の計測と, 装置を実際に被験者に使用させたときのアンケートや心理学的な指標によって回答をさせる心理物理学測定が大半であり, 本稿でもこの両面について報告をする.

2. 背景知識

本研究で利用した RHI とは, 被験者自身の手 (リアルハンド) とゴムの手 (ラバーハンド) を並べて机の上に置

き, 被験者にリアルハンドが見えないように仕切りを置き, 被験者がラバーハンドを注視しているとき, ラバーハンドとリアルハンドに同期させた刺激を与えることで, ラバーハンドをあたかも自らの手だと錯覚する現象である[6].

この現象は触覚の錯覚だけではなく, 触覚や痛覚, 温熱覚といった複合的な手の感覚情報処理にも影響を及ぼす[7]. しかし, この錯覚は即応性に優れておらず, 被験者の学習の要素に強く依存する. また誘発させるためには 2~20 分程度の時間を要する[8].

先行研究によれば, ラバーハンドにレーザーを当て, それを被験者が見続けるという, 刺激が視覚のみによるものでも 66%の被験者において, 触覚が生起されたという報告があり[8], 触覚刺激は必ずしも必要ではなく, 視覚的な VR のみでも誘発できると考えられる. そこで, 本研究では RHI 誘発させるため, リアルハンドと同期する仮想空間上の手を利用した.

3. 方法

3.1. システム構成

本研究で作製したシステムは, 図 2 に示すようにヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) (HTC VIVE Pro, HTC, 台湾・Valve, 米国), VR グローブ (Noitom Hi 5 Glove, Noitom, 米国), マイクロコントローラ (Arduino Uno, Arduino, イタリア), モータードライバ (TA7291P, 東芝), ペルチェ素子 (FPH1-3103NC, ジーマックス) で構

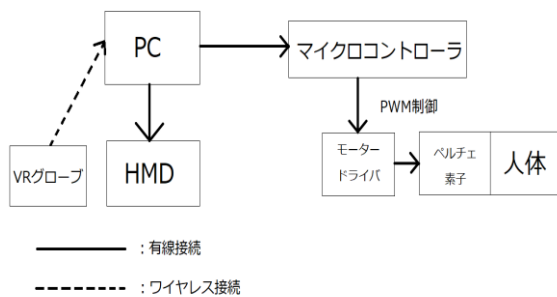


図 1: システム構成

成されている。仮想現実には Unity (バージョン 2017. 4. 26f1, Unity Technologies, 米国) を使って作成した。基本設計は、以下の通りとなっている。

仮想空間内では VR グローブと連動した仮想的な手が表示されるようにした。その手と VR 内の火との距離は、ソフトウェアで算出し、その距離に応じた値を、マイコンにシリアル通信で送信した。この時マイコンが、送られてきた値に応じてペルチェ素子に流す電流量を PWM で制御した。この PWM 制御では、仮想的な手と火の距離に比例するように Duty 比を変化させた。仮想的な手と火の距離が 1 m 以下となったときに通電を開始し、距離が 0.1 m 近づくごとに Duty 比を初期値 25% から 6% ずつ増加させ、手と火の距離が 0.1 m 以下となったときに 78% になるように設定した。

3.2. ペルチェ素子の温度計測

装置の特性を調べるために、Duty 比を段階的に変化させたときの温度上昇を経時的に計測した。この温度測定では、VR は使用しなかった。

まず直流電源でペルチェ素子に印加する電流や電圧の最大値をそれぞれ 3.8V, 1.0A とした。温度測定にはサーモカメラ FLIR C2 (FLIR Systems, 米国) を用いて電流を流し始めた時間を 0 秒として 5 秒間隔で 5 分間、温度測定し、Duty 比を 0%, 20%, 39%, 59%, 78%, 100% の 6 条件に分けてそれぞれ 3 回ずつ測定した。

ペルチェ素子は、電流を逆にすることで冷却することができ、温度提示後に常温にすばやく戻すこともできる。そこで冷却時の温度変化を空気に晒している状態で測定した。Duty 比は比較のため上記と同様の 6 条件として、計測した。各条件において、40°C を基準温度として基準温度から冷却を開始した。開始後から 1 分間電流を流し、5 秒おきに温度を測定した。装置簡素化のためペルチェ素子にヒートシンクは接続しなかった。

3.3. 装置の試用と心理学的計測

被験者は 22~23 歳の被験者 4 名 (すべて男性) として、被験者の協力の下で、装置使用時の心理学的計測を実施した。

被験者に本装置を装着させ、HMD 内に見える仮想的な

火に手を 5 秒以上近づけさせ、そのときの感覚を、それぞれ 1 から 7 までの尺度で回答させた。

本研究では、1 で全く感じない、4 で熱い、7 で耐えられないほど熱いという尺度により被験者に熱感覚を回答するよう伝えた。また事前の検討で弱い痛みを感じる被験者がいたため、痛みについても同様の尺度で内観を答えさせた。

ペルチェ素子は、弱電流だと応答性が悪いため、仮想的な手と火の距離が 1 m 以下になった時点で、Duty 比 100% で 5 秒間電流を流した。その後、手と火の距離に応じて Duty 比 25~78% で電流を流した。

さらに HMD やペルチェ素子の装着状況による内観の変化を見るため、以下の条件に分けて測定を実施した。

まず条件 1 として、HMD とペルチェ素子を装着し通常の使用方法で記録した。次に HMD のみを取り外し、条件 1 と同様に記録を行った (条件 2)。ここで、ペルチェ素子を装着していることへの慣れを確認するため再び HMD を装着し同様に計測した (条件 3)。最後に条件 4 として、ペルチェ素子を取り外し HMD で視覚的なフィードバックのみを与えた。上記測定は 3 回測定した。

また、測定時、ペルチェ素子は 1 か所、もしくは 2 か所 (図 2) に装着した。これは、ペルチェ素子の枚数の変化によって被験者が熱を受ける面積の変化し、内観が変化するかを調べるためである。装着するペルチェ素子の数を変えて上記の測定を実施した。ペルチェ素子の発熱部分は 15 mm×15 mm の正形状だった。

ペルチェ素子が 1 か所の時は手掌か手関節のより熱を感じやすい方に装着し、2 か所の時は手掌・手関節の両方に装着した。また、このとき、ペルチェ素子は、同じ駆動電圧がかかるように並列接続した。



図 2: ペルチェ素子装着位置

4. 結果

4.1. ペルチェ素子の温度計測

温度計測において、通電して温度を上昇させた結果を図3に示す。Duty比0%以外の条件では、通電開始直後は急激に温度が上昇し、その後温度上昇が緩やかになるが、単調増加する傾向が見られた。Duty比100%では、5分間で23℃から72℃と約50℃上昇した。Duty比20%では、約10℃上昇と、上昇率も20%となっており、Duty比と最終的な温度の上昇の比率はほぼ一致していた。

次に、温度を低下させた場合の結果を図4に示す。時刻0秒は、ペルチェ素子が40℃になった状態で、駆動電流の極性を冷却方向にして通電を開始した時刻である。Duty比39%以上では、時刻10秒で温度が下降から上昇に転じた。またDuty比によって開始後10秒までの温度の下降率が異なっていた。

4.2. 心理学的計測

被験者4名の内観の平均値を図5, 6に示す。結果としてHMDを外した際に熱さの内観が減少し、痛覚の内観が増加していることがわかる。また、ペルチェ素子が1か所の場合でも2か所の場合でもほぼ同様の値の内観が報告された。また、ペルチェ素子がない場合でもわずかではあるが熱の内観が報告された。また4名の被験者の内2名で、弱い痛みが感じられたことがわかった。

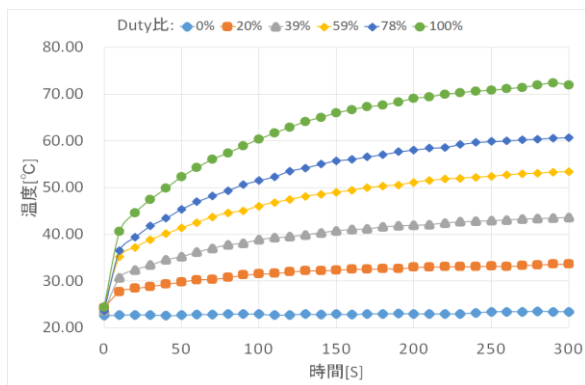


図3: ペルチェ素子の温度上昇

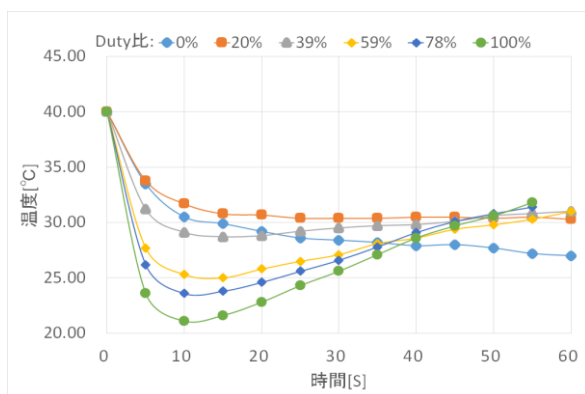


図4: ペルチェ素子の温度下降

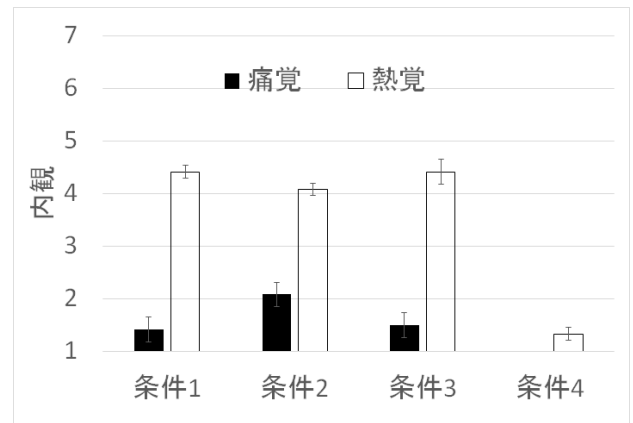


図5: 心理的尺度測定結果 (ペルチェ1か所)

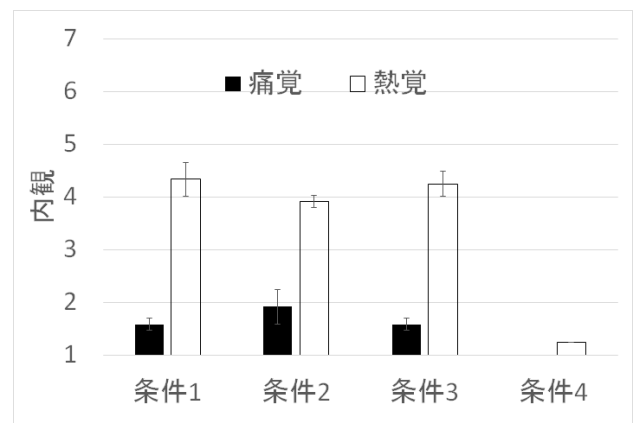


図6: 心理的尺度測定結果 (ペルチェ2か所)

5. 考察

試作した装置を駆動し温度を計測した結果、Duty比が高いと開始数秒は温度変化が著しいが、数十秒から100秒ほど経過すると、40℃を超えることがわかった。40℃を超えると、人が使ったときに火傷をする可能性があると考えられる。一方で、Duty比が低いと温度変化は緩やかになるが、目標とする温度(40℃)に到達するのに100秒以上を要する。先行研究[3]では、この研究では冷却時のものであったが、ペルチェ素子に電流を流す時間は4秒と短時間であった。そこで、開始数秒はペルチェ素子を急速に熱し、その後はDuty比を下げ、仮想的な火に手を近づけている間は、定値制御させるのがよいと考えられる。

ペルチェ素子の冷却では冷却開始後10秒で温度がかえって上昇してしまい、これは予想外の結果だった。この原因としては、ペルチェ素子は吸熱面の反対側で発熱をしているので、その発熱が吸熱側に伝搬した可能性が考えられる。この問題には、冷却時間を10秒以内に限定する、もしくは冷却時には極性を入れ替えず、ただ電流を切るようにするなどの対策が考えられる。

心理的な尺度の測定では、熱覚も確認されたが、2名の被験者で痛みも誘発された。これは実験者らが意図していない効果であった。この原因については、視覚情報の影響が考えられる。先行研究[9]では、視覚情報から起こされる

印象から、実際に触れたときの触覚情報が影響を受けることが報告されている。本研究では、HMDを装着していない（視覚的なフィードバックがない）状態で、痛みの内観が増加しており、このことから視覚の影響が考えられる。おそらく視覚情報と与えられた熱がある程度一致していることで痛みは低減されると考えられる。

システムからの漏電による感電についても事前に考慮したが、漏電が痛みの原因になった蓋然性は低い。事前の検討で漏電のチェックを実施しており、漏電は確認できなかった。また、本研究で使用した電源の最大電圧は3.8Vであり、感電を引き起こせるものではなかった。

ペルチェ素子の枚数によって内観が変化しなかったのは、より熱覚を感じやすい手関節の影響が大きく、手掌のペルチェ素子はあまり内観を変化させていなかったことが考えられる。

今後の展望として、以下の問題点を解消していく。まず一つ目の問題は、心理学的な評価と実際の物理的な温度の関係性が確かめられないことである。これは、装置の改良案として、温度センサーの導入を検討している。二つ目の問題は心理学的な評価の比較項目が少ないことである。これは、加熱時でもさらに条件を増やすことや、加熱のみではなく、手を火に近づけたうえで冷却を行った際の心理学的な評価を取るなど、評価項目を増やし解決したい。

6. 結論

本研究では、温熱覚とVRの組み合わせに注目し、熱覚提示装置を製作した。また、その装置の特性試験や試用を実施した。その結果、VR内の仮想的な火の温度を実際に感じる事ができた。

謝辞

本研究はJSPS科研費18K17707, 15K12551, 25750197の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 嵯峨智 (2018) 「レーザー光による熱放射を利用した触覚ディスプレイの熱伝達」, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33A-1, 2018.
- [2] 界瑛宏, 三武裕玄, 長谷川晶一 (2017) 「可視光LEDを用いた非接触型温覚提示装置の開発」, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1D3-06, 2017.
- [3] 前田智祐, 倉橋哲郎 (2018) 「ウェアラブルな温冷覚多点提示システム TherModule の基礎検討」, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 34A-1, 2018.
- [4] Yukari Konishi, Nobuhisa Hanamitsu, Kouta Minamizawa, Benjamin Outram, Tetsuya Mizuguchi, and Ayahiko Sato. Synesthesia suit: the full body immersive experience. In ACM SIGGRAPH 2016 VR Village, p.20. ACM, 2016.
- [5] Alexandra Delazio, Ken Nakagaki, Roberta L Klatzky, Scott E Hudson, Jill Fain Lehman, and Alanson P Sample. Force jacket: Pneumatically actuated jacket for embodied haptic experiences. In Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, p.320. ACM, 2018.
- [6] Matthew Botvinick, and Jonathan Cohen. Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. Nature, 391, 756. 1998.
- [7] 金谷翔子, 横澤一彦 (2015) 「手の身体所有感覚とラバーハンド錯覚」, バイオメカニズム学会誌, Vol39, No2, 2015.
- [8] 本間元康 (2010) 「ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり」, 認知科学 17 (4) pp. 761–770, 2010.
- [9] 山本健太郎, 崔原齊, 三浦佳世 (2014) 「視覚的触感に触覚情報が及ぼす影響」, 基礎的心理学研究, Vol.33, No.1, 9–18, 2014.