



水中での移動感覚再現に向けた ロコモーションインタフェースの検討

Investigating locomotion interfaces for moving behavior under water

川俣昂平¹⁾, 蒲池みゆき²⁾

Kohei KAWAMATA and Miyuki G. KAMACHI

- 1) 工学院大学大学院 工学研究科 (〒192-0015 東京都八王子市中野町 2665-1, em21007@ns.kogakuin.ac.jp)
2) 工学院大学 情報学部 (〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2, miyuki@cc.kogakuin.ac.jp)

概要: 本研究は、手軽なスキューバダイビング体験の実現を目的に、VR 環境下 (地上) で全身を使わずに水中の移動感覚を再現できるインタフェースを構築し評価を行なった。具体的には、水中での移動方向を決定するインタフェースとして頭部もしくは手を用いる場合の違いを、主観評価および水中でのターゲットを經由する所要時間など客観評価による検討を通して、水中ならではのインタフェースの利便性を調べた。結果として、頭の向きを使用したインタフェースを構築することが、手軽なスキューバダイビング体験の実現に向けて重要であることが明らかとなった。

キーワード: ユーザインタフェース, ロコモーションインタフェース, 水中感覚

1. はじめに

スキューバダイビングは老若男女問わず、生涯スポーツとして一定の人気がある。しかし、他のスポーツと比べてハードルが高い一面を持つ。特に、持病がある方は医師の診断書が必要になるなど、事情によっては体験することさえ簡単ではない。また、「レジャー白書 2020」[1]によると、1 回参加するにあたりかかる費用は 2 万円を超えており、スポーツ部門で最も高額 (スキンドайビング, スキューバダイビング) となっている。さらに、スキューバダイビング (スキンドайビングを含む) をしてみたい人のうち、実際に参加できている人は 1/5 となっている。他方で近年、手軽なスキューバダイビング体験実現に向けた研究が行われている。

Yamashita ら[2]は水中でのバーチャルリアリティ (以下, VR) 環境である AquaCAVE を構築し、ヘッドトラッキング技術の検討を行った。一般的には赤外線を利用するが、水中環境では赤外線が使用できない。そのため、可視光と偏光板を用いたトラッキングの仕組みを構築し、水中でのヘッドトラッキングを実現した。Nagata ら[3]は市販されているヘッドマウントディスプレイ (以下, HMD) に防水加工を施した結果、水深 4 m までの範囲で、陸上と同等のヘッドトラッキングとリフレッシュレートを維持できることが分かった。これらの研究は、実際のスキューバダイビ

ングと比較して手軽である。しかし、水中の感覚再現を全身が水に入ることによって再現しており、多くの人が身近に感じられる簡便なシミュレータシステムではない。

Jain ら[4]は陸上で、VR を用いたスキューバダイビングシミュレータを構築し、さらに、呼吸による浮力感や音が水中でのリアリティを増す要因であることを明らかにした。また、Fels[5]らは陸上で水泳の感覚を再現したロコモーションインタフェースを開発した。このインタフェースは水面で泳ぐ感覚に焦点を当てている。これらは、陸上でのスキューバダイビング (泳ぐ) 体験を実現しているが、全身を吊るす必要があり、広い場所と多くの専用器具を必要としている。

そこで今回は、スキューバダイビングを経験がない人にとって身近なものにするべく、VR を用いてリアリティが高くかつ、簡便なシミュレータを用いた体験型システムの開発を目指す。その上で、直感的に VR 空間内を移動できるインタフェースが必要になると考えた。

Boletsis ら[6]は、ロコモーションインタフェースの比較実験を行った。実験では 3 つのインタフェースが用いられた。1 つめは足にトラッカを装着し、トラッキングして VR に反映させることで実際に歩くもの、2 つめはコントローラのタッチパッドで移動方向・速度を制御するもの、3 つめはコントローラで移動地点を指定しテレポーターショ

ンするものが用いられた。結果として、それぞれ独立した強みがあるものの、モノやシステムなどの使いやすさの指標である System Usability Scale (以下, SUS) スコア[7]はタッチパッドを使用するものとテレポーションタイプのインタフェースが高得点であった。これらの SUS スコアが高い理由として、バーチャル空間で実際に歩行するより疲労感がないこと、現実空間の物体と衝突する恐怖心を感じないこと挙げられた。しかし、コントローラでの移動が VR 環境で没入感を高めるという結果は出ていない。また、水中環境での移動を実現するインタフェースは比較されていない。

よって、本研究ではバーチャル空間での水中移動が直感的にできるシステムを目指し、インタフェースの作成、評価を行った。

2. 実験

2種類のインタフェースを作成して、実際に使用することで、どちらのインタフェースが効率良く移動できるか、調査することを目的とした。

2.1 方法

2.1.1 被験者

身体に欠損がない 14 名が参加した。しかし、1 名は実験を中断したため 13 名分 (18 歳から 24 歳, 平均 22.6 歳, 男性 10 名, 女性 3 名) のデータで解析を行った。なお、本実験にあたって被験者にはあらかじめ同意書および教示文にて実験内容の説明を行っており、「工学院大学ヒトを対象とする研究に関する倫理審査委員会」による審査により承認を得た。

2.1.2 装置

バーチャル環境を視覚呈示するためにデスクトップ PC (日本 HP, GT13-0704jp) と HMD (VIVE Pro 2, htc corporation), 環境作成のために Unity (Unity Technologies, ver.2021.1.22f1) を用いた。また、移動時の速度データを取得するためにトラッカ 2 個 (VIVE トラッカー 3.0, htc corporation), トラッカの動きを正確にトラッキングできるように、ベースステーション (ベースステーション 2.0, htc corporation) を 3 個使用した。設置位置は被験者から見て正面, 斜め右前, 斜め左前とした。コントローラの向きを取得する時は VIVE コントローラ (htc corporation) を用いた。

2.1.3 作成したインタフェース

2種類のインタフェースのうち、一つはコントローラの向きで移動方向を制御 (以下, コントローラ条件) するも

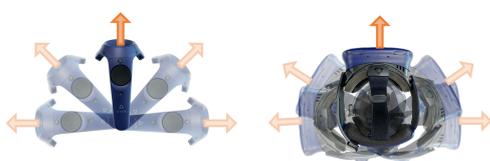


図 1: 移動方向制御イメージ (左右方向)
(左: コントローラ, 右: 頭の向き)

の, もう一つは頭の向きで移動方向を制御 (以下, 頭の向き条件) するものである。図 1 は左右方向の制御を例として上方向から示したものである。コントローラ条件は図 1 左のように, 進みたい方向にコントローラを向けて制御する。頭の向き条件は, コントローラと同様で図 1 右のように, 進みたい方向に頭部を向けることで制御する。どちらのインタフェースにおいても左右方向に関しては, 被験者から見て後方に視野を変更できるよう, 左 (現実空間での正面から左 180 度までの範囲) に向け続けることで, バーチャル空間での頭部が左方向に回転し続け, 右 (右 180 度までの範囲) に向け続けることで右方向に回転し続けるようにした。

移動速度は足のキック速度によって変化する。フレーム毎に, 被験者の両足に取り付けたトラッカから足の速度を求めて減衰させた上で, バーチャル空間での移動速度に反映した。足が静止した時は, 水中環境での惰性を再現した。具体的には, 足の速度が設定した閾値を下回った時は, バーチャル空間に足の速度を反映させず, 徐々に速度を落としていく。そして, 足の速度が閾値を上回った場合は, 足の速度がバーチャル空間に反映される状態に戻る。

2.1.4 手続き

被験者は実験開始前に, 足にトラッカと HMD を装着した。コントローラ条件の時はコントローラを手を持った。そして, 実験開始時, 水中を模したバーチャル環境が HMD に呈示され, 練習試行を 4 試行行った後, 本試行 16 試行を行った。

練習試行でのタスクはリング 3 個全てが正面に配置されていた。本試行でのタスクは, リング 1 個目 (以下, リング 1) とリング 2 個目 (以下, リング 2) が正面に配置されており, リング 3 個目 (以下, リング 3) の設置場所はリング 2 から上下左右方向 (各 90 度) となっていた。これら 4 種類 (上下左右方向) をそれぞれ 4 試行 (計 16 試行) とし, ランダムな順序で行った。本試行のリング 2 の設置角度はリング 3 の方向に 45 度傾けて, 円滑にタスクを遂行できるようにした。また, リングの間隔は各 10 m にしており, リング 1 から 3 は 20 m になる。図 2 は実験で使用したバーチャル環境 (正面) の画像である。

その後, 被験者は操作方法に対する主観評価を行った。今回は SUS[7]を使用して, そのスコアを主観評価結果とした。本実験は日本語話者を対象としているため, 山内[8,9]の日本語版 SUS で評価を行った。

この流れを一つのインタフェースに対して行った。頭の

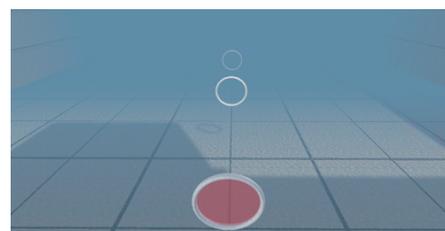


図 2: 実験環境例 (リングが全て正面)

向き条件から開始した被験者グループはコントローラ条件へ、コントローラから開始した被験者グループは頭の向き条件へと切り替えて行った。

2.2 結果

インタフェースの種類を制御方法、実験でタスクとしたリングの配置場所をリングの向きとして述べる。

2.2.1 主観評価

制御方法2条件下の、被験者の SUS スコアの平均値および標準誤差を図3に示す。T検定を行ったところ、コントローラと頭の向き条件間で有意な差はみられなかった ($t(12) = 1.423, p = .180$)。よって、主観的にはどちらの制御方法にも、使いやすさには差がないことが分かった。

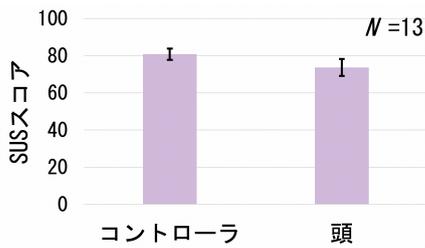


図3: 各制御条件の SUS スコア

2.2.2 客観評価

頭部やコントローラの座標や角度をもとに、どちらの操作方法が正確かつスムーズに移動できるかを評価するため、解析を行った。なお、移動速度が速すぎる、リフレッシュレート低下などの理由で、ログ上にリングを通過した記録が残っていない試行、実験者の指示のミスがあった試行はエラーデータとして除外した。

リング1からリング3まで、移動に要した時間と移動した距離について、頭の向き条件とコントローラ条件間でT検定を行った。移動距離についてはバーチャル空間での1フレームごとの頭部位置の変化量を求め、その合計値とした。結果として、移動時間 (s) (コントローラ条件, $M = 32.63, SD = 20.60$; 頭の向き条件, $M = 36.31, SD = 16.11$) ($t(12) = 0.813, p = .432$), 移動距離 (m) (コントローラ条件, $M = 27.24, SD = 5.14$; 頭の向き条件, $M = 33.30, SD = 13.06$) ($t(12) = -1.676, p = .120$) のどちらも有意な差はみられなかった。よって、移動時間と移動距離については、制御方法には差がないことが示された。

次に、リングの方向による違いを見るため、独立変数をリングの方向として、従属変数を移動時間と移動距離に設定し、2つそれぞれに対して一元配置分散分析を行った。

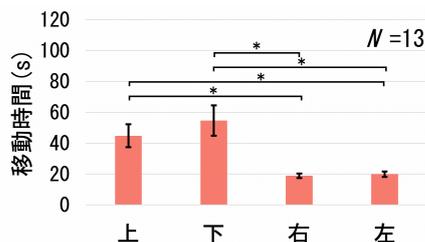


図4: リングの向きと移動にかかった時間

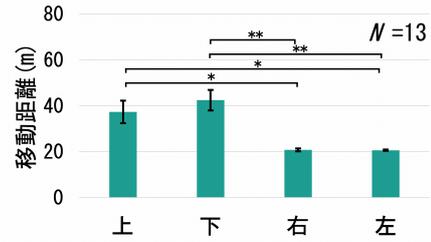


図5: リングの向きと移動にかかった距離

図4はリングの方向による移動時間の違いを示したものである。結果、リングの方向の違いによる移動時間に有意な主効果がみられた ($F(1.291, 15.491) = 13.695, p = .001$)。多重比較を行ったところ、上と右 ($p = .017$), 上と左 ($p = .019$), 下と右 ($p = .013$), 下と左 ($p = .013$) の間に有意差がみられた。次に、図5はリングの方向による移動距離の違いを示したものである。移動距離においても移動時間と同様に有意な主効果がみられた ($F(1.927, 23.125) = 14.135, p < .001$)。多重比較を行った結果、上と右 ($p = .033$), 上と左 ($p = .027$), 下と右 ($p = .003$), 下と左 ($p = .002$) の間に有意差がみられた。よって、左右方向はスムーズに移動できるが、上下方向の移動には時間がかかること、また、上下方向は移動距離も長くなることが分かった。

さらに、制御方法によって、リングの方向条件間の移動時間と距離に違いがあるのかを見るため、独立変数を制御方法とリングの向き、従属変数を移動時間と距離と設定し、従属変数とした2つそれぞれに対して、2要因分散分析を行った。図6はリングの向きと制御方法による移動時間の違いを示したものであり、図7は移動距離の違いを示したものである。分析結果は制御方法とリングの方向間において、移動時間 ($F(1.632, 19.581) = 2.584, p = .109$) と移動距離 ($F(1.635, 19.622) = 1.235, p = .305$) となった。そのため、全体として交互作用はみられなかった一方、グラフから上下方向の移動距離、移動時間に違いがある可能性が読み取れる。よって、今回の実験データから、制御方法によって

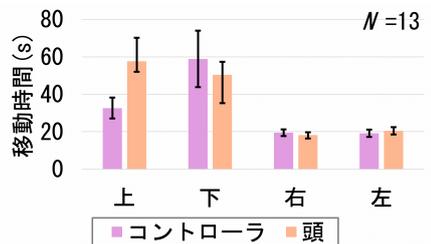


図6: 制御方法とリングの向きによる移動時間

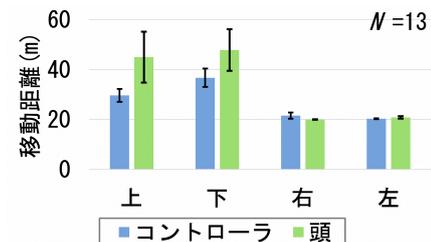


図7: 制御方法とリングの向きによる移動距離

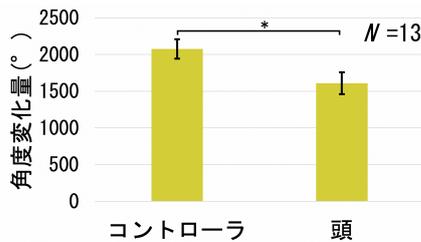


図8: 各条件で使用した装置の角度変化量

移動しやすい方向が変わることは明確に示されなかった。

次に、移動方向の調整量を調べるため、コントローラ条件で使用したコントローラと、頭の向き条件で使用したHMDの角度変化量を以下のように求めた。1試行中のリング1からリング3までの間で、フレームごとの角度変化量をUnityのワールド座標系で求めて合算し、角度変化量の被験者内平均を用いてT検定を行った。結果として、コントローラとHMDの角度変化量に有意差がみられた ($t(12)=3.073, p=.010$)。図8の通り、コントローラの角度変化量が大きいことから、頭の向き条件時より移動方向の調整を行っていたことがわかった。

2.3 考察

今回の実験では、リング1からリング3の移動に伴う移動時間と移動距離からは、インタフェースの優位性を判断することはできなかった。一方で、各インタフェースで使用した装置の角度変化量に焦点を当てたところ、頭の向き条件での頭の変化量はコントローラ条件のコントローラの変化量より少なくなった。そのため、頭の向きを使用した場合の方が、コントローラを使用する時より、移動方向の調整が少なく移動できたことを示唆している。

最後にこのインタフェースの課題として、リングの向きだけに焦点を当てたところ、上下方向の誤差範囲が大きくなった。理由として、上下の移動が直感的ではなく、使いこなせた人と使いこなせなかった人の差が大きくなり、誤差範囲に影響したと考えられる。加えて、上下方向は移動時間と距離共に、左右方向と比べて長くなっている。今回、移動方向を制御するプログラムは制御方法を問わず基本的に同一である。よって、上下方向の移動制御を改善する必要があると思われる。左右方向と上下方向の違いに関しては、リング3を、上下左右90度方向にしたことも要因と考えられる。左右方向90度は日常的に向く方向で比較的気付きやすい。しかし、上下方向90度は首を直角に曲げなければならず、見つけにくかったことも考えられる。

3. まとめ

手軽なスキューバダイビング体験の実現に向けて、バーチャル環境での水中移動を直感的に行うため、移動方向を頭の向きで制御できるものと、コントローラで制御できるもの、2つのインタフェースを作成し実験を行った。結果として、移動にかかった時間と距離から、どちらが優位か結論づけることはできなかった。一方で、頭の向きで移動

方向を制御する時の「頭の角度変化量」と、コントローラの向きで移動方向を制御する時の「コントローラの角度変化量」を比較した結果、頭の角度変化量が少ないことが分かった。これらのことから、コントローラが移動体験に適する結果は出ておらず、一般的に現実での水中ではコントローラを持たない。よって、頭の向きを使用したインタフェースを構築することが、直感的なインタフェースの実現に向けて重要であることが明らかとなった。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 JP17H01756 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 日本生産性本部, “レジャー白書 2020 余暇の状況と産業・市場の動向,” 公益財団法人 日本生産性本部, pp46, 東京都, 2020.
- [2] Yamashita, Shogo and Zhang, Xinlei and Miyaki, Takashi and Rekimoto, Jun “AquaCAVE: An Underwater Immersive Projection System for Enhancing the Swimming Experience,” *ICAT-EGVE 2016 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments*, pp. 25–28, 2016.
- [3] Nagata, Kazuma, Denik Hatsushika, and Yuki Hashimoto. “Virtual scuba diving system utilizing the sense of weightlessness underwater.” *International Conference on Entertainment Computing*, pp205-210, 2017.
- [4] Dhruv Jain, Misha Sra, Jingru Gro, Rodrigo Marques, Raymond Wu, “Immersive Scuba Diving Simulator Using Virtual Reality,” *UIST '16: Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.729-739, 2016.
- [5] Fels, S. and Kinoshita, Y. and Tzu-pei Grace Chen and Takama, Y. and Yohanan, S. and Gadd, A. and Takahashi, S. and Funahashi, K., “Swimming across the Pacific: a VR swimming interface,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 24-31, Jan.-Feb, 2005.
- [6] Costas Boletis, Jarl Erik Cedergren, “VR Locomotion in the New Era of Virtual Reality: An Empirical Comparison of Prevalent Techniques,” *Advances in Human-Computer Interaction*, vol. 2019, 2019.
- [7] Brooke, John, “SUS: A quick and dirty usability scale,” *Usability Eval. Ind.*, vol.189, 1995.
- [8] 山内 繁, “エンジニアのための人を対象とする研究計画入門-科学的合理性と倫理的妥当性,” 丸善出版, pp81-84, 東京都, 2015.
- [9] エンジニアのための研究倫理 ,http://www.f.waseda.jp/s_yamauchi/ResEthics/SUS/SUS.html (2022.07.01 アクセス)