

[研究助成 (A)]

複数の錯覚現象生起による知覚力覚に関する研究

2231021



研究代表者

東京大学
大学院情報理工学系研究科

特任助教

中 村 拓 人

[研究の目的]

本研究の目的は再実装が容易な小型デバイスによる提示力覚表現を豊かにすることである。安価な VR ゴーグルの普及により、娯楽、医療、スポーツなどの分野においても VR 技術が広まりつつある。しかし、現状の多くの体験には力覚のフィードバックがないため作業性や技術訓練の質に制限がある。これは、従来は大型・高重量装置によって「物理的な力」を提示していたからである。そこで本研究では、再実装が容易な振動刺激を用いた錯覚を複数利用することで、小型デバイスでの強力な力覚提示を実現させる。本研究によって普及の課題となっていた、サイズや重量課題を解決し、より質の高い VR 空間での娯楽や訓練の普及に寄与する。

[研究の内容、成果]

振動刺激を用いた錯覚現象は複数報告されてきたが、組み合わせた際の効果の検証報告は少ない。本研究では、その中でも非対称加速度振動している振動子を把持すると牽引力を知覚する牽引力錯覚と、筋肉へ振動刺激を提示することで運動している感覚のみを知覚させる運動錯覚を組み合わせる。予備実験の結果、2つの現象を同時に提示することで、知覚する力覚は強くなることが確認された。しかし、同時提示時に知覚される力覚の大きさやタイミングなど、

将来的なデバイス応用を見据えた制御要項は未調査である。そこで、本研究ではこれらの錯覚の同時提示の特性を調査することで、将来的なデバイス応用への基礎的な知見を蓄積する。

1. 同時提示による知覚力覚増強の確認

本項目では、予備的に確認していた牽引力錯覚と運動錯覚を同時提示による知覚力覚増強現象を被験者実験により再度確認する。

2. 知覚力覚の物理量調査

本項目では、提案手法である2つの錯覚の同時提示による知覚力覚と1つの錯覚現象提示によって知覚される力覚の物理量を心理物理実験を用いることで主観的等価点を算出し比較する。

3. 2つの現象の時間差提示による知覚タイミングの調査

複数の錯覚現象は刺激提示から錯覚を知覚するまでに時差が生じる。この時差は錯覚現象ごとに異なるため、強力な力覚知覚に2つの錯覚現象の提示タイミングの最適化を実施する。

本報告書では紙面の都合により、提案手法の説明、項目1、項目2に関する報告を詳細に記載する。

[提案手法：牽引力錯覚と運動錯覚の同時提示]

本研究では、前述のように牽引力錯覚と運動錯覚を同時提示することで力覚を提示する。そこでこれらの錯覚現象を発生させる装置を下記

のように制作した。

牽引力錯覚は非対称振動により生起させる手法を採用し、運動錯覚は腱振動により生起させる手法を採用した。両錯覚の生起を、同じ振動子、制御装置を用い、入力信号を個別に操作するという形で行うことにより、システム全体をより少ない部品種類数で実装した。また、各振動子からの刺激の有無や刺激開始時刻はソフトウェアで制御可能である。牽引力錯覚と運動錯覚を同時に提示するためのシステムは、牽引力錯覚提示モジュール、運動錯覚提示モジュール、各モジュールを駆動する駆動部から構成される(図1)。



図1 複数の錯覚を提示する装置

使用する振動子には、振動周波数範囲を駆動可能な振動子 (ACOUSTIC HAPTIC 639897, Foster Electric Co., Ltd.) を採用した。運動錯覚提示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る。駆動部は信号を出力する PC 内ソフトウェア (Unity), オーディオインタフェース (ICUSBAUDIO7D, StarTech.com), 15 W 出力の D 級オーディオアンプ (PAM8610, DIODES) から構成される。PC から出力された音声信号がオーディオインタフェース及びオーディオアンプを介して、各モジュールの振動子を駆動する。振動波形は複数用意し、各振動子を個別かつ任意のタイミングで駆動可能とした。牽引力錯覚提示のための振動子に入力する振動波形には、先行研究

[49] 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 (図2) を採用した。

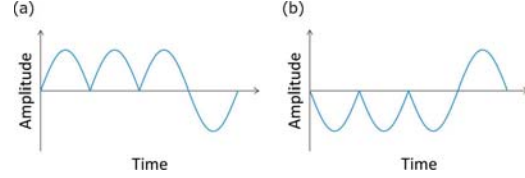


図2 振動子へ入力した非対称振動波形

本研究では、振動子の周波数特性を考慮した 65 Hz を振動子に入力する非対称振動波形の周波数とした。非対称振動波形が入力された振動子の加速度を測定すると図3のように瞬間的に変化する加速度とその逆方向に緩やかに変化する加速度が繰り返される非対称振動が見られる。

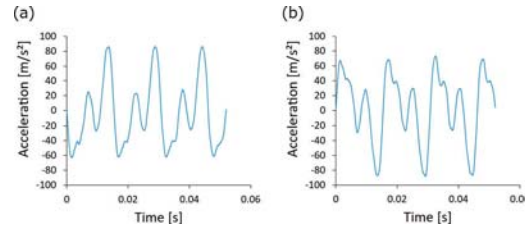


図3 計測された加速度波形

本研究では、この非対称振動の最大加速度振幅を、牽引力錯覚の生起が確認されている先行研究を参考に $90 \pm 10 \text{ m/s}^2$ とした。加速度振幅の調整は、実験参加者に各モジュールを装着させた状態で、レーザー変位計 (LK5000, Keyence) を用い、振動子の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。

運動錯覚提示のための振動子に入力する振動波形には、正弦波の対称振動波形を採用した。周波数については、70 から 80 Hz が運動錯覚を生起させやすいことが知られており [66], 先行研究 [74] では 70 Hz において最も速い運動の錯覚が生起したことから、本研究では 70 Hz を採用した。また、本研究では手首内側の腱 (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

屈させる運動錯覚を採用した。腱の位置を目視で確認しやすいことと、錯覚する運動の方向が牽引力錯覚の方向と合わせられることが採用理由である。

[実験 1：手首振動が牽引力錯覚の力覚強度に与える影響]

本実験では、提案手法である牽引力錯覚と手首背屈運動錯覚の組み合わせが、牽引力錯覚単体よりも強い力覚を知覚させるという仮説を立て、検証した。

本実験では、図 4 のような実験設備を用意した。振動提示装置は、前述した牽引力錯覚提示モジュール、手首の腱（橈側手根屈筋、長掌筋、尺側手根屈筋の腱）への振動提示を行う運動錯覚提示モジュール、手首の腱から少し逸れた位置へ振動提示を行う振動子内蔵バンドから構成された。実験参加者はマウスを操作し、任意のタイミングで力覚錯覚が伴う振動刺激を受け、テンキーを操作して主観的評価値の回答を行った。

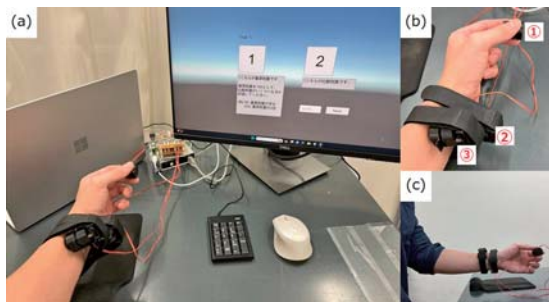


図 4 実験 1 の設備

1 試行の流れは、基準刺激の提示（1 回当たり 6 秒）、比較刺激の提示（1 回当たり 6 秒）、実験参加者の強度評価であった。実験参加者は、1 試行の中で最大 3 回ずつ基準刺激と比較刺激を体験可能であった。

本実験において実験参加者に提示した振動パターンの種類は、基準刺激が指先への振動刺激 2 種、比較刺激が 4 種（基準刺激と同じ指先への振動刺激 2 種×手首への振動刺激 2 種の組み合わせ）であった。指先振動の 2 種は、手背方

向の牽引力錯覚を生起させる非対称振動刺激（left）と手掌方向の牽引力錯覚を生起させる非対称振動刺激（right）から成る。手首振動の 2 種は、手首背屈運動錯覚を生起させる腱への対称振動刺激（腱振動刺激, tendon）と手首背屈運動錯覚を生起させない腱から少しずれた位置への対称振動刺激（皮膚振動刺激, skin）から成る。

本計測では、各振動刺激パターンを 5 回ずつ含む計 10 回の試行をランダムな順で行った。以上を手背条件群と手掌条件群それぞれで行った。本実験で実験参加者が行った試行は、合計で練習試行が 4 試行、本試行が 20 試行であった。

実験の結果を図 5 に示す。検定の結果、left and tendon 条件 ($t(13) = 4.03$, adjusted $p < 0.05$, $r = 0.75$), left and skin 条件 ($t(13) = 2.61$, adjusted $p < 0.05$, $r = 0.59$), right and tendon 条件 ($t(13) = 3.22$, adjusted $p < 0.05$, $r = 0.67$), right and skin 条件 ($t(13) = 2.66$, adjusted $p < 0.05$, $r = 0.59$) の比較刺激の評価値がいずれも有意に 100 より高いことが示された。

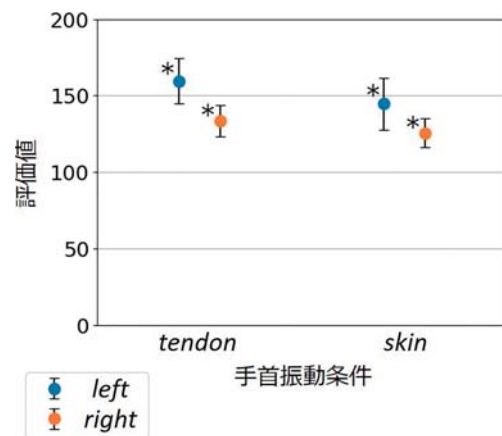


図 5 実験 1 の結果

本実験では牽引力錯覚に対して手首振動刺激を加えることで、知覚される力覚が増強されるか検証した。加えた手首振動刺激は、手首背屈運動錯覚を生起させる刺激とさせない刺激の 2 種類であった。検証の結果、牽引力錯覚と手首振動刺激の組み合わせで知覚される力覚は、牽

引力錯覚単体の力覚よりも強く感じられることが示唆された。

〔実験 2：提案手法による知覚力覚の物理量計測と比較〕

本実験では提案手法によって得られる力覚を物理量でいうとどの程度かを計測することで、従来手法と比較した。力覚の強度計測は、錯覚により知覚する力と錘による牽引力の主観的等価点を階段法によって推定することで行った。

本実験では、図 6 のような実験設備を用意した。振動提示装置は、牽引力錯覚提示モジュール、手首の腱（橈側手根屈筋、長掌筋、尺側手根屈筋の腱）への振動提示を行う運動錯覚提示モジュール、手首の腱から少し逸れた位置へ振動提示を行う振動子内蔵バンドから構成された。牽引力錯覚を提示する振動子にはテグスが取り付けられており、スタンドに取り付けられた滑車を介して反対の端に錘を吊るすクリップが取り付けられている。クリップに錘を付けることで実験参加者に錯覚ではない物理的な力覚提示を行う。錯覚による力覚提示を行う際は、錘を持ち上げてテグスを弛ませ、物理的な力の知覚を避けた。

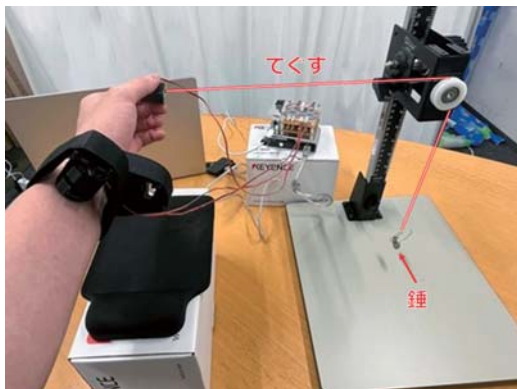


図 6 実験 2 の設備

1 回の振動刺激時間は、実験 1 と同様に 6 秒とした。1 試行の流れは、振動で生起する錯覚的な力覚提示（6 秒）、インターバル（3 秒）、錯覚を生起させない振動と錘による力覚の提示（6 秒）、実験参加者の回答、インターバル（6 秒）であった。実験参加者は 1 回目の力覚に比べて 2 回目の力覚が「強い」か「弱い」かを回

答するよう指示を受け、どちらが錯覚による力覚または錘による力覚であるかは知らされなかった。また、実験参加者は「強い」か「弱い」か回答し、もしもどちらとも言えない場合にはランダムに回答するよう指示を受けた。ある試行で実験参加者が「強い」と回答した（錯覚による力覚よりも錘による力覚の方が強いと感じた）場合は、次の試行における錘の質量を減らした。同様に、「弱い」と回答した場合は次の試行における錘の質量を増やした。初めて回答が反転する（ある試行とその 1 つ前の試行で回答が「強い」から「弱い」に変わる、もしくはその逆）までは、錘の質量を 12 g ずつ変化させ、その後は錘の質量を 4 g ずつ変化させた。各振動パターンにそれぞれ 2 つの初期値が異なる系列を用意した。1 つは初期値が十分に小さい 0 g（錘なし）の上昇系列、1 つは初期値が十分に大きい 48 g の下降系列である。

本実験において実験参加者に提示した振動パターンは 4 種（指先への振動刺激 2 種×手首への振動刺激 2 種の組み合わせ）であった。指先振動の 2 種は、手背方向の牽引力錯覚を生起させる非対称振動刺激（left）と手掌方向の牽引力錯覚を生起させる非対称振動刺激（right）から成る。手首振動の 2 種は、手首背屈運動錯覚を生起させる腱への対称振動刺激（腱振動刺激, tendon）と手首背屈運動錯覚を生起させない腱から少しずれた位置への対称振動刺激（皮膚振動刺激, skin）から成る。

本計測では、各振動パターンの上昇系列及び下降系列を 1 回ずつランダムな順に行う計 4 回の試行を 1 セットとし、2 セット毎に 1 分間の休憩を設けながら 14 セット（計 56 試行）行った。以上を手背条件群と手掌条件群それぞれで行った。本実験で実験参加者が行った試行は、合計で練習試行が 8 試行、本試行が 112 試行であった。

実験の結果を図 7 と図 8 に示す。図 7 はある参加者の実験データ例である。先行研究にない、ある振動パターンにおける上昇系列と下降

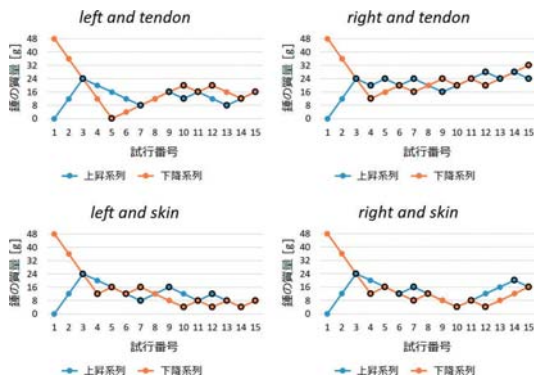


図7 サンプル実験データ

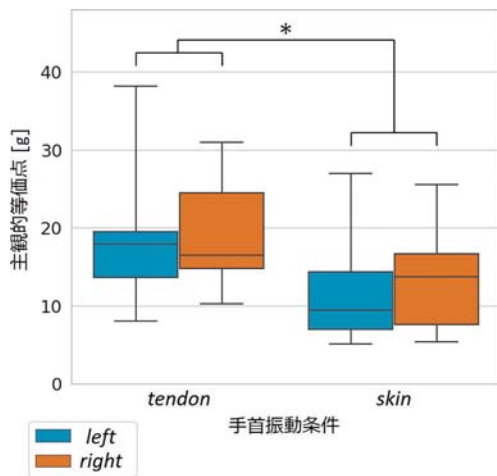


図8 実験2の結果

系列のデータについて、それぞれ反転点（回答が「強い」から「弱い」、もしくはその逆に変わる点）の値と15番目の値の平均を求め、さらにその二つの値（上昇系列と下降系列から得られた値）の平均を求め、それを主観的等価点とした。

図8は全参加者の主観的等価点の計測結果である。二元配置分散分析の結果について、手首振動要因の主効果 ($F(1,10)=44.491, p<0.001$, $\text{partial } \eta^2=0.816$) が有意であったが、指先振動要因の主効果 ($F(1,10)=0.575, p=0.466$, $\text{partial } \eta^2=0.054$) 及び交互作用 ($F(1,10)=0.408, p=0.537$, $\text{partial } \eta^2=0.039$) は有意ではなかった。

牽引力錯覚に対して手首背屈運動錯覚を生起させる腱振動刺激を組み合わせることで知覚される力

覚の強度と、手首背屈運動錯覚が生起しない皮膚振動刺激を組み合わせることで知覚される力覚の強度を比較した。結果として、手首背屈運動錯覚を生起させる腱振動刺激を組み合わせる方が知覚される力覚の強度が強くなることが示唆された。

このように実験1と実験2を通して、牽引力錯覚と運動錯覚を同時に提示することで、知覚する力覚が強くなることが明らかになり、その物理量も約2倍になることが確認された。

[今後の研究の方向、課題]

本研究では複数の錯覚を提示することで、軽量のデバイスによって、従来よりも強い力覚知覚を実現させた。当初の目標通り、従来よりも表現可能な力覚の幅は広がったといえる。しかし、提示可能な力覚は20g程度であり、適用可能なアプリケーションには限界がある。より広い分野への応用を考えると、より強い力覚を提示する手法が求められる。この課題に対しては、さらに錯覚を追加で提示する手法が考えられる。まず、今回使用した運動錯覚は手首以外の部位においても発生するため、同時に複数部位に運動錯覚を提示することで、さらなる知覚力覚の増強が期待できる。また、皮膚のせん断変形を利用して力覚を提示するハンガー反射も手首や肘で発生することが確認されており、利用が期待できる。

[成果の発表、論文など]

- [1] 納藤, 中村, 雨宮: 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, 第28回日本バーチャリアリティ学会大会, 2023.09.
- [2] T. Noto, T. Nakamura, T. Amemiya: Synergistic Illusions: Enhancing Perceptual Effects of Pseudo-Attraction Force by Kinesthetic Illusory Hand Movement, IEEE Trans. on Haptics (ToH), 2024.