



セルフリオネット：指先力入力システムによる 全身アバタ操作と多様な触覚インタラクションの実現

平尾悠太郎^{1),*}, 橋本健^{2),*}

1) 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学領域 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5, yutarohirao@gmail.com)

2) 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, hashimoto@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本論文では指先の力入力によって全身アバタの運動を生成し、自在な操作と多様な触覚の体験を実現する VR システム、セルフリオネット (セルフ+マリオネット) を提案する。セルフリオネットはマウスのような形状の力入力装置であり、ユーザはセルフリオネットに指を固定して使用する。セルフリオネットを装着した状態でユーザが指に力を込めることで、バーチャル身体の手や足を含めた全身の操作が可能となり、バーチャル物体を持ち上げたり、VR 空間を歩行したりすることができる。また、セルフリオネットはバーチャル身体の手や足の操作だけでなく、バーチャル物体や環境の物理特性に応じて操作に必要な力入力量を変化させることで、バーチャル物体の重さや硬さといった触覚特性や、水中や沼道、坂道などのバーチャル環境の触覚的表現を可能とする。

キーワード: 身体性, 触覚, アバタ操作, 力入力デバイス

1. はじめに

2024 年現在、ロボットやバーチャル身体などのアバタを通して、遠隔地や VR 空間の物体、事象をリアリティをもって見聞きできるようになってきた。しかし、VR 空間での身体的インタラクションにおいては未だ多くの課題残されている。VR 研究の文脈における身体的自己認知や身体的インタラクションといった身体性の研究はこれまで主にユーザの身体動作をトラッキングし、アバタの形態学的に対応した部位への運動へと変換する、モーションキャプチャ (mocap) 技術を対象として行われてきた。mocap 技術は、ユーザが物理世界で慣れている自身の身体制御則 (身体図式) をほぼそのまま用いることが可能であるため、特に身体操作においては適応が早く直感的に行えるという利点がある。一方で mocap 技術では外部カメラやトラッカーなどが必要であり、また身体運動を可能とする十分な空間を確保する必要もあるため、普及において環境的 (機材的・空間的) ハードルがある。さらに mocap 技術には、身体に障がいを抱えるユーザが十分に活用できないという身体的制約も存在する。これら操作面における課題に加え、全身を用いた触覚的インタラクションにも多くの課題がある。これまでの触覚研究ではワイヤやロボットアームなどを用いて物理的に力触覚を再現する手法が主であった。しかしこれらの手法では提示できる力触覚の強さと、デバイスの複雑さや重量、ユーザの可動範囲などがトレードオフとなってしまう実用化は限定的であった。また、人の認知特性を利用して主に視覚刺激によって疑似的に触覚を提示する手法も研究されているが、触覚フィードバックなしで提示可能な触覚の表現

力には限界がある。このように、全身に対して触覚を含んだ身体的インタラクションを実現するには触覚提示技術の表現力と有用性という潜在的なトレードオフが存在する。

これに対し本研究では、指先の力入力によって全身アバタの運動を生成し、自在な操作と多様な触覚の体験を実現する VR システム、セルフリオネット (セルフ+マリオネット) を提案する。これにより狭い空間やユーザの身体的特徴など環境的・身体的制約の多様性を吸収し、かつ触覚の表現力と有用性のトレードオフという全身触覚提示の技術的課題も克服した、誰もがどこでも VR 空間に全身性 (全身の身体性) を形成できるシステムの実現を目指す (図 1)。

2. セルフリオネット

本提案システムの設計原理は、通常的身體図式とは乖離した身体操作において身体性を担保することを目指している。そこで、身体性の構築において重要な要素である、制御性の高さ (制御の時空間解像度が高く連続であること) [1] と、期待される触覚と得られる触覚情報の種類の一致性 [2] を満たすべく、提案手法では指先の力入力を全身アバタの連続的な運動へと変換する。指の力入力をバーチャルな運動へと変換する場合、ユーザには力センサに入力した力と同等の反力がパッシブフィードバックとして提示される。そしてこの力入力に伴ってユーザが指から受け取る触覚情報と、バーチャルなインタラクションによって期待される触覚情報は、いずれも皮膚の変形による皮膚感覚情報と、筋や腱による深部感覚情報を含むものであり、この意味で、力入力によるバーチャル身体操作はモダリティマッチな触覚情報を伴うと言える。さらに力入力によるバーチャル身体操作は、バーチャル物体や環境の物理特性に応じて操作に必要な力

*: 共同筆頭著者

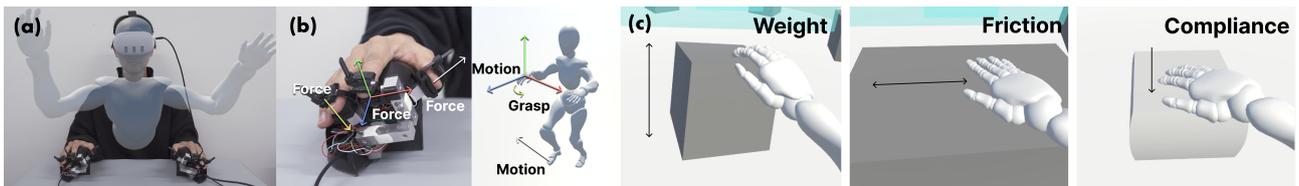


図 1: (a) セルフリオネットシステムイメージ; (b) 力入力とバーチャル運動の対応; (c) 触覚的インタラクションの実装例

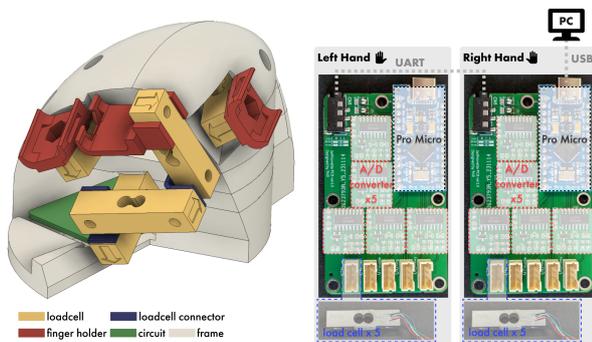


図 2: 左: ハードウェア構成; 右: システム構成

入力量を変化させることで触覚表現も可能である。ここで、つもり制御 [3] や Motion-Less VR [4] に見られるようなこれまでの力入力アバタ操作システムに比べ、セルフリオネットは力入力とバーチャル身体運動の連続的なマッピングにより、より精緻で複雑な操作と効果的な触覚提示を可能とし、また物理身体とバーチャル身体との間に形態学的に不一致なマッピングを形成することで、全身を拘束することによる危険性や煩雑さなどの問題を回避できる。

図 2 に装置の外観と構成部品、システム図を示す。片手用のハードウェアは合計 5 つのシングルビームロードセルと、ユーザーが自然な姿勢で手を置くことができる球状の外殻から構成されている。各ロードセルの大きさは $12.5 \times 12.5 \times 55 \text{ mm}$ であり、最大 20 kg の力入力をアナログ信号に変換する。ロードセルからのアナログ信号は HX711 チップによって 80 Hz でデジタル信号に変換され、マイコン (Pro Micro) で読み取られる。5 つのロードセルは、親指に 1 つ、中指に 1 つ、人差し指に 3 つが配置されており、人差し指の 3 つはそれぞれが直交するように配置されている。これらにより、親指と中指は上下方向に 1 自由度、人差し指は前後上下左右の 3 自由度で力入力を取得できる。また、使用者の指を指ホルダーに固定するために、再利用可能な結束バンドを用いた。このとき、指と結束バンドの間に低反発ウレタンフォームを入れることで指を快適かつ確実に固定できるようにした。以上のシステムにより両手で合計 10 自由度の入力を得ることができる。

次に力入力からアバタの動きへの変換について説明する。デバイスからの力入力とアバタの動きの対応を図 1 (b) に示す。アバタの頭、手、脚にそれぞれ到達目標点を設定し、

FinalIK¹を用いた逆動力学処理によってアバタ動作を実現した。このとき頭部の目標点はヘッドマウントディスプレイ (HMD) の位置に追従する。また、バーチャル手の目標点については、人差し指の 3 つのロードセルからの力入力値が、VR 空間上の各座標軸に沿った動きへ変換される。さらに、バーチャル脚の目標点については、親指のロードセルからの力入力値が、脚の昇降動作軸の動きへ変換される。他方、中指のロードセルからの力入力値はバーチャル物体の把持インタラクションのトリガーとして使用される。

アバタの手と脚については、各ロードセルに加えられた力が VR 空間内の対応する目標点に作用する力に変換される。そしてこの目標点の位置が更新され、更新された目標点にアバタの手や脚が追従する。ロードセルに加わる力 F_l と VR 空間上の目標点に加わる力 F_v の関係式について、本研究では式 1 のような挙動を定義することで安定した運動を実現した。具体的には、ロードセルに加わる力と目標点に加わる力は比例定数 α で比例し、各目標点の運動 \ddot{x} はバネ・ダンパモデルで記述される。また、バネ定数 k と減衰係数 c はそれぞれ、 10 N/m 、 10 Ns/m とした。

$$F_v = \alpha F_l, \quad m_v \ddot{x} + c \dot{x} + k(x - x_0) = F_v + f_m \quad (1)$$

歩行については、左右の親指を交互に入力する、Walking in Place (WIP) のような手法を実装した。具体的には、バーチャル脚の足踏みの高さや周期を調節することで、VR 空間内での歩行速度や方向転換、後方への移動などを可能とした。また把持に関しては、手を完全に開いている状態から完全に閉じている状態までが中指の力入力に応じて連続的に表現された。さらに、バーチャル手の近くにバーチャル物体がある場合、特定の閾値を超えて手を握ると物体を把持できるように実装された。さらにバーチャル物体や環境とのインタラクション中に外力 f_m を変化させることで、動作を実現するために必要な力の入力量に変化し、これによりバーチャル物体の重さや表面粗さ、硬さなどの触覚プロパティの表現を可能とした (図 2 (c))。

3. 実験

本実験の目的は、セルフリオネットがバーチャル物体とのインタラクションにおいてリアルな触覚体験を提示し得るか、またその触覚的インタラクションを通してアバタの身体性を高め得るかについて検討することである。そこで本実験では、VR 空間においてバーチャル物体の重さ、硬

¹<http://root-motion.com/>

さ、表面粗さ（摩擦係数）といった3つの触覚プロパティを提示し得るインタラクションにおいて、セルフリオネットと mocap, そして人差し指ジェスチャによる（フィンガー）操作を比較した。本実験における仮説は以下のとおりである。

[H1] セルフリオネットは mocap やフィンガー操作に比べてよりリアルな触覚提示が可能である。

[H2] セルフリオネットは mocap やフィンガー操作に比べて高い身体性を生起させられる。

3.1 実験条件

実験は参加者内計画で行われた。実験条件として、バーチャル身体操作手法に関する3つの水準、すなわち mocap 条件、セルフリオネット条件、人差し指ジェスチャ（フィンガー）条件を設定した。全ての操作条件において、バーチャル手の動作範囲はアバターの肩から前方 0.15 m の点を中心とし、かつ肩から 0.6 m 前方に頂点を持つ半球内に限定された。mocap 条件では VR 用 HMD (Meta Quest 3) のハンドトラッキングを用いて、ユーザの手の位置にバーチャルハンドの目標点を追従させた。またフィンガー条件では、人差し指の先端の位置を、目標点の座標系へと変換するシステムを実装した。本実装では3次元空間の各軸において人差し指とバーチャル手の両方の可動範囲を考慮した座標変換を実装した。

また、バーチャル物体との触覚的インタラクションにおいて、持ち上げによる重さ表現、押し込みによる硬さ表現、なぞりによる摩擦係数表現、といった3つの触覚表現を設定した。具体的に、mocap 条件とフィンガー条件については、古典的な疑似触覚技術として、目標点に対するバーチャル物体の追従量を変化させることで触覚プロパティを表現した。他方、セルフリオネット条件においては、バーチャル物体の触覚特性に応じて式 1 における f_m を変化させる、すなわち重さ表現においては $f_m = -m_{obj}\ddot{x} - m_{obj}g$ における m_{obj} によって、弾性（硬さ）表現においては $f_m = -k_{obj}x$ における k_{obj} によって、そして摩擦係数表現においては垂直抗力と面に水平な力から計算される動摩擦と静止摩擦を f_m に反映することによって触覚プロパティを表現した。

3.2 実験環境

実験は座位にて行われた。参加者は VR 用 HMD (Meta Quest 3) を装着し、フィンガー条件においては人差し指の角度が正面方向に対して約 45 度となるように机の上に設置されたアームレストに腕を置いて操作した。また、セルフリオネット条件では机の上に置かれた提案デバイスを装着して操作した。また VR 環境では、参加者の目の前に白い円柱の台があり、その台の淵に等間隔となるように5つのバーチャル物体が配置された。参加者の正面には常に1つのバーチャル物体が配置されており、ユーザはフットペダルを踏みこむことで台を回転させ、正面のバーチャル物体を隣接したバーチャル物体と入れ替えることができた。

3.3 実験課題

参加者に様々なパラメータの触覚特性を体験させるために、各触覚特性について5つの異なる強度を用意し、それ

らの大きさ（重さ、硬さ、摩擦係数の大きさ）を並べ替えるダミー課題を実施した。参加者は台上に配置された5つのバーチャル物体とインタラクションし、各物体の触覚特性について強度が強い順（重い、硬い、または摩擦係数が大きい順）に1位から5位まで順位付けを行った。本実験の課題遂行にあたり、バーチャル物体の切り替えや順位付けは参加者がフットペダルによって自由に行うことができ、すべての順位付けが完了した後に参加者の自己申告によって課題を終了した。

3.4 手続き

実験には計8名（男性6名、女性2名）が参加し、平均年齢は 25.38 ± 2.77 であった。参加者は実験前に実験の目的や方法、手続きなどの説明を受け、同意書に署名した。その後、参加者は VR 用 HMD を装着し、3つの操作条件の中からランダムに選択された操作条件における準備を行った。その後、簡単な操作確認を行い、実験課題に移行した。実験参加者は並び替え課題を行った後、HMD を外してアンケートに回答した。また、実験1同様、提示される操作条件の順番は参加者間でカウンターバランスされた。実験は全部で約1時間程度であった。また参加者には謝金として Amazon Gift カード 1000 円分が支払われた。

3.5 評価指標

触覚のリアリズム (H1)、身体性 (H2)、作業負荷 (H2) のそれぞれを質問肢によって評価した。身体性については、身体性を構成する身体所有感、行為主体感、自己位置感覚の3要素に関する10項目の質問肢を用いた [5]。また、作業負荷については NASA-TLX を用いた [6]。

3.6 結果

図3に触覚のリアリズムに関する結果を示す。操作要因と触覚特性要因における二要因分散分析の結果、操作要因において主効果が見られた ($F(2, 63) = 7.0, p < .01$)。よって下位検定として Shaffer の p 値補正を用いたウィルコクソンの符号付き順位検定を行った結果、mocap-フィンガー条件間 ($p < .01, r = .58$) 及びフィンガー-セルフリオネット条件間 ($p < .01, r = .62$) で有意差が見られた。

また、図4に身体性と作業負荷の結果を示す。身体性の各項目の結果においてはウィルコクソンの符号付き順位検定を、作業負荷の結果においては対応ありの t 検定を、それぞれ Shaffer の p 値補正を用いて適用したところ、身体所有感に関してはフィンガー条件が mocap 条件よりも ($p < .01, r = .94$)、また作業負荷に関しては mocap 条件がフィンガー条件 ($p < .01, r = .86$)、セルフリオネット条件 ($p = .049, r = .67$) に比べて有意に低いことが示唆された。

3.7 考察

3.7.1 セルフリオネットの触覚的表現力

[H1] は部分的に支持された。mocap 条件による触覚体験のリアリズムが、セルフリオネット条件によるそれと大差がなかったことについて、本実験の環境におけるバーチャル物体とのインタラクションでは、手の可動域が比較的狭

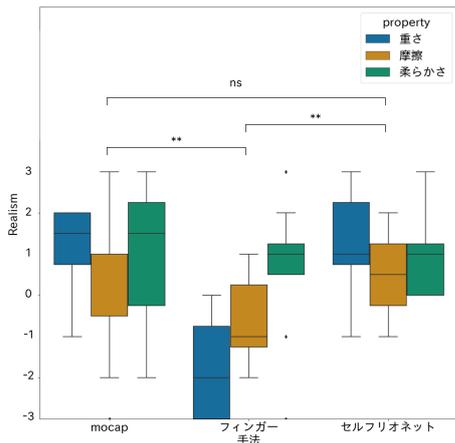


図 3: 触覚的インタラクションに対するリアリズムの結果

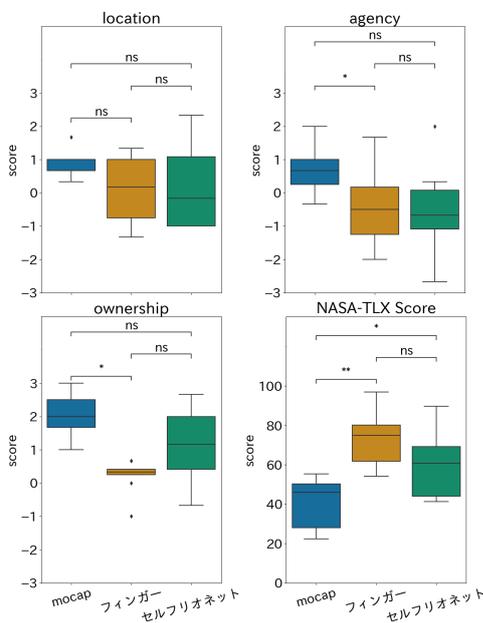


図 4: 身体性と NASA-TLX の結果

かったため、触覚的インタラクションのリアリズム低下を招くほどバーチャル手の位置と参加者の手の位置が大きく乖離しなかった可能性が原因の一つとして考えられる。また、参加者がセルフリオネットの操作に十分慣れておらず、参加者が望む動きを完璧に実行することができなかったために、触覚的インタラクションにおいても十分なポテンシャルを発揮できていなかった可能性も考えられる。このことは、セルフリオネットの作業負荷のスコアが mocap 条件よりも高かったことから推察される。今後の研究では、セルフリオネットの操作に十分慣れた状態における触覚体験のリアリズムの検討が課題として挙げられる。一方、セルフリオネットはフィンガー条件に比べるとリアルな触覚体験を提示できていることが示唆された。これは、セルフリオネットの力入力操作による指先の力情報の変化が、バーチャル物体の触覚特性の違いに関する手がかりとして寄与したためであると考えられる。

3.7.2 セルフリオネットの身体性

[H2] は支持されなかった。これは上述したように、今回の疑似触覚的インタラクションが、mocap 条件における身体性を低下させるほど違和感のある体験ではなかった可能性が一因として挙げられる。一方で、セルフリオネットのような、通常的身體図式とは大きく乖離する身体操作手法であっても一定の身体性を担保できることが示唆された。これはセルフリオネットの操作による触覚的インタラクションがアバタの身体化を促進したためであると考えられる。

4. まとめ

本研究では指先の力入力によって全身アバタの運動を生成し、自在な操作と多様な触感の体験を実現する VR システム、セルフリオネットを提案し、触覚的インタラクションを通じた触覚的表現力と身体性について実験を通じた検討を行った。実験の結果、セルフリオネットは通常とは大きく異なる身体図式を要するにも関わらず、触覚的インタラクションを通じて mocap による操作と大差ない身体性を生起できる可能性があり、またバーチャル物体の重さ、摩擦、硬さなどに関して一定のリアリズムを担保した触覚提示が可能であることが示唆された。

謝辞 本研究は、JST ACT-X JPMJAX22KD, JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMs2013, および JSPS 科研費 23K20007, 24K20818 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 小嶋秀樹. ミクロな予測性とマクロな予測性—高橋・宮崎論文へのコメント—. 心理学評論, Vol. 54, No. 1, pp. 25–28, 2011.
- [2] P. Svensson et al. A review of invasive and non-invasive sensory feedback in upper limb prostheses. *Expert review of medical devices*, Vol. 14, No. 6, pp. 439–447, 2017.
- [3] M. Niwa et al. Detection and transmission of “tsumori” : an archetype of behavioral intention in controlling a humanoid robot. In *Proceeding of 20th International Conference on Artificial Reality and Telexistance (ICAT2010)*, pp. 197–201, 2010.
- [4] T. Imanaga et al. Research on motion-less vr: Comparison of muscle outputs between motion using developed system and natural motion. In *2022 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 1078–1079. IEEE, 2022.
- [5] M. G. Franco and T. C. Peck. Avatar embodiment. towards a standardized questionnaire. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 5, p. 74, 2018.
- [6] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183. Elsevier, 1988.