

爪上振動提示による重量感覚変調

岸 道大* 雨坂 宇宙* 竹内 悠人* 岩井 大輔*

概要. 本研究は、爪上に取り付けた小型振動アクチュエータによって、指腹の自然な触覚を妨げることなく重量感覚を変化させる触覚提示手法を提案する。従来、重量錯覚は物体に振動を与えることで引き起こされるが、把持動作を行う対象物ごとにデバイスを取り付ける必要があり、柔軟性に欠けていた。本研究では、振動アクチュエータを指腹を避けるように配置し、振動タイミングを指ごとに制御することで、物体が軽く感じられたり重く感じられたりする知覚操作を実現する。5つのLRAモータを個別制御し、爪上でわずかに提示タイミングをずらした振動を与えることで、振動が指先の間を移動するような感覚を生成する。この流れの方向を変えることで、持ち上げられるような軽さ、または押し下げられるような重さの錯覚を感じさせることを期待する。本デモでは、装着者は指先に流れる微弱な振動を通じて、重量感覚の変化を体験できる。

1 はじめに

本研究の目的は、爪上からの振動提示によって高次の知覚である重量知覚を操作することである。

触覚の研究分野では、XRにおける触覚再現や感覚変容を実現するために、振動素子やアクチュエータを用いて疑似的に触覚を生成する取り組みが広く行われている [1, 3, 4, 5]。これらの研究は、XR環境における感覚の幅を広げ、バーチャル環境における没入感を高めるなど、マルチモーダルな体験を実現するうえで重要な役割を果たしてきた。

一方で、近年では単に触感を再現するだけでなく、触覚刺激がユーザの行動様式や高次の感覚への影響も明らかにされつつある。例えば、Kimら [2] は振動を与えた物体を把持することで、ユーザの重量感覚が変化することを示している。この結果は、触覚刺激が「重さ」という高次知覚に作用しうること示唆しており、触覚再現を超えて、感覚と行動を操作する新たな触覚インタフェースの可能性を開くものである。

このような高次感覚に作用する触覚刺激を提示する際、その提示位置と方法は重要な設計要素となる。指先への触覚提示は一般に、指腹からの提示とそれ以外に大別される。指腹からの触覚提示としては、電気刺激によって実環境からの触覚と人工的な触覚を同時に提示する手法 [5] や、振動刺激により力覚を誘発する手法 [4] が報告されている。しかし、指腹への提示は指と対象物体との間にデバイスが介在するため、現実の自然な触感を損ないやすいという課題があった。行動様式の変化や自然な動作中での感覚操作を応用として想定する場合、この課題を改

善し、自然な触感を保ったまま刺激を提示できることが重要である。

そこで本研究では、指腹の自然な触感に干渉しない、現実の触覚に人工刺激を重ねできる身体側からの触覚提示、特に爪上からの触覚提示に着目する。爪上からの提示は、指と物体の間の自然な接触を維持したまま刺激を与えられるため、触覚の純粋な変化を観察できる点で優位性を持つ。また、爪の硬質な構造によって安定した刺激伝達が可能であり、機械的なノイズや装着位置の変動の影響を受けにくいという利点もある。

本研究では、特に日常的な動作である把持動作に着目する。把持は、複数の指が協調して物体を持ち上げ・支える複雑な動作であり、単指での探索動作を対象とした従来研究よりも、現実に近い多様な知覚要素を含む。そこで本研究では、5本の指すべてに爪上触覚提示デバイスを装着し、指ごとに異なる振動パターンを提示することで、把持動作中の重量感覚変化を誘発することを目的とする。

従来の重量錯覚研究では、物体自体に振動アクチュエータを取り付けることで重く感じる錯覚を生じさせていた [2]。しかしこの手法は、対象物ごとに装置を設置する必要があり、汎用性に欠ける。そこで本研究では、振動アクチュエータを身体側に配置することで、どのような物体に対しても共通の刺激提示が可能となる柔軟な構成を実現する。本研究では、身体側配置による柔軟性を活かし、重量知覚に方向性を持たせるため、5指間で振動のタイミングをわずかにずらすことにより、指先に触覚的な流れを感じさせるような新たな触覚体験を提示する。これにより、振動の流れが上方向であれば軽く持ち上げられる感覚を、下方向であれば押し下げられる感覚を生み出すことを狙う。

そこで、本デモでは5つの振動アクチュエータを

個別制御し、爪上に貼り付けた状態で重量感覚の変調を体験できるよう設計した。参加者は、指先に流れる微弱な振動を通じて、重量感の方向性を体験できる。この体験を通じて、重量感覚の再定義や、触覚による知覚拡張の可能性を提示する。

2 システム構成

本研究では、5本の指それぞれに装着可能な爪上触覚提示デバイスを試作した。本システムの構成を図1に示す。デバイスは、指腹の自然な触覚を妨げることなく、爪上から振動刺激を提示することで重量感覚の変調を引き起こすことを目的としている。

各指に取り付けるモジュールは、小型リニアレゾナンスアクチュエータ（LRA、型番 LD14-002）を1つずつ搭載しており、独立した振動提示が可能である。振動の提示には、Adafruit 製モータドライバ DRV2605L を使用し、LRA の内蔵するエフェクト機能による波形を I²C 通信によって制御する。複数のモータドライバを同時に扱うため、I²C マルチプレクサ（TCA9548A）を用いて各ドライバを個別チャンネルとして切り替える構成とした。

中央制御にはマイコン（Arduino Mega）を用い、PC との間で UART 通信を行う。PC 側では提示パターンを定義し、マイコンへ送信することで、指ごとに異なる振動タイミングを制御できる。

この構成により、5本の指それぞれに独立したタイミング・強度で振動を与えることができ、刺激の流れる方向やリズムを制御することで、重量の方向性や重心移動のような錯覚を誘発することができる。

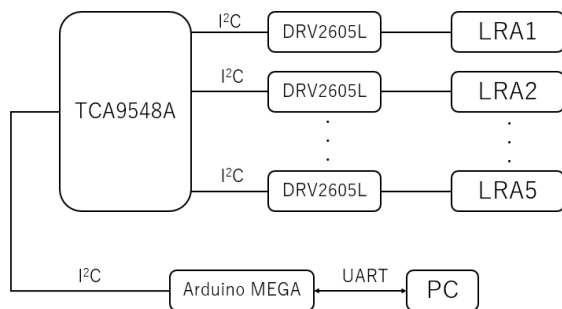


図 1. システム構成図

3 デモ概要

本デモでは、爪上触覚提示デバイスを実際に装着し、指先への振動刺激によって重量感覚の変化を探索する。

参加者は、5本の指に取り付けられた LRA から提示される微弱な振動を体験する（図2）。5指それぞれの振動タイミングをわずかにずらすことで、刺

激が指の間を伝播するような感覚を作り出す。このとき、刺激の流れる方向が上向きであれば軽く、下向きであれば重く感じるような重量錯覚が生じる可能性を検討している。

現在、提示条件と知覚との関係を明らかにするための試行を進めており、デモ参加者には複数の提示パターンを体験してもらうことで、どのような条件が重量感覚に影響するかを探索する。

振動パターンは PC 上で選択可能であり、ランダム振動・順次振動・強度グラデーションなどを切り替えて比較できる。参加者は、提示される振動の方向性や時間的变化に対して、どのような主観的变化を感じるかを自由に体験・報告する形式を予定している。

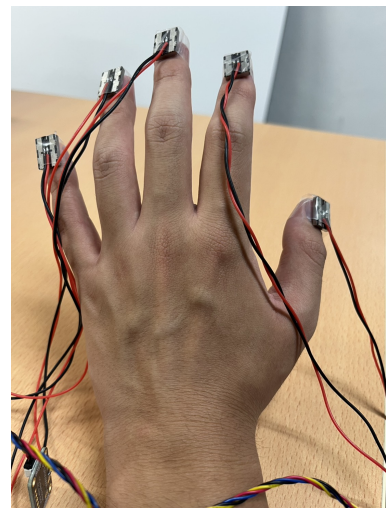


図 2. システム装着図

4 今後の展望

本デモで示した爪上振動による重量感覚変調手法は、まだ初期的な探索段階であり、今後は以下の点を検討する予定である。

1つ目は、振動パターンの精緻化である。現在は Adafruit 内蔵ライブラリのエフェクト機能による波形を使用しているため、振動の持続時間や強度の細かい制御が難しい。LRA の特性を活かし、振動タイミングや強度をより緻密に操作することで、重量知覚変調のメカニズムや最適条件を明らかにすることを目指す。

2つ目は、装置配置の最適化である。本デモは爪上に装着しているが、本手法は把持動作における自然触覚を妨げない、指腹を覆わない身体側からの提示手法の一例に過ぎない。指背やその他の部位など、他にも設置場所の選択肢があり、より最適な配置条件を検討する必要がある。

参考文献

- [1] S. Cai, Z. Chen, H. Gao, Y. Huang, Q. Zhang, X. Yu, and K. Zhu. Vibopneumo: A vibratory-pneumatic finger-worn haptic device for altering perceived texture roughness in mixed reality. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2024.
- [2] G. Kim, S. Okamoto, Y. Akiyama, and Y. Yamada. Weight illusion by presenting vibration to the fingertip. *Frontiers in Virtual Reality*, 3, 2022.
- [3] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎. Augmented Reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究. 電子情報通信学会論文誌 D, 87(11):2025–2033, 2004.
- [4] 岡本正吾, 昆陽雅司, 田所諭. 1A1-D08 指腹への振動触刺激による力覚の誘発. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010, pp. 1A1–D08.1. 一般社団法人 日本機械学会, 2010.
- [5] 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹. 電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティドリアリティ. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 8(3):339–348, 2003.