



# 非対称振動のジャークが仮想力覚の 知覚強度に与える影響

The Influence of Asymmetric Vibration's Jerk on Perceived Pseudo-Attraction Force Intensity

長原末緒<sup>1)</sup>, 西澤昌宏<sup>2)</sup>, 西原功<sup>1)</sup>, 中田崇行<sup>1)</sup>

Mio NAGAHARA, Masahiro NISHIZAWA, Isao NISHIHARA, and Takayuki NAKATA

1) 富山県立大学大学院 工学研究科 電子・情報工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

2) 富山県立大学 情報工学部 情報システム工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河 5180)

**概要：**仮想力覚は非対称振動によって知覚される疑似的な牽引力であり、ゲームコントローラ等の応用が期待される。本研究は仮想力覚の知覚精度向上を目的とし、知覚に寄与する非対称振動波形のパラメータを調査する。特に、非対称振動波形におけるジャーク(躍度)に着目し、その非対称性を操作した波形を生成・提示する。また、ジャークの比率が仮想力覚に与える影響を実験的に調べる。本発表では、波形生成手法と実験結果を報告する。

**キーワード：**仮想力覚, アクチュエータ, 力覚, 非対称振動

## 1. はじめに

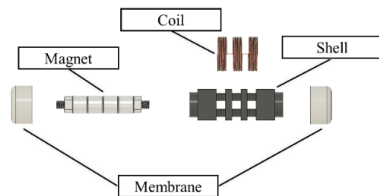
近年、バーチャルリアリティにおいて、力覚を提示するハプティクス技術の研究が盛んに行われている。スマートフォンやゲームコントローラなどの携帯型デバイスでは、単純な振動の強弱に加え、コンテンツに応じて振動を制御することで疑似的な触力覚をユーザに提示している。力覚を提示する装置は、大きく分けて接地型と非接地型に分類できる。接地型装置はワイヤ[1]やロボットアーム[2]をユーザの手に固定し、物理的に反力を提示することで、直接的に精密な力覚提示が可能である。しかし、これらは装置を接地する必要があるため、携帯性に乏しいという課題がある。一方、非接地型装置は、装置を空間に固定することなく力覚の提示が可能であるため携帯性に優れる。非接地型には、さらに物理的に力覚を提示する装置と、錯覚により力覚を提示する装置がある。物理的に力覚を提示する装置は、ドローン[3]やコントロール・モーメント・ジャイロスコープ[4]を利用し、プロペラの推進力やフライホイールの慣性力により力覚を提示する。しかし、これらの装置は装置自体が大型であり、ウェアラブルデバイスへの統合が困難である。一方、錯覚を利用する装置は非対称振動[5]や電気刺激[6]を利用した、指の感覚神経への刺激により力覚提示を行う。特に非対称振動による力覚提示は、既存の振動モータでも応用可能であり、より小型かつ軽量のウェアラブルデバイスの実現が容易であるという利点がある。こうした背景から、本研究では非対称振動を用いて疑似的な

力覚を提示する仮想力覚[7]に着目する。非対称振動とは、一方向へ素早く変化する加速度と逆方向へ緩やかに変化する加速度を生成する振動であり、これを指腹部に提示すると、ヒトは素早く変化する加速度のみを検知し、同方向へ力覚を知覚する[8]。しかし、仮想力覚は錯覚により生起するため、物理的に力覚を提示する装置と比較して、提示できる力覚の精度や大きさに課題がある。これは、仮想力覚の詳細な作用機序が明確に解明されていないため、物理的な刺激量を単に増強させるだけでは、知覚される力覚が必ずしも比例して強くなることに起因する。この課題に対処する方法として、振動子自体の構造を工夫して出力を増強するハードウェア的な対策[9]と、振動パターンを工夫して仮想力覚を錯覚的に増強するソフトウェア的な対策[10]が考えられる。前者のハードウェア的な対策では前述の通り、仮想力覚の作用機序が未解明であることから、単に物理的な出力を高めるだけでは、必ずしも飛躍的な仮想力覚の増強に繋がるとは限らない。そこで、本研究では後者のソフトウェア的な対策に着目し、ハードウェアの条件を変えずに振動方法を工夫することで、仮想力覚を強くするパラメータを調査することを目的とする。特に、先行研究[13]においてジャーク(躍度)の振幅の非対称性が錯覚の発生確率と関連することが示唆されており、このジャークを操作することが仮想力覚の増強に有望な手段であると考えられる。

したがって、本研究では非対称振動におけるジャークの



(a) 装置概要図



(b) アクチュエータの構成

図1 仮想力覚提示装置

振幅の非対称性を操作した波形が、仮想力覚の知覚強度に与える影響について実験的に調査する。

## 2. 先行研究

仮想力覚は、非対称に振動したアクチュエータを指先で把持することで知覚できる。Rekimoto はリニアアクチュエータを用いた仮想力覚提示装置 Traxion を開発し、デューティ比 20%:80%=ON:OFF の PWM 制御により非対称振動を生成した[11]。この装置は 1 軸方向を提示し、その方向弁別正答率は 80% 付近であった。Rekimoto はさらに Traxion を重ね合わせることで 2 軸へと提示軸を拡張した。提示方向は 45 deg ずつずらした 8 方向であり、方向弁別正答率は 20% 付近であった。これに対し嘉指らは、複数の非対称振動を位相同期させて振動を合成するアクチュエータ配置で 2 軸の仮想力覚提示デバイスを開発した[12]。この装置は、90deg の誤りを許容した大まかな方向弁別正答率は 92.4%、8 方向の細かな弁別における正答率は 54.6% であった。これらの多軸化の研究では、単軸方向の提示と比較して正答率が低下する傾向が見られる。この傾向は多方向提示における課題であり、アプリケーションへ応用する際に仮想力覚をより鮮明に知覚可能にする必要がある。

仮想力覚を効率よく生成するために、非対称振動波形の設計指針を探る研究も進められてきた。Tanabe らは、基本波と第 2 高調波を組み合わせた非対称な加速度波形でボイスコイルモータを振動させることで仮想力覚を提示した[13]。基本波と第 2 高調波の位相差を段階的に変化させ、位相差が仮想力覚の発生に与える影響を評価した。その結果、位相差が 0° または -180° に近い場合に錯覚が起りやすいことが示された。この結果から、非対称振動のジャークにおいて正負のピーク値で絶対値の差が大きいほど、錯覚の発生確率が高まることが考察された。しかし、Tanabe らの研究は基本波と第 2 高調波の位相差に着目した検討に留まっており、ジャーク自体を操作量として制御したわけではない。そのため、ジャークの具体的な波形が

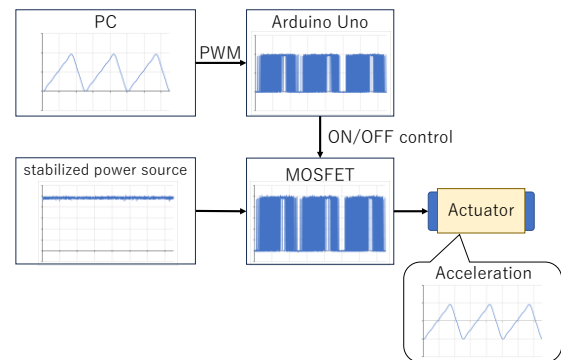


図2 波形制御システム

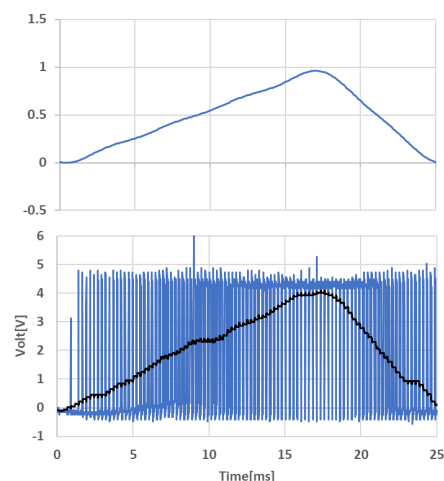


図3 入力波形(上：生成したアナログ波形，  
下：(青線) MOSFET から出力された PWM 波形，  
(黒線) 疑似電圧)

知覚強度に与える影響について、体系的な研究は十分とはいえない。そこで本研究では、この先行研究の知見に基づき、ジャークの振幅の非対称性を操作した波形が仮想力覚の知覚強度に与える影響を調査する。知覚に寄与する非対称振動波形のパラメータを調査することで、仮想力覚の知覚強度向上を試みる。

## 3. 提案手法

### 3.1 仮想力覚提示装置

本研究で使用する 1 軸の仮想力覚提示装置を図 1 に示す。本装置で用いたアクチュエータは、3D プリンタで造形した外殻にコイルを巻き、内部に筒型のネオジウム磁石を入れて作成した。アクチュエータの両端には、エラストマー製の膜を接着させた。これにより、コイルに電流を流すことで、フレミングの左手の法則に基づき磁束と電流の作用により推力が発生し、内部の磁石が往復運動する。

アクチュエータの駆動は、安定化電源と MOSFET を用いたスイッチング回路によって行った。図 2 にその波形制御システムの概要を示す。安定化電源から供給される電圧を、Alpha & Omega Semiconductors 社の MOSFET (D4184) を介してアクチュエータに印加することで、アクチュエー

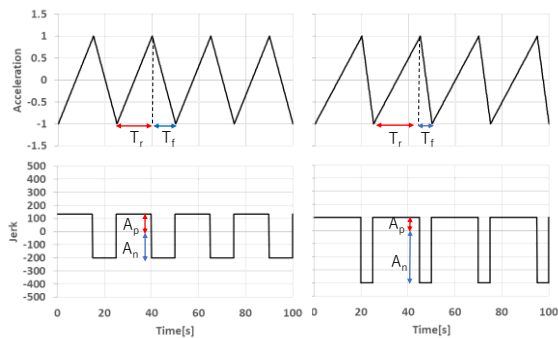


図4 上昇時間  $T_r$  と下降時間  $T_f$  が異なる波形  
(上) 加速度のこぎり波形,  
(下) 対応するジャーク波形

タを振動させた。MOSFET の ON/OFF 制御には、Arduino Uno から出力される PWM 信号を用いた。アクチュエータへの入力には、コンピュータ上で生成した目標とする加速度波形を、PWM 信号に変換したものを用いた。この PWM 信号は、デューティ比を変化させることで、アクチュエータに疑似的なアナログ電圧として印加される。生成したアナログ波形および MOSFET から出力されたアクチュエータの入力波形の例を図 3 に示す。本研究では、この疑似アナログ入力によりアクチュエータを振動させた。

### 3.2 波形制御手法

本研究では仮想力覚の知覚強度向上を目的に、非対称振動において、ジャーク波形における正の振幅と負の振幅の非対称性を操作した加速度波形を提案する。目標とする加速度波形は、図 4 のように 1 周期  $T$  内で緩やかに上昇する部分( $T_r$ )と急峻に下降する部分( $T_f$ )で構成されるのこぎり波形とした。加速度のこぎり波形を時間微分することで得られるジャークは、矩形波となる。図 4 の左図と右図に示すように、のこぎり波形の上昇時間  $T_r$  と下降時間  $T_f$  の比率を操作することで、結果としてジャークの矩形波における正の振幅  $A_p$  と負の振幅  $A_n$  が操作される。これにより、ジャーク波形における正負の振幅比を系統的に変化させ、知覚される仮想力覚の強度への影響を評価することが可能となる。

本研究で用いるアクチュエータは、その物理特性（共振周波数やゲイン・位相特性）により入力波形と振動波形が変動するため、調整が必要である。初めに、目的とする上昇時間と下降時間の比率が異なる加速度のこぎり波形を作成し、フーリエ解析によってその周波数成分、振幅、および位相を算出する。この際、振幅が大きい順に主要な 5 つの周波数成分を抽出し、その基本波に対する相対的な振幅と位相差を算出する。これらを合成することで目標波形を再現する。これをアクチュエータへの初期入力信号とした。この合成信号を PWM 信号に変換し、MOSFET を介した回路によってアクチュエータを駆動させ、加速度波形を計測した。加速度波形は、アクチュエータの表面にチェッカーボードを接着し、1000 fps のハイスピード撮影によつ



図5 波形計測の撮影環境

て得られた画像群からマーカの 3 次元位置を検出することで計測した。図 5 は波形計測の撮影環境である。装置は発泡ゴム製の土台に両面テープで固定して撮影を行った。計測された出力加速度波形をフーリエ解析し、目標とする各周波数成分における実際の出力振幅と基本波に対する位相を算出する。この計測結果を、目標のこぎり波形が持つ本来の振幅・位相と比較し、ずれの量を把握する。最後に、このずれを基に、入力波形を再調整する。この反復調整により、変動する特性や非線形性が存在する状況においても、目的のジャーク非対称性を持つ加速度のこぎり波形を生成する。

## 4. まとめ・今後の展望

本研究では、仮想力覚の知覚強度向上を目指しジャーク波形の正負振幅の非対称性を操作する手法を提案した。提案手法では、自作アクチュエータの物理特性変動や非線形性を考慮し、目標の加速度波形で振動させるために反復調整を行う。これにより、ジャークの比率がそれぞれ異なるのこぎり波状の加速度波形を安定して生成できる見込みである。

現在の研究段階では、提案手法で述べた波形制御手法に基づき、異なる上昇時間：下降時間の比率 (6:4, 7:3, 8:2, 9:1) を持つ、のこぎり加速度波形の生成に着手している。今後は、これらの波形を用いて、仮想力覚の知覚強度を調べる心理物理学の実験を実施する予定である。現段階では、各波形における仮想力覚の知覚強度をマグニチュード推定法によって評価する予定である。

これまで、仮想力覚に関して様々な入力波形が提案されてきたが、ジャークの非対称性に着目した知見は限定的である。そのため、本研究の結果を先行研究と比較し、ジャークの制御が知覚強度の向上にどれほど寄与するかを考察する予定である。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 (22K12115) の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Y. Hirata and M. Sato, "3-dimensional interface device for virtual work space," in IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.889-896 (1992)
- [2] T. H. Massie and J. K. Salisbury, "The PHANTOM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects," in Proc. 3rd Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.295-300 (1994)
- [3] K. Arezoo et al., "A Novel Ungrounded Haptic Device for Generation and Orientation of Force and Torque Feedbacks," in IEEE Transactions on Haptics, vol. 18, no. 1, pp. 151-163 (2025)
- [4] J. M. Walker et al., "Haptic orientation guidance using two parallel double-gimbal control moment gyroscopes," in *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 11, no. 2, pp. 267-278 (2018)
- [5] T. Amemiya et al., "PhantomDRAWN: direction guidance using rapid and asymmetric acceleration weighted by nonlinearity of perception," in Proc. of the 2005 international conf. on Augmented teleexistence, pp.201-208 (2005)
- [6] 牛山奎悟ほか, "指の基節への電気刺激による力覚提示手法の検討," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.27, no.3, pp.163-166 (2022)
- [7] 田辺健ほか, "非対称振動刺激による牽引力錯覚の研究動向," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.25, no.4, pp.291-301 (2020)
- [8] 雨宮智浩ほか, "知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価" TVRSJ, vol.11, no.1, pp.47-57 (2006)
- [9] 真鍋光希ほか, "反発する磁石の漏れ磁束を利用したウェアラブル触覚提示素子," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.28, no.4, pp.361-370 (2023)
- [10] T. Tanabe et al., "Evaluation of the Perceptual Characteristics of a Force Induced by Asymmetric Vibrations," in Trans. Haptics, vol.11, no.2, pp.220-231 (2018)
- [11] J. Rekimoto, "Traxion: A Tactile Interaction Device with Virtual Force Sensation," UIST'13, pp.427-431(2013)
- [12] 嘉指裕介ほか, "振動合成による仮想力覚提示装置の多方向化," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.24, no.4, pp.401-411(2019)
- [13] T. Tanabe et al., "Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations," in Trans. on Mechatronics, vol.26, no.1, pp.203-213(2021)