

感覚間相互作用と非対称振動が生み出す触錯覚を用いた触覚表現基盤の構築

A representation infrastructure using haptic illusions created by cross-modal interactions and asymmetric vibrations



雨宮 智浩(Tomohiro AMEMIYA, Ph. D.)

東京大学 情報基盤センター 教授

(Professor, Information Technology Center, The University of Tokyo)

日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 電子情報通信学会, IEEE

受賞: 第 39 回電気通信普及財団賞テレコムシステム学際研究賞 特例表彰 (2024 年), Best IEEE ISMAR 2022 Poster Award (2022 年), ACM SIGGRAPH Asia 2018 Best Virtual & Augmented Reality Technology (2018 年), Eurohaptics 2014 Best Demonstration Award (2014 年), 日本バーチャルリアリティ学会論文賞 (2005, 2014, 2017, 2025 年), 電子情報通信学会 ヒューマンコミュニケーション賞 (2009, 2023 年) 他

著書: メタバースの教科書 ー原理・基礎技術から産業応用までー (単著), オーム社 (2023 年), メタバースでできる 100 のこと (監修), TJMBOOK, 宝島社, (2022 年), バーチャルリアリティ学ライブラリ 2 神経刺激インタフェース (共著), コロナ社 (2023 年), サービス VR の挑戦 (共著), 東京大学出版会 (2023 年), トコトンやさしいVRの本 第2版 (共著), 日刊工業新聞社 (2022 年) 他

研究専門分野: バーチャルリアリティ学, 人間情報学

あらまし

これまでに我々は正逆方向に「短時間の大きな力」と「長時間の小さな力」という非対称な強さの力の往來を周期的に繰り返す振動（非対称振動）によってあたかも一方向のみに牽引されるような擬似的な力感覚（牽引力錯覚）を生成する技術を考案し、外部に固定することなく、引っ張られたり押されたりする感覚が生成可能かどうか検証を続けてきた。令和3年度 SCAT 研究助成の対象として採用していただき、本研究を加速させることができた。本稿では、視覚情報や異種の錯覚現象との組み合わせによる感覚間相互作用によって牽引力錯覚の増強、変調、誘発を試みた結果を報告する。

1. 研究の目的

情報通信技術の発展により視聴覚以外の感覚情報を利用した、より豊かな表現が可能なメディア技術に対する期待が高まっている。中でも触覚は遠隔にある物体の存在感、実在感の生成に寄与し、重要な感覚モダリティと考えられている。一方で、触覚や力感覚の忠実な再現のためには情報提示装置が複雑になるといった問題がある。そこで、本研究では、簡便な振動生成機構を用いて、人間の知覚特性の非線形性を活用して錯覚的に触覚・力感覚体験を創出する手法を確立することを目指す。さらに視覚情報や他の錯覚現象と組み合わせた感覚間相互作用によって、知覚される触覚や力感覚の種類を増やし、安定した触覚体験を提供する触覚情報通信のための設計指針を得ることを目指す。感覚・知覚・認知の過程に内在する「歪み」である錯覚の特性を積極的に利用することで、簡便な装置でも物理法則の制約から解放された感覚情報提示を実現することが本研究の目的である。

2. 研究の背景

一般的には、押されたり、引かれたり、重くなったりとといった触覚・力感覚体験を生み出すには、対象物体との間に発生する力を計算して環境に固定されたロボットアームのモータのトルクを制御するなどして利用者に力を返す方法が用いられる。そのため、外部に固定されていない機器で時間的に安定して反力を生成するような、物理法則に従わない現象はこうした方法で実現することはできない。

これに対して、我々は正逆方向に「短時間の大きな力」と「長時間の小さな力」という非対称な強さの力の往來を周期的に繰り返す振動（非対称振動）によってあたかも一方向のみに牽引されるような擬似的な力感覚（牽引力錯覚）を生成させ、外部に固定することなく、引っ張られたり押されたりする感覚を生成する研究を進めている [1][2]。これまでに、明瞭な牽引力感覚の生成には特定の周波数帯域が重要であること [3]、鉛直方向に非対称振動させることで質量を変えずに知覚される重量を自在に変化できること [4]などを明らかにしてきた。この技術は携帯端末などの外部に固定されていない機器で力感覚を作り出すことを可能

感覚間相互作用と非対称振動が生み出す触錯覚を用いた触覚表現基盤の構築

A representation infrastructure using haptic illusions created by cross-modal interactions and asymmetric vibrations

にした。さらに、40g 程度の重量の直動型アクチュエータの採用により、明瞭な牽引力感覚を作ることができた[2]。

一方で、これらの触錯覚現象は振動刺激によって生じるため、長時間の振動刺激による順応で触覚感度が低下し、牽引力感覚が不明瞭になることや、体験者ごとに主観的な力の大きさが異なることが明らかになっている[5]。また、振動振幅の増加によりある程度の力覚増強は可能であるが、振幅が大きすぎると牽引力錯覚が生起しなくなることから力覚強度が限られている。そこで、本研究では安定した牽引力錯覚を知覚させることや感じられる力の強度を増強させることを目指し、牽引力錯覚と、視覚や他の錯覚現象との相互作用の可能性を検証した。

3. 研究の方法

本研究では牽引力錯覚と組み合わせる刺激として(1)身体に関する視覚情報と固有感覚のずれと(2)腱振動による運動錯覚を用いた。

3-1. 視覚との相互作用

VR 空間を用いて、自分の腕の動きが投影された CG の腕アバタの動く方向（視覚情報）と牽引力錯覚の回転方向（触覚情報）に時間差を与え、その回転方向や腕の見た目に齟齬が生じるときの方向弁別実験を実施した。視覚情報は見た目を人間の腕のように見える条件と木の枝のように見える条件を設け、触覚情報は 2 台の振動アクチュエータによって構成された非対称振動発生装置を用いて、回転方向の牽引力錯覚を生成した。視覚が触覚に先行する、つまり CG の腕が先行して回転するタイミングを 0 から 400 ms で操作した。これらの CG 身体の見た目（人間の腕か木の枝か）、視触覚間の遅延（視覚が触覚に先行する時間）、視触覚の方向の一致（同じ方向か、逆方向か）を被験者内要因とした被験者実験を実施した。



図 1 試作した牽引力錯覚の提示装置

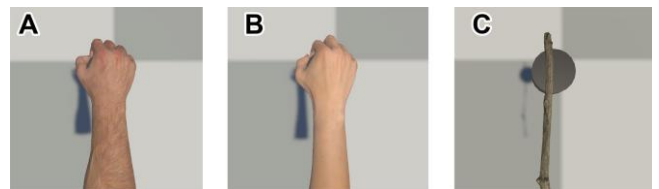


図 2 実験で用いた腕に対応するアバタ

その結果、CG 身体の見た目が人間の腕で、視触覚の方向が一致しない条件の場合、視触覚間の遅延時間が 50ms のときに有意に視覚情報の方向の影響を受けることが判明した。また、質問紙の結果から身体所有感や運動主体感は CG 身体の見た目や視触覚の方向の一致によって影響を受けるが、遅延時間による主効果やそれとの交互作用には有意な差が認められなかった。これらのことから、知覚にのぼるような身体所有感や運動主体感とは独立に、視触覚間の遅延時間によって方向知覚の弁別感度が低下することが示された[6]。

3-2. 他の錯覚現象との相互作用

筋や腱に振動が加わると、筋内にある筋紡錘(Ia 求心性線維)が発火する[7]。筋紡錘は、筋肉が弛緩し伸長した時に発火する深部感覚受容器であるため[8]、振動刺激によって筋紡錘が発火すると、実際には肢が動いていない状態でも筋が弛緩し伸長するような肢の動きの感覚が生起する。本研究では、振動アクチュエータをバンドで手首の腱上に固定して手首背屈の運動錯覚を誘発させたとき、同時に指先に提示される非対称振動で生じる牽引力錯覚が増強されるかと、知覚される

感覚間相互作用と非対称振動が生み出す触錯覚を用いた触覚表現基盤の構築

A representation infrastructure using haptic illusions created by cross-modal interactions and asymmetric vibrations

方向が変化するかを検証した。

その結果、指先への非対称振動の提示により生ずる牽引力錯覚は、手首背屈運動錯覚を同時に誘発すると増強されることが、マグニチュード推定法を用いて確認された。また、対照条件として、腱上ではなく、運動錯覚が生じない皮膚への振動刺激の同時提示では知覚される牽引力錯覚の強度に変化は見られなかった。

また、牽引力錯覚と手首背屈運動錯覚を組み合わせた実験では牽引力錯覚と同じ並進方向の力覚が知覚されることが確認された。ただし、手掌方向の牽引力錯覚と手首背屈運動錯覚を組み合わせた条件では手の中心を軸とする回転方向の力覚が知覚されることが確認された。このことから、手の初期姿勢や手首運動錯覚の方向が特定の条件を満たすと、牽引力錯覚の方向に手首が曲がる力覚が知覚されると考えられる。

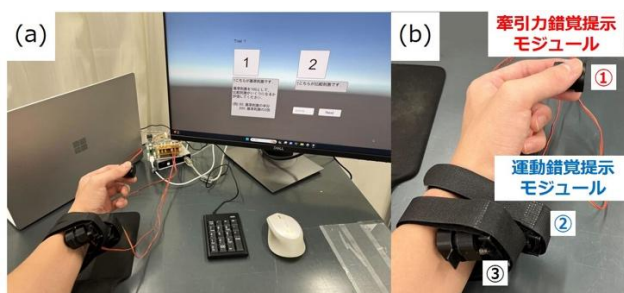


図3 牽引力錯覚と運動錯覚を同時に提示する装置

4. 将来展望

牽引力錯覚は外部に固定することなく力感覚が生成できるため、ゲームのコントローラに内蔵することで様々な力触覚表現ができたり、歩行者ナビゲーションシステムにおいて手を引くように方向を伝えたりすることができる。本研究成果によって、これまでよりもより広範囲の力覚強度にできることが確認された。さらなる力覚増強のための振動パラメータの最適化を進めることで、より多様な力覚表現の実現が可能であると考えられる。

牽引力錯覚と手首背屈運動錯覚の組み合わせでは振動刺激を提示してから実際に錯覚が誘発されるまでの時間(潜時)がそれぞれ異なる。そのため、刺激の同時提示が力覚の増強に最適とは限らず、また提示する時間差によって力覚の方向などの特性が変化する可能性が

ある。

また、本研究成果によって自身の身体アバタの見た目や遅延時間に応じて牽引力錯覚の方向知覚の弁別に影響が生じることがわかった。これらはVRのシステムで牽引力錯覚を応用する場合に効果的な方向弁別を行うための設計指針となると考えられる。

おわりに

本研究では牽引力錯覚を生起させる刺激の物理的な強度上げるのではなく、視覚情報や他の錯覚現象との組み合わせによって力覚表現能力や力覚強度を上げることができるかを検証した。VR空間での腕の見た目や知覚方向の一致、そして遅延時間の組み合わせによって牽引力錯覚の方向弁別に影響が生じることが明らかになった。また、手首背屈の運動錯覚によって牽引力錯覚の方向や強度を変調できることが明らかになった。

参考文献

- [1] 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, March 2006.
- [2] Tomohiro Amemiya, Hiroaki Gomi, "Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically", In Proc. of Eurohaptics 2014, pp. 88-95, Versailles, France, June 2014.
- [3] Tomohiro Amemiya, Taro Maeda, "Directional Force Sensation by Asymmetric Oscillation from a Double-layer Slider-crank Mechanism", Transactions of the ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 9, No. 1, 011001, March 2009.
- [4] Tomohiro Amemiya, Taro Maeda, "Asymmetric Oscillation Distorts the Perceived Heaviness of Handheld Objects", IEEE Transactions on Haptics, Vol. 1, No. 1, pp. 9-18, Jan-Jun, 2008.
- [5] 田辺健, 雨宮智浩, 遠藤博史, 井野秀一, "非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向", 日本バーチ

感覚間相互作用と非対称振動が生み出す触錯覚を用いた触覚表現基盤の構築

A representation infrastructure using haptic illusions created by cross-modal interactions and asymmetric vibrations

ャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 4, pp. 291-301, Dec. 2020.

- [6] Tomohiro Amemiya, "Influence of Hand-arm Self-avatar Motion Delay on the Directional Perception Induced by an Illusory Sensation of Being Twisted", Scientific Reports, Nature Publishing Group, Vol. 12, Article number: 6626, April 2022. doi:10.1038/s41598-022-10543-y
- [7] David Burke, Karl-Erik Hagbarth, Lars Löfstedt, and B. Gunnar Wallin, "The responses of human muscle spindle endings to vibration of noncontracting muscles," The Journal of Physiology, Vol. 261, No. 3, pp. 673-693, 1976.
- [8] Peter B. Matthews, Mammalian muscle receptors and their central actions, Edward Arnold, 1972.
- [9] Takuya Noto, Takuto Nakamura, Tomohiro Amemiya, "Synergistic Illusions: Enhancing Perceptual Effects of Pseudo-Attraction Force by Kinesthetic Illusory Hand Movement", IEEE Transactions on Haptics, April 2024. doi:10.1109/TOH.2024.3386199
- [10] 納藤拓哉, 中村拓人, 雨宮智浩, "異なる力覚錯覚の刺激間時間差が知覚強度に与える影響", 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2A1-09, Sep. 2023.

関連文献

- [11] 福田光輝, 青山一真, 雨宮智浩, 中村拓人, 鳴海拓志, "座面への分布的な非対称振動波形が牽引力錯覚に及ぼす効果", 第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 3C2-11, Sep 2024.
- [12] 納藤拓哉, 中村拓人, 葛岡英明, 雨宮智浩, "牽引力錯覚に手首背屈運動錯覚を組み合わせることによる力覚増強", 信学技報 MVE2023-93, 電子情報通信学会研究会, March 2024.

この研究は、令和 2 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 3 ～ 5 年度に実施されたものです。