



非対称振動による温感の運動錯覚提示

Presentation of Moving Warmth Illusion by Asymmetric Vibrations

伊藤天翔¹⁾, 田辺健²⁾, 長谷川 晶一³⁾, 家永直人⁴⁾, 黒田嘉宏⁴⁾

Takato ITO, Takeshi TANABE, Shoichi HASEGAWA, Naoto IENAGA, 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)

2) 産業技術総合研究所 人間情報インタラクシオン研究部門 (〒 305-8566 茨城県つくば市東 1-1-1 中央事業所 6 群)

3) 東京工業大学 未来産業技術研究所 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259)

4) 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)

概要: 本研究では非対称振動が温感の運動錯覚を引き起こすか否かを調査し, その特性を検討する. 温感是非接触の可視光 LED で提示し, 運動錯覚には牽引力錯覚に用いられる非対称振動を適用する. 温覚提示と非対称振動あるいは正弦波振動を用いた比較実験で, 温感に運動錯覚が生じるかに加え熱源移動時の運動感との比較や, 錯覚を組み合わせた際の影響を調査した. 本研究により振動子による温感の運動感提示が可能になると期待される.

キーワード: 力覚・体性感覚, 感覚・知覚, 運動感覚, クロス・マルチモーダル

1. はじめに

近年, VR (Virtual Reality) のリアリティ向上のため, 非接触温感提示に関する研究が盛んに行われている. また, VR 空間における感覚フィードバックの一つとして, 温覚が注目されている. 音楽や映像と合わせて温刺激を提示することで, 心的印象を変化させられる [1][2] 他, VR 空間上で視覚情報と同時に物体の温度情報を伝えることで, 没入感の向上が可能である [3][4]. しかし, 温覚は視覚や触覚などの感覚に比べ知覚が遅く, VR 空間上で温感を運動させる表現に関しては議論されることは少ない.

皮膚上に温刺激を提示し, その感覚を運動させるとき, 錯覚を用いない手法としては提示部を並べて配置する方法や, 提示部自体を動作させる方法が考えられる [5][6]. しかし, これらの手法では温感の運動の表現可能な範囲に機械的な制限があると考えられる他, 装置が大型化しやすい問題がある.

そこで, 錯覚により温感の運動を提示する. Thermocaress は空気圧による触覚提示と恒温水循環による温覚提示を組み合わせた提示を行い, サーマルリファラルを用いて肌が撫でられているような温熱感覚の提示を可能にした [7]. しかし, 恒温水循環装置が大きくなり, 接触型の感覚提示であるため錯覚提示範囲が制限されている上, 接触感が生起感覚に影響を及ぼす可能性が考えられる. また, 温刺激による仮現運動を用いる手法も考えられるが, 錯覚提示前に数秒間温刺激を与える必要があり, また温感の運動感が断続的になり, 実際に提示したい感覚との間に誤差が生じる恐れがある [8]. こうした時間的・感覚的誤差や表現の制限は VR 体験におけるリアリティを低減させてしまう恐れがある.

そこで, 非接触, あるいは身体との接地面が十分に小さい装置による温感の運動錯覚提示により, 提示範囲の変化に対し柔軟に対応可能で, 提示したい感覚との誤差が少ない温感運動表現の実現が期待される.

本研究では, 可視光 LED による非接触温覚提示と, 小型の振動子を用いて方向提示が可能である牽引力錯覚を生起させる非対称振動に着目する [9]. 牽引力錯覚は皮膚感覚に由来する錯覚であると考えられている. 上肢運動によって錯覚の強度が強まる他, 運動感の随意性などに影響を与えることなどが確認されている [10].

関節伸筋の腱に対し振動刺激を加えることで, 関節が伸展する錯覚を生起させられる [11]. この錯覚を提示中に, 鼻に触れることで鼻が伸びたような感覚を提示することができる. これをピノキオ錯覚といい, 鼻だけでなくウエスト等にも触れることでも, その身体図式が変化することが知られている [12]. 雨宮らの研究により, 牽引力錯覚でも同様に身体図式の変化が生じることが示唆された [13]. そこで, 非接触での温感提示中に牽引力錯覚により手の身体図式が変化することで, それに伴い温感の運動錯覚を生起させることが可能ではないかと考えた. そこで, 本研究では非対称振動により温覚が運動する錯覚が生じるか否かを調査し, 生じる場合はその性質について調査することを目的とする. 本研究により, この錯覚が確認されることで, 新たな温感の運動表現が可能になると期待される.

2. 提案手法

本研究では図 1 のように, 非対称振動により牽引力錯覚を与えると同時に非接触で温感提示を行うことで, 温感が

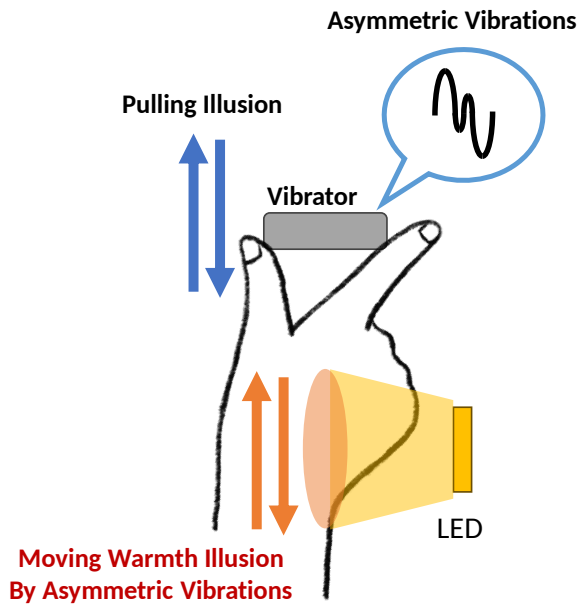


図 1: 非対称振動による温感の運動錯覚のイメージ

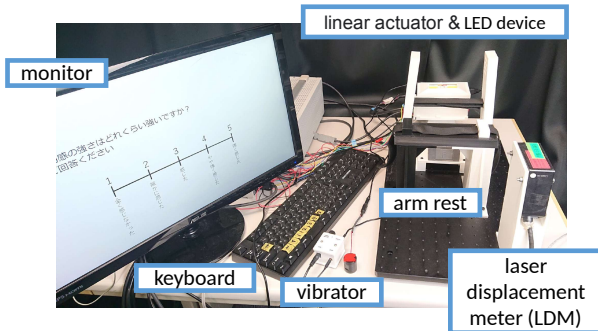


図 2: 実験システムのイメージ画像

運動するような感覚が生起されるかを調査する。具体的には、指先で把持した振動子に対し非対称振動を提示すると同時に、可視光 LED による非接触温覚提示を行うことで、温感の運動錯覚が生じるかを確認する。また、熱源の動作を同時に行うことで温感の運動感が変化するか調査するために、手や腕の任意の場所に温覚提示を行える非接触温覚提示装置を作成し、錯覚の性質に関する調査を行う。

2.1 提案装置・システム

本研究で使用する実験システムを図 2 に示す。システムは温覚提示位置をリニアアクチュエータにより制御可能な非接触温覚提示装置と、牽引力錯覚により並進力を提示する振動子によって構成される。実験中、参加者は指先で振動子を把持した状態で、前腕の付け根を腕置きに固定する。また、並進力提示中に腕が前後方向へ動いていないことを確認するために、KEYENCE 製レーザ変位計（型番：LK-G500）により、刺激提示中の変位計測を行う。そのため、参加者の腕にレーザ変位計用のストラップを装着させ、実験を行う。さらに、実験中に視覚情報が錯覚を妨げることを防ぐため、また LED 光やレーザ光から実験参加者を保護するため、装置全体を仕切りで覆っている。

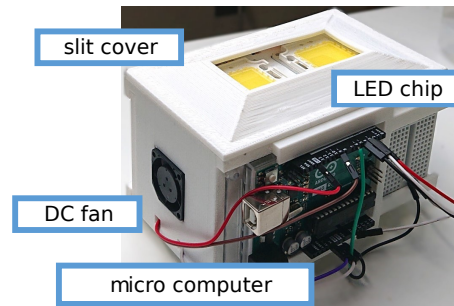


図 3: 非接触温覚提示装置

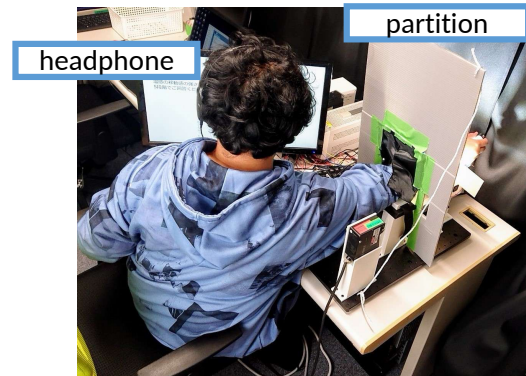


図 4: 実験の様子

2.1.1 非接触温覚提示装置

図 3 は作成した非接触温覚提示装置である。装置は箱型の LED 光提示装置により構成されており、リニアアクチュエータ（オリエンタルモーター 製 EZSM4RD015AZAC）に搭載することで手から前腕にかけて温覚提示を行う。箱型の LED 光提示装置は上面に二つの平面 LED (Coairrwy 製 High Power Chip LED 50 W) を配置し、内部の放熱のために箱両側面には DC ファン (Shenzhen YCCFAN Technology 製 YDM2507C05F) が取り付けられている。また、LED 光の提示範囲を制限し、実験参加者の手が直接 LED と接触しないようにスリットが装着されている。非接触温覚提示装置の部品や腕置きなどは、3D プリンタ (JAPAN 3D PRINTER 製 Raise3D Pro2 Plus) で製作した。また、LED 光の Duty 比と、リニアアクチュエータの制御は箱型の LED 光提示装置に搭載したマイクロコンピュータ (Arduino 製 Arduino Uno) により行う。

2.1.2 非対称振動提示装置






実験で使用する非対称振動提示装置には、バイブレーションアクチュエータ (FOSTER 製 型番: 639897) を用いる。実験参加者はバイブレーションアクチュエータを指先で把持し、非対称振動刺激には、先行研究 [14] で提案された刺激を用いた。

3. 評価実験

3.1 実験概要

実験の様子を図 4 に示す。刺激提示中は実験装置に仕切りをつけ、ヘッドホンからホワイトノイズを流すことで提示されている刺激パターンがわからないようになっている。

表 1: 刺激提示パターン

Pattern	LED move	waveform
1	fixed ×	sine wave 
2	fixed ×	asymmetrical wave 
3	normal loop ↑↓	sine wave 
4	normal loop ↑↓	asymmetrical wave 
5	reverse loop ↓↑	asymmetrical wave 

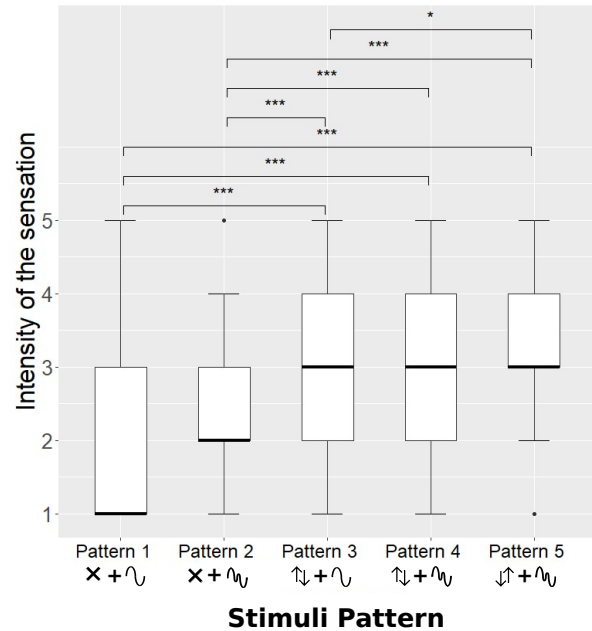
本実験では、実験を実施する前に参加者に非対称振動提示を行い、振動覚が知覚されることを確かめる。その後、非対称振動による温感の運動錯覚を確認し、その性質を調査する実験を行う。実験において、LED 光による非接触温覚提示と同時に、振動子から振動を提示する。振動の提示パターンは、正弦波振動と非対称振動を、振動により生じる牽引力錯覚の方向を切り替えながら提示する 2 通りである。また、刺激提示中リニアアクチュエータで熱源を移動させるパターンは、固定するパターン、非対称振動の提示とそれにより生じる牽引力錯覚と同方向に熱源を移動させる、前進した後に後退するパターン（以後、順往復と呼ぶ）と、非対称振動の提示とそれにより生じる牽引力錯覚と逆方向に熱源を移動させる、後退した後に前進するパターン（以後、逆往復と呼ぶ）の 3 通りである。リニアアクチュエータによる熱源の移動幅は 15 mm とした。実験で提示するリニアアクチュエータによる熱源の動作パターンと、振動子に入力する振動パターンの組み合わせは、正弦波振動の提示時は順往復と逆往復を区別しないため、表 1 に示す 5 通りである。

実験の初めに、実験参加者に対し振動覚のテストとして、把持した振動子に牽引力錯覚を発生させる非対称振動と錯覚を生じさせない正弦波振動を入力し、牽引力錯覚を知覚したかどうか二択で回答させた。偶然により正答した可能性を排するため、これを三回連続で正答するまで続けた。

刺激提示中、腕の移動によって温感の運動感が生じていないことを保証するため、レーザ変位計により腕の変位を計測する。データ処理として、腕の変位が ± 10 mm を超えるデータに関しては、腕が動いてしまったものとして使用しないものとした。また、刺激提示中にレーザ変位計による計測ができていないデータも、腕が動いていないことを保証できないため使用しないものとした。

3.2 実験方法

本実験では、非対称振動による温感の運動錯覚が生じるかの確認と、その基礎的特性に関して調査を行う。表 1 のパターン 1~5 をランダムな順番で提示した後、刺激提示中に感じた温感の運動感を 5 段階の一方方向リッカート尺度（1: まったく感じなかった, 2: 少し感じた, 3: 感じた, 4: 強く感じた, 5: とても強く感じた）により回答させる試行を各パターン 25 回、総試行回数が 125 回になるまで行う。すべての試行が終了した後、内観報告として、試行を行って感じたことについて回答を得る。実験 1 は 22 歳から 24 歳



* $p < 0.05$, *** $p < 0.001$

図 5: 実験: 刺激提示パターンと運動感の関係

までの男性 9 名に対して行った。

パターン 1 とパターン 2 の結果から、非対称振動を提示せず、熱源を移動させたときの温感の運動感と比較する。非対称振動による温感の運動錯覚が生じるならば、パターン 1 に比べパターン 2 の方が温感の運動感が強く感じられると予想される。また、パターン 3, 4, 5 で感じられる温感の運動感を比較することで、非対称振動による温感の運動錯覚が温感の運動感に与える影響について考察する。

3.3 実験結果

データ処理を行ったデータ（1125 個のデータから、172 個のデータを除外）について、Friedman 検定で刺激提示パターンの主効果を確認した後、Wilcoxon の符号付順位和検定により Bonferroni 補正を用いて多重比較を行い、結果を記載した箱ひげ図を図 5 に示す。なお、「*」は補正後の p 値が $p < 0.05$ 、「***」は p 値が $p < 0.001$ であることを示している。

図 5 より、パターン 1 とパターン 3 について有意差が確認されたため、15 mm の往復幅は温感の運動感を生起するのに十分であると考えられる。また、パターン 1 とパターン 2 について効果量は 0.33 であり、非対称振動により温感の運動感は増加する傾向は見られたが、二つの提示間において有意差は確認できなかった。しかし、パターン 3 とパターン 5 においては有意差が確認できた。これにより、熱源の動作時に逆向きに牽引力錯覚を提示する場合には、牽引力錯覚によって温感の運動感を増強・拡張させられると示唆される。しかし、パターン 3 とパターン 4 においては有意差が確認されなかったことから、熱源移動時に牽引力錯覚を提示する方向も温感の運動錯覚を生じさせる要因になっていることが示唆されるが、パターン 4 とパターン 5 に関する有意差が確認されなかったため、検定による結

果では牽引力錯覚を提示する方向の違いによる影響を確認できなかった。全体として回答が、1: まったく感じなかった～5: とても強く感じた、と広がってしまっており、各パターン毎の差異が表れにくくなってしまっているように思われる。これは、内観報告に「温感が運動する感覚がイメージしづらい」「何を最小として、最大とするのかがわからない」といった意見を受けたことから、実験のセットアップに不足があったか、回答方法が望ましくないものであった可能性がある。また実験中、振動子の把持姿勢や腕の高さが変化してしまうなど、個人差の統制にも問題があった。

4. むすび

本研究では非対称振動による温感の運動錯覚が生じるか、またその特性について調査した。非対称振動による温感の運動錯覚は、牽引力錯覚と熱源の移動が逆向きになるように提示することで温感の運動感を増加させることができた。非対称振動を用いて温感の運動感を拡張する表現が可能になると期待される。しかし、提示する非対称振動により生じる牽引力錯覚の方向による違いに関しては、明確な違いを確認することができなかった。また、熱源を固定した状態では正弦波振動・非対称振動の違いについて温感の運動感について、非対称振動を提示する方が運動感が大きくなる傾向は見られたが、有意といえる変化が確認されなかった。今回行った実験では、刺激の事前提示による感覚のイメージ教示やリッカート尺度を用いた回答の難しさ、実験装置の個人差統制の問題などがあったと考えられる。そのため、今後は実験手順、回答方法を変更し、改良した実験装置での実験を再度行う予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP21H03474, JP24K02969, JP24K22316 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Akazue, M. Halvey, L. Baillie, S. Brewster. :”The Effect of Thermal Stimuli on the Emotional Perception of Images”, CHI ’16: Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 4401–4412, 2016.
- [2] 秋山 史門, 佐藤 克成, 牧野 泰才, 前野 隆司. :”ThermOn – 温冷覚呈示による音楽の情動性拡張 メディアインタフェース”, 情報処理学会 インタラクシオン 2013, 1EXB-55, 2013.
- [3] R. L. Peiris, W. Peng, Z. Chen, L. Chan, K. Minamizawa. :”ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays”, CHI ’17: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 5452–5456, 2017.
- [4] N. Ranasinghe, P. Jain, S. Karwita, D. Tolley, E. Y.-L. Do. :”Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions”, CHI ’17: Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1731–1742, 2017.
- [5] 串山 久美子, 土井 幸輝, 笹田 晋司, 馬場 哲晃. :”Thermo Drawing: 冷温提示による小型触覚ディスプレイを使用した温度描画システムの開発”, 情報処理学会 インタラクシオン 2012, pp. 723–728, 2012.
- [6] 川田 涼馬, 橋本 泰成. :”ペルチェ素子を用いた温熱覚提示装置の開発”, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5A-03, 2019.
- [7] L. Yuhu, N. Satoshi, S. Y. Ah, R. Niiyama, K. Yasuo. :”ThermoCaress: A Wearable Haptic Device with Illusory Moving Thermal Stimulation”, CHI ’21: Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, No. 214, pp. 1–12, 2021.
- [8] T. Moesgen, H.-N. Ho, Y. Xiao. :”Apparent Thermal Motion on the Forearm”, Eurohaptics 2024, SESSION 4, 2024.
- [9] 雨宮 智浩, 安藤 英由樹, 前田 太郎. :”知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 11, no. 1, pp. 47–58, 2006.
- [10] T. Amemiya, H. Gomi. :”Active Manual Movement Improves Directional Perception of Illusory Force”, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 9, Issue. 4, pp. 465–473, 2016.
- [11] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, P. B. C. Matthews. :”The Contribution of Muscle Afferents to Keslesthesia Shown by Vibration Induced Illusions of Movement and by the Effects of Paralyzing Joint Afferents”, Brain, Vol. 95, Issue. 4, pp. 705–748, 1988.
- [12] J. R. Lackner. :”Some Proprioceptive Influences on the Perceptual Representation of Body Shape and Orientation”, Brain, Vol. 111, Issue. 2, pp. 281–297, 1988.
- [13] T. Amemiya, H. Gomi. :”Active Manual Movement Improves Directional Perception of Illusory Force”, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 32, pp. 1749–1756, 2024.
- [14] T. Tanabe, H. Yano, H. Endo, S. Ino, H. Iwata. :”Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 26, Issue. 1, pp. 203–213, 2021.