This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.



The Perceptual Characteristics of Induced Pulling Illusion Corresponding to the Frequency Spectrum of Asymmetric Vibrations

田辺 健¹⁾, 矢野 博明²⁾, 岩田 洋夫²⁾

1) 筑波大学 大学院システム情報工学研究科 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, t_tanabe@vrlab.esys.tsukuba.ac.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: 往復で振動加速度が異なる非対称振動を指腹部に提示されたとき,人は振動を牽引されるような 力として錯覚する (牽引力錯覚).近年では,ボイスコイル型振動子に非対称な信号を入力することで牽 引力錯覚を誘発できることが示されているが,指腹部に加わる非対称振動の物理量に基づく知覚特性は 不明である.本研究では,非対称振動制御可能な実験装置を開発し,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を評価した.

キーワード: 牽引力錯覚,非対称振動,非接地型力覚提示

1. はじめに

近年,触覚への情報提示において,シンプルなハードウェ ア構成で高度な触覚情報を提示できることから錯覚現象を 用いた手法が積極的に提案されており,その一例として非 対称振動による牽引力錯覚を用いた手法がある [1].人間は 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,強い加速度と弱い加速度が交互に繰 り返される非対称振動を指腹部に提示されたとき,人は弱 い加速度を不鮮明に知覚することで振動を一方向に牽引さ れるような力として錯覚する [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.

近年の牽引力錯覚の誘発手法において,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手法が主流である[2,3,4,5].しかし, これらの手法では非対称振動のパラメータ(振動加速度,振 動周波数,振動の形状など)は厳密には制御されていない. 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に選択して いた.そのため,異なる振動子で同様の効果を出すのは困 難で,再現性が低いことが課題となっていた.再現性の高 い誘発手法を明らかにするには,指腹部に加わる非対称振 動のパラメータと本錯覚の知覚特性の関係を明らかにする 必要がある.本錯覚を誘発するには具体的にどのような振

Takeshi TANABE, Hiroaki YANO, and Hiroo IWATA



図 1: 開発した非対称振動提示装置. (a) 概観. (b) 構成図.

で得られた知見は本錯覚を利用したインタフェースを構成 する際の工学的方法論につながる.我々はこれまでに少な くとも本錯覚が誘発される非対称振動を観測しており、複 数の周波数成分で構成されていたことを確認した [5]. また, 単一の周波数成分で構成される単純な正弦波振動では本錯 覚が生起しないことも確認しており [5],本錯覚を誘発する には複数の周波数成分を持つ振動が重要である可能性が示 唆された.しかし、どの周波数成分が本錯覚に寄与してい るかは明らかにされていない.本錯覚に寄与する周波数成 分を明らかにすることができれば、最低限の正弦波振動の 足し合わせで本錯覚を誘発できる可能性を持つ.一般的に 振動子は線形システムで表すことができ [4,6],正弦波振動 の生成は比較的容易である.そのため,正弦波振動の足し 合わせで本錯覚が誘発できれば、固有の振動子ごとに実験 的に入力信号を選択する従来手法 [2, 3, 4, 5] に比べて実装 が容易で再現性が高くなると考えられる.そこで、本研究 では牽引力錯覚をたインタフェースに応用するための工学 的方法論の確立を目指し,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の関係を心理物理実験を通して 評価した.

実験方法

2.1 実験装置

我々のこれまでの研究において,牽引力錯覚を定量的に 評価するための実験プラットフォームである非対称振動提示 装置を開発した [7](図 1). 本装置はボイスコイルモータ (以 下,VCM)で構成されており,可動子である永久磁石はバネ によって固定されている. コイルに電流信号を入力すること でローレンツ力が発生し、VCMの推力 Fa が変化する. さ らに入力信号に周期信号を用いることで振動を発生させる. 本装置は比較的フラットな周波数応答を持ち, 20-300 Hz の 任意の非対称振動が生成可能であることを確認した [7].本 装置での非対称振動の制御方法については以下の通りであ る.本装置を把持した状態をモデル化し (図 2), コイルヘ の電流 i を入力とし、指腹部の振動加速度 xh を出力とする 伝達関数 G_h を同定する.そして,目標とする非対称振動 の時系列データ \ddot{x}_{ref} をあらかじめ設計し、 G_h の逆システ ムを用いてシミュレーションによって入力電流 i を算出する (図3). その電流信号をコイルに入力することで目標とする 非対称振動を生成する.実験参加者ごとに指のパラメータ (m_h, b_h, k_h)を同定することで実験参加者間で刺激を統制 することが可能である.なお,詳細は文献 [5] を参照のこと.

本装置を制御するための信号は Matlab R2018a(Math Works inc.) によって生成され, PC から USB オーディオア ダプタを介して出力し, パワーアンプ IC(Texas Instruments inc., LM3886) で増幅後, VCM(Moticont inc., GVCM-019-022-02) に入力された.本装置が発生する振動加速度を 計測するために加速度センサ (Analog Devices inc., EVAL-ADXL001-70Z) とデータ・アクイジション (Measurement Computing inc., USB-1608FS) を使用した.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 (Single-Tact inc., S8-10N) を取り付けた.

2.2 非対称振動刺激

我々のこれまでの研究 [5] で観測された非対称振動は図 4 の通りである.本実験ではこの非対称振動をリファレンス データとして用いる.リファレンスデータを扱いやすくす



図 2: 非対称振動提示装置の力学モデル. (a) 概念図. (b) 等価モデル.



図 3: 非対称振動の制御手法のブロック図.

るため3次のフーリエ級数展開を用いて関数近似した.

$$\ddot{x}_{ref} = \sum_{n=1}^{3} k_n (a_n \cos(2\pi n f t) + b_n \sin(2\pi n f t))$$
(1)

関数近似した際のフーリエ級数は $a_{1,2,3}=0.30$, 0.06, 0.04, $b_{1,2,3}=0.35$, 0.47, 0.10 であり, リファレンスデータの計 測値と近似式の適合度を表す決定係数は $R^2 = 0.956$ であっ た. f は振動周波数を表し, k_n は各周波数成分にかかる任 意のゲインである.なお,本近似式では振動加速度のピー クの値が 1 m/s² になるように正規化した.

本実験ではどの周波数成分が錯覚に寄与するかを明らかに するために,各周波数成分のゲイン k_n を変化させた際の錯覚 への影響を調査した.ゲインの条件としてはオリジナルの非対 称振動の条件 ($k_{1,2,3}$ =1,1,1,以下,original 条件)に加えてそ こから基本波を取り除いた条件 ($k_{1,2,3}$ =0,1,1,以下,w/o-1st 条件),第二次高調波を取り除いた条件 ($k_{1,2,3}$ =1,0,1,以下, w/o-2nd 条件),第三次高調波を取り除いた条件 ($k_{1,2,3}$ =1,0,1,以下, w/o-2nd 条件),第三次高調波を取り除いた条件 ($k_{1,2,3}$ =1,1,0, 以下,w/o-3rd 条件)の計4水準を用意した(図 5).なお, ゲインの各水準間で強度を統制するために振動加速度のピー クの値を 80 m/s² とした.また振動周波数 f はこれまでの 研究で観測された75 Hz に加えて,Amemiya et al.[3] と Culbertson et al.[4] が報告した 40 Hz とした.

2.3 手続き

健康で右利きの成人男性 8 名 (21 から 26 歳,平均 23.1 歳)が本実験に参加した.実験参加者がこれまでに体験した 触覚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 ののうち 6 名が研究開発段階のプロトタイプのものを体験 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.

図6に実験環境の外観を示す.実験参加者は着席し,非対称振動提示装置を利き手で把持させた.図2のモデルは把持力が一定で線形システムであると仮定することで成り立つため[4,6],実験中に実験参加者の把持力が一定になるように調整させた.実験参加者にあらかじめ本装置をFig.1(b)のように拇指・示指・中指・薬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5s間把持させ,その時の平均値とし



図 4: 非対称振動のリファレンスデータ [5]. (a) リファレ ンスデータ (破線) と近似式 (実線). (b) リファレンスデー タの周波数スペクトル.



図 5: 実験で使用した非対称振動刺激の時系列データ と周波数スペクトルの一例 (*f*=75). (a) w/o-1st 条 件 (*k*_{1,2,3}=0,1,1). (b) w/o-2nd 条件 (*k*_{1,2,3}=1,0,1). (c) w/o-3rd 条件 (*k*_{1,2,3}=1,1,0). (d) original 条件 (*k*_{1,2,3}=1,1,1).

た.実験中に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.

心理物理実験を行う前に実験参加者ごとに指のパラメー タ (m_h , b_h , k_h)を同定し、本実験で使用する非対称振動 に対応した入力電流を生成した。指のパラメータは Matlab R2018a(Math Works inc.)のパラメータ推定機能を用いて 実測データから最小二乗法によって同定した。3 s 間に 10-1000 Hz に変化する正弦波スイープ信号を実験参加者が装 置を把持した状態で本装置に入力し、その時の振動加速度 \dot{x}_h を実測データとして用いた。3 s 間の計測を5 回行い、合 計 15 s 間の実測データを用いてパラメータを同定した。な お、推定の際の各パラメータの初期値として、McMahan et al. のモデル [6] を参照し、 m_h =0.029 kg、 b_h =8.0 Ns/m, k_h =509 N/m とした。パラメータ同定後、図 3 の流れで入 力電流を生成した。

2.2 節の非対称振動刺激からランダムに選んだ1つの刺 激を実験参加者に提示し,実験参加者は牽引されたと感じ



図 6:実験環境の外観.

た方向を「右方向」または「左方向」の強制二択で回答さ せた.非対称振動の刺激時間は1 sec とし,回答後2 sec の インターバルを設けて次の刺激を提示した.各条件(周波数 2 条件,ゲイン4 条件)20回ずつを左右二方向で行い,一人 当たり合計 320試行行わせた.なお,実験中の疲労や刺激 への順応を考慮し,全試行を 40試行×8ブロックに分割 し,ブロック間では楽な姿勢で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 ンセリングヘッドフォン(Sony Corp.,WH-1000XM2)を 着用させた.

3. 実験結果

図7に実験参加者に提示された非対称振動刺激の振動加 速度の典型例を示す.実線は各刺激ごとの計測値の平均,包 絡線は標準偏差を表し,破線は目標値を表す.各実験参加者 ごとに提示された非対称振動刺激の計測値と目標値がどの 程度一致するかを検証するために決定係数を求めた(表1). その結果,40 Hz のw/o-2nd 条件では決定係数が全体的に 低いことが確認されたが,他の条件では計測値と目標値が 概ね一致することが確認された.この結果は概ね狙い通り の刺激を実験参加者に提示できたことを示唆する.

図8に各非対称振動刺激において実験参加者が知覚した牽 引力の方向の正答率を示す. 箱の中央線は全実験参加者の正 答率の中央値を表し,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. なおここでの 正答率は先行研究 [5] を参考に本来のリファレンスの非対称振 動を提示した際の牽引される力の方向を正解とした.周波数, ゲインを要因とする反復測定の two-way ANOVA(analysis of variance) を行った. その結果,周波数の主効果 $[F_{(1,7)} =$ 4.21, *p* = 0.08, η²_p = 0.38] において有意差が認めれなかった が、ゲインの主効果 $[F_{(3,21)} = 3.69, p = < 0.05, \eta_p^2 = 0.36]$ と交互作用 $[F_{(3,21)} = 3.71, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.35]$ で有意差 が認められた.この結果より、非対称振動の各周波数成分 を取り除くことで錯覚される牽引力の方向の正答率が有意 に変化することが示された. 交互作用で有意差が認められ たため、下位検定として各水準ごとに Bonferroni 補正によ る単純主効果の検定を行った. その結果, 40 Hz の w/o-1st 条件と w/o-3rd 条件で有意差が認められた (p < 0.05).

4. 考察

w/o-1st 条件と w/o-2nd 条件では 40 Hz と 75 Hz の両 周波数において,正答率がチャンスレベルの 50 %付近に集 まった.この結果は,前述の条件では本錯覚が生起しなかっ たことを意味する.また,40 Hz においては,w/o-1st 条件 とw/o-3rd 条件で有意差が認められたことから,第三次高 調波は本錯覚に寄与せず,基本波と第二次高調波が本錯覚 に寄与すると考えられる.以上の結果より,本錯覚を誘発 するための非対称振動は基本波と第二次高調波の二つの周



図 7:実験参加者に提示された非対称振動刺激の典型例 (実 線:各刺激の計測値の平均,包絡線:各刺激の計測値の標準 偏差,破線:目標値). (a) w/o-1st 条件. (b) w/o-2nd 条件. (c) w/o-3rd 条件. (d) original 条件.

表 1: 各非対称振動刺激ごとの目標値-計測値間の決定係数

	w/o-1st		w/o-2nd		w/o-3rd		original	
	40 Hz	$75 \mathrm{~Hz}$	40 Hz	$75~\mathrm{Hz}$	40 Hz	$75~\mathrm{Hz}$	40 Hz	$75 \mathrm{Hz}$
P1	0.96	0.96	0.78	0.93	0.89	0.88	0.93	0.93
P2	0.96	0.93	0.58	0.86	0.83	0.79	0.91	0.92
P3	0.97	0.95	0.88	0.95	0.90	0.90	0.94	0.95
$\mathbf{P4}$	0.91	0.97	0.21	0.91	0.83	0.83	0.91	0.91
P5	0.94	0.95	0.88	0.94	0.86	0.86	0.93	0.95
P6	0.98	0.94	0.80	0.93	0.92	0.91	0.92	0.93
P7	0.92	0.95	0.57	0.96	0.85	0.85	0.95	0.95
$\mathbf{P8}$	0.96	0.98	0.93	0.96	0.91	0.91	0.95	0.95

波数成分で構成されている可能性が示唆された.この知見 は、本錯覚を利用したインタフェースを開発する際のアク チュエータの設計指針につながると期待される.

一方で,全体的に正答率が低く,特に 75 Hz では全ての ゲイン条件で全参加者の正答率の中央値がチャンスレベル 付近であった.本実験で使用した非対称振動のリファレン スデータの周波数は 75 Hz であったが開発した非対称振動 提示装置でそれを再現したところ, 錯覚が明瞭的に生起し なかったことが確認された.この原因として,装置の重量 とバランスが関係していると考えられる. 我々のこれまで の研究 [5] で使用した振動子は 35 g であったのに対しては 本装置は 87.6 g だった. そのため,装置の重量がオフセッ トとしてかかったことで錯覚の明瞭度が低下したと考えら れる.装置の重量をカウンタウェイトなどを用いてキャン セルするなどの実験環境の見直しが求められる. また本装 置は使用した VCM の形状の都合上,片側にコイルが取り 付けられた構造となっており、重心のずれを牽引力として 誤認識した可能性が考えられる.以上の実験設計の見直し を行い,再度知覚特性評価を行う必要がある.



図 8: 各非対称振動刺激に対する正答率 (*: p < 0.05).

5. まとめ

本研究では牽引力錯覚をたインタフェースに応用するた めの工学的方法論の確立を目指し,非対称振動の周波数成 分に対応した牽引力錯覚の知覚の関係を心理物理実験を通 して評価した.先行研究 [5] で観測された非対称振動をフー リエ級数展開し,各周波数成分の有無による錯覚の知覚特 性の変化を調査した.その結果,本錯覚が誘発される非対 称振動は基本波と第二次高調波の二つの周波数成分で構成 されている可能性が示唆された.一方で開発した非対称振 動提示装置では錯覚の明瞭度が低く,実験設計の見直しが 必要となった.

謝辞 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

- 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, art. 15, pp.1–17, 2008.
- [2] J.Rekimoto, "Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation," in Proc. of ACM Symp. on User Interface Softw. and Technol., pp.427–431, 2013.
- [3] T.Amemiya, and H.Gomi, "Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically," in *Proc. of Eurohaptics 2014*, pp.88–95, 2014.
- [4] 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.
- [5] T.Tanabe, H.Yano, and H.Iwata, "Evaluation of the Perceptual Characteristics of a Force Induced by Asymmetric Vibrations," *IEEE Trans. Haptics*, pp.220–231, 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.
- [7] T.Tanabe, H.Yano, and H.Iwata, "A Control Method of Asymmetric Vibrations for a Quantitative Evaluation of Induced Pulling Sensation," in *Proc. of Haptics Symp.* 2018, pp.54–55, 2018.