



不連続的な温度変化による非接触冷覚の連続性に関する評価

許佳諱¹⁾, 長谷川晶一²⁾, 黒田嘉宏³⁾

Jiayi XU, Shoichi HASEGAWA, and Yoshihiro KURODA

1) 筑波大学 理工情報生命学術院 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, xujiayi@lelab.jp)

2) 東京工業大学 精密工学研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259, hase@pi.titech.ac.jp)

3) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, kuroda@lelab.jp)

概要: 本研究では、温度変化を時間的にゼロに保ちつつ温度感覚を変容させる非接触冷覚提示を目指し、不連続的な温度変化による冷覚を連続的に提示する方法を提案する。具体的には、冷却用の冷気源と加熱用の光源を組み合わせ、皮膚温度の上昇と下降を非接触で交互に変化する。皮膚温度が急速に低下し、ゆっくりと上昇する場合、冷覚のみが知覚される。本稿では、システムを実装し、提案手法による非接触冷覚の連続性について評価した。

キーワード: 非接触冷覚提示, 感覚連続性錯覚, 冷気流, 可視光 LED

1. はじめに

近年、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及に伴い、バーチャルリアリティー (VR) の作成と体験が容易になった。さらに、HMD による視覚情報の提示が可能となるため、他の知覚情報の提示への要望が高まっている。その中で、温度情報は、周囲の環境を認識するための重要な要素として、注目されている。

人は環境にいる場合、物体に触れることなく、空気の温度を感じ、連続的に暖かさあるいは冷たさを感じる。そのため、温度情報を非接触で連続的に感じさせる必要がある。非接触型温度感覚提示については、電磁波を用いた温覚提示、ミストや超低温の冷気流などを用いた冷覚提示手法がある [1][2][3]。これらの方法は、皮膚の温度を大幅に変化させることにより、温度感覚を提示する。しかし、皮膚表面の温度を大きく変えることによって連続的に温度感覚を提示するのは、以下の観点から望ましくない。

- 皮膚温度を大きく変えると、温冷覚の閾値が変化し、同様な温冷覚提示が困難となる
- 過加熱または過冷却する可能性があり、安全上の問題が生じる

連続的に温度感覚を提示する場合、皮膚温度を大きく変化させない必要がある。連続的な温度感覚提示としては、強い冷刺激と弱い温刺激を同時に空間的に分布させることで皮膚の平均温度を変化せず冷覚を連続的に提示する研究が行われている [4]。皮膚の一部の温度が急速に低下し、一部の温度がゆっくりと上昇する場合、冷覚のみが知覚される。これはベルチエ素子を用いた研究であり、接触型温冷覚提示手法である。一方、非接触型温度感覚提示について、LED などの電磁波を用いた温覚提示は刺激を空間分布させることができるが、ミストや冷気流を用いた冷覚提示は刺激を細かく空間分布させることが難しい。

温冷覚の知覚特性より、温冷覚の時間応答性は視覚と比較して低い [5]。そのため、皮膚の温度が不連続に変化しても温冷覚を連続的に提示することが可能になる。本研究では、特に冷覚に着目し、不連続な温冷刺激により皮膚温度を保持しつつ連続的な冷覚を生起させる非接触冷覚提示手法を開発する。具体的には、冷却用の冷気源 (ボルテックスチューブ) と加熱用の光源 (LED) を組み合わせ、温度の上昇と下降を非接触で交互に変化する方法を考案する。

本発表では、提案手法による非接触冷覚の連続性について評価した結果を報告する。

2. 試作システム

試作システムの構成を図 1 (上) に示す。提示部に冷気吐出口と LED を配置する。冷気生成部で、一定の流量である冷気を生成する。流量制御部で、印加する電圧によって、生成された冷気の流量を制御する。流量が制御された冷気を提示部の冷気吐出口から出力することによって強い冷刺激を提示する。また、提示部に配置された LED の明るさを調整することによって弱い温刺激を提示する。試作システムは、冷気生成部、流量制御部、提示部によって構成され、図 1 (中) に示すように、それぞれボルテックスチューブ (Tohin 製 AC-50)、電磁弁 (Asco 製 Positive-flow-202)、3D プリンタ (ANYCUBIC 製 MEGA-S) で印刷した部品を用いて実装する。電磁弁の出力流量は PWM 方式によって制御する。図 1 (下) に示すように、提示部に 12 個の放熱基板付クールホワイト LED (CREE 製 XPGWHT-L1-STAR-G53 5 W) を配置する。集光するため、レンズ (CREE 製 LL01CR-DF40L06-M2-T 半値角 28 度) を各 LED に取り付ける。ファン (Nidec 製 D02X-05TS1 02 5V DC) は適切な放熱をするために放熱基板に取り付ける。エアークンプレッサ (Hitachi 製 POD-0.75LES) をボルテックスチューブ

ブに必要な圧縮空気を供給するために使用した。本システムで使用したエアークンプレッサは圧力が一定範囲内 (0.6~0.8 MPa) で保持される空気を出力することができるため、ボルテックスチューブから出力される冷気の温度は一定であると考えられる。また、本システムで使用したボルテックスチューブの冷風率を調整することができる。冷風率とは、コンプレッサからの供給空気量と冷気の量の割合である。冷風率が高い場合、出力される冷気は量が多く、入力された圧縮空気との温度差が小さい。本実験では、冷風率を 75 % に設定する。

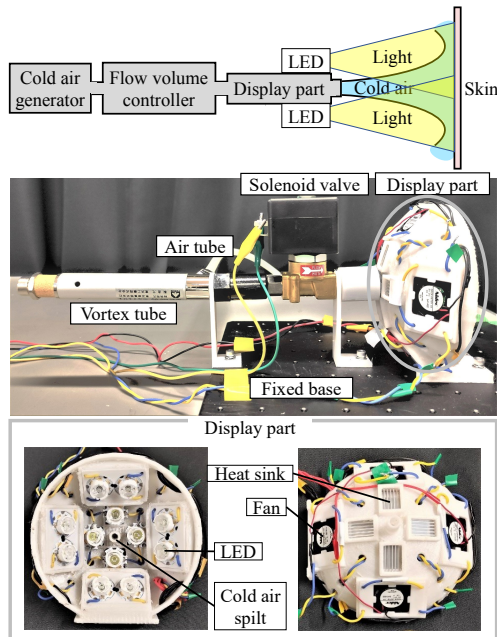


図 1: 試作システム: (上) システムの構成, (中) システムの全体図, (下) 提示部

3. 評価実験

本節では、手のひらを対象に二つの実験を行った結果について述べる。実験 1 では、実験 2 の準備として、各冷 (温) 刺激による温度変化を計測し、温度変化率に対応するデューティ比を調べる。実験 2 では、提案手法による冷覚の連続性を評価する。

3.1 実験参加者

12 人の実験参加者 (19~26 歳, 女性 4 人, 男性 8 人) がすべての実験に参加した。実験参加者は本システムの開発に関与していない。実験への参加に対して、それぞれ 1,000 円の Amazon ギフトカードが支払われた。実験参加者の募集と実験内容は、筑波大学 システム情報系研究倫理委員会 (2020R453) によって承認された。実験参加者は、書面によるインフォームドコンセントに参加することに同意している。

3.2 実験環境

図 2 に示すように、LED の光などの刺激情報を与えることと環境空気の流れの影響を避けるため、試作システムは遮光布で覆われていた。実験 1 では、サーモグラフィ

カメラ (Avionics/InfReC R450, 温度分解能: ≤ 0.025 °C) を用いて皮膚の温度変化を計測し、中温度ホットプレート (NISSIN/NHP-M20) を用いて皮膚の初期温度を設定した。実験 2 では、実験参加者はノイズキャンセリングヘッドホンを着装し、コンプレッサ、電磁弁、環境騒音の影響を避けるためにホワイトノイズを聞いた。エアコンで環境温度を 24 °C に設定し、温度センサ (Sensirion/SHT85) で測定したところ、生成された冷気の温度は 0 °C であった。

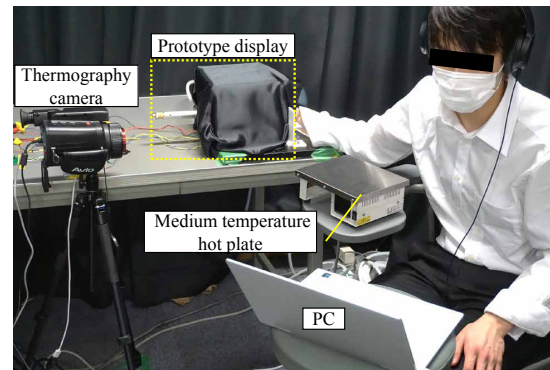


図 2: 実験環境

3.3 実験 1: 温度変化の計測

人によって個人差があるため、実験参加者ごとに冷刺激及び温刺激に対するキャリブレーションを行う必要がある。

3.4 実験手順

本実験では、6 秒間の刺激の前後に手のひらの皮膚温度を測定し、6 秒間の平均温度変化を温度変化率として計算した。冷刺激について、電磁弁に適用されるデューティ比は 55, 59, 63, 67, 71, および 75 % に設定した。デューティ比が最高および最低の条件について、温度変化率を三回計測し、他の条件について温度変化率を一回計測した。温刺激について、LED に適用されるデューティ比は 40, 51.5, 63, 74.5, 86, および 97.5 % に設定した。デューティ比が最高および最低の条件について、温度変化率を三回計測し、他の条件について温度変化率を一回計測した。実験時の環境温度は 24 °C であった。低温熱源から出力する冷気の温度は 0 °C であった。

図 3 に示すように、各計測では、実験参加者はまず中温ホットプレートに手を 20 秒間置いて、皮膚の温度を初期化した。次に、実験参加者は、Hand fixed base 1 に手を置いて、サーモグラフィカメラを用いて刺激を与えた前の熱画像を撮影した。その後、実験参加者は、Hand fixed base 2 に手を置いて、刺激を与えた。最後に、実験参加者は、Hand fixed base 1 に手を置いて、サーモグラフィカメラを用いて刺激を与えた後の熱画像を撮影した。熱画像の白いボックス (約 2×2 cm) 内の皮膚平均温度を計算した。

3.5 実験結果

計測結果の一例を図 4 に示す。実験 2 は各参加者の測定結果の線形回帰から、目標とする温度変化率に対応するデューティ比を算出する。

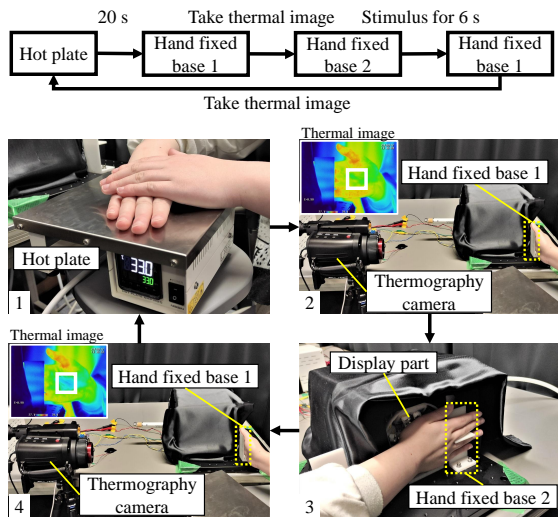


図 3: 実験 1 の手順

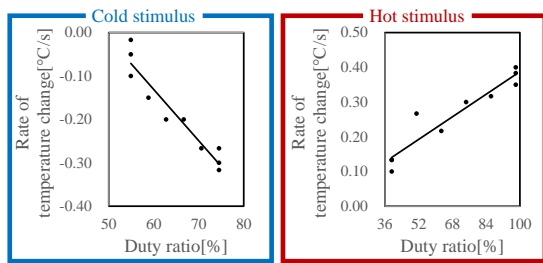


図 4: 計測結果の一例

3.6 実験 2 : 冷覚の継続性

本実験では、提案手法による冷覚を連続的に感じることができるかどうかを評価した。

3.7 実験手順

図 5 に示すように、皮膚の温度を 0.06 °C 以内に变化させ、加熱速度を 0.03 °C/s, 冷却速度を -0.12, -0.15, -0.18, -0.21, -0.24 °C/s にし、5 種類の温冷刺激パターンを設計した。各実験参加者に対して、各刺激パターンは 3 回の試行でランダムに提示された。刺激の提示が終わった後、実験参加者は「連続的に寒さを感じたか?」という質問に回答した。寒さを感じない、または寒さから暑さへの変化を感じる場合、「No」、そうでなければ、「Yes」を回答するよう指示した。

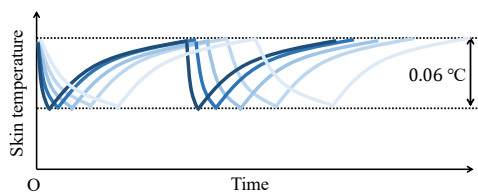


図 5: 温冷刺激パターン

3.8 実験結果

図 6 に示すように、「Yes」の回答率の結果は、冷却速度が -0.18 °C/s あるいはそれより遅い場合、冷却速度が速いほ

ど、連続的に冷たく感じやすいことを示している。一方、冷却速度が -0.18 °C/s より速い場合、知覚される連続性はわずかに低下した。

Cooling Rate[°C/s]	-0.12	-0.15	-0.18	-0.21	-0.24
“Yes” Answer Rate	0.50	0.53	0.69	0.69	0.64

図 6: 「Yes」の回答率

図 7 に示すように、冷却速度が速い場合、合計時間に対する加熱時間の比率が大きくなる。加熱時間の比率がある閾値を超えると、温刺激を感じる可能性が高くなると考えられる。今後は温刺激を感じやすくなる加熱時間の比率の閾値を調べる。

Cooling Rate[°C/s]	-0.12	-0.15	-0.18	-0.21	-0.24
Heating Time / Total Time	0.8	0.83	0.86	0.88	0.89

図 7: 合計時間に対する加熱時間の比率

4. むすび

本研究では、冷却用の冷気源と加熱用の光源を組み合わせ、非接触連続的な冷覚提示システムを開発し、不連続な温度変化が連続的な冷感を生成できることが示唆された。

謝辞 本研究の一部は科研費 (21H03474,21K19778) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 界瑛宏, 山口勉, 三武裕玄, 長谷川晶一, HMDVR のための可視光 LED による手への非接触型温覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 83-92, 2019. (In Japanese)
- [2] M. Nakajima, K. Hasegawa, Y. Makino and H. Shinoda, Spatiotemporal Pinpoint Cooling Sensation Produced by Ultrasound-Driven Mist Vaporization on Skin. IEEE Transactions on Haptics, 2021.
- [3] J. Xu, Y. Kuroda, S. Yoshimoto and O. Oshiro, Non-contact Cold Thermal Display by Controlling Low-temperature Air Flow Generated with Vortex Tube. 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp. 133-138, 2019.
- [4] A. Manasrah, N. Crane, R. Guldiken and K. B. Reed, Perceived Cooling Using Asymmetrically-Applied Hot and Cold Stimuli. in IEEE Transactions on Haptics, Vol. 10, No. 1, pp. 75-83, 2016.
- [5] J. Heron, C. Aaen-Stockdale, J. Hotchkiss, N. W. Roach, P. V. McGraw and D. Whitaker, Duration channels mediate human time perception. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, Vol. 279, pp. 690-698, 1729.