

視覚刺激を用いた牽引力錯覚の 知覚変化を提示する VR システム

服部 圭吾^{1,a)} 橋口 哲志² 田辺 健³ 雨宮 智浩⁴ 柴田 史久¹ 木村 朝子¹

概要: 牽引力錯覚は、デバイスを接地することなく一方向に引っ張られる力感を提示できる特性を有し、VR コンテンツにおける触覚体験を拡張する手法として注目されている。これまでに、歩行誘導や操作方向の提示など、牽引力錯覚を様々な場面で活用する研究が報告されている一方で、仮想物体の運動といった視覚刺激と牽引力錯覚を組み合わせた場合に、知覚される牽引力がどのように変化するかについては十分に検討されていない。そこで本研究では、VR 空間における海釣りのオモリ投擲動作を題材としたデモコンテンツを構築し、物体の運動を示す視覚刺激と非対称振動による牽引力錯覚を組み合わせることで、牽引力錯覚の知覚の変化を体験可能な形で提示する。

1. はじめに

牽引力錯覚とは、外力を発生させることなく、身体が特定の方向に引かれているかのような力感を知覚する現象である。この錯覚は、加速度変化に非対称性をもたせた振動刺激によって力の方向性が強調されることで生起すると考えられている [1]。非対称振動による牽引力錯覚は、小型の振動子のみで成立し、装置の接地を必要とせずに方向性のある力感を提示できるため、ゲームコントローラやウェアラブルデバイスにおける力覚提示手法として有効である。

このような特徴から、非対称振動による牽引力錯覚は、小型デバイスにおける力覚提示手法として様々な応用が検討されてきた。例えば、歩行誘導や操作方向の提示といった直感的な誘導インタフェースへの応用が報告されている [2][3]。さらに、体験コンテンツへの応用として、高橋らは釣り体験を題材に、魚の引きや大きさ、さらには生物らしさを非対称振動によって表現できることを示している [4]。しかし、これらの研究の多くは、牽引力錯覚を表現手段として用いるにとどまり、他の感覚刺激との組み合わせによる知覚変化については十分に整理されていない。

触覚提示は振動刺激に限らず、視覚刺激の操作によっても変調可能であることが知られている。視覚的な変形や運動量の操作によって、実際には力を加えることなく、抵抗感や重量感といった多様な力覚を知覚させられることが示

されている [5][6]。これらの知見は、力覚が触覚刺激単独ではなく、視覚情報を含む複数の感覚の統合によって構成される知覚現象であることを示唆している。視覚刺激と牽引力錯覚を組み合わせた研究として、川岸らは、ユーザの入力に対する表示の移動量を変化させる C/D 比に基づく pseudo-haptics と非対称振動による牽引力錯覚を併用することで、推進力および抵抗力の知覚が強化されることを示した [7]。この研究は、視覚刺激が牽引力錯覚の知覚に影響を与えることを示した点で重要である一方、ユーザの能動的な操作を前提としており、物体の運動そのものが持つ視覚的因果表現が牽引力錯覚の知覚に与える影響については、十分に検討されていない。

そこで本研究では、非対称振動によって生じる牽引力錯覚に対して、物体の運動を示す視覚刺激を組み合わせることで、体験者が知覚する推進力および抵抗力がどのように変化するかに着目する。本デモ展示では、力が生じている理由や方向を理解しやすい視覚表現を付与することで、牽引力錯覚の知覚がどのように変化するかを、体験可能な形で提示する。

2. 実装

本研究では、非対称振動によって生じる牽引力錯覚と視覚刺激の組み合わせが、知覚される推進力および抵抗力に与える影響を体験的に提示する題材として、海釣りにおけるオモリの投擲動作を採用した。

釣りの投擲動作は、オモリが前方へ飛翔し、それに伴って糸が引き出されるという、力の発生源と方向が視覚的に明確な運動を含んでいる。このため、牽引力錯覚によって

¹ 立命館大学大学院

² 立命館大学 立命館グローバル・イノベーション研究機構

³ 国立研究開発法人産業技術総合研究所

⁴ 東京大学

a) hattori@rm2c.ise.ritsumeai.ac.jp



図 1 デモ内容. (左) VR 空間：オモリが飛んでいく様子，(中央) 振動子を握る体験者の姿勢，(右) システム構成：マイコンから振動子に振動波形が送信される様子.

生じる力覚を，視覚的な因果関係と結びつけて提示しやすい．以上の理由から，本研究では釣りの投擲動作を題材とした体験システムを設計し，視覚刺激と非対称振動による牽引力錯覚を統合した力覚提示を行う．

体験システムは，Unity および SteamVR を用いて開発した．ハードウェアには Meta 社の Meta Quest 3 を用い，振動子としてフォスター電機株式会社の hapStak を使用した．振動子の制御には M5Stack AtomMatrix を用いた．提示する非対称振動は先行研究を参考にし，正弦波振動の一部を反転させた波形を用いた [8]．

3. デモ内容

本システムでは海釣りを想定し，釣り竿を振ってオモリを遠くへ投擲する際の力覚インタラクションを，視覚刺激と非対称振動を組み合わせた牽引力錯覚によって表現する．作成したシーンを図 1 に示す．体験者はヘッドマウントディスプレイ (Meta Quest 3) を装着し，右手の母指と示指で振動子を把持する．左手には振動子を駆動するためのボタンを持つ．

体験者には，実際の海釣りにおける投擲動作を模倣させ，オモリを投げるタイミングで左手のボタンを押下させる．ボタン押下に同期して，アニメーションによって釣り竿の先端からオモリが前方へ飛び出し，リールが回転しながら糸が勢いよく引き出されていく様子が提示される．同時に，手に把持した振動子から非対称振動が提示され，糸が引き出される方向への牽引力が知覚される．

この非対称振動による牽引力は，オモリが空中を飛行し，水面に落下するまで継続して提示される．これにより体験者は，単なる振動刺激としてではなく，「飛んでいくオモリに引っ張られて糸が出ていく」という一連の視覚的因果関係に基づいた力覚として牽引力を知覚する．なお，オモリの飛行速度や到達距離は調整可能であり，視覚刺激の変化に伴う牽引力の知覚変化を体験できる．

4. おわりに

本稿では，非対称振動を用いた牽引力錯覚に視覚刺激を組み合わせ，牽引力を増強させることを試みた．今後は，

今回用いた視覚刺激を「飛ぶ」「糸が出ていく」などの要素ごとに分割した実験を行うことで，体験者が何を基に牽引力が変化したと感じたかを分析していく．また，凧揚げや放水といった推進力や抵抗力を感じる他のシチュエーションも作成し，新たな体験を作っていく予定である．

参考文献

- [1] Tomohiro Amemiya and Taro Maeda. Asymmetric oscillation distorts the perceived heaviness of handheld objects. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 1, No. 1, pp. 9–18, 2008.
- [2] Tomohiro Amemiya, Hideyuki Ando, and Taro Maeda. Lead-me interface for a pulling sensation from handheld devices. *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 5, No. 3, September 2008.
- [3] Tomosuke Maeda, Takayoshi Yoshimura, Junnosuke Yamamoto, Hiroyuki Sakai, and Kouta Minamizawa. Design and validation of pseudo-force haptic device for actual walking. In *2024 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 104–110, 2024.
- [4] 高椋慎也, 兩宮智浩, 伊藤翔, 五味裕章. Vr 魚釣りにおける牽引力錯覚の表現と応用. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 18, No. 2, pp. 87–94, 2016.
- [5] Katrin Wolf and Timm Bäder. Illusion of surface changes induced by tactile and visual touch feedback. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '15, p. 1355–1360, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [6] Elodie Bouzbib, Claudio Pacchierotti, and Anatole Lécuyer. When tangibles become deformable: Studying pseudo-stiffness perceptual thresholds in a vr grasping task. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2743–2752, 2023.
- [7] Tomohiro Kawagishi, Yuki Ban, Yusuke Ujitoko, Shin'ichi Warisawa. Enhancing perceived resistance and propulsion by combining pseudo-haptics and pulling illusion. In *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 403–409, 2023.
- [8] 田辺健, 矢野博明, 岩田洋夫. 振動スピーカを用いた力覚提示手法の知覚特性. *計測自動制御学会論文集*, Vol. 53, No. 1, pp. 31–40, 2017.