



Virtual Joint: 皮膚伸長による拡張身体の動作に対応する固有感覚フィードバック

Virtual Joint: Proprioceptive Feedback Corresponding to Augmented-Body Movements via Skin-Stretch

高下修聡¹⁾, Jürgen Steimle²⁾, 稲見昌彦¹⁾

1) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

2) Saarland University (ドイツ)

概要: 尻尾や追加肢の基部などの視認しがたい拡張身体部位に対し、視覚に頼らずにその姿勢や与えられた力をフィードバックする手法が望まれている。本研究では、拡張身体の基部にその動作に対応した皮膚変形を与えることによって、単なる情報のマッピングに留まらない、より「自然に」感じられる拡張身体に対する固有感覚フィードバックを提案する。

キーワード: 身体拡張、アバター、XR、身体化、体性感覚フィードバック

1. はじめに

物理空間とバーチャル空間の双方において、ヒトの身体の形を拡張する技術が開発されてきており、新たな能力やインタラクションをヒトに与えつつある。物理空間においては、第三の腕 [1] や尻尾 [2] などがマルチタスクや身体のバランスをサポートすることに寄与しているほか、感情伝達 [3] など社会的交流のための使用も検討されつつある。また、バーチャル空間においても、感情を表現するために猫耳や尾を使用する、蛇の下半身を持つアバターにおいて他者に尾を巻き付けるなど、拡張身体を用いた新たな身体表現の文化が形成されつつある。

しかし、それら拡張身体には生得的な感覚が欠如しているため、その身体の位置や加えられた力をユーザーが知覚することができず、インタラクションに弊害を与えている。通常、人間は筋肉・腱・関節・皮膚に存在する受容器からの信号を統合して、四肢の位置や力を意識する [4, 5, 6]。一方で、拡張身体はそのような先天的なフィードバックを欠いているために、ユーザーは視覚情報に過度に依存せざるを得ず、認知的負荷が強いられている [7]。これはバーチャル空間における尾や翼などの拡張身体では、義肢や物理拡張肢で存在するそれらのマウンタを通じた慣性の伝達や圧力変化が存在しないため、より顕著であり、例えばユーザーは他者が尻尾に触れたとしても気が付くことができない。これまでの研究では振動 [8]、圧力 [9] などが拡張身体や義肢からのフィードバックのために採求されてきたが、生得的身体の固有感覚と似た形式でのフィードバックではなく、単に位置や力の情報をマッピングするアプローチに基づいていた。

そこで本研究では、ユーザーに拡張身体の固有感覚を皮膚伸長を通じて伝えるフィードバックシステム、Virtual Joint を提案する。特に、固有感覚の手がかりが現実の拡張肢よりもより少ないバーチャルリアリティ空間において、ユーザーの通常の視野の外に位置するために固有感覚を必要とする、

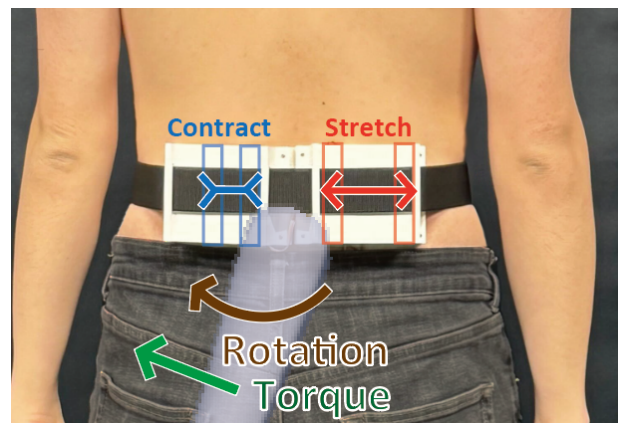


図 1: Virtual Joint のコンセプト。拡張身体の動作に伴う皮膚や筋肉の伸長感覚を皮膚伸長フィードバックを通じてユーザーに提示する。

尻尾に注目して検討を行った。このシステムは拡張身体と現実の身体の境目にバーチャルな関節を想定し、その付近で拡張身体の動作に伴って発生するはずの皮膚や筋肉の伸縮感覚を、皮膚伸長を通じてユーザーに伝達する。具体的には、腰から伸びる尻尾が右側に倒れたときには、左腰の皮膚を伸ばし右腰の皮膚を縮めることで、拡張身体に動作に伴って引っ張られる基部付近の皮膚の感覚をユーザーに伝える。同様に、尻尾に右側に倒される力を加えられたときには、左腰の皮膚を伸ばすことによって、左腰に位置するバーチャルな筋肉が延ばされている感覚をユーザーに提示する。これによって、ユーザーは拡張身体の位置や力を、生得的な身体のそれと似た感覚で感じられると考えられる。

本研究は、バーチャルな尻尾に関する Virtual Joint の角度と力を伝えるために、それらの信号の皮膚伸長量へのマッピング方法を検討した。加えて、最終的に選定されたマッピングを用い、尻尾の角度と尻尾に加えられたトルクを知

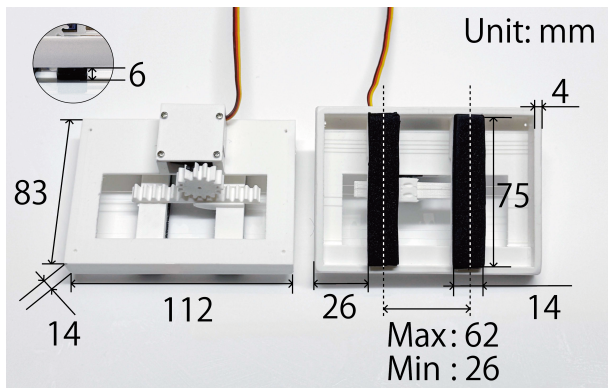


図 2: 皮膚伸長デバイス。アクチュエータが二つのネオプレンフォームの間隔を 26 - 62mm の範囲で駆動させ、ユーザーの皮膚を伸縮させる。

覚する能力及び主観的体験を評価した。結果は、全ての知覚タスクにおいて Virtual Joint に基づく皮膚伸長フィードバック条件が採用された振動フィードバック条件を上回っていた。また、主観的評価においても、身体所有感、行為主体感、知覚された身体の変化、身体の拡張感、楽しさ、(生得的身体を基準とした) 感覚の自然さ、直感性の次元において振動刺激フィードバック条件よりも高いスコアを得た。これらの結果は、提案手法がユーザーに直感的な拡張身体的位置・力の知覚を支援し、拡張身体をより自分の身体であるかのように感じさせることを示唆している。

本システムは、ユーザーが拡張された身体部分を「生得的な身体と似たように」操作し感じられる体験設計に貢献する。また、自らの身体的位置・力に関する知覚を与えることによって、安全かつ高機能な身体拡張技術の実用を近づける可能性がある。

2. 皮膚伸長システム

本研究のコンセプトに基づき、ユーザの皮膚を変形させるデバイスを開発した(図 2)。本研究では、特にバーチャルな尻尾の感覚に着目し、その左右への振動を表現することを目的とした。多様なシナリオへの適用を考慮し、デバイスは着座型の皮膚せん断フィードバックシステムではなく、ウェアラブルなシステムとして設計した。

デバイスの構造を図 2 に示す。本デバイスは、ラック・アンド・ピニオン機構を介して皮膚と平行に配置されたアクチュエータを駆動し、皮膚を伸展させる方式を採用している。筐体には ABS 樹脂による三次元造形を用い、軽量性と剛性を確保した。また、皮膚変形デバイスに関する先行研究 [10] を参考に、アクチュエータ支持にナイロン糸を使用した。皮膚との接触部には、厚さ 6 mm の高摩擦ネオプレンフォームを採用し、腰部の多様な曲面形状にフィットするよう設計した。バーチャル尻尾の運動に伴う皮膚変形を表現するため、デバイスは腰部両側に、尻尾の回転軸を挟む形で配置した。駆動信号は Arduino Due を介して送信された。

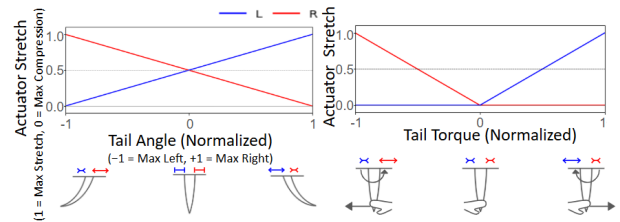


図 3: 角度 (左)・トルク (右) の伝達のために最終的に採用されたマッピング。

3. 角度・トルクの伝達のためのマッピング設計

本研究は現実に存在する感覚を再現する研究ではなく、現実に存在しない尻尾の感覚、即ち架空の感覚をユーザーに提示することを試みているために、位置やトルクを腰部への皮膚伸長刺激を用いて伝えるためにはその位置・トルクの量を皮膚せん断量に変換するためのマッピングが必要であった。

予備的な検討の結果、図 3 に示すマッピングが最終的に採用された。角度変化に関しては、前述の説明と同じく、尻尾を右側に倒したときには右腰側の皮膚が縮み左腰側の皮膚が伸びる。また、トルクに関しては、尻尾を右側に倒す力を加えられたときには左腰のみの皮膚が伸びる。これらのマッピングは線形独立であるため、理想的には、左右の腰に与えられた皮膚変化量から位置・トルクのパアを一意に推定できる。

4. 評価

上述のマッピングを採用した最終的なシステムにおいて、角度・トルクの知覚精度の評価、及び身体化感覚 [11] や主観的楽しさ、生得的身体を基準とした感覚の自然さ、直感性を評価した。評価は振動の強度を用いてアーム位置を伝達した以前の研究 [12] を参考にした振動刺激フィードバック条件と比較して行われた。

全体的な実験の手続きを図 4 に示した。参加者 ($n = 21$, 男 18, 女 3, SNS で広く募集) は初めに実験内容について説明を受け、属性を蒐集するアンケートに回答した。その後、尻尾の回転量を推定するタスク、尻尾に加わったトルクを推定するタスク、その両方を同時に推定するタスクに順に参加し、主観的評価のアンケートに記入した。これを皮膚伸長フィードバック・振動フィードバックの各条件(被験者間でカウンターバランスされた順序で実行)について行った後、全体的な印象を調査するインタビューに回答した。

角度推定タスク、トルク推定タスク、角度-トルク同時推定タスクにおいては、参加者は腰部に与えられた刺激を学習した後に、知覚精度が検証された。角度については 0 度から ± 90 度までの 18 度刻みで、即ち 11 種の回転状態に対する刺激が図 3 に従って与えられた。即ち、尻尾が右に 90 度傾いているときには、右腰のアクチュエータの間隔は 26 mm に収縮し、左腰のアクチュエータの間隔は 62 mm に伸長した。トルクについては、 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ から $\pm 50 \text{ N} \cdot \text{m}$ まで $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 刻みで、11 段階のトルクに対応する刺激が

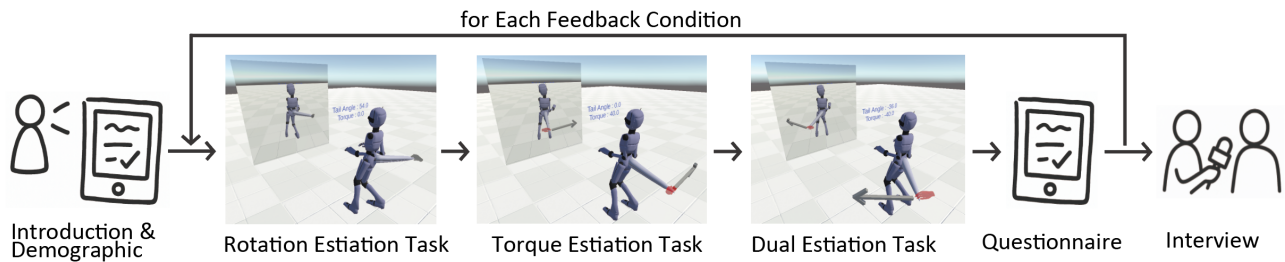


図 4: 実験の流れ

図 3 に従って与えられた。なお、振動刺激には Vp-210 を用い、図 3 におけるアクチュエータ間隙と比例した電圧で駆動される振動子による振動が与えられた。最大のアクチュエータ間隙 62 mm に対応する最大電圧は被験者ごとに調整され、2.7 V から 5 V の範囲であった。角度-トルク同時推定タスクにおいては、角度に対応する刺激量とトルクに対応する刺激量の平均を取ったアクチュエータ変化もしくは振動子駆動電圧が与えられた。

それぞれのタスクは、学習フェーズ、練習フェーズ、テストフェーズから構成された。学習フェーズでは、参加者は尻尾の角度もしくは尻尾に加えられるトルク(矢印の大きさで描画)をその値を示す数値と共に観察しながら、24 回の試行に渡って、尻尾の状態(角度やトルクの量)と腰部への刺激量との対応を学んだ。練習フェーズでは、ユーザーは尻尾が見えない状態で、腰部に与えられた刺激量から尻尾の状態を推定した。ユーザーが尻尾の状態の推定値を答えたのちに、再度尻尾が描画され、正解の値がユーザーに伝えられた。これが 24 試行に渡り繰り返し行われた。テストフェーズにおいては、練習フェーズと同様にユーザーは尻尾が見えない状態で、腰部に与えられた刺激量から尻尾の状態を推定した。ただし、推定後に正解の値は教示されなかった。これを 36 試行に渡り繰り返した。

主観的アンケートは、VEQ [13] を参考に身体化感覚に関する項目を作成し、また「自分の生得的身体の身体構造を保ったまま新たな構造が追加された気がした」という項目で身体の拡張感覚を、「どのくらいインタラクションを楽しんだか? / インタラクションが面白かったか?」という項目で体験の楽しさを、「バーチャルの尻尾の感覚をどのくらい生得的身体と同じような方法で自然に感じる事ができたか?」という項目で感覚の自然さを、「バーチャルの尻尾の感覚をどのくらい直観的に感じる事ができたか?」という項目で感覚の直感性を評価した。

5. 結果

主観的アンケートの結果は、全ての項目において、皮膚伸長フィードバックが振動フィードバックを有為に上回っていた(図 5)。

また、知覚課題においては、提示した状態の値と推定値の Confusion Matrix (図 6) を観察すれば、皮膚伸長フィードバックにおいて振動フィードバック条件よりも対角方向

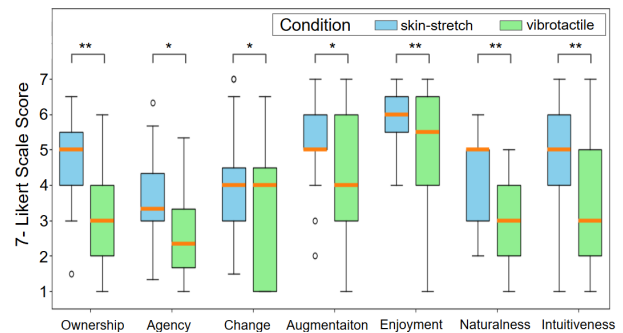


図 5: アンケート結果。

への集中が明確であり、知覚的な優位が明らかであった。

また、インタビューのコメントでは「もしも尻尾があったら、と期待する感覚に(皮膚伸長フィードバック条件は)近かった」という報告が多数あり、提案手法が架空の尻尾の感覚としてユーザーが期待するものに振動刺激よりは近いことを示唆していた。

6. おわりに

本研究では、拡張身体の基部付近にバーチャルな関節を想定し、その付近の皮膚や筋肉の伸長を皮膚伸長フィードバックを通じて伝えることで、より生得的身体の固有感覚知覚に似たモダリティを用いてユーザーに拡張身体的位置・力の間隔を伝達する手法である Virtual Joint を提案した。本手法の有効性は振動刺激フィードバックと比較して検証され、主観的評価及び知覚課題における客観的評価の両方を通してその優位が実証された。インタビューのコメントも、提案手法が尻尾の感覚という架空の感覚の構成に近づいていることを示唆していた。本提案手法は拡張身体における知覚の精度と主観的な体験を両立する体験設計に繋がり、将来の拡張身体を用いた作業能力の拡張や身体表現、インタラクション設計に貢献する。

謝辞本研究の一部は、JSPS 科研費 (JP24KJ0955)、JST ACT-X(JPMJAX24CF)、および JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2292) の支援を受けました。また、本研究の一部は、セコム科学技術振興財団の支援を受けて実施されました。

参考文献

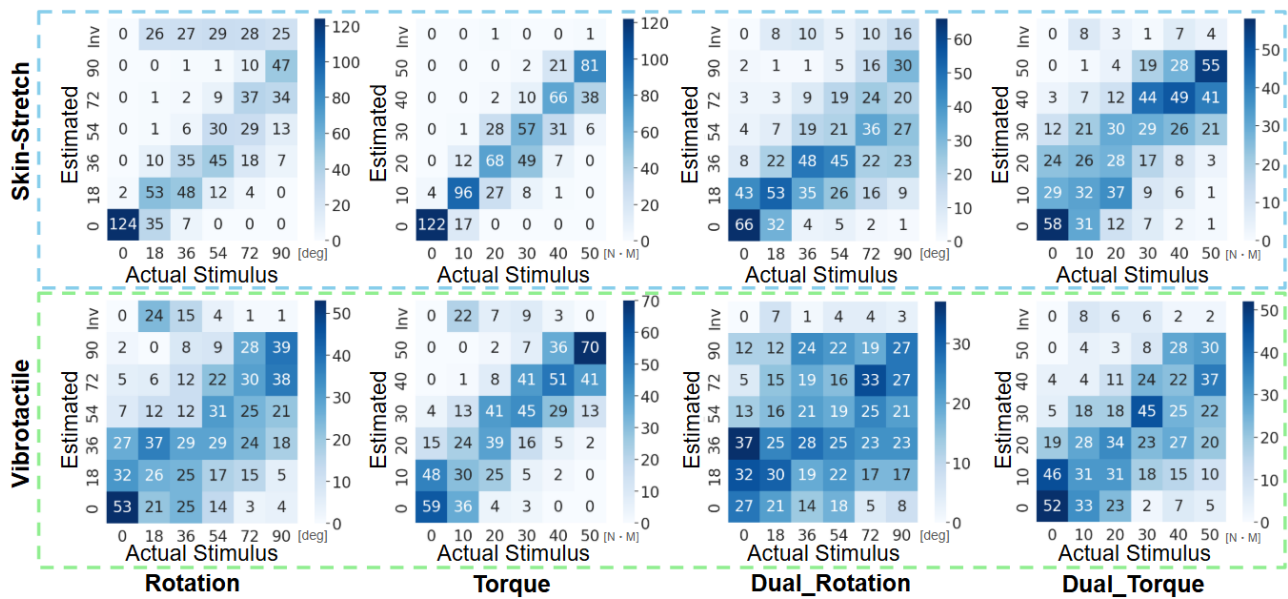


図 6: 知覚課題における confusion matrix。

- [1] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In *Proc. of UIST 2018*, pp. 65–74, Berlin, Germany, 2018. ACM.
- [2] Junichi Nabeshima, MHD Yamen Saraiji, and Kouta Minamizawa. Arque: artificial biomimicry-inspired tail for extending innate body functions. In *ACM SIGGRAPH 2019 Posters*, SIGGRAPH '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [3] Haoran Xie, Kento Mitsuhashi, and Takuma Torii. Augmenting human with a tail. In *Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019*, AH2019, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] C. S. SHERRINGTON. On the proprioceptive system, especially in its reflex aspect. *Brain*, Vol. 29, No. 4, pp. 467–482, 03 1907.
- [5] B. Edin. Cutaneous afferents provide information about knee joint movements in humans. *The Journal of Physiology*, Vol. 531, No. Pt 1, pp. 289–297, 2001.
- [6] Uwe Proske. The role of muscle proprioceptors in human limb position sense: a hypothesis. *Journal of Anatomy*, Vol. 227, No. 2, pp. 178–183, August 2015. Epub 2015 May 14.
- [7] Mattia Pinardi, Matthew R. Longo, Domenico Formica, Matija Strbac, Carsten Mehring, Etienne Burdet, and Giovanni Di Pino. Impact of supplementary sensory feedback on the control and embodiment in human movement augmentation. *Communications Engineering*, Vol. 2, No. 1, p. 64, 2023.
- [8] Yukiko Iwasaki, Kozo Ando, Shuhei Iizuka, Michiteru Kitazaki, and Hiroyasu Iwata. Detachable body: The impact of binocular disparity and vibrotactile feedback in co-presence tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 2, pp. 3477–3484, April 2020.
- [9] Kohei Umezawa, Yuta Suzuki, Gowrishankar Ganesh, and Yoichi Miyawaki. Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study. *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 1, p. 2339, 2022.
- [10] Emir Trujillo-Trujillo, Kevin Acuna-Condori, and Marina Gabriela S. P. Paredes. Evaluation of the skin fixation method of a haptic device to provide proprioceptive information for a sensory feedback prosthesis. In *2022 IEEE ANDESCON*, pp. 1–6, Barranquilla, Colombia, Nov 2022. IEEE.
- [11] Konstantina Kilteni, Raphaela Groten, and Mel Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence*, Vol. 21, No. 4, pp. 373–387, 2012.
- [12] A. Nocco, L. Raiano, M. Pinardi, D. Formica, and G. Di Pino. A novel proprioceptive feedback system for supernumerary robotic limb. In *2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, pp. 1024–1029, New York, NY, USA, Nov 2020. IEEE.
- [13] Daniel Roth and Marc Erich Latoschik. Construction of the virtual embodiment questionnaire (veq). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3546–3556, 2020.