



到達運動における牽引力錯覚の基礎的検討

Pilot Study of Pulling Illusion during Reaching Movement

田辺 健¹⁾, 近井 学¹⁾, 遠藤 博史¹⁾, 井野 秀一¹⁾

Takeshi TANABE, Manabu CHIKAI, Hiroshi ENDO, and Shuichi INO

1) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒 305-8566 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 6, {t-tanabe, m-chikai, hiroshi-endou, s-ino}@aist.go.jp)

概要: ヒトは非対称な振動を指先に提示された時, 振動を一方方向に牽引される力として錯覚する (牽引力錯覚). これまで牽引力錯覚は皮膚感覚由来の錯覚現象であることが議論されてきたが, 上肢の能動的な運動によって錯覚の感度が高まることも報告されている. つまり, 牽引力錯覚時には感覚系のみならず運動系を含めて情報が処理されていると考えられる. そこで本研究では, 牽引力錯覚が上肢運動に与える影響を明らかにすることを目的とし, 上肢運動の中でも到達運動に着目した予備実験を行った. 予備実験の結果, 牽引力錯覚は運動の軌跡には影響しなかったが主観的な運動の随意性には影響する可能性が示唆された.

キーワード: 牽引力錯覚, 到達運動, ハプティクス

1. はじめに

ヒト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, ヒトは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な振動を指先に提示されたとき, 緩やかに変化する加速度を不鮮明に知覚することで非対称振動を一方方向に牽引されるような力として錯覚する (牽引力錯覚)[1]. 特に牽引力錯覚は小型のボイスコイル型振動子によって誘発できる特徴を持ち, 歩行時の経路誘導 [2, 3] や VR システムの力覚フィードバック [4, 5] に応用されてきた.

しかしながら, 錯覚が生起する機序についての統一的な見解は明らかにされていない. これまで牽引力錯覚は主に皮膚感覚由来の錯覚現象であることが考察されており [6, 7], さらにそれを支持する実験結果も報告されている [8]. 一方で, 皮膚感覚の寄与だけでは牽引力錯覚を説明することはできない. Amemiya et al. は牽引力錯覚中に上肢を能動的に並進・回転方向に運動させることで, 運動なしの状態に比べて牽引力のベクトルの角度弁別の精度が上昇することを報告した [9]. 牽引力錯覚中に能動的な運動を行ったとき, 深部感覚が自身の運動の情報を取得し, さらに運動指令の遠心性コピーが発生する. 両条件とも皮膚感覚への刺激は同じであるため, 深部感覚や遠心性コピーが錯覚に作用した可能性が考えられる. つまり, 牽引力錯覚時には感覚系だけではなく運動系を含めて情報が処理されている可能性がある. よって, 牽引力錯覚と運動の関係を明らかにすることは, 錯覚が生起する機序を解明する手がかりになると考えられる.

現時点では, 上肢運動が錯覚に影響することは明らかに

なっているが, それに対して錯覚が上肢運動の軌跡やその時の運動の感覚に与える影響までは明らかにされていない. 運動に与える影響を明らかにすることで牽引力錯覚による感覚入力的情報を脳がどのようにして処理しているかを明らかにすることができる. そこで本研究では, 牽引力錯覚が上肢運動に与える影響を明らかにすることを目的に錯覚と運動に関する予備実験を行った. 牽引力錯覚は一方方向に直線的に手引きされるような感覚が生起する. また, 上肢運動の中でも目標位置まで手を伸ばす動作である到達運動はほぼ直線的な軌道を描くことが知られており [10], 牽引力錯覚に従うまたは抗うことができる運動であると考えられる. そこで, 本研究では上肢運動の中でも到達運動に着目した.

2. 方法

本実験は, 右上肢による水平方向の 2 点間を往復する到達運動中に外乱である非対称振動を含む振動刺激を提示し, その時の手先の軌跡を計測した. また, 錯覚及び運動に対する主観評定も行い, 生理的・心理的指標の両方から運動への影響を評価した.

2.1 実験参加者

28-57 歳 (平均:47.0 歳) の健康な成人男性 3 名が本実験に参加し, 全員が右利きだった. ヘルシンキ宣言に基づき実施し, 全実験参加者からインフォームドコンセントを得た.

2.2 実験環境

図 1 に実験セットアップを示す. 到達運動は実験参加者に対して前後 1 自由度の方向とし, 手先位置の計測と動作の制限を目的に 1 自由度のステージを使用した. ステージはリニアスライダ (Misumi Inc., SSELBWM16-670) と手

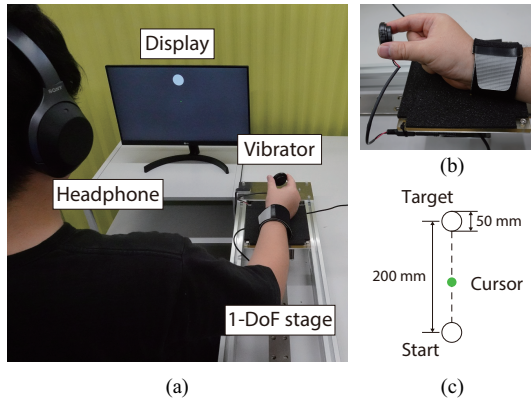


図 1: 実験セットアップ (a) 外観 (b) 振動子の把持方法および手首の固定方法 (c) 到達運動の開始位置と目標位置

先位置を計測するためのワイヤエンコーダ (Microtech Laboratory Inc., MLS-30-450-1000) で構成されており, MATLAB R2019a(Math Works Inc.) によって制御された. エンコーダの分解能は 0.2 mm であった. 手先位置のデータはマイコン (Arduino, Arduino Uno R3) を用いて収集し, 約 120 Hz の更新周波数でシリアル通信によって PC に送られた. 取得した手先位置データはサンプリング周波数を一定 (120 Hz) にするために線形補間され, 三次バタワースローパスフィルタ (カットオフ周波数: 10 Hz) で平滑化された後に時間で微分することで速度に変換された. また, 外乱である振動刺激を生成するためにボイスコイル型振動子 (Acouve Lab Inc., Vibro Transducer Vp210) を使用しており, 振動子を制御するための信号は心理物理実験用ライブラリである Psychtoolbox を用いて生成した. 生成された制御信号は USB オーディオアダプタを介して PC から出力し, パワーアンプ IC (Texas Instruments Inc., LM386) によって増幅した後に振動子に入力した. 手先位置を表すカーソルと到達運動における目標位置を表示するために, 実験参加者の前方にディスプレイ (LG Electronics Inc., 22MK600M) を配置した. 手先位置の描画はビジュアルデザイン用のプログラミング言語である Processing 3.5.4 を使用し, 描画のフレームレートは 60 Hz であった. 手先位置のデータは MATLAB から UDP 通信によって Processing に送られた.

実験参加者は高さ調整が可能な椅子に座り, 右手をステージ上に置き, 手首をバンドで固定した (図 1(b)). 牽引力錯覚は振動子を拇指と示指で把持することで生起するため [11], 実験参加者はステージ上の右手で同様の把持方法によって振動子を把持した (図 1(b)). 本実験装置により, 振動子を把持した状態で 1 自由度の到達運動が実施できるようにした.

2.3 実験条件

外乱である振動刺激を生成するための入力信号を図 2 に示す. まず, 牽引力錯覚が到達運動に及ぼす影響を評価するために到達運動と同じ方向に牽引する pull 条件と逆方向に牽引する push 条件を設定した. 正弦波の一部を反転させた非対称な信号を振動子に入力し, その時に発生した非対称振動を指先に提示することで少なくとも牽引力錯覚が生起するため [11], 本実験ではこの信号を使用した. また, 牽

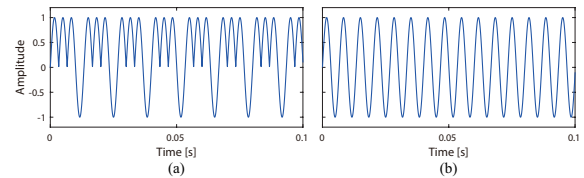


図 2: 振動刺激を生成するための入力信号の例 (a) 非対称振動 (b) 対称振動

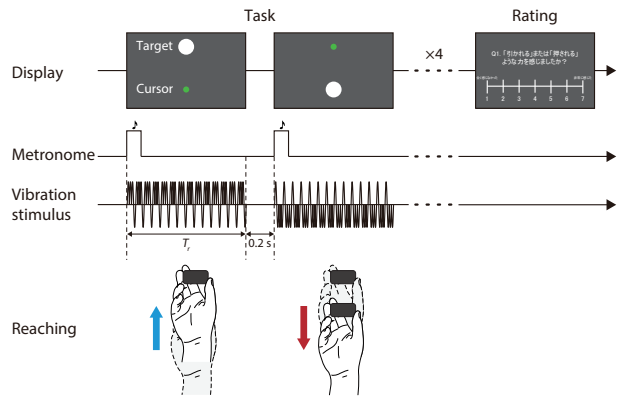


図 3: 到達運動課題の流れ

引力錯覚と単純な振動刺激を比較するために対称振動として正弦波の入力信号を使用した (以下, vib. 条件). よって, 外乱の条件は 3 水準であった. これらの入力信号の基本波は 75 Hz [11] とし, パワーアンプ IC によってピークピーク値を 7.5 V に調整した.

目標位置まで手先を移動させる時間 (以下, 到達時間 T_r) も本実験の要因とした. ヒトの到達運動の制御は, 腕などのダイナミクスを学習した内部モデルに基づいてフィードフォワード的に制御することが知られている [12]. そのため, 素早い到達運動では, 変化させたダイナミクスを再学習させ, 内部モデルを再構成しない限り, 運動に影響を与えることは困難である. 一方で, 牽引力錯覚を感じつつ緩やかに運動した場合, 錯覚による牽引力に手先が誘導されることで手先速度等が変化する可能性が考えられる. そこで, 到達時間を素早い到達運動の条件である 1 s と緩やかな到達運動の条件である 2 s の 2 水準とした. これらの到達時間の周期で繰り返されるメトロノームをヘッドホン (Sony Corp., WH-1000XM2) から出力し, 実験参加者にはメトロノームのリズムに合わせて到達運動を行うように指示した.

2.4 手続き

図 3 に示すように実験参加者は 2 点間をメトロノームに合わせて到達運動を往復で繰り返した. メトロノームに同期して目標位置がディスプレイに表示され, さらに外乱である振動刺激が振動子から出力された. 1 回目のメトロノームのタイミングで手先が前進する方向に目標位置が表示され, 2 回目のメトロノームのタイミングでは手先が後退する方向に目標位置が表示された. メトロノームは 2.3 節で設定した到達時間に 0.2 s のインターバルを加えた周期で変化させた. なお, インターバル中は振動刺激を停止した. 以上の往復の到達運動を 1 試行につき 4 往復行った. 開始位

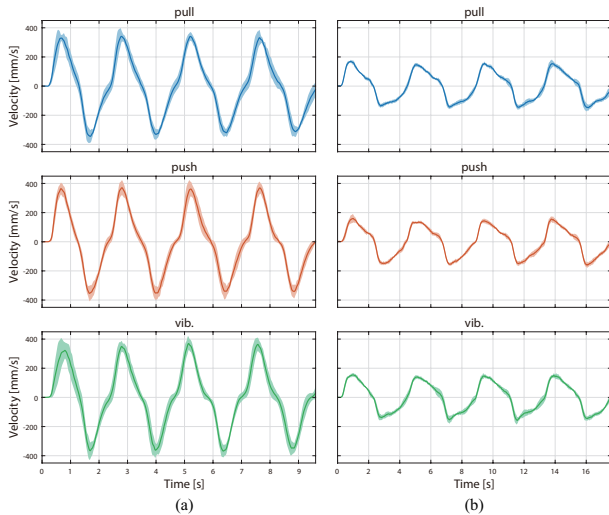


図 4: 手先速度波形の典型例 (a) $T_r = 1$ s (b) $T_r = 2$ s

置から目標位置までの間隔を 200 mm とし、目標位置は直径 50 mm の円領域とした (図 1(c)). これらのパラメータは実験的に決定した。

実験参加者は、所定の回数の到達運動を行った後に錯覚と運動について 7 段階で主観評定することが指示された。錯覚の感度を明らかにするために「引かれるまたは押されるような力を感じましたか? (1:全く感じなかった-7:非常に感じた)」という質問を用いた。本実験では実験参加者が随意的に到達運動をする課題であるが、牽引力錯覚によって腕が牽引される感覚に伴い、他者に手引きをされるような感覚が生起すると予想される。そこで、運動の随意性を評価するために「腕の動きは能動的でしたか? (1:非常に受動的-7:非常に能動的)」という質問を用いた。回答はテンキー (NAKABAYASHI CO., LTD., TNK-SR227) を用いて左手で入力させた。以上を 1 試行とし、各条件 8 試行、合計 48 試行 (外乱条件 3 水準 \times 到達時間 2 水準 \times 8 試行) 実施した。疲労を考慮し、48 試行を 4 ブロックに分割し、ブロック間では 2 分間の休憩を設けた。また、到達時間に関しては、2 ブロックずつ同じ条件で行い、ブロックの前にどちらの条件かを実験参加者に口頭にて伝えた。外乱条件に関しては、外乱への学習を防ぐためにランダムな順番で行った。

3. 結果

図 4 に手先速度波形の典型例を示す。実線は各条件ごとの 8 試行分の加算平均を表し、包絡線は標準偏差を表す。到達運動の普遍的な特徴として、速度波形がベル型の曲線を描くことが知られている [12]。到達時間が 1 s の場合、ベル型に近い速度波形であるが速度のピークに対する立上り・立下りの傾きがわずかながら異なっている。到達時間が 2 s の場合、ピークに対する立上り・立下りの傾きの違いがより顕著に表れた。これは、実験参加者がメトロノームのリズムに合わせて手先速度を調整していたことを示唆する。また、速度のピーク値が到達時間の条件間で異なるため 1 s に比べれば 2 s の方が緩やかな到達運動であったことが示唆さ

表 1: 外乱の条件間の速度波形の相関係数

ID	T_r	pull-push	pull-vib.	push-vib.
P1	1 s	0.996	0.963	0.976
	2 s	0.996	0.992	0.995
P2	1 s	0.995	0.973	0.980
	2 s	0.991	0.995	0.992
P3	1 s	0.979	0.986	0.985
	2 s	0.992	0.983	0.990

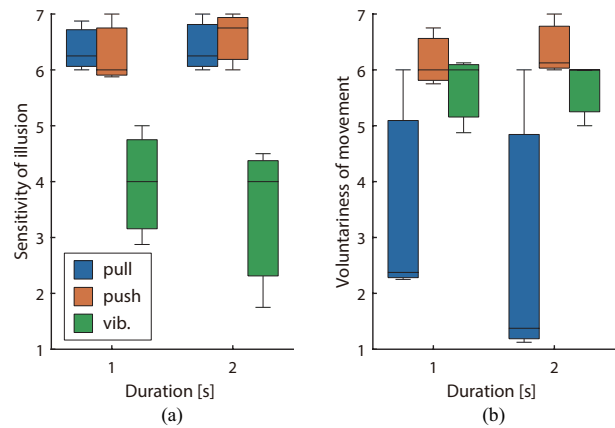


図 5: 主観評定の結果 (a) 錯覚の感度 (b) 運動の随意性

れた。

次に外乱の条件間で速度波形の差異を明らかにするために、実験参加者ごとに外乱の条件間で波形の相関関係を調べた (表 1)。その結果、全条件間で高い正の相関が認められ、到達運動中に牽引力錯覚を誘発しても運動の軌跡には影響がないことが示唆された。

図 5 に主観評定の結果を示す。本実験のサンプルサイズは 3 名であるため、統計解析は行わずに全体の傾向に基づいて議論する。錯覚の感度に関しては、非対称振動の条件である pull 条件と push 条件の主観評定のスコアが高く vib. 条件が低いことが確認された (図 5(a))。これは非対称振動の条件では到達運動中でも錯覚が生起し、対称振動の条件では錯覚が生起しなかったことを意味する。到達時間の条件間では特徴的な傾向は確認されなかった。運動の随意性に関しては、pull 条件が主観評定のスコアが低く、残りの 2 条件が高いことが確認された。随意的に到達運動を繰り返す課題であるにもかかわらず、pull 条件では随意性が低くなる結果となった。一方で、本評定に関しては個人差がある。pull 条件で低いスコアを回答したのは 3 名中 2 名であり、残りの 1 名が他の条件と同程度のスコアであった。運動の随意性に変化があった 2 名の実験参加者では、到達運動時間が長くなることでより低いスコアを回答した。

4. 考察

到達運動中に牽引力錯覚を誘発した場合、牽引力によって手先が誘導されることで運動に影響すると予想したが、運動の軌跡 (速度波形) には影響がないことが確認された。この結果の理由として以下の 2 点が考えられる。1 点目とし

て、非対称振動によって生起する力の感覚は錯覚現象であり、運動に干渉する物理的な外力が加えられていないことが挙げられる。2点目として、錯覚される牽引力の主観的等価点は0.1 N オーダーであるため [11]、運動に干渉するほど強い力ではなかったことが挙げられる。これらの点を明らかにするには、錯覚される牽引力の主観的等価点と同程度の物理的な牽引力を提示した条件との比較が必要である。

個人差はあるが、到達運動の方向に牽引力錯覚を誘発することで、運動の随意性が低くなる傾向が確認された。この結果について考察する。上肢の運動がない状態で牽引力錯覚を誘発した場合、牽引されるような感覚が惹起するが実際には運動が行われていないため上肢の動きを検出する深部感覚との間で矛盾が生じる。しかし、錯覚を誘発し、牽引力の方向に運動することで牽引されるような感覚と深部感覚との間の矛盾がなくなる。また、到達時間が長い方が随意性が低くなる傾向がある。到達時間が長い場合は、動作が緩やかになるため、遠心性コピーによって予測される動作も緩やかになると考えられる。予測した動作よりも強く手先が牽引される感覚が返ってくることで能動的に運動しているにもかかわらず、受動的に運動したと錯覚した可能性がある。現時点ではサンプルサイズが小さく、以上の考察を支持するエビデンスも少ないため、牽引力の強度を変化させた条件、到達運動の速度を変化させた条件や受動・能動運動などの条件を含めて総合的に検証していく必要がある。

運動の随意性に変化が見られなかった実験参加者にインタビューしたところ、自ら動かしているため受動的であるとは感じづらいと回答した。運動の随意性を評価するための尺度について再検討する必要がある、さらに尺度の妥当性を示すために受動運動の条件も含めて実験を設計する必要がある。

5. まとめ

本研究では牽引力錯覚が到達運動に与える影響を明らかにする予備実験を行った。実験の結果、運動の軌跡には影響しなかったが、運動の随意性には影響する可能性が示唆された。今後は、本予備実験の結果に基づき、物理的な牽引力との比較や牽引力の強度を変化させた条件、到達運動の速度を変化させた条件、受動・能動運動などの条件を含めて検証していく必要がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 (19K24374) の助成を受けたものである。

参考文献

[1] T.Amemiya et al., “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] J.P.Choinière et al., “Development and Experimental Validation of a Haptic Compass Based on Asym-

metric Torque Stimuli,” *IEEE Trans. Haptics*, vol.10, no.1, pp.29–39, 2017.

- [3] T.Amemiya et al., “Orienting Kinesthetically: A Haptic Handheld Wayfinder for People with Visual Impairments,” *ACM Trans. Accessible Comput.*, vol.3, no.2, pp.6:1–6:23, 2010.
- [4] 高椋ほか, “VR 魚釣りにおける牽引力錯覚の表現と応用,” *THIS*, vol.18, no.2, pp.87–94, 2011.
- [5] I.Choi et al., “Gravity: A Wearable Haptic Interface for Simulating Weight and Grasping in Virtual Reality,” In: *Proc. of the 30th Annu. Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp.119–130, 2017.
- [6] T.Amemiya et al., “Distinct pseudo-attraction force sensation by a thumb-sized vibrator that oscillates asymmetrically,” *Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Appl.*, pp.88–95, 2014.
- [7] H.Culbertson et al., “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.
- [8] 田辺ほか, “非対称振動の周波数の違いによる牽引力錯覚が生起する閾値への影響,” SI2019 講演会, pp.112–119, 2019.
- [9] T.Amemiya et al., “Active Manual Movement Improves Directional Perception of Illusory Force,” *IEEE Trans. Haptics*, vol.9, no.4, pp.465–473, 2016.
- [10] P.Morasso et al., “Spatial control of arm movements,” *Exp. Brain. Res.*, vol.42, no.2, pp.223–227, 1981.
- [11] T.Tanabe et al., “Evaluation of the Perceptual Characteristics of a Force Induced by Asymmetric Vibrations,” *IEEE Trans. Haptics*, vol.11, no.2, pp.220–231, 2018.
- [12] R.Shadmehr et al., “Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task,” *J. Neurosci.*, vol.14, no.5, pp.3208–3224, 1994.