

首への熱刺激による VR 体験者への方向提示の提案

小野 龍一¹ 伊藤 亘輝¹ 羽田 久一^{1,a)}

概要：近年，VR 環境にマルチモーダルなインタラクションを取り入れる研究が盛んである．中でも従来の VR 環境にある視覚や聴覚に嗅覚や触覚，温度を加えた研究が挙げられる．それらの研究は例として嗅覚は匂いの再現，触覚は触れた感触の再現，温感 は 寒 暖 の 再 現 と い っ た ， そ れ ぞ れ の 感 覚 本 来 の イ ン タ ラ ク シ ョ ン を VR で 再 現 す る も の が 多 く ， そ れ 以 外 の 用 途 で 感 覚 を 利 用 す る 研 究 は 未 だ 少 ない．本研究では VR 体験するユーザが装着する熱刺激デバイスを制作し，HMD 内の映像に連動する熱刺激を与える事で，熱刺激による向きのインタラクションを行い VR 体験における臨場感を向上させるデバイスを提案する．

キーワード：VR，熱，ウェアラブル，ペルチェ素子，

1. はじめに

近年の VR 環境は従来の視覚・聴覚といった従来の感覚を用いるのに加えて，触覚や嗅覚といったそれまで扱われていなかった感覚を用いたマルチモーダルなインタラクションを VR 環境に組み込む研究が行われている．前例として顔の前面や手首に熱刺激を与える事で VR 体験の臨場感を向上させる研究がある [1][2]．この取り組みは従来の VR 体験に用いられる視覚や聴覚に新しい感覚を取り入れる事で，ユーザが VR 環境下で体感することのできる臨場感を向上させる事を向上させる事を目的としている．本研究は，ペルチェ素子を取り付けた首輪をユーザが装着し，素子を加熱する事で VR 体験時における臨場感の向上を目的とする．熱刺激を選んだ理由として熱による暖かさを表現する為であり，首は周囲 360 度からの熱刺激を受けることが可能で熱を感じ易い．また，首の皮膚は顔よりも薄く刺激に対して敏感であり，顔に向けての熱刺激よりも鮮明に刺激を感じることができる．ユーザが VR 空間上で視認している物体と同じ方向のペルチェ素子を加熱する事で，視認している物体があたかも実世界と同様に熱を発しているように錯覚させる．これにより，VR 空間上での熱による方向提示を試みる．

2. 関連研究

本研究はユーザの首に熱のインタラクションを提供するデバイスを提案する．そこで関連研究としてユーザに対して熱刺激を与える研究と首に対してインタラクションを行

う研究を挙げる．

Ambiotherm[3] は首に取り付けられたペルチェ素子と顔前面に取り付けられたファンで熱と風を与える事で VR 体験の臨場感を向上させる研究である．研究では風と熱の刺激をランダムに与えて，従来の VR に介在する視覚と聴覚に対して同調もしくは反駁しているかを検証する．結果として視覚と聴覚のみの従来の VR 構成と比較して，Ambiotherm は VR 体験の臨場感に対して有意な改善が観察された．

Exploring of Simulating Passing through Feeling on the Wrist[2] は VR 体験での没入感を強化する為に，熱刺激が体を通る感覚の再現を試みる．実装では手首の内側と外側にペルチェ素子を取り付け，連続して熱刺激を与える事で刺激が手首を通る感覚を再現する．

Directional thermal perception for wearable device[4] では温度を用いてメッセージを示すシステムや腕に熱刺激を提示し，手首に巻き付けた複数のペルチェ素子へ順々に熱刺激を与えることで対象が該当する部分の刺激を認識できるかの実験を行なっている．結果は熱した部分によっては知覚が困難であり，冷やした場合は順々に刺激を与えるよりも一方向からの刺激の方が指向性を感じられた．

See through the fire: Evaluating the augmentation of visual perception of firefighters using depth and thermal cameras[5] は人の視覚は目に見える光だけを知覚する能力に制限されており，他の感覚を目から認識することを試みており，実験では深度と熱イメージを用いて消防士の視覚的感知を増強し環境に対する適応力の向上を図っている．実験は暗い地下室で擬似的な火災環境を再現し，HMD に赤

¹ 東京工科大学

^{a)} hadahskz@edu.teu.ac.jp

外線カメラと深度カメラを取り付けたハンズフリーの場合と赤外線カメラと深度カメラを手持ちの杖に取り付けた場合とで地下室のサイズの見積もりと室内にある熱源の見つけ出す実験を行なった。結果は人間の視覚認知の増大が確認され、HMDではなく実際に消防用のヘルメットに設置されるべきという意見が挙げられた。

ThermoVR[1]はVRへの没入感を向上させる為に、HMDの内側にペルチェ素子を取り付ける事でユーザの顔に熱刺激によるフィードバックを与え、有用性を確認する為に2つの実験を行なった。第1の実験は熱の指向性を探る方法としてペルチェ素子を複数同時に作動させ、温熱刺激と寒冷刺激を与えて熱刺激に対する認識の精度を評価した。第2の実験は熱刺激をユーザに与えた際の没入感を評価した。結果は温熱刺激より寒冷刺激の方がユーザの刺激に対する精度が高く、取り付けた全ての素子が刺激された際に没入感があると報告している。

NeckGraffe[6]はパソコンやタブレット等のデバイスを長時間使用するユーザに正しい姿勢をとる為のフィードバックを提供する。ユーザは首の向きと位置を測定する為にセンサを下頸部に取り付け、角度センサを用いる事で日々の姿勢の異なる位置を測定する。頸部に負荷が掛かる姿勢を長時間続けるとユーザが使用しているデバイスに通知が送られる。

3. 首に熱刺激を与えるデバイスの提案

本研究では、VR空間上のオブジェクトの位置に対応する熱刺激をユーザの首に対して与えるデバイスを提案する。従来の熱刺激を与えるデバイスは手首に巻き付ける物やHMDの内部、首の一部分である事が多い、これらのデバイスは熱刺激をそのままの刺激としてユーザに与えるといった、感覚本来のインタラクションのみを再現している。そこで図1のように首の周囲にペルチェ素子を配置し、VR空間上のオブジェクトの位置に対応したペルチェ素子を加熱する事で熱による方向提示を行うサーモチョーカーを制作する。

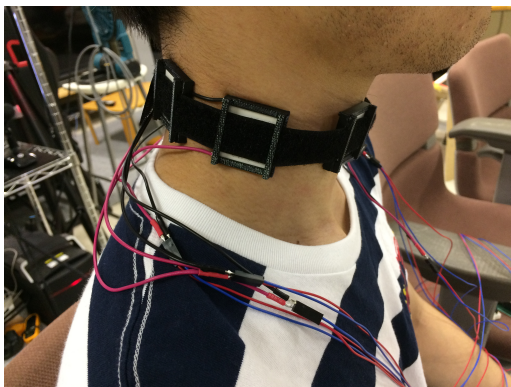


図1 首の周囲に取り付けたペルチェ素子

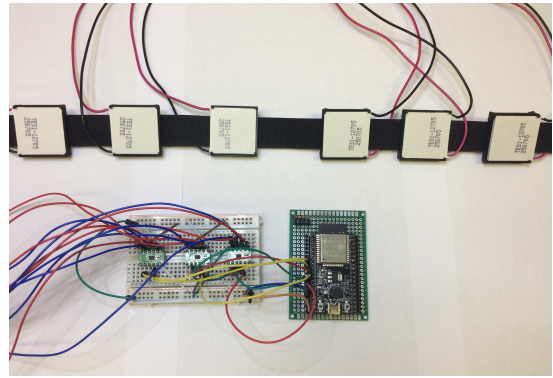


図2 デバイスの構成要素

3.1 ユーザに熱刺激を与えるペルチェ素子

ペルチェ素子は電流を流すことによって、一方の面からもう一方の面へ熱を移動させる熱電素子であり、局部に対して温かい刺激と冷たい刺激の両方を与える事ができる。非駆動時から駆動時へ切り替わる際の温度の調節は迅速に行われ、ユーザに対し熱刺激を提供する。

3.2 首輪の構成要素

図2はデバイスの構成要素であり、提案するデバイスは市販のマジックテープに、3Dプリンタを用いて製作したペルチェ素子用の固定具で取り付けた。使用するペルチェ素子の個数は実験毎に2つから6つで偏りが無いように対称に配置する為にマジックテープにスライドして取り付ける。ペルチェ素子を貼り付けや縫い付けではなくスライドして取り付ける事で、実験の際にスムーズにペルチェ素子の取り外しが可能である。ペルチェ素子の温度制御はステップモータードライバで行い、デバイス全体の制御にマイクロコントローラの esp32 を用いる。また、MacbookPro にインストールした TouchDesigner を用い、音楽機器のデータ送信に用いられる OpenSound Control を wifi 経由で送信する事で、ペルチェ素子の温度の切り替えを行う、

4. 実装

4.1 全体の概要

今回、wifi で OpenSound Control の値を送信するのに MacbookPro にインストールした TouchDesigner、ペルチェ素子の制御にマイクロコンピュータの esp32、VR 環境に HTCvive を用いた。OpenSound Control 信号の流れは図3のようになっている。

4.2 VR アプリの設計

今回実験に使用する VR 映像の制作にゲームエンジンの unity を用いた。映像の内容は被験者を中心とする周囲に火の玉を模したオブジェクトが指定した角度に配置されるようになっている。オブジェクトの位置は TouchDesigner から受信した角度の値を元に反映している。

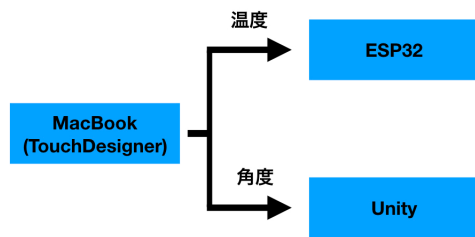


図3 システムの構成図

4.3 サーマヨーカーの設計

本デバイスはペルチェ素子を2つから6つまで取り付けた首輪と制御を行う esp32, ステッピングモータードライバから構成される。ペルチェ素子は偏りが無いように対称に配置されており、対応した位置にある素子が加熱される。

4.4 ペルチェ素子の制御

ペルチェ素子の制御にはモータードライバの DRV8835 を用いた。ドライバーは esp32 からの PWM 信号によって熱量を変化させる。熱の値の操作には TouchDesigner を用いて制作したアプリから値を Wifi で送信して esp32 の PWM 値を操作した。各々のペルチェ素子の熱の値は各ペルチェの設置位置の角度と VR 内にあるオブジェクトのある角度が同じ場合に最大値が送信され対照の角度まで離れるにつれ最小値に近づいていく。

5. 実験

HMD を装着するユーザに対してペルチェ素子を組み込んだ首輪を取り付け、ペルチェ素子の加熱による熱刺激を与える事で、VR 空間内の物体が実際に熱を発していると錯覚させる。VR 空間上の物体の位置をペルチェ素子を配置した方向に切り替えることで、熱刺激がユーザの VR 体験における方向に対する臨場感の向上に繋がるかの検証実験を行なった。図4, 5, 6はペルチェ素子が2個, 4個, 6個の場合で、それぞれを対称に配置し、全ての実験においてペルチェ素子の配置を2パターンにすることで実験を行う。実験でのペルチェ素子の温度は38度から43度の間で、これは人の体温に熱刺激が近いと無感帯となり刺激に鈍くなるのと温度が45度以上での熱刺激は熱痛覚となり、その間の温度で熱刺激を与えるのが有効である為の実験ではその間の温度で熱刺激を与える。[7]

5.1 実験内容

図7はUnity上で作成した火を模したオブジェクトであり、HMDと首輪を装着したユーザを中心にオブジェク

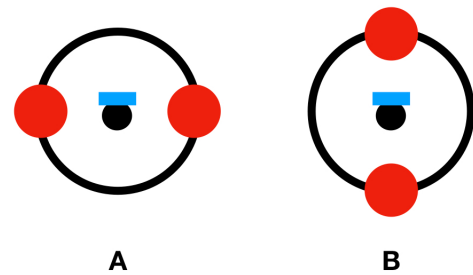


図4 ペルチェ素子2個の配置

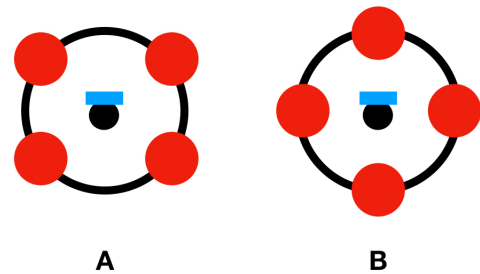


図5 ペルチェ素子4個の配置

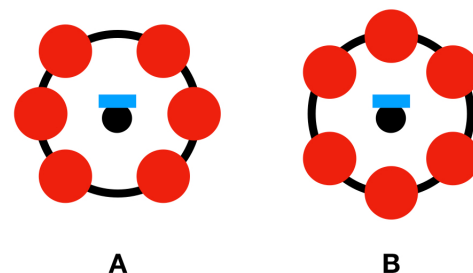


図6 ペルチェ素子6個の配置

トをユーザの周囲に配置する。ユーザには予め首輪を付けない状態でHMDを装着し、オブジェクトが自分の周囲を一周するのを体験した後に、図8のようにHMDと首輪を装着したユーザを中心にオブジェクトの位置を30度ずつ移動させ、移動させた位置に対応するペルチェ素子を加熱させる。ペルチェ素子の加熱はグラデーションを描いており、熱された部分は段々と温度が下がり一周する過程で再び温度が上がっていく。これにより、オブジェクトの位置と対応する位置の加熱したペルチェ素子との間で違和感が生じるかの検証を行う。



図 7 Unity 上に表示されたオブジェクト

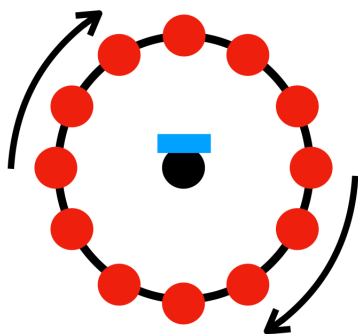


図 8 ユーザの周囲を移動するオブジェクト

5.2 実験結果

実験の結果、ペルチェ素子を 6 個配置した場合と 4 個配置した場合では縦と横の配置において共にユーザの周囲を回転するオブジェクトの位置とペルチェ素子の加熱による方向の差異に違和感はないが、6 個のペルチェ素子を配置した方がユーザからの評判が良い結果となった。ユーザからは常に後部のペルチェ素子からの熱を感じるという意見が述べられた。また、ペルチェ素子を 2 個使用した場合では、ペルチェ素子を首の前後と左右に取り付けた際に、ペルチェ素子による熱刺激とオブジェクトの位置との間で違和感が生じる結果となった。

6. 考察

本研究では実験に使用したペルチェ素子の個数を 2 個、4 個、6 個と分けて違和感の有無を検証した。4 個と 6 個では違和感の割合が低かったのに対して 2 個の場合は、首の前後と左右に素子を取り付けた両方のパターンにおいて、首の前面付近への熱刺激に対する違和感が明確となった。

7. 今後の課題

7.1 ユーザへの寒冷刺激の提供による検証実験

本研究では実験に使用したのは暖かい刺激のみであり、冷たい刺激は行っていない。Ambiotherm や ThermoVR では温熱刺激だけでなく寒冷刺激を含んだ実験を行っており、同様に寒冷刺激をユーザに提供した際の違和感の有無について検証する必要がある。

8. まとめ

本研究は VR を体験するユーザに熱刺激を与えて、向きのインタラクションを行い、VR において方向提示を行う首輪型デバイスの提案と制作を行なった。首輪には電流を流す事で加熱と冷却を行うペルチェ素子を取り付けた。ペルチェ素子の制御には esp32 とモータドライバを用い、VR 空間内のオブジェクトの位置に対応したペルチェ素子を加熱する事で、VR を体験するユーザに熱刺激で方向の提示を行い、首輪から出る熱とオブジェクトとの違和感の有無を検証した。検証実験はペルチェ素子を 2 個用いての実験はユーザが熱刺激とオブジェクトの位置に違和感を感じる結果となったが、ペルチェ素子を 4 個あるいは 6 個用いた場合は熱に対する違和感が無く、VR 空間に表示されたオブジェクトに適した結果となった。

参考文献

- [1] Peiris, R. L., Peng, W., Chen, Z., Chan, L. and Minamizawa, K.: ThermoVR: Exploring Integrated Thermal Haptic Feedback with Head Mounted Displays, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, ACM, pp. 5452–5456 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025824 (2017).
- [2] Peng, W., Peiris, R. L. and Minamizawa, K.: Exploring of Simulating Passing Through Feeling on the Wrist: Using Thermal Feedback, *Adjunct Publication of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, ACM, pp. 187–188 (online), DOI: 10.1145/3131785.3131819 (2017).
- [3] Ranasinghe, N., Jain, P., Karwita, S., Tolley, D. and Do, E. Y.-L.: Ambiotherm: Enhancing Sense of Presence in Virtual Reality by Simulating Real-World Environmental Conditions, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, ACM, pp. 1731–1742 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025723 (2017).
- [4] Jeong, K., Seong, Y., Chung, J., Park, Y. and Lee, W.: Directional Thermal Perception for Wearable Device, *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception*, SAP '15, ACM, pp. 133–133 (online), DOI: 10.1145/2804408.2814184 (2015).
- [5] Abdelrahman, Y., Knierim, P., Wozniak, P. W., Henze, N. and Schmidt, A.: See Through the Fire: Evaluating the Augmentation of Visual Perception of Firefighters Using Depth and Thermal Cameras, *Proceedings of the 2017 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, UbiComp '17, ACM, pp. 693–696 (online), DOI: 10.1145/3123024.3129269 (2017).
- [6] Khurana, R., Marinelli, E., Saraf, T. and Li, S.: Neck-Graffe: A Postural Awareness System, *CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '14, ACM, pp. 227–232 (online), DOI: 10.1145/2559206.2580936 (2014).
- [7] Susumu, T., 佐藤 誠, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会: バーチャルリアリティ学, コロナ社 (2010).