



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

腱への非対称振動刺激を用いた指先非拘束型力覚提示手法の提案

福田光輝¹⁾, 中村拓人²⁾, 青山一真³⁾, 鳴海拓志¹⁾, 雨宮智浩³⁾, 葛岡英明¹⁾

Koki FUKUDA, Takuto NAKAMURA, Kazuma AOYAMA, Takuji NARUMI, Tomohiro AMEMIYA and Hideaki KUZUOKA

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {kokifukuda, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 大阪大学 情報イノベーション機構 D3 センター

(〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-32, takuto.nakamura.d3c@osaka-u.ac.jp)

3) 東京大学 バーチャルリアリティ教育研究センター

(〒 113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16, {aoyama, amemiya}@vr.u-tokyo.ac.jp)

概要: 手に対する力覚提示は VR 体験の臨場感向上や技能伝達などに効果的であるが、その実現手法の多くは作業範囲の制約や装置の大型化等の実用上の課題を抱える。本研究では、従来指先や手先を対象に非接地の力覚提示を行う手法として用いられてきた非対称振動刺激を手部の腱の甲側と掌側の両側に提示することで、指先を拘束せずに手部全体に力覚を提示する手法を提案する。実験により、手背と手首掌側の腱に非対称振動刺激を提示することで効果的に力覚錯覚を誘起できることを確認した。

キーワード: 非対称振動刺激, 力覚錯覚, 力覚提示, ハプティックインタフェース

1. 序論

VR 体験やゲームの臨場感向上、および技能伝達などにおいて、手に対する力覚提示が効果的である [1]。手部に力覚を提示するために、これまで多様なアプローチで研究や開発がされてきた。外部で接地したデバイスから物理的に力を加えることによって力覚を提示する手法 [2] や、腕に固定したデバイスから手に力を加え力覚を提示する手法 [3]、屈曲方向に運動錯覚を与える腱振動刺激による手法 [4] などが挙げられる。

手に対する力覚提示の研究は盛んに実施されているが、現状の手法には作業範囲が限定される、装置が大型化する、高価であるといったさまざまな課題がある。そこで、筆者らは作業範囲の制限がなく、小型であり、比較的安価に力覚を提示できる、非対称振動刺激による牽引力錯覚 [5] に着目した。これは、加速度が非対称な振動を提示することで、物理的な力がかかっていないにもかかわらずある方向に引っ張られる力を知覚する錯覚である。

ただしこの非対称振動刺激による牽引力錯覚は、現状指先や手先に生起される形でしか報告されていないため、応用的なシステムは指先や手先に力が発生する状況に限られてしまう。加えて、従来手法では手で把持する [6]、もしくは指先に装着する [7] 必要がある。このような提示方法だと、提示中に手を使った他の操作が制限されてしまい、インタラクションを妨げてしまうという課題がある。

そこで本研究では、手部の腱の甲側と掌側の両側に提示することで、指先を拘束せずに手部全体に力覚を提示する手法 (図 1) を提案する。運動錯覚が報告されている部位へ非対称振動刺激を提示したところ、手部全体での力覚錯覚

が生起することを発見した。本手法は従来の力覚提示が持つ作業範囲の制約や装置の大型化といった課題を克服しつつ、非対称振動刺激の新たな使い方によって、他の物体とのインタラクションを担保したハンズフリーな力覚提示の実現を目指す。

実験では本手法が実際に効果を持つか確かめるために、意図した方向へ実際に力覚錯覚が生じるのか、生じる場合はどのような提示条件が錯覚の誘起に有効であるかを検証する。

2. 実験

2.1 目的

本研究の目的は下記の 3 つである。

1. 本手法によって力覚錯覚が生じることを検証する。



図 1: 腱への非対称振動刺激を用いた力覚提示手法

2. 知覚しやすい提示位置や提示箇所を検証する。
3. 非対称振動であることに意味があるのかを検証する。

2.2 振動提示装置

先行研究 [6] を基に、パソコンで生成したオーディオ信号を、オーディオインタフェース (ICUSBAUDIO7D, StarTech.com) を介し、製作したオーディオアンプ装置によって増幅し、その増幅した電圧を振動子 (639897, フォスター電機株式会社) に加えることによって振動を発生させる。手への振動子の装着は、3D プリンタによって製作したケース、ばね (ばね定数 0.20 N/mm) 4 個およびバンドを用いて製作した装置により実現した (図 2)。

2.3 手順

実験参加者は左手に非対称振動刺激提示装置を装着し、5 秒間の振動刺激を受けた後に、その刺激によって感じた力の向きとその確信度をキーボードで回答する形式で実験を行った。力の向きは左か右かの 2 択で、確信度は 1 (確信なし) から 7 (確信あり) の 7 段階で回答した。振動刺激提示中は目を閉じ、机などに触れないように手を浮かせるよう指示を受けた。また、実験を通して音によるバイアスがかからないように、ホワイトノイズが流れているヘッドフォンを装着した状態で実験を実施した。実験の様子を図 3 に示す。振動の大きさを統制するために、レーザ変位計 (LK-G5000, 株式会社キーエンス) を用いて装着した状態での振動子の加速度を取得した。先行研究を基に、振幅の最小値が $90 \pm 10\% \text{ m/s}^2$ となるように振動の大きさの調整を行った。また皮膚

表面に押さえつける力については、ばね定数 0.20 N/mm のばね 4 本で装置が構成されているため、ばねの縮みが $1.5 \text{ mm} \sim 2.5 \text{ mm}$ になるように調整し押さえつける力が $1.2 \text{ N} \sim 2.0 \text{ N}$ となるようにした。

非対称振動刺激を起こすための信号はオーディオ編集ソフト (Audacity) によって作成し、正弦波信号の山を 1 つおきに反転させ非対称な信号とした (図 4)。この信号によって生成した電圧を振動子に加えることによって、非対称振動刺激を生成する。周波数に関しては、先行研究に加え、本研究で用いる振動子の共振周波数が 65 Hz であることから、本研究では上記正弦波信号の周波数として 65 Hz を採用した。

非対称振動刺激による牽引力錯覚は、人間は加速度の大きい動きには敏感であり加速度の小さい動きには鈍感であるという特徴を用いて牽引力錯覚を想起させている [5]。本装置にこの原理を応用し、甲側に装着した場合、正非対称振動刺激が右方向を、負非対称振動刺激が左方向を意図する刺激とする。反対に掌側は、正非対称振動刺激が左方向を、負非対称振動が右方向を意図する刺激である。

各部位に対する振動の組み合わせは、甲側掌側とも非対称振動、甲側非対称振動/掌側対称振動、甲側対称振動/掌側非対称振動、甲側非対称振動のみ、掌側非対称振動のみ、甲側掌側とも対称振動の 6 通りである。これにより、提示位置が 1 点と 2 点のときに差異が生じるのか、対称振動でなく非対称振動であることに意味があるのかを調査する。それぞれに対して左右 2 方向を意図する振動を 5 回ずつ、合計で 60 回の振動をランダムに提示した。そして、これを手首甲側/手首掌側 (図 5(a)) および手背 (手の甲)/手首掌側 (図 5(b)) の 2 通りの提示位置に対して実験を行った。よって、1 人の実験参加者に対して与えた振動刺激は合計で 120 回となる。実験参加者は 5 名 (右利きの男性, 平均年齢 23.6 歳) であり、それぞれの条件に対して合計で 50 回試行を行った。

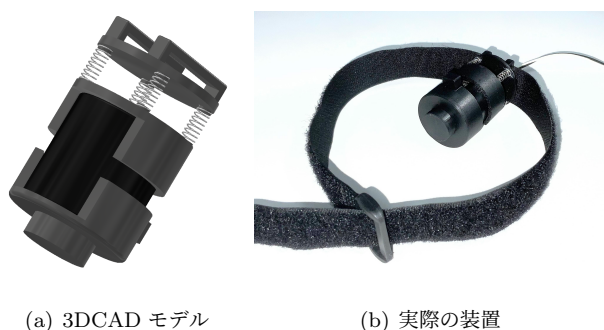


図 2: 非対称振動刺激提示装置

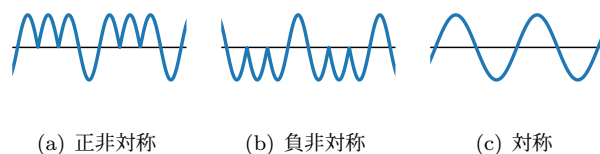


図 4: 振動刺激に用いる信号



図 3: 実験環境と実験実施時の様子

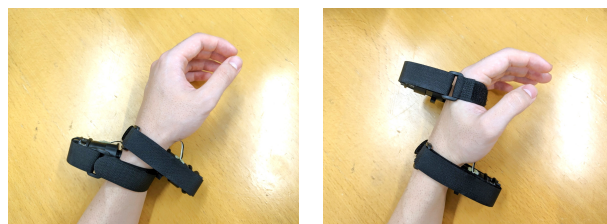


図 5: 提示部位および提示方向における装置設置方法

2.4 結果

各実験参加者の条件ごとの正答率を図 6 に示す。本実験においてランダムに左右を回答した場合のチャンスレベルは 0.5 であり、図 6 において赤い破線で示した。また、各条件の平均正答率について二項検定を行い、算出した p 値および効果量 (Cohen's h) の値を表 1 および表 2 に示す。また、甲側と掌側の両側から非対称振動刺激を提示したときの、意図する方向と回答方向を図 7 に示す。

また、非対称振動か対称振動かどちらに意味があるのかを調査するため、手背と手首掌側に装着した条件における正答率に対して分析を行った。まず、振動位置が手背か手首掌側か、振動刺激が非対称か対称かという 2×2 条件に対して、二元配置分散分析を行った。両側を対称振動としたときの正答率を 0.5 として分析を行った結果、手背の主効果 ($F(1, 4) = 9.38, p = 0.038, \eta_p^2 = 0.70$) および交互作用 ($F(1, 4) = 8.96, p = 0.040, \eta_p^2 = 0.69$) が有意であった。交互作用が有意であったため、下位分析として単純主効果

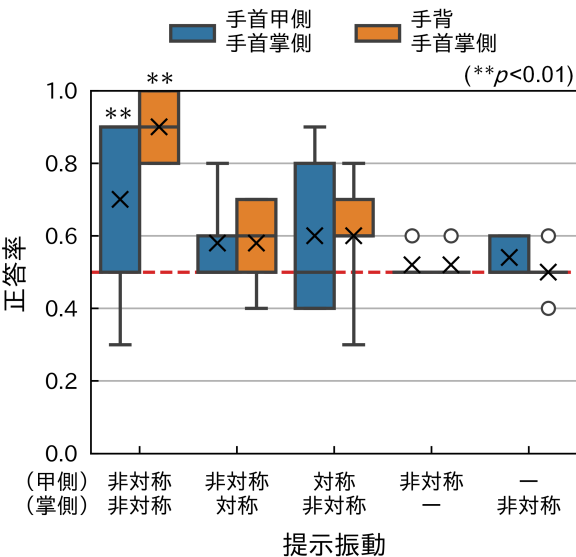


図 6: 各条件における実験参加者の正答率

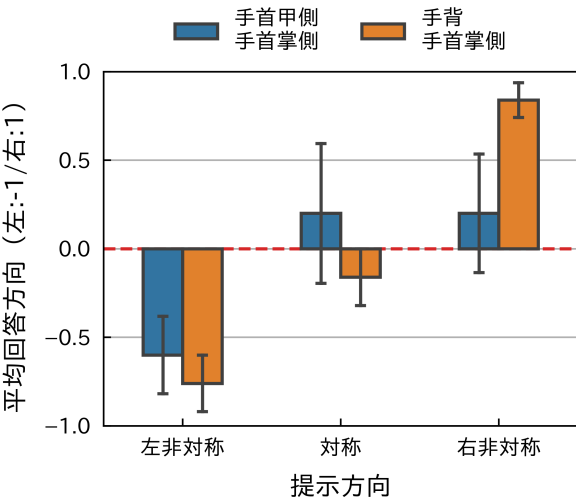


図 7: 両側からの非対称振動刺激提示時における回答方向

の検定を実施した。その結果、手背が非対称振動のとき手首掌側の単純主効果 ($F(1, 4) = 12.86, p = 0.023, \eta_p^2 = 0.76$) が、手首掌側が非対称振動のとき手背の単純主効果 ($F(1, 4) = 13.84, p = 0.021, \eta_p^2 = 0.78$) が有意であった。

3. 考察

3.1 力覚錯覚の生起

実験の結果より、本手法である手部両側から非対称振動刺激を加えたとき、手首甲側と手首掌側に提示した場合は正答率が 70%、手背と手首掌側に提示した場合は正答率が 90% となった。表 1 および表 2 に示したようにこれらはチャンスレベルよりも有意に高いことから、本手法によって力覚錯覚が生じたと言える。また、正答率と効果量から、手背と手首掌側に非対称振動刺激を提示することで効果的に力覚錯覚を誘起できると言える。

3.2 提示が 2 点である必要性

手部両側の 2 点から振動刺激を提示した場合に力覚錯覚が生じているが、振動刺激が 1 点のみの場合はその正答率が 50% に近い。実験参加者へのインタビューによると、振動刺激が 1 点の場合、振動されている点から押されているように感じるという意見が得られた。そのため、振動刺激が 1 点であると非対称振動の正負にかかわらず 1 方向にしか力覚を感じなかったと考えられる。意図した方向に力覚錯覚を誘起するには、同時に 2 点からの提示を行う必要があると考えられる。

表 1: 条件ごとの平均正答率 (装着: 手首甲側/手首掌側)

甲側	掌側	正答率	p 値	Cohen's h
非対称	非対称	0.70	0.00660 **	0.412
非対称	対称	0.58	0.322	0.161
対称	非対称	0.60	0.203	0.201
非対称	-	0.52	0.888	0.0400
-	非対称	0.54	0.672	0.0801

(** $p < 0.01$)

表 2: 条件ごとの平均正答率 (装着: 手背/手首掌側)

手背	掌側	正答率	p 値	Cohen's h
非対称	非対称	0.90	< 0.001 **	0.927
非対称	対称	0.58	0.322	0.161
対称	非対称	0.60	0.203	0.201
非対称	-	0.52	0.888	0.0400
-	非対称	0.50	1.000	0.0000

(** $p < 0.01$)

3.3 非対称振動である必要性

前節に示したように、手背と手首掌側に装着した場合の分析を行った結果、交互作用が有意であった。下位検定も含めた結果から、手背と手首掌側が両方とも非対称振動であるとき、相乗効果として正答率が向上すると言える。また、腱振動刺激による運動錯覚は拮抗する筋を同時に振動させても増強しないという報告 [8] から、この運動錯覚とは異なる原理によって発生しているものだと考えられる。これらより、甲側と掌側どちらか一方の腱振動刺激による運動錯覚によるものだけではなく、その振動が非対称振動刺激であることによって力覚錯覚が起こっていると考えられる。

4. 結論

本研究では、従来の課題を解決した新たな力覚提示として、手部の腱上 2 点への非対称振動刺激による指先を拘束しない力覚錯覚手法を提案した。本手法のための装置として、振動子を用いた非対称振動刺激提示装置を製作した。手部の甲側掌側の両側から非対称振動刺激を提示することによって、力覚錯覚を想起させるものである。本装置は指先非拘束であり軽量のため、手での操作やコントローラの把持ができ、インタラクションを妨げずに力覚を提示することができる。本研究の提案手法によって実際に力覚錯覚を想起させられるのかを検証するために、製作した装置を用いて実験を行った。その結果、最大で 90% の正答率となり、本手法によって力覚錯覚は生起させられると言える。

本手法は、VR やゲームにおいて自由な手指操作と豊かな力覚提示の両立を可能にする、新たな力覚提示の可能性を示すものである。今後の展望として、本手法を VR やゲームなどの映像体験と組み合わせることで、臨場感の向上が起るか調査することがあげられる。

謝辞 本研究は、JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR226N)、科研費基盤研究 (B) (22H03628, 25K03162)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Nihar Sabnis, Maëlle Roche, Dennis Wittchen, Donald Degraen, and Paul Strohmeier. Motion-Coupled Asymmetric Vibration for Pseudo Force Rendering in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, pp. 1–22, New York, NY, USA, April 2025.
- [2] Bastien Poitrimol and Hiroshi Igarashi. A Cable-Based Haptic Interface With a Reconfigurable Structure. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 17, No. 010901, June 2024.
- [3] Changcheng Wu, Jianli Ren, Qingqing Cao, Zeran Yue, Ting Fang, and Aiguo Song. A Wearable Fingertip Force Feedback Device System for Object Stiffness Sensing. *Micromachines*, Vol. 15, No. 6, p. 693, June 2024.
- [4] Mantas Cibulskis, Difeng Yu, Erik Skjoldan Mortensen, Waseem Hassan, Mark Schram Christensen, and Joanna Bergström. Tendon Vibration for Creating Movement Illusions in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '25, pp. 1–16, New York, NY, USA, April 2025.
- [5] Tomohiro Amemiya, Hideyuki Ando, and Taro Maeda. Lead-me interface for a pulling sensation from hand-held devices. *ACM Trans. Appl. Percept.*, Vol. 5, No. 3, pp. 15:1–15:17, September 2008.
- [6] Takuya Noto, Takuto Nakamura, and Tomohiro Amemiya. Synergistic Illusions: Enhancing Perceptual Effects of Pseudo-Attraction Force by Kinesthetic Illusory Hand Movement. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 17, No. 4, pp. 729–741, October 2024.
- [7] Heather Culbertson, Julie M. Walker, Michael Raitor, and Allison M. Okamura. WAVES: A Wearable Asymmetric Vibration Excitation System for Presenting Three-Dimensional Translation and Rotation Cues. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 4972–4982, New York, NY, USA, May 2017.
- [8] Sarah Calvin-Figuère, Patricia Romaiguère, Jean-Claude Gilhodes, and Jean-Pierre Roll. Antagonist motor responses correlate with kinesthetic illusions induced by tendon vibration. *Experimental Brain Research*, Vol. 124, No. 3, pp. 342–350, February 1999.