



# 異なる力覚錯覚の刺激間時間差が知覚強度に与える影響

Effects of inter-stimulus time differences between two different force illusions on perceived intensity

納藤拓哉<sup>1)</sup>, 中村拓人<sup>1)</sup>, 雨宮智浩<sup>2)</sup>

Takuya NOTO, Takuto NAKAMURA, and Tomohiro AMEMIYA

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {noto,n.takuto}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学情報基盤センター (〒 113-0032 東京都文京区弥生 2-11-16, amemiya@vr.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 指先に非対称振動を提示すると牽引力を錯覚する。筋や腱に対称振動を提示するとその腱が伸びる方向の肢の運動を錯覚する。これらの現象を利用した力覚提示は小型・軽量なシステムで実現できる一方で、その力覚強度には限度がある。筆者らは、両錯覚現象の組み合わせとして、指先への非対称振動と手首内側の腱への対称振動を同時に提示することで知覚力覚が増強されることを予備的に確認した。しかし、刺激提示から錯覚生起までの時間が両錯覚で異なることの影響は未調査であった。本研究では、非対称振動と腱振動の提示開始時刻の差が、知覚される力覚の強度に与える影響について報告する。

**キーワード:** Haptics, 牽引力錯覚, 運動錯覚

## 1. はじめに

ヒトの知覚は非線形であるため、急激に変化する加速度と緩やかに変化する加速度が繰り返される非対称な振動加速度パターンを提示されると、振動を一方向に引っ張られる疑似的な力覚として知覚する(牽引力錯覚) [1, 2]。この現象を利用した力覚提示デバイスは振動子で作製できるため、小型、軽量かつ非接地で実現でき、VR やインタフェースの分野で注目を集めている。しかし、提示できる力覚の強度には限界がある。提示する振動の振幅を変化させることで知覚力覚の強さを制御する研究が行われている [3] が、刺激の物理的強度を上げることはしばしば痛みを伴ってしまう。

刺激の物理的な強度を上げるのではなく、異なる錯覚を組み合わせることにより疑似力覚を増強させた研究事例がある。河岸らは画面上のカーソルなどの位置や速度を適切に変化させて抵抗感を提示する Pseudo-haptics [4] と牽引力錯覚を組み合わせることで、より強く力を感じられると報告した [5]。しかし、当該手法では画面上のカーソルを常に見る必要がある、利用できる場面に限界がある。

そこで本研究では、視覚刺激を用いずに生じる運動錯覚に着目し、牽引力錯覚と組み合わせることで多様な力覚表現をつくることを目標とした。運動錯覚とは、深部感覚を知覚する受容器を外部から振動提示によって刺激することで、関節を動かさずに運動感覚を知覚させる錯覚現象である [6]。筆者らは、牽引力錯覚を生起させる刺激と運動錯覚を生起させる手首の腱への刺激を同時に提示することで知覚力覚が増強されることを予備的に確認した。しかし、両錯覚は刺激提示から生起までの時間が異なり、このずれの影響は未調査であった。そこで本研究では、刺激提示から生起するまでの時間が異なる二つの錯覚現象を、刺激開始

時刻をずらして提示した際に、生じる力覚に与える影響について調査した。

## 2. 関連研究

把持したデバイスが非対称に振動することによって、一方向に引っ張られる牽引力錯覚が生起される。クランクスライダ機構を用いた牽引力錯覚を提示する手法 [1] は、鮮明に錯覚を誘発できる一方で装置の小型化に課題があった。市販の振動子に非対称な信号を入力することで牽引力錯覚を提示する手法 [7, 3] は、従来手法よりも大幅にデバイスを小型、軽量化させたが、振動の物理的強度が下がった。

腱や筋に振動を加えることで、刺激された筋が伸展する方向に肢が動く運動錯覚が生起される。刺激開始から錯覚が生起するまでの時間にはばらつきがあり、肢が固定されていない、見えていない環境では数秒程度、肢が見えている、体のどこかに触れている環境では数十秒程度との報告がある [8]。これまで腱に振動提示を行う方法として、接地した振動提示装置に腱を触れさせる手法 [9] やバンドを用いて振動子を腱の位置に固定する手法 [10] がとられた。

河岸らは Pseudo-haptics と牽引力錯覚を組み合わせることで知覚力覚を増強させた [5]。しかし、Pseudo-haptics による力覚知覚にはユーザが移動させるものを凝視する必要があり、力覚提示箇所を必ずしも凝視しないタスクへの応用は困難である。

筆者らはこれまでに、牽引力錯覚を生起させる刺激と手首の運動錯覚を生起させる刺激を同時に提示することで生じる力覚が増強されることを予備的に確認してきた。しかし、両錯覚は生起までの潜時が異なるため刺激の同時提示が強度の増強に必ずしも最適とは限らず、また刺激開始時

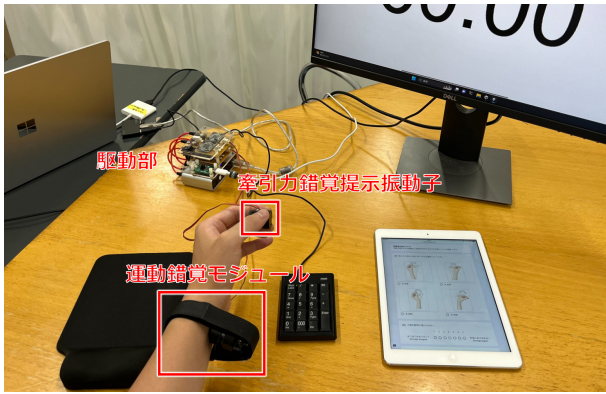


図 1: 実験の様子

刻のずれによって生じる力覚の鮮明度が変化する可能性もある。

本研究では、錯覚生起の潜時が異なる二つの錯覚現象を、刺激開始時刻をずらして提示した際に、知覚力覚の方向や鮮明度、強度が受ける影響を調査した。

### 3. 実験

牽引力錯覚を誘発する刺激と運動錯覚を誘発する刺激の提示開始タイミングのずれが、知覚力覚に与える影響について調査する実験を行った。実験参加者は 22 歳から 27 歳の男性 8 名 (全員右利き) であった。

#### 3.1 実験システム

本実験では図 1 のような実験システムを用意した。牽引力錯覚と運動錯覚を共に提示するために、実験機材は牽引力錯覚提示振動子、運動錯覚モジュール、各モジュールを駆動する駆動部から構成された。牽引力錯覚提示振動子は先行研究 [3] において牽引力錯覚の生起が確認されている周波数範囲を駆動可能な振動子 ACOUSTICAPTIC 639897 を採用した。運動錯覚モジュールは振動子、振動子を格納するケース、バンドから構成された。運動錯覚の先行研究 [10] を参考に、バネを内蔵した振動子ケースを介して振動子を提示部位に装着した。採用した運動錯覚は手首内側の腱 (橈側手根屈筋、長掌筋、尺側手根屈筋の腱) を想定した位置に振動を提示し、手首を背屈させる運動錯覚である。腱の位置を目視で確認しやすいことと運動の方向が牽引力錯覚の方向と類似していることが採用理由である。駆動部は PC、オーディオインタフェース ICUSBAUDIO7D、アンプ PAM8610 から構成された。PC から出力された振動波形はオーディオインタフェース及びアンプを介して、牽引力錯覚提示振動子及び運動錯覚モジュール内の振動子を駆動した。

牽引力錯覚提示振動子に入力する振動波形は先行研究 [3] で牽引力錯覚の生起が確認されている、正弦波の二周期分のうち半周期が反転した非対称振動波形を採用した。周波数と最大加速度振幅は、先行研究 [3, 2] をもとにそれぞれ 65 Hz,  $90 \pm 10 \text{ m/s}^2$  に決定した。加速度振幅の調整は実験参加者にデバイスを装着した状態で、レーザー変位計

(キーエンス LK5000) による加速度計測を実施しながら出力振動強度を指定範囲に調整した。運動錯覚モジュール内の振動子に入力する振動波形は正弦波を採用した。周波数と最大加速度振幅は、先行研究 [8, 9] をもとにそれぞれ 70 Hz,  $90 \pm 10 \text{ m/s}^2$  に決定した。加速度振幅の調整は牽引力錯覚と同様の方法で行った。押し込み力は、先行研究 [10] をもとに 1.5 N から 2.5 N に決定し、振動子ケース内のバネの変位量を目視で観測することで押し込み力の調整を行った。実験中、参加者はテンキーを操作し、左手に振動刺激を体験した。知覚力覚についてのアンケートは iPad (Apple Inc.) を操作し回答した。モニターには試行間の休憩時間を表示した。

#### 3.2 手順

参加者が体験した実験手順は以下の通りであった。まず、実験参加者が椅子に座った状態で実験姿勢の教示や実験の流れの説明を行った。実験姿勢は腕を少し前に出した状態であり、腕の固定は行わなかった。次に、参加者の左腕に各種装置を装着し、聴覚手がかりを減らすためにノイズキャンセリングヘッドフォンを付け、ホワイトノイズを流した。次に、装着された状態の振動子の加速度調整を行った。次に、参加者が振動感覚やアンケートの回答方法に慣れるための練習試行を行ってから、振動提示により生起する力覚についてのアンケートに回答する実験を行った。振動提示中は触覚手がかりと視覚手がかりを減らすために、前腕を机や体に当たらないよう少し浮かせ目を閉じてもらうよう指示した。

#### 3.3 条件

本実験では、指先への非対称振動と手首の腱への対称振動を、開始時刻をずらして提示した。非対称振動提示開始が腱振動提示開始に 4 秒先行、2 秒先行する条件 (-4, -2) と腱振動提示開始が非対称振動提示開始に 2 秒先行、4 秒先行、6 秒先行、8 秒先行する条件 (2, 4, 6, 8) の計 6 つの時間差条件を用意した。なお、非対称振動と腱振動が共に提示される時間は 6 秒に統一した。指先への非対称振動は、牽引力錯覚を左方向 (L) と右方向 (R) に生起させる 2 種類用意した。参加者に提示した振動パターンは、牽引力錯覚の左右条件と先の時間差条件の組み合わせ計 12 種類であった。

#### 3.4 質問紙

参加者が体験する振動刺激は全て、初めは指先非対称振動と腱振動どちらか単体の振動刺激から両方の振動刺激へと変化するものであった。そのため、参加者が回答するアンケートではその変化の前後それぞれで生じる力覚について回答を得た。刺激がどちらか単体の時は、Q1「力覚が鮮明に感じられた」、Q2「左右がはっきり判断できた」、Q3「手首が曲がる感覚がした」という質問に、1 を「全く当てはまらない」、7 を「完全に当てはまる」としてそれぞれ 7 段階の Likert 尺度で回答する項目を用意した。刺激が両方の時は、刺激が単体の時について用意した項目に加えて、Q4「力覚が強くなった」、Q5「振動を感じる領域が広がった」、Q6

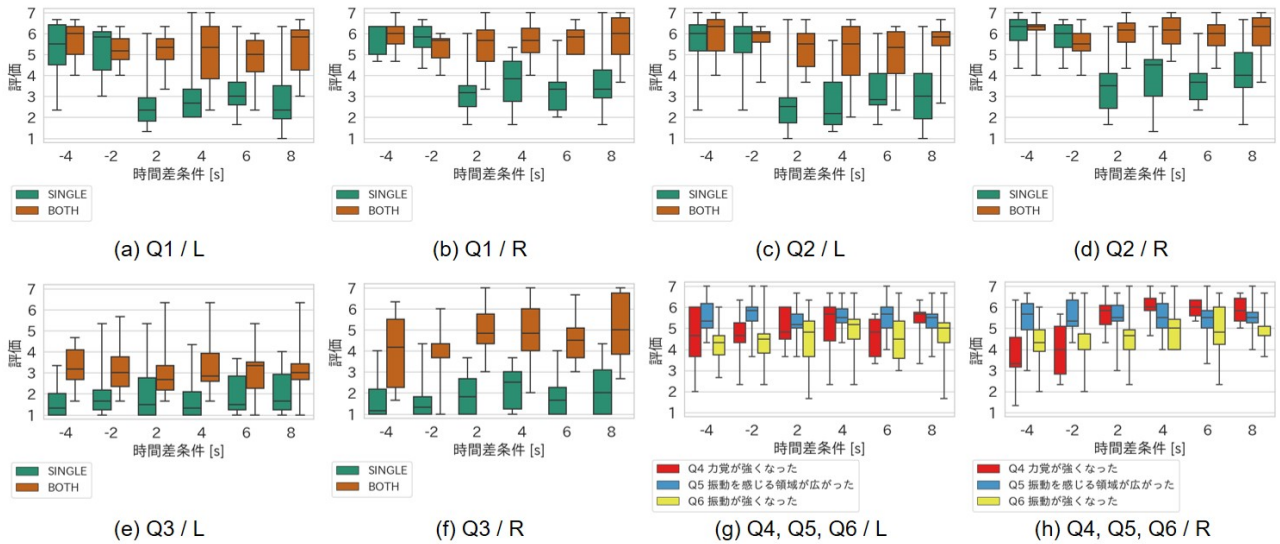


図 2: 各質問項目の回答結果。SINGLE は刺激が単体の時、BOTH は刺激が両方の時を表す。L (左), R (右) は牽引力錯覚の方向を表す。(a)(b) Q1 「力覚が鮮明に感じられた」。(c)(d) Q2 「左右がはっきり判断できた」。(e)(f) Q3 「手首が曲がる感覚がした」。(g)(h) Q4 「力覚が強くなった」、Q5 「振動を感じる領域が広がった」、Q6 「振動が強くなった」

「振動が強くなった」という質問に 7 段階の Likert 尺度で回答する項目を用意した。

1 試行において、参加者はテンキーを操作し同じ振動刺激パターンを 3 回受けた後、アンケートに回答した。実験参加者の疲労や振動に対する残効を考慮し、試行間には最低 1 分間のインターバルを設けた。練習試行では、指先非対称振動が先のパターンと手首腱振動が先のパターンを 1 回ずつ計 2 試行行った。本番では、各振動パターンをそれぞれ 1 回ずつ含む計 12 回の試行をランダムな順に行うものを 1 セットとし、連続で 3 セット (計 36 試行) 行った。

#### 4. 結果

刺激が単体の時と刺激が両方の時の Q1 「力覚が鮮明に感じられた」、Q2 「左右がはっきり判断できた」、Q3 「手首が曲がる感覚がした」の項目の回答結果、及び Q4 「力覚が強くなった」、Q5 「振動を感じる領域が広がった」、Q6 「振動が強くなった」の項目の回答結果を図 2 に示す。参加者は一条件当たり三回アンケートに回答しているため、その平均を代表値とした。

検定は有意水準 0.05 とした。多重性の補正には Bonferroni 法を採用した。Q1, Q2, Q3 の三項目について、各時間差条件において刺激が単体の時に比べ刺激が両方の時のスコアが高いかを検証するため、Wilcoxon の符号順位検定を行った。その結果、有意差は見られなかったものの Q1, Q2 の項目では、指先非対称振動 (牽引力錯覚) が後から提示される時間差条件において大きな効果量が見られ、Q3 の項目ではすべての条件で大きな効果量が見られた (表 1)。

Q4, Q5, Q6 の三項目について、時間差条件ごとに差があるかを検証するため Friedman 検定を行った。その結果、牽引力錯覚右方向条件の Q4 「力覚が強くなった」の項目で有意傾向 ( $p_{adj} = 0.14$ ) が見られた。効果量の確認のため、

表 1: 刺激が単体と両方の時の差をみる検定結果の効果量  $r$

項目	牽引力錯覚	時間差条件 [s]					
		-4	-2	2	4	6	8
Q1	L	0.39	0.03	0.89	0.78	0.64	0.89
	R	0.29	0.30	0.89	0.89	0.89	0.82
Q2	L	0.30	0.11	0.84	0.89	0.69	0.89
	R	0.05	0.36	0.89	0.84	0.84	0.78
Q3	L	0.84	0.79	0.54	0.89	0.70	0.67
	R	0.89	0.84	0.89	0.89	0.89	0.89

表 2: 時間差条件同士の差をみる検定結果の効果量  $r$

時間差条件 [s]	時間差条件 [s]					
	-4	-2	2	4	6	8
-4	-	0.17	0.79	0.78	0.78	0.74
-2	-	-	0.81	0.89	0.84	0.77
2	-	-	-	0.30	0.37	0.42
4	-	-	-	-	0.18	0.30
6	-	-	-	-	-	0.04
8	-	-	-	-	-	-

それぞれの時間差条件の組み合わせで Wilcoxon の符号順位検定を行った。結果、指先非対称振動が先に提示される条件と手首腱振動が先に提示される条件間で大きな効果量が見られた (表 2)。

#### 5. 考察

牽引力錯覚と運動錯覚は刺激提示から錯覚生起までの時間が異なるため、錯覚生起のタイミングが重なるような特定の時間差で提示した際に、他の時間差条件よりも鮮明に力覚を感じる、もしくは強度が上がって感じる予想していた。しかし、本実験の結果について、Q1 「力覚が鮮明に感じら

れた」、Q2「左右をはっきり判断できた」の項目では、特定の時間差条件ではなく、指先非対称振動が先に提示された条件と手首腱振動が先に提示された条件との間で傾向に違いが見られた。非対称振動が先行する場合にはスコアが変わらず、腱振動が先行する場合にはスコアが上がる傾向があることから、牽引力錯覚の方が方向手掛かりとして優位と考えられる。参加者からの力覚の方向についての報告も、非対称振動提示時は牽引力錯覚の方向と一致する傾向が見られ、このことを支持している。

採用した運動錯覚が手首を背屈させる運動であるため、手首が曲がる感覚が生起する可能性を考慮し、Q3「手首が曲がる感覚がした」の項目を用意した。この項目では、どちらの振動刺激が先に関わらず、どちらか単体の振動刺激が提示された時よりも両方の振動刺激が提示された時の方がスコアが高い傾向が見られた。指先非対称振動刺激または手首腱振動刺激単体ではなく、二つが合わさることで回転感が生起されると考えられるため、どちらかの錯覚が打ち消されるわけではなく何らかの寄与率で合成されていると考えられる。

Q4「力覚が強くなった」、Q5「振動を感じる領域が広がった」、Q6「振動が強くなった」の項目では、牽引力錯覚右方向条件のQ4の項目において、非対称振動が先行する条件よりも腱振動が先行する条件の方がスコアが高い傾向が見られた。手首腱振動刺激により、左方向に比較的不鮮明な力覚を知覚した後に、指先非対称振動刺激により、右方向に鮮明な力覚を知覚したことで、対比効果によって力覚が強くなる変化をより感じやすかった可能性がある。

本実験では各刺激の開始時刻をずらして提示した。また、提示した刺激は総振動時間を統一するのではなく、両刺激が共に提示される時間を同一秒数に統一した。これは刺激開始時刻のずれが両刺激提示時の知覚力覚に与える影響を調査するにあたって、両刺激提示の時間が条件間で変わるのを避けるためであった。今後、刺激終了時刻をずらした場合や時間の統制を総振動時間や各刺激の振動時間に対して行った場合についても調査を行うことで、知覚力覚の鮮明度や強度変化に影響する因子のさらなる解明につながると思われる。

## 6. まとめ

本研究では、潜時の異なる牽引力錯覚と手首背屈の運動錯覚を生起させる振動刺激を開始時間をずらして提示することで、そのずれが生じる力覚に与える影響について調査した。力覚の鮮明度については牽引力錯覚が提示された時に高くなる傾向があり、手首が曲がる感覚は牽引力錯覚と運動錯覚の両刺激が共に提示された時に高くなる傾向が見られた。手首背屈方向の運動錯覚の刺激が、それとは逆向きの牽引力錯覚の刺激に先行した場合に、生じる力覚が強くなる変化を感じやすい傾向が見られた。これらの発見は本提案手法で多様な力覚表現を実現する上で重要な貢献となる。今後、刺激終了時刻をずらした場合や各刺激の時間

を統制した場合に、生じる力覚に与える影響について調査していきたい。

謝辞 本研究は、創発的研究支援事業 (JPMJFR226N)、一般財団法人テレコム先端技術研究支援センター及び公益財団法人立石科学技術振興財団の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎. 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. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No. 1, pp. 47–58, 2006.
- [2] 田辺健, 雨宮智浩, 遠藤博史, 井野秀一. 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.
- [3] T. Tanabe, H. Yano, and H. Iwata. Properties of proprioceptive sensation with a vibration speaker-type non-grounded haptic interface. In *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 21–26, 2016.
- [4] Y. Ujitoko and Y. Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, 2021.
- [5] 河岸知浩, 伴祐樹, 宇治土公雄介, 割澤伸一. Pseudo-haptics に牽引力錯覚を組み合わせることによる知覚される抵抗力・推進力の増強. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 第 27 巻, 2022.
- [6] G. M. Goodwin, D. McCloskey, and P. Matthews. The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, Vol. 95, No. 4, pp. 705–748, 1972.
- [7] J. Rekimoto. Traxion: a tactile interaction device with virtual force sensation. In *ACM SIGGRAPH 2014 Emerging Technologies*, pp. 1–1, 2014.
- [8] M. W. Taylor, J. L. Taylor, and T. Seizova-Cajic. Muscle vibration-induced illusions: review of contributing factors, taxonomy of illusions and user's guide. *Multisensory Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 25–63, 2017.
- [9] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博. 振動刺激条件の相違が運動錯覚の誘発と知覚量に及ぼす影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 4, pp. 457–466, 2014.
- [10] 牛山奎悟, 田中叡, 高橋哲史, 梶本裕之. 多点同時振動刺激による肩関節の運動錯覚. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 26, No. 2, pp. 143–154, 2021.