



動作の有無に応じた冷温提示による VR における水中感覚の提示

伊藤健太¹⁾, 伴祐樹¹⁾, 割澤伸一¹⁾

1) 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 (〒 277-0882 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, kentaito@s.h.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: バーチャルリアリティ (VR) では, 触覚刺激を加えることで臨場感が向上することが知られている. 特に水中環境を提示する VR では, 温熱刺激が有効であると考えられている. 水中 VR において, 温熱刺激によって臨場感の向上を実現した先行研究はいくつかあるが, いずれも数秒間, 単調に冷やすだけのものである. しかし, この提示方法は, 10 秒以上の提示が難しい問題を抱えている. 一方で, 実際的水中では, 「じっとしていると冷たくないが, 動くとき冷たくなる」という現象がある. この現象を再現することで, 水中 VR の臨場感を高められると考えた. 実験の結果, 一定の低温を提示する方法よりも, 提案した方法の方が実際の水に触れたときの感覚に近いと評価された.

キーワード: サーマルディスプレイ, 臨場感, マルチモーダル



図 1: 動作の有無に応じた冷却のイメージ

1. 序論

Virtual Reality (以下, VR) を用いた研究では, Head Mounted Display (以下, HMD) による視覚刺激の他に, 風などの触覚刺激を加えることで, 臨場感・没入感が高まることが明らかになっている [1]. 最近では, 振動 [2] や気流 [3] などを用いてハプティックフィードバックを提示し, VR 体験を向上させる研究が行われている.

その中で, 冷温提示を用いて VR 環境における水中の臨場感・没入感を高めるための研究が行われている. Maeda ら [4] は小型で複数の身体部位に装着可能な温熱提示デバイスを, Peiris ら [5] は小型の振動子と熱提示素子を搭載した HMD を開発した. 水中映像の再生と同期して素子を作動させることで, それぞれ映像体験の臨場感が有意に向上することを示した.

上述した先行研究は, 映像に同期した温度刺激によって体験の臨場感が向上することを示したが, 図 2 にあるような温度提示方法では次のような課題が残されている: 放熱が追いつかない・素子の性能上皮膚温度に対して 10°C 以上低い温度を提示することが難しいため, 一定の傾きで冷やし続けるには時間的な限界が存在する. 皮膚温度より低い定常温度を提示することでこれらを回避できるが, 人間の温度知覚は一定の温度に触れ続けると冷たさを感じなくなることが知られている [6]. 本研究では, 温度提示手法を工夫することにより臨場感をさらに高めることを研究目的と

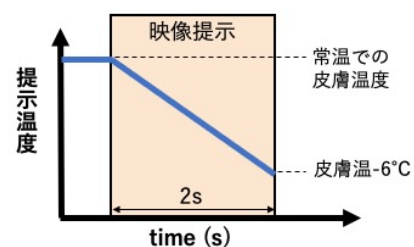


図 2: 先行研究における温度提示

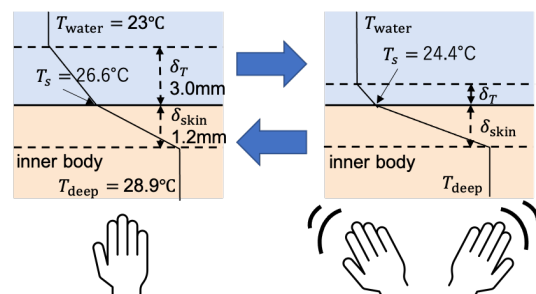


図 3: 動作の有無に応じた皮膚にあたる水温の変化

した. 我々は, 水風呂やプールで起こる「水中で静止していると冷たくないが, 動くとき冷たい」という現象を, 図 1 のように表現することで, 水中 VR の臨場感を向上させることができると仮説を立てた.

2. 提案する温度提示手法

本章では、実際に水風呂やプールで起こる動作時の温度変化を考察し、水中 VR の臨場感を向上させるための動作に応じた温度提示手法を提案する。

本研究では、動作時及び停止時の皮膚表面にあたる水温を、強制対流熱伝達・一次元熱伝導のモデルで計算した。図 3 は動作時と停止時の温度変化の模式図である。

水温を T_{water} (23°C)、深部皮膚温度を T_{deep} (実験開始時に測定、平均 28.9°C)、求める皮膚表面の温度を T_s とし、一次元熱伝導モデルにおける温度境界層の厚さを、水側は δ_T (動作速度に応じて変化)、皮膚側は δ_{skin} (表皮と真皮の厚さの和から 1.2 mm で統一) とした。

δ_T は、前腕部を円柱 (直径 $d = 0.1\text{ m}$) と近似して、強制対流熱伝達のモデルで計算した。まず、水温 T_{water} から、水の密度 ρ ・粘度 μ ・熱伝導率 λ_{water} ・比熱 C_p ・プラントル数 $Pr = \mu C_p / \lambda_{water}$ が求められる。次に、動作速度を u (本実験では、動作時 0.2 m/s 、停止時 0.01 m/s で計算) とおくと、レイノルズ数 $Re = \rho u d / \mu$ であり、無次元数であるヌセルト数 Nu は、式 (1) にあるように二通りで表現できる。この式を解くことによって、熱伝達率 h を求めることができる。

$$Nu = \frac{hd}{\lambda_{water}} = CRe^m Pr^{1/3} (C, m \text{ は } Re \text{ から決定}) \quad (1)$$

水側の温度境界層厚さ δ_T は、 $\delta_T = \lambda_{water} / h$ で求められる。流速 u が速いほど、 δ_T は小さくなる。皮膚表面に当たる水温 T_s は、水と皮膚でやり取りされる熱流束から、式 (2) を T_s について解くことで求められる。

$$\lambda_{water} \frac{T_s - T_{water}}{\delta_T} = \lambda_{skin} \frac{T_{deep} - T_s}{\delta_{skin}} \quad (2)$$

本実験の実験協力者においては、停止時の T_s は平均 26.6°C 、動作時の T_s は平均 24.4°C であった。提案手法であるこのモデルに従った温度提示によって、水中 VR 体験の臨場感を向上できるのか検証するため、種々の温度提示手法間で臨場感を比較する実験を行った。

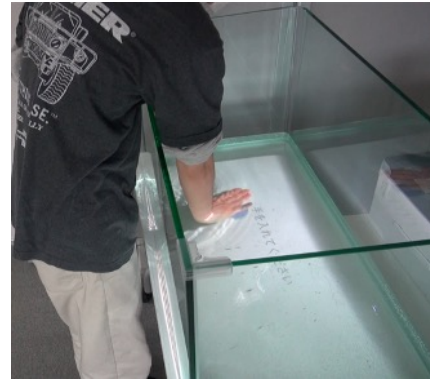
3. 実験

3.1 実験の概要

実験の目的は、2章で提案した手法により、動作に応じて生じる皮膚に当たる水温の変化を表現することで、水中 VR 体験の臨場感を向上できるかを検証することにある。本研究では、8名 (男性 8名、20代 7名、30代 1名、全員が右利き) が実験に参加した。本研究は、東京大学倫理審査専門委員会 (審査番号: 20-75) によって承認された。実験開始前には、各実験協力者から書面によるインフォームド・コンセントを得た。

実験は、後述する 4条件 (3.4節) で行い、各条件間で水中 VR コンテンツを体験した後に行われるアンケートの結果を比較した。期待効果を回避するため、実験協力者は本実験のテーマを「VR における水とのインタラクションに関する研究」とであると伝えられた。

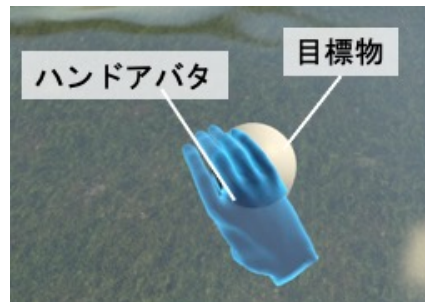
各試行では、水槽に右手をつけて実際の水に触れた時の感覚を覚える水槽タスクと、次に HMD と実験用熱提示デバイスをつけて VR タスクを行った。その後、水槽タスクでの感覚と VR タスクでの感覚を比較してアンケート (3.5節) に回答した。



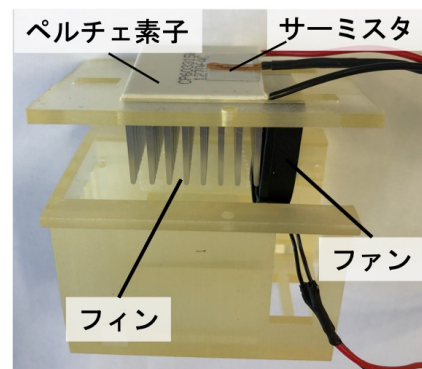
(a) 水槽タスクの様子



(b) VR タスクの様子



(c) HMD に提示される映像



(d) 温度提示デバイス

図 4: 実験設定

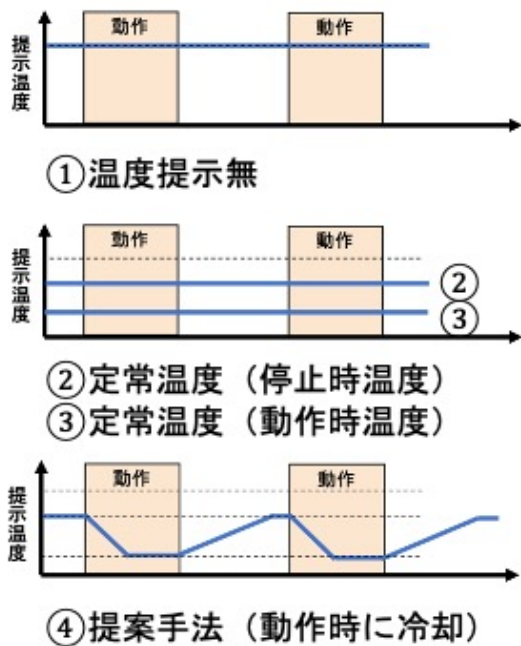


図 5: 実験条件

3.2 水槽タスク

実験協力者は、図 4 (a) のように、水槽の水の中に右手を入れて、実際の水に触れたときの感覚を覚えた。水槽中には目標物が投影されており、目標物は 0.2 m/s、3 秒の等速直線運動と 11 秒の静止を 2 回繰り返した。

3.3 VR タスク

実験協力者は、図 4 (b) のように、HMD を装着し、デバイスを手に持つ形でタスクを行った。HMD 中には水中を模した映像を提示した (図 4 (c))。実験協力者は、ハンドトラッキングを行い表示されるハンドアパタを、表示される目標物に追従させるタスクを行った。目標物は 0.2 m/s、3 秒の等速直線運動と 11 秒の静止を 2 回繰り返した。

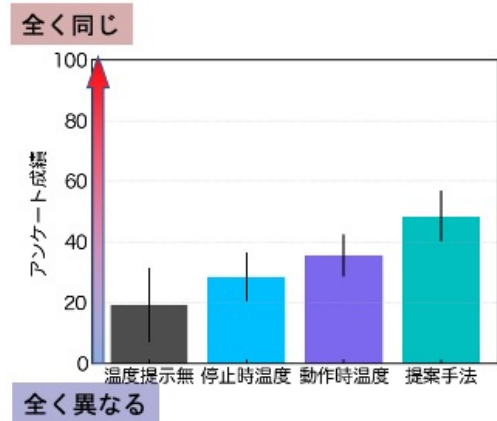
実験に使用するデバイスは図 4 (d) のような構成になっており、冷却と加熱を制御する電子部品であるペルチェ素子を用いた。ペルチェコントローラ PLC-24V10A (クラグ電子) が、動作に応じて指定の温度に冷やすことや、定常温度に保つ制御を行った。

3.4 実験条件

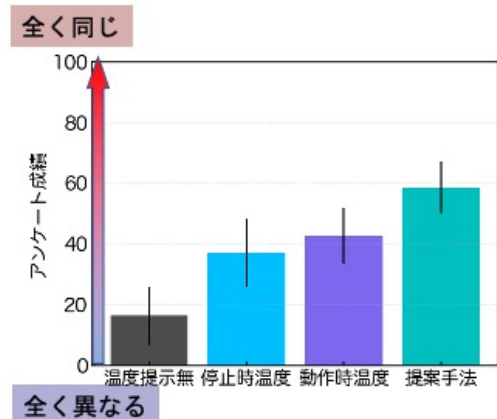
実験条件は、デバイスを保持するだけで温度提示を行わない温度提示無、タスク開始から終了まで停止時温度を提示し続ける定常温度（停止時温度：平均 26.6°C）、動作時温度を提示し続ける定常温度（動作時温度：平均 24.4°C）、動作の有無に応じて冷却する提案手法の計 4 条件 (図 5) である。先行研究 [4, 5] の温度提示手法は、10 秒以上提示できないため除外した。条件間でアンケート結果を比較した (3.6 節)。

3.5 実験で用いるアンケート

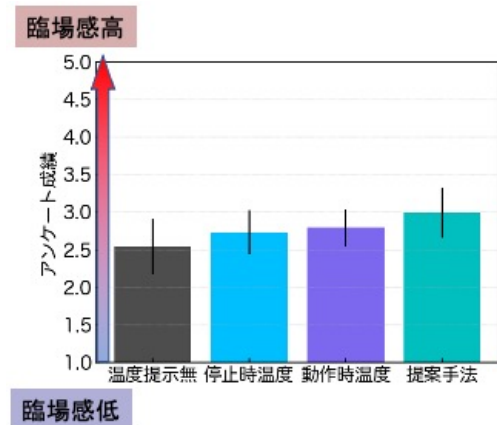
実験では 2 種類のアンケートを用いた。どちらのアンケートも、タスク前に実際の水に触れた際の感覚と比較して回



(a) VR 体験全体を通して受けた感覚



(b) 手に感じた温度



(c) IPQ

図 6: 実験結果 (アンケート回答の平均値と標準誤差)

答するよう伝えた。

一つは Schubert らが提案した Igroup Presence Questionnaire (以下、IPQ) [7] である。IPQ は 14 項目の質問を用いて臨場感を算出する。もう一つは独自に作成したアンケートで、次の 2 項が実際の水の感覚にどの程度近かったか質問した。(全く異なる：0 ～ 全く同じ：100)

- VR 体験全体を通して受けた感覚
- 手に感じた温度

3.6 実験結果及び議論

8名(男性8名, 20代7名, 30代1名, 全員が右利き)が実験に参加した。図6(a)は「VR体験全体を通して受けた感覚は, 水槽で触れた水の感覚にどの程度近かったか?」に対する回答の平均値と標準誤差である。提案手法に対する回答が最も高く, 動作に応じた冷温提示によって, 水中VRの臨場感が向上するという仮説を支持するものとなった。「手に感じた温度は, 水槽で触れた水の感覚にどの程度近かったか?」(図6(b)), IPQ(図6(c))の結果も同様に, 提案手法に対する回答が最も高く, 仮説を支持するものとなった。今後, 実験協力者をさらに募り, 結果を統計的に信頼のおけるものになりたいと考えている。

4. 結論

本論文では, 水中VRの臨場感向上を目的として, 動作に応じた冷温提示を提案した。実験では, 動作に応じた冷温提示によって, 水中VRの臨場感が向上することが示された。今後の課題としては, 体験者が自由に動けるコンテンツに本手法を応用するために, 熱提示の遅延による違和感を軽減することが挙げられる。

参考文献

- [1] Michael Rietzler, Katrin Plaumann, Taras Kränzle, Marcel Erath, Alexander Stahl, and Enrico Rukzio. Vair: Simulating 3d airflows in virtual reality. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5669–5677, 2017.
- [2] Koichi Shimizu, Gaku Sueta, Kentaro Yamaoka, Kazuki Sawamura, Yujin Suzuki, Keisuke Yoshida, Vibol Yem, Yasushi Ikei, Tomohiro Amemiya, Makoto Sato, et al. Fivestar vr: shareable travel experience through multisensory stimulation to the whole body. In *SIGGRAPH Asia 2018 Virtual & Augmented Reality*, pp. 1–2, 2018.
- [3] Nimesha Ranasinghe, Pravar Jain, David Tolley, Shieny Karwita, Shi Yilei, and Ellen Yi-Luen Do. Ambiotherm: Simulating ambient temperatures and wind conditions in vr environments. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 85–86, 2016.
- [4] Tomosuke Maeda and Tetsuo Kurahashi. Thermodule: Wearable and modular thermal feedback system based on a wireless platform. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, pp. 1–8, 2019.
- [5] Roshan Lalintha Peiris, Liwei Chan, and Kouta Minamizawa. Liquidreality: wetness sensations on the face for virtual reality. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 366–378. Springer, 2018.
- [6] Lynette A Jones and Hsin-Ni Ho. Warm or cool, large or small? the challenge of thermal displays. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 1, No. 1, pp. 53–70, 2008.
- [7] Thomas Schubert, Frank Friedmann, and Holger Regenbrecht. The experience of presence: Factor analytic insights. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 10, No. 3, pp. 266–281, 2001.