



フィンガーフリー型振動デバイスによる 擬似牽引力提示とその VR 応用

Pseudo-Traction Force Rendering with a Finger-Free Vibration Device and Its Application in VR

伊藤 充¹, 雨宮 智浩²

Mitsuru ITO and Tomohiro AMEMIYA

- 1) 三菱電機株式会社（〒247-8501 神奈川県鎌倉市大船 5-1-1, Ito.Mitsuru@dr.MitsubishiElectric.co.jp）
2) 東京大学 情報基盤センター（〒113-8658 東京都文京区弥生 2-11-16, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp）

概要：

非対称振動は、牽引錯覚と呼ばれる、身体が一方方向に引かれるような感覚を誘発し、この現象はナビゲーションの支援など様々な応用を可能にする。この錯覚は、従来、親指と人差し指で把持する方式で実現されるという制約があり、VR コントローラやハンドトラッキング操作との併用が困難であった。本研究では、バーチャル物体による重さや身体が押されるようなインタラクションを可能とする、親指・人差し指を使用しないグリップ型触覚デバイスを提案する。試作デバイスは、ハンドトラッキングを用いたジェスチャ操作や VR コントローラとの同時使用が可能であり、小指・薬指・手のひらで安定して装着できるフィンガーバンド構造を採用している。このシステムは、低コストな 2 つの振動アクチュエータを用いて実現され、垂直方向の明確な擬似牽引力の提示を可能にする。本デバイスは、バッテリーモードと無線通信に対応し、加えて、AR 環境での重量感・牽引感の提示を可能とする空間ハプティクスシステムを構築した。

キーワード：力覚、牽引錯覚、触覚、振動触覚、ナビゲーション

1. はじめに

親指と人差し指の協調運動は、物の把持や持ち運びといった日常的動作から、スマートフォンの操作、AR とのインタラクションに至るまで、人間の手の操作性を飛躍的に高めている。従来の触覚デバイスは、手指に装着することで振動や圧力を提示し、バーチャル物体への接触や把持の感覚を再現してきた。例えば、親指サイズの振動子を用いて牽引錯覚を行動ナビゲーションに応用した研究が報告されている [1]。また、WAVES システムでは、非対称振動によって三次元の移動・回転方向を提示する手法が提案された [2]。さらに、歩行中の実環境ナビゲーションに対応したハンドヘルド型デバイスの研究 [3]、バーチャル質量感覚を提示する Gravity Grabber [4]、バーチャル力覚提示を行う Traxion [5] など、多様なデバイスが開発されてきた。近年では、牽引錯覚を用いた並進・トルクフィードバックによる動作誘導 [6] や、親指と人差し指および手のひらで保持する形式のデバイスによる誘導・重量感提示 [7] など提案されている。しかし、AR 操作に必要な指の自由な操作性を維持しながら、擬似牽引力によって重量や反力を提示することは依然として困難である。

本研究では、親指・人差し指を用いたジェスチャ制御を

可能としつつ、グリップ型のフィンガーバンド構造によって擬似重量感を提示する触覚デバイスを提案する。プロトタイプは、2 つの振動アクチュエータと制御ユニットから構成されるフィンガーバンド型デバイスである。アクチュエータは垂直方向に配置されており、皮膚との接触面積を

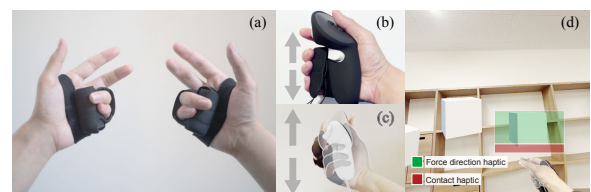


図 1: 親指と人差し指の自由な操作を可能にするフィンガーフリー型触覚デバイス。(a) ハンドトラッキングとの併用による直感的ジェスチャ操作、(b) VR コントローラとの併用による互換性の確保、(c) バーチャル物体の静的な重さを模倣するパッシブ触覚提示、(d) HMD のパススルービュー上で表示される動的な垂直方向の擬似牽引力の提示

増やすことで触覚強度を高め、錯覚の誘発を促進している。制御ユニットには、駆動回路、バッテリー、無線通信モジュールを内蔵する。また、応用例として、バーチャルの手にかかる力を模倣する親指・人差し指非使用型の触覚フィードバックデバイスを提案する。これにより、AR 体験において重量感の欠如を補完し、日常的な操作や AR ジェスチャ操作を妨げることなく受動的な触覚刺激として重量を提示することができる。

2. 関連研究

初期の疑似牽引力提示の研究としては、Buru-Navi シリーズ [1] が挙げられ、小型リニアアクチュエータによる牽引を用いた歩行誘導などのナビゲーションの有効性が示された。加えて、Gravity Grabber [4], WAVES [2], Traxion [5] など、駆動原理と装着部位が異なる多様な研究も行われている。Waylet [7] では 2 つのアクチュエータの個別駆動により、任意の方向の疑似牽引力を提示可能とすることが可能になった。一方、指の自由度を保った重量提示研究としては、視覚変調を併用した pseudo-haptics 手法の報告も行われているが、実質的には力覚を提示しないため重量知覚の個人差が大きいという課題が残っている。これら既存研究を踏まえ、本研究では (1) 牽引方向を上下に限定した専用デバイス設計、(2) 指自由度を最優先したフィンガーバンド機構、(3) VR に適用可能なプラットフォームを設計したことにより、重さなどを力覚提示する新たなインタラクションを設計した。

3. 試作システム

3.1 触覚デバイス

本プロトタイプは、2 つの振動アクチュエータ、オーディオアンプモジュール、無線通信モジュールで構成されている。バッテリーユニットを含む総重量は、小型バッテリーの場合約 100g、大型バッテリーの場合約 140g である。最大出力での連続動作時間はそれぞれ 15 分および 250 分である。振動アクチュエータには、高出力のボイスコイル型アクチュエータ (型番 646752, フォスター電機) を使用した。振動干渉を防ぐため、2 つのアクチュエータは正負を逆にして両面テープで貼り合わせ、信号タイミングに差のない回路で駆動されている。制御ユニットは主に、マイクロコントローラ (ESP32-PICO-D4, Espressif Systems), オーディオアンプ (NS4168, YONGFUKANG Technology), バッテリー (ATOM TailBAT, M5Stack Technology) から構成される。

従来の牽引錯覚デバイスは親指と人差し指の腹によるピンチ状のグリップが必要となるが、本プロトタイプは図 2(a)に示すようにフィンガーグリップ型を採用している。この方式は、振動面と皮膚との接触面積比を増加させ、振動の伝達効率を高める。また、指の基部への振動伝達が向上することで、非対称振動の知覚が容易になると考えられる [8]。

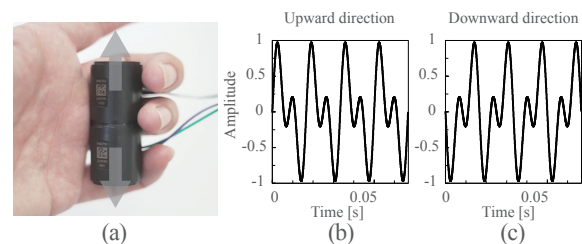


図 2: 疑似牽引力制御。垂直方向の疑似牽引力によって擬似的な重さの感覚を生成する。(a) アクチュエータと皮膚との接触状態、(b) 上方向の牽引力触覚信号: 重量感が増す感覚を提示、(c) 下方向の牽引力触覚信号: 重量感が減る感覚を提示

3.2 触覚信号

アクチュエータへの非対称振動入力振幅を反転させることで、疑似牽引力の方向を切り替えることができる。触覚信号は 65Hz のキャリア波に基づく非対称振動であり、図 2(a), (b)に波系を示す。

予備実験では、デューティ比 0.25 の 125Hz サイン波と、位相差を持つ第 2 高調波を重量した 60Hz サイン波の非対称合成振動によって、明瞭な牽引錯覚を誘発できることが確認されている [Tanabe et al. 2020]。

図 3 は、加速度センサ (ADXL362, Analog Devices) により測定した、アクチュエータユニットの触覚信号応答を示すものである。図 4 では、バーチャル物体との接触や力の方向に応じた触覚レンダリングの概念を示す。バーチャル物体が手に接触・支持・圧迫する場面においては、非対称振動の強度を変化させて多段階の触覚フィードバックを提示する。衝突を示す初期の接触のタイミングでは、150Hz のサイン波を 50ms 提示することで、接触イベントを強調する。

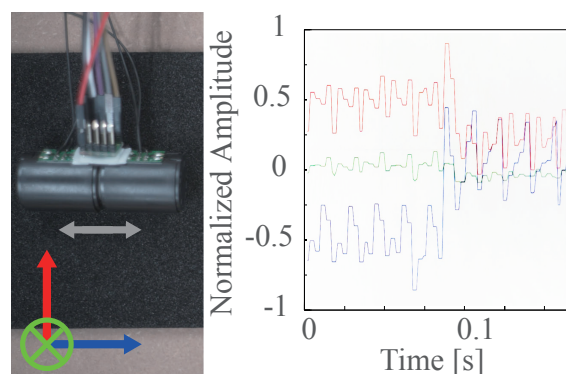


図 3: アクチュエータユニットの動作状況。キャリア波 65Hz の触覚信号に対するアクチュエータユニットの応答を加速度センサ (ADXL362) により測定した結果。

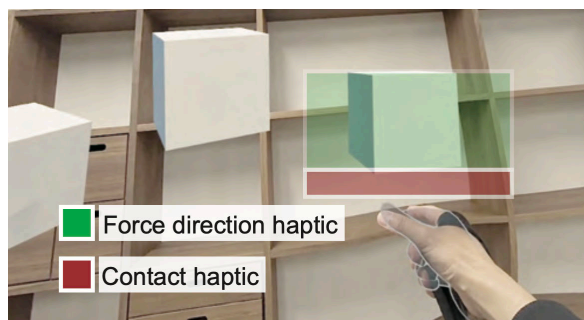


図 4：手と物体の接触状態に応じた触覚レンダリング。右図はバーチャル物体が手を押している状態を示し、左図はその実環境における対応を示す。物体との接触、支持、圧迫に応じて、多段階の振動提示により触覚がレンダリングされる。

3.3 触覚信号の生成と物理キャリブレーション

触覚刺激は、65 Hz の非対称パルス列 (24-bit / 96 kHz, 20 s) を基準波形とし、Audacity の Amplify 機能で 0 dBFS (HIGH), -6 dBFS (MID), -12 dBFS (LOW) の 3 つの WAV ファイルを作成した。OS (Windows 11) および再生ソフト (Foobar2000) は出力音量を 100 % に固定し、刺激レベルはファイル側のピーク振幅のみで制御した。物理出力は加速度センサ (ADXL362, Analog Devices) を振動子表面に貼付し、 ± 2 g 範囲・400 Hz 出力モードで測定した -12 dBFS (LOW) の値は 0.88 G p-p であった。

4. 予備実験

4.1 エキスパート・ヒューリスティック評価

ISO 9241-210 の 10 指標について、ハプティクス研究者 3 名 (平均経験 4.7 年) が 7 段階評価を行った。質問は以下であった。(識別容易性, 強度適切性, 時空間分解能, 装着快適性, 重量負荷(動きやすさ), 安全性(発熱・摩擦等), 疲労度, 自由度阻害の少なさ, 静音性, 拡張可能性(他機器連携)) 総合平均は 5.2 で、「識別容易性」「拡張可能性」は 6.0 と高評価を得た。自由記述では刺激強度の調整の要望が最多であった。

4.2 方向・強度弁別予備実験

擬似牽引力の方向・強度弁別予備実験を、以下の条件で実施した。実験参加者は、エキスパート・ヒューリスティック評価と同じ母集団であった。

- ・6 条件：{LOW, MID, HIGH} × {上, 下}.
- ・各刺激 20 秒 提示・休止 30 秒

実験参加者は、提示直後に (1) 方向 (二択) と (2) 主観強度 (100 mm VAS) を記入した。回答所要時間は平均 5.0 秒で強度・方向差は非有意であった。方向識別正答率は LOW 100 %, MID 83.3 %, HIGH 83.3 % でいずれも偶然水準 50 % を大きく上回った。VAS 値は物理加速度に対し線形増加を示した。

4.3 予備的なユーザ評価

非対称振動に関する先行研究 [1][6][5][7]は、主に指先でつまむ (ピンチ) 動作時における牽引錯覚の知覚に焦点を当てており、この動作が擬似牽引力を最も明確に知覚できるとされてきた。また、手全体で握る場合や身体に装着する場合には、指先でつまむ場合に比べて力の知覚効率が低下することも報告されている。例えば、ピンチ操作では、参加者が擬似牽引力の方向をほぼ 100% の精度で判別できたのに対し、アクチュエータを指の基節骨近くに装着した場合、方向の判別精度は 95.8% であった [2]。このように、手全体で物体を握った場合の力の知覚は、指先によるピンチ操作よりも弱くなると予想される。本研究では、アクチュエータと皮膚との接触面積を拡大し、装着安定性を高めるためにフィンガーバンドを採用した。我々のシステムによる力フィードバック提示の有効性を検証するため、10 名 (大学生・職員、男性 8 名、女性 2 名、年齢 24~44 歳) を対象に予備ユーザスタディを実施した。各参加者には、デバイスを使用して「重さの変化をどの程度明確に感じ取れたか」を、2 つの条件 (指先ピンチおよびフィンガーバンドによる手の把持) 下で評価してもらった。その結果、全員が「手で握った状態でも明確な力の感覚を感じ取れた」と回答し、本デバイスが明確な力フィードバックを提供できることが示された。さらに、力の知覚の明瞭さは、ピンチ条件とグリップ条件の間でほぼ同等であった。この結果から、本システムは操作モードに依存せず、高い忠実度で力フィードバックを伝達できる可能性が示唆される。

5. VR デモによる実証

本システムにおいて体験者は、AR 環境内で手を自由に動かしながら、バーチャル物体が手を押すような擬似的な重量感を体験できる。例えば、左手で右手を押したときや、バーチャル物体に手が接触したときに、バーチャル物体からの重量を感じる。擬似牽引力による錯覚が生起する前には、バーチャル物体の接近を知らせる低周波振動が提示され、接触の予兆として機能する。空間的なハプティクスレンダリングの応用として、柔らかい物体を押したときには、その反力を疑似重量で調整して提示する。さらに、体験者がバーチャル物体を把持し持ち上げる際には、接触と物体の重さに関する予期的な触覚フィードバックが提示される。没入感の向上のために、高解像度の HMD パススルービューを活用し、現実の手とバーチャル要素のオーバーレイ表示を実現している。また、動的な垂直方向の擬似牽引力は、直感的に理解しやすい矢印で視覚的に提示され、力の方向とインタラクションの意味が明瞭に把握できるよう工夫されている。これらの多面的で精密な触覚インタラクションにより、本デモは魅力的かつ直感的なユーザ体験を提供し、AR 応用の可能性を提示している。

6. むすび

本研究では、親指および人差し指を自由に保ちつつ、手掌への非対称振動刺激によって牽引感および重量感を提示する触覚デバイスを提案し、その有効性を検証した。デバイスは小指・薬指・手掌で固定するフィンガーバンド構造を採用し、AR 環境下での手の自然な操作と触覚提示の両立を可能とした。

本デバイスは、2つのアクチュエータを垂直に配置することで、振動強度と皮膚接触面積を拡大し、従来のピンチ操作の形式を採用せずとも明瞭な擬似牽引力を提示できることを確認した。予備的な評価実験では、参加者全員が手掌グリップ条件下でも明確な力の感覚を知覚できたと報告し、ピンチ操作時と同等の明瞭さが得られることが示された。また、バーチャル物体との接触・重量変化を段階的に提示する触覚レンダリングと、パススルービューによる視覚的統合により、直感的かつ没入感の高いAR体験を実現した。本デバイスは、ジェスチャ操作と触覚提示の両立が求められる次世代のXRインタフェース設計において、新たな可能性を拓くものである。今後は、力覚提示の長時間利用における快適性や動作範囲の拡張、および提示タイミングや波形パラメータの最適化により、より多様なタスクへの適用と高精度な力の知覚の支援を目指す。

参考文献

- [1] Amemiya, T., Gomi, H.: Buru-Navi3: Behavioral navigations using illusory pulled sensation created by thumb-sized vibrator. In: ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies, p. 1. ACM (2014).
- [2] Culbertson, H., Walker, J.M., Raitor, M., Okamura, A.M.: 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, pp. 4972–4982. ACM (2017).
- [3] Kappers, A.M.L., Fa Si Oen, M., Junggeburch, T.J.W., Plaisier, M.A.: Hand-held haptic navigation devices for actual walking. IEEE Transactions on Haptics 15(4), 655–666 (2022).
- [4] Minamizawa, K., Fukamachi, S., Kajimoto, H., Kawakami, N., Tachi, S.: Gravity grabber: Wearable haptic display to present virtual mass sensation. In: ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies (SIGGRAPH '07). ACM (2007).
- [5] Rekimoto, J.: Traxion: A tactile interaction device with virtual force sensation. In: Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 427–432. ACM (2013).
- [6] Tanabe, T., Yano, H., Endo, H., Ino, S., Iwata, H.: Motion guidance using translational force and torque feedback by induced pulling illusion. In: 2020 International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, pp. 471–479. Springer (2020).
- [7] Maeda, T., Yamamoto, J., Yoshimura, T., Sakai, H., Minamizawa, K.: Waylet: Self-contained haptic device for park-scale interactions. SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies, 22:1–22:2 (2023).
- [8] Zhu, J., Yamamoto, T., Nakano, M., Yamakawa, Y., Fujimoto, M.: Control architecture for human-robot collaboration systems in smart manufacturing. In: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1321–1328. IEEE (2019).