



非対称振動の周波数成分間の位相差に基づく牽引力錯覚の特性

Perceptual Characteristics of Pulling Illusion Based on the Phase Difference of the Frequency Components of Asymmetric Vibrations

田辺健¹⁾, 矢野博明²⁾, 遠藤博史¹⁾, 井野秀一¹⁾, 岩田洋夫²⁾

Takeshi TANABE, Hiroaki YANO, Hiroshi ENDO, Shuichi INO, Hiroo IWATA

1) 産業技術総合研究所 人間情報研究部門 (〒305-8566, 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 6

{ t-tanabe, hiroshi-endou, s-ino }@aist.go.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, yano@iit.tsukuba.ac.jp, iwata@kz.tsukuba.ac.jp)

概要: 人は非対称振動を指先に提示された時, 振動を牽引力として錯覚する (牽引力錯覚). 本研究では非対称振動波形の設計指針の確立を目指し, 非対称振動の周波数成分間の位相差に対応した知覚特性を評価した. 心理物理実験の結果, 基本波と第二次高調波の位相差が 0 deg または -180 deg の時に錯覚が起きる確率が高くなることが確認された. また, 加速度の変化率の極性ごとの差が錯覚に寄与する要因であることが示唆された.

キーワード: Illusory force sensation, asymmetric vibration, non-grounded haptic interface.

1. はじめに

人は強い刺激には敏感に反応するが弱い刺激は知覚しづらい傾向を持つ. そのため, 急激に変化する加速度と緩やかに変化する加速度が交互に繰り返される非対称振動を指腹部に提示されたとき, 人は緩やかに変化する加速度を不鮮明に知覚することで振動を一方に牽引されるような力として錯覚する (牽引力錯覚)[1]. 一般的に連続的な力を生成するには作用・反作用の法則に従い, 装置を地面などの外部環境に固定させる必要があるが, 本錯覚は片手で把持できる程度の小型の装置を振動させるだけで牽引力を提示できる特徴を持つ. そのため, 本錯覚はモバイル・ウェアラブル機器の新たな情報提示手法として期待される.

近年では, 小型のボイスコイル型振動子 (以下, 振動子) に対して非対称な電流または電圧信号を入力することで非対称振動を生成する手法が主流になりつつある [3, 2, 4]. しかし, 牽引力錯覚を生起させるための非対称振動波形の具体的な設計指針が明らかにされていない. 従来手法では, 振動子から出力される振動加速度を厳密には制御しておらず, 振動子の特性をブラックボックスとして扱い, 固有の振動子ごとに錯覚が顕著に現れる入力信号を実験的・経験的に選択していた. そのため, 出力される振動波形は固有の振動子の特性に依存し, 非対称振動波形の中でも錯覚生起に寄与する要因を明らかにできていなかった.

この課題に対して我々は, 振動加速度ベースの非対称振動波形の設計指針を明らかにするために, 非対称振動のパラメータに基づく錯覚の評価を行ってきた [5]. 特に, 非対称振動は周期的な信号であるためフーリエ級数で近似できる点と一般的なボイスコイル型振動子は正弦波振動の生成が

容易である点 [6] に着目し, 周波数成分に基づく牽引力錯覚の特性を明らかにしてきた. 周波数成分のパラメータに基づく非対称振動波形の設計方法を明らかにできれば, 単純な正弦波振動の組み合わせによって非対称振動波形を構成することができ, さまざまな振動アクチュエータへの実装が容易となる. これまでの研究において, 基本波と第二次高調波の 2 つの周波数成分で構成された非対称振動波形によって牽引力錯覚が生起することが明らかになった [5]. 一方で, 基本波と第二次高調波の足し合わせはそれぞれの周波数成分の振幅や位相によってプロファイルが大きく変化する. そのため, 次のステップとして基本波と第二次高調波の振幅と位相に基づく錯覚の特性を明らかにする必要がある. 特に周波数成分間の位相差によって波形の非対称性が変化するため (図 1), 錯覚される牽引力に影響を及ぼすであると予想される. そこで, 本研究では非対称振動の周波数成分間の位相差に基づく牽引力錯覚の特性を明らかにする.

2. 方法

2.1 非対称振動波形の基本モデル

本節では非対称振動波形の基本モデルについて議論する. 我々のこれまでの研究で, 非対称振動波形の三次以上の高調波成分を除去しても錯覚が生起し, 基本波また第二次高調波のいずれかが除去されると錯覚が生起しないことを確認した [5]. このことから, 少なくとも錯覚を生起させるためには基本波と第二次高調波で構成された非対称振動が必要であると言える. この知見に基づく非対称振動波形の

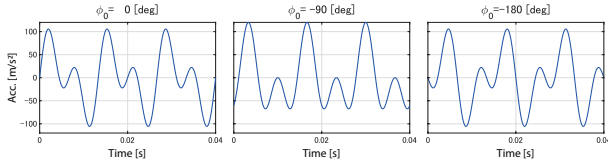


図 1: 周波数成分間の位相差 ϕ_0 を変化したときの非対称振動波形

基本モデルは

$$\ddot{x}_{ref} = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) \quad (1)$$

で表すことができる。ここでの ω は角周波数を表し、基本波の周波数 f との関係は $\omega = 2\pi f$ である。式 (1) を三角関数の合成公式を用いると、

$$\ddot{x}_{ref} = A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) \quad (2)$$

となり、ここでの $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $\phi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n}$ である。非対称振動を複数の周期提示することで牽引力錯覚が生起するため [4]、初期位相の値よりも基本波と第二次高調波の相対的な位相差が重要である。基本波と第二次高調波の位相差 $\phi_0 = \phi_2 - \phi_1$ であり、基本波の位相を基準 ($\phi_1 = 0$) とすれば式 (2) は

$$\ddot{x}_{ref} = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_0) \quad (3)$$

となる。式 (3) は牽引力錯覚を生起させるための非対称振動波形の暫定的なモデルである。非対称振動波形の設計指針を明らかにするには、式 (3) におけるそれぞれの係数である振動加速度の振幅 A_1, A_2 と位相差 ϕ_0 に対応した牽引力錯覚の知覚特性を明らかにする必要がある。

まず、振動加速度の振幅 A_1, A_2 について検討する。式 (3) は周波数が異なる 2 つの正弦波で構成されており、これは対称振動の足し合わせで非対称振動を構成していることを意味する。そのため、基本波または第二次高調波のいずれかの振幅が増大または減少した場合、振幅が大きい方の周波数の正弦波振動に近づくと考えられる。よって、非対称振動を構成するには A_1 と A_2 の値は同程度または差が小さいことが望ましい。次に位相差 ϕ_0 について検討する。図 1 に位相差 ϕ_0 を変化した際の非対称振動波形を示す。位相差が変化することで波形の形状が変化することが確認された。波形の形状が変化すれば錯覚される牽引力に影響を与えると予想され、振幅 A_1, A_2 よりも位相差 ϕ_0 の方が重要なパラメータになると考えられる。そこで、周波数成分間の位相差に対応した牽引力錯覚の特性を心理物理実験によって明らかにする。

2.2 刺激

図 1 に示す通り、位相差 ϕ_0 を変化させていくことで非対称振動波形の形状が変化する。また、式 (3) は周期信号の足し合わせであるため、位相差 ϕ_0 を $-180 \sim 180$ deg の範囲で変化させることで波形の形状が 1 周して元の形状となる。さらに、 $-180 \sim 0$ deg と $0 \sim 180$ deg は非対称振動波形の符

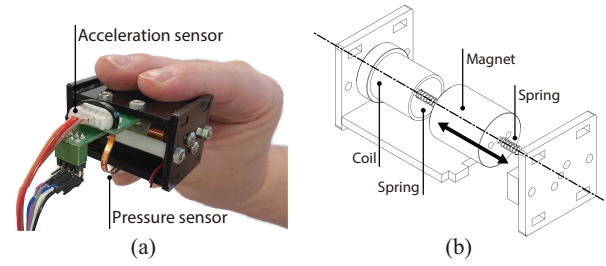


図 2: 開発した非対称振動提示装置 (51(w) × 32(d) × 32(h) mm, 78.5 g): (a) 外観 (b) 構成図

号が異なるだけで波形の形状は同等になる。符号が変われば錯覚される牽引力の方向が変化するだけで、波形の形状は同じであることから錯覚の生起確率は変化しないと考えられる。よって、周波数成分間の位相差と錯覚の関係において、評価すべき最低限の範囲としては $-180 \sim 0$ deg または $0 \sim 180$ deg であり、本実験では位相差 ϕ_0 を $-180 \sim 0$ deg に変化させた。

位相差の分解能は著者らの予備実験で得られた結果に基づき 15 deg とした。よって、位相差 ϕ_0 の条件としては、0, -15, -30, -45, -60, -75, -90, -105, -120, -135, -150, -165, -180 deg の計 13 水準が使用された。式 (3) のその他のパラメータとして、基本波の周波数 f は少なくとも錯覚生起が報告されている 75 Hz (第二次高調波は 150 Hz) とした [4]。振動加速度の振幅である A_1 と A_2 は予備実験で錯覚生起が確認された強度である 60 m/s^2 とした。

2.3 実験装置と非対称振動制御方法

非対称振動刺激を提示するために、非対称振動提示装置を開発した (図 2)。本装置は一般的なボイスコイル型振動子と同様にボイスコイルモータ (Moticont Inc., GVCN-019-022-02) とバネ (SAMINI Co., Ltd., 12-0325) で構成されている。本装置の共振周波数を 18.32 Hz に設定することで本実験で使用する 75 Hz と 150 Hz でフラットな周波数応答になるようにした。これにより、装置の機械的影響を小さくした環境で牽引力錯覚の評価ができる。本装置を制御するための信号は Matlab R2018a(Math Works Inc.) によって生成し、USB オーディオアダプタから出力し、パワーアンプ IC(Texas Instruments Inc., LM3886) を介してボイスコイルモータに入力した。本装置から生成される振動加速度を計測するために加速度センサ (Analog Devices Inc., EVAL-ADXL001-70Z) とデータ・アキュイジション (National Instruments Co., USB-6003) を使用し、サンプリング周波数は 20 kHz とした。計測された加速度の時系列データはオフラインで三次バターワースローパスフィルタ (カットオフ周波数: 5 kHz) によって平滑化された。牽引力錯覚は振動子を把持することで生起するため [4]、本装置は拇指・示指・中指でつまむように把持する方法を採用した。また、本装置を把持した際の把持力を計測するために力センサ (SingleTact Inc., S8-10N) を装置と拇指の間に取り付けた。

次に非対称振動の制御手法について説明する。図 2(a) のように装置を把持したとき、把持力が一定であれば装置と

指を線形システムとして扱うことができる [6]。ここで装置と指を含めた系の伝達関数を $G_h(s)$ とする。本実験で使用する非対称振動刺激は 75 Hz と 150 Hz で構成されているため、 $G_h(s)$ におけるこれらの周波数の応答が明らかになっていれば入力すべき電流信号を求めることができる。よって、それぞれの周波数の正弦波の電流信号を入力した際に出力される振動加速度との利得と位相を計測し、式 (3) をこれらのパラメータで補正した式 (4) で電流信号 i_{ref} を求めた。

$$i_{ref} = \frac{A_1}{|G_h(j\omega)|} \sin(\omega t - \angle G_h(j\omega)) + \frac{A_2}{|G_h(j2\omega)|} \sin(2\omega t - \angle G_h(j2\omega) + \phi_0) \quad (4)$$

本実験ではこれらのパラメータを実験のはじめに各実験参加者ごとに計測し、式 (4) に基づき電流信号を生成した。

2.4 実験参加者

22-27 歳の健康な成人男女 10 名 (女性 1 名) が本実験に参加し、全員が右利きだった。実験参加者がこれまでに体験したハプティックインタフェースとして、全員が携帯端末やゲーム機のバイブレーション機能を体験したことを報告し、さらにそのうち 9 名が研究開発段階のプロトタイプのことを体験したことを報告した。本実験は筑波大学システム情報系研究倫理委員会の承認 (審査承認番号: 2018R213) を受け、実験参加者から実験の参加への同意を得た。

2.5 手続き

実験参加者に着席させ、非対称振動提示装置を利き手で把持させた。2.3 節で説明した非対称振動の制御手法は把持力が一定であることで成り立つ。そこで、実験中の把持力を統制するために、実験参加者に把持力の調整をさせた。実験参加者にあらかじめ本装置を拇指・示指・中指で落とさない程度に軽く把持させ、ベースラインとなる把持力を拇指の位置に取り付けられた力センサを用いて計測した。ベースラインの把持力は前述の状態で 5 s 間把持させ、その時の平均値とした。実験中は実験参加者の前方に液晶ディスプレイを配置し、ベースラインと現在の把持力を表示し、現在の把持力がベースラインと同等になるように調整させた。

次に非対称振動制御用の電流信号を生成するために 75 Hz と 150 Hz における利得と位相を計測した。計測の際は、実験参加者には前述した把持方法で装置を把持させ、75 Hz と 150 Hz の正弦波の電流信号を 1 s 間入力し、そのときの振動加速度を加速度センサによって計測した。各周波数ごとに 5 回の利得と位相の計測を行い、5 回分の平均値をその周波数における利得と位相の値とした。計測された利得と位相を用いて式 (4) によって電流信号を生成した。

把持力の計測と電流信号を生成した後に心理物理実験を開始した。本実験で設定した位相差の 13 水準のうちランダムに選んだ 1 つの刺激を実験参加者に提示し、実験参加者には牽引されたと感じた方向を「右方向」または「左方向」の強制二択で回答させた。各位相差ごとに「右方向」と回答した確率を求めることで位相差と錯覚の関係を明らかにした。非対称振動の刺激時間は 1 s とし、回答後 2 s のイン

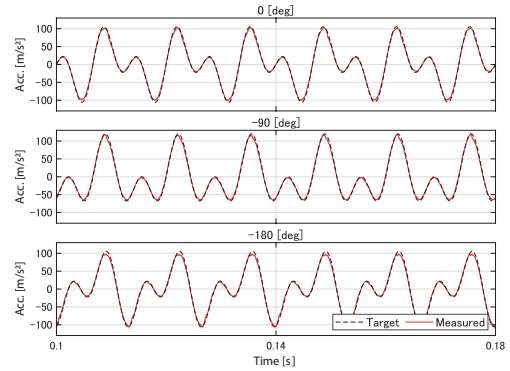


図 3: 非対称振動刺激の典型例

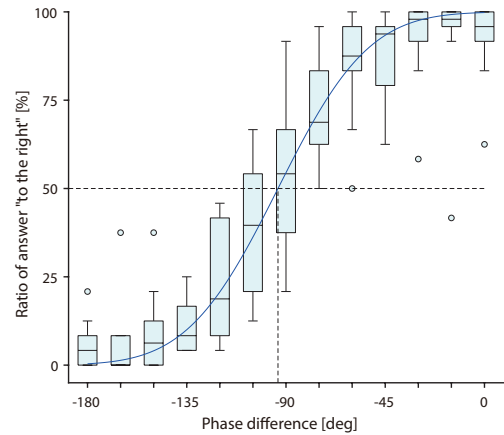


図 4: 位相差ごとの「右方向」と回答した確率

ターバルを設けて次の刺激を提示した。位相差の各水準につき 24 試行を行ったため、一人当たり合計 312 試行であった。なお、実験中の疲労や刺激への順応を考慮し、全試行を 52 試行 × 6 セットに分割し、セット間では楽な姿勢で 2 分間の休憩を設けた。方向の回答は非利き手で把持させたゲームパッド (ELECOM Co., Ltd., JC-U3808TWH) の十字キーを使用し、聴覚からの情報を遮断するためにホワイトノイズを流したノイズキャンセリングヘッドホン (Sony Corp., WH-1000XM2) を着用させた。

3. 結果

まず、実験参加者に提示された非対称振動刺激の精度について報告する。実験参加者に提示された非対称振動刺激の時系列データを図 3 に示す。目標値 (破線) と計測値 (実線) がおおむね一致することが確認された。計測された時系列データを高速フーリエ変換し、基本波と第二次高調波の位相差を算出した。目標値との平方平均二乗誤差 (RMSE) は 3.69 deg であった。以上の精度の非対称振動刺激が実験参加者に提示された。

図 4 に各位相差ごとの「右方向」を回答した確率を示す。本研究ではこれらの確率を錯覚の生起確率として扱った。箱の中央線は全実験参加者の生起確率の中央値を表し、箱の下部と上部は第一四分位数、第三四分位数を表し、ひげは最小値、最大値を表す。ドットは第一四分位数 - 1.5 × IQR (interquartile range) から第三四分位数 + 1.5 × IQR の範囲から外れた生起

確率を表す。錯覚の生起確率とチャンスレベル (50%) を比較するために 1 サンプルの t 検定を行った。その結果, -75 deg 以上がチャンスレベルに比べて有意に右方向の錯覚の生起確率が高く ($p < 0.01$), -120 deg 以下が有意に左方向の錯覚の生起確率が高いことが認められた ($p < 0.01$)。この結果は式 (3) の非対称振動波形の基本モデルによって牽引力錯覚を誘発することができ, また周波数成分間の位相差が変化することで錯覚される牽引力の方向が反転することを意味する。次に方向が反転する閾値を求めるために全実験参加者の錯覚の生起確率の中央値を用いて最小二乗法によって心理測定関数 (累積正規関数) に近似した。その結果, 方向が反転する閾値 (心理測定関数の 50% の点) は -93.63 deg であった。

4. 考察

基本波と第二次高調波の位相差が変化することで錯覚の生起確率が変化し, -93.63 deg を境に方向が反転することが明らかになった。この理由について考察する。非対称振動波形は 1 周期の積分値は 0 になるため, 一定時間の加速度の総和では本錯覚を議論することは難しい。そこで, 非対称振動波形を時間で分割して議論する。加速度が負のピークから正のピークに立上る時間を T_r , 正のピークから負のピークに立下る時間を T_f とする (図 5)。 $\phi_0 < -90$ deg のときは $T_r > T_f$ となり立下り時間の方が短く, $\phi_0 > -90$ deg のときは $T_r < T_f$ となり立上り時間の方が短くなることが確認された。つまり, これらの振動は立上り・立下り時間が異なっている時間方向に対して非対称な振動であることを意味し, 加速度の単位時間当たりの変化率が異なることを示唆する。そこで, 加速度の単位時間当たりの変化率 (i.e., 加加速度) を求めた (図 6)。加速度の変化率の正のピークを A_p , 負のピーク A_n で表す。位相差が 0 deg または -180 deg の時に A_p と A_n の大きさが異なるため, A_p と A_n の差 ($|A_p| - |A_n|$) が重要であると予想し, その差と位相差の関係性を求めた (図 7)。その結果, $|A_p| - |A_n|$ の差が直線的に変化し, A_p と A_n の大小関係が -90 deg を境に反転した。

心理物理実験の結果を踏まえると A_p が大きいときは右方向の錯覚が生起する確率が高く, A_n が大きいときは左方向の錯覚が生起する確率が高い。また, -93.63 deg は生起確率が 50% であったため錯覚が生起しておらず, これは A_p と A_n の差が 0 に近かったためであると考えられる。よって, 牽引力錯覚を生起させるための非対称振動波形の設計指針として, 加速度の変化率の極性ごとの差が重要であり, 式 (3) の基本モデルでそれを実現するには基本波と第二次高調波の位相差を 0 deg また -180 deg にする必要がある。

5. まとめ

本研究では牽引力錯覚を生起させるための非対称振動波形の設計指針を明らかにするために, 基本波と第二次高調波の位相差に着目した特性を明らかにした。今後は, 基本波の周波数と周波数成分間の振幅の差の関係も明らかにする。

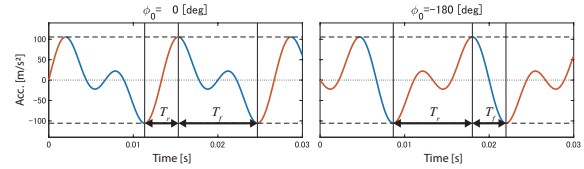


図 5: 加速度の立上り・立下り時間

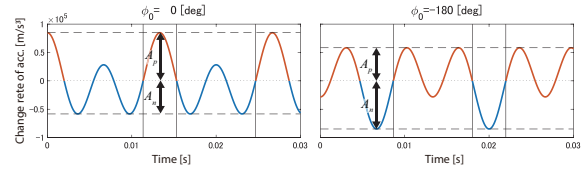


図 6: 加速度の単位時間当たりの変化率

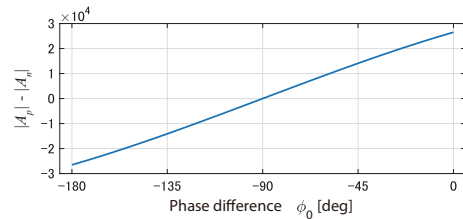


図 7: 位相差と $|A_p| - |A_n|$ の関係

謝辞 心理物理実験のデザインについてご助言いただいた筑波大学人間系 綾部早穂教授に感謝の意を示す。本研究は JSPS 科研費 (17J01330) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] T. Amemiya, H. Ando, and T. Maeda, “Lead-Me Interface for a Pulling Sensation from Hand-held Devices,” *ACM Trans. Appl. Perception*, vol.5, no.3, pp.15:1–15:17, 2008.
- [2] T. Amemiya, and H. Gomi, “Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically,” *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, LNCS, vol. 8619, pp.88–95, 2014.
- [3] H. Culbertson, J. M. Walker, and A. M. Okamura, “Modeling and Design of Asymmetric Vibrations to Induce Ungrounded Pulling Sensation Through Asymmetric Skin Displacement,” In: *Proc. of Haptics Symp. 2016*, pp.27–33, 2016.
- [4] T. Tanabe, H. Yano, and H. Iwata, “Evaluation of the Perceptual Characteristics of a Force Induced by Asymmetric Vibrations,” *IEEE Trans. Haptics*, vol.11, no.2, pp.220–231, 2018.
- [5] 田辺, 矢野, 岩田, “非対称振動の周波数成分に対応した牽引力錯覚の知覚特性,” 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 31A-3, 2018.
- [6] W. McMahan, and K. J. Kuchenbecker, “Dynamic modeling and control of voice-coil actuators for high-fidelity display of haptic vibrations,” In: *Proc. of Haptics Symp. 2014*, pp.115–122, 2014.