

エキセントリックトレーニングにおける 速度指標および位置指標に基づく聴覚フィードバックの比較

大石 琉翔^{1,a)} 中村 聡史¹

受付日 2025年7月14日, 採録日 2026年3月11日

概要: 筋肉が収縮した状態から伸ばして行うエキセントリックトレーニングでは、適切な動作速度で行うことがトレーニング効果を向上させるうえで重要である。しかし、実際のトレーニングでは筋疲労により無意識のうちに動作が速くなり、トレーニング効果が低下することがある。本研究では、動作速度に応じてリアルタイムに聴覚フィードバックを提供するシステム (SpeedFB) を提案する。具体的には、エキセントリックトレーニングのダンベルカール動作において、SF ゲームに着想を得た「チャージ音」を用いて速度を提示するプロトタイプを開発した。本システムの有効性を検証するため、2つの実験を実施した。実験1では、SpeedFBと秒数を読み上げる条件、およびフィードバックなし条件を比較した。その結果、SpeedFBは動作の加速を効果的に抑制し、エキセントリック局面の動作時間を長くする効果を示した。実験2では、SpeedFBと腕の位置に基づくフィードバック (PositionFB) を比較した。その結果、SpeedFBは動作時間のばらつきを抑えた一方、PositionFBは動作速度が遅くなる傾向を示した。以上の結果から、速度に基づくフィードバックは、動作制御の向上と安定したエキセントリックトレーニングの実施に有効であることが明らかになった。また、PositionFBと組み合わせることで、目的に応じたより効果的なフィードバック設計につながる可能性が示された。

キーワード: エキセントリックトレーニング, 筋力トレーニング, 聴覚フィードバック, ソニフィケーション, 効果音

Comparison of Speed-based and Position-based Auditory Feedback in Eccentric Strength Training

RYUTO OISHI^{1,a)} SATOSHI NAKAMURA¹

Received: July 14, 2025, Accepted: March 11, 2026

Abstract: Eccentric training, which involves muscle lengthening under tension, requires controlled movement speed to maximize effectiveness. However, muscle fatigue often leads to unintentional acceleration, reducing training effectiveness. This study proposes SpeedFB, a speed-based auditory feedback system that provides real-time auditory cues to regulate movement speed. Specifically, we developed a prototype system for eccentric biceps curls that employs a “charging sound,” inspired by sci-fi games, to provide feedback on movement speed. We conducted two experiments to evaluate the effectiveness of our system: (1) The first experiment compared SpeedFB with a numerical count method and a no-feedback condition. Results showed that SpeedFB effectively prevented acceleration and prolonged the eccentric phase. (2) The second experiment compared SpeedFB with a position-based feedback method (PositionFB). The results showed that SpeedFB promoted a more consistent movement duration, whereas PositionFB led to slower movements with increased variability. These findings demonstrate that speed-based auditory feedback effectively improves movement regulation and supports consistent execution of eccentric training. Moreover, combining it with PositionFB may lead to more effective feedback designs tailored to specific training goals.

Keywords: eccentric training, strength training, auditory feedback, sonification, sound effect

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan
^{a)} ryuto0115fms@gmail.com

1. はじめに

ソニフィケーションは、リアルタイムフィードバックに

よって運動学習を促進する手法として、スポーツトレーニングやリハビリテーションに広く応用されている [1], [2], [3]. 動作データを聴覚情報へと変換することで、視覚に依存せずに情報を知覚することが可能となり、特に視線の制約がある状況において有効である。先行研究では、ソニフィケーションが複雑な運動スキルの習得を促進すること [4], およびリハビリテーション課題における遂行を向上させることが示されている [5].

筋力トレーニングの中でも、ダンベルカールは上腕二頭筋の発達を目的として広く実施されている。特に、筋肉が伸張しながら力を発揮するエキセントリック局面は、筋力向上や筋肥大の誘発において重要な役割を果たすことが知られている [6], [7], [8], [9]. エキセントリック動作は、その効果を最大化するために3~5秒程度のゆっくりとした速度で実施することが推奨されている [10]. しかし、3~5秒にわたるエキセントリック動作は筋肉に高い負荷を与えるため、動作を繰り返すうちに動作が徐々に速くなってしまいう傾向がある。その結果、意図した速度を維持できなくなり、トレーニング効果が十分に得られない可能性がある。

聴覚フィードバックは、市販の製品にも応用されており、特に Nintendo が提供する「リングフィットアドベンチャー」において注目される。このシステムでは、一部の運動において「チャージ音」が再生され、動作の制御を促すよう設計されている。このようなフィードバックは、特にコンセントリック局面やアイソメトリック局面における動作の安定化に寄与する可能性がある。ただし、「リングフィットアドベンチャー」の技術的な詳細は公開されておらず、高負荷のエキセントリック条件における有効性については明らかではない。それにもかかわらず、この製品の広範な普及は、フィットネス領域におけるソニフィケーションの実用的価値を示唆している。一方、本研究で提案するアプローチは、このような非公開の商用製品とは異なり、アルゴリズムや評価方法を明確に示しており、透明性と再現性を重視している。これにより、学術的な文脈における厳密な評価や再現実験が可能となる点に特徴がある。

本研究では、この問題に対処するために、適切な速度でエキセントリック動作を行えるよう支援する速度を指標とする聴覚フィードバックシステムを提案する。本システムは、動作速度に応じて提示される効果音がリアルタイムに変化し、ユーザが自身の動作を能動的に調整できるよう設計されている。具体的には、目標とする速度範囲内で動作している場合には、SF ゲームに着想を得た「チャージ音」を再生し、エネルギーが蓄積されるような感覚を提示することで、適切な速度の維持を促す。一方、目標速度を超える速さで動作している場合には、エネルギーの放出を表す音を再生し、ユーザに減速を促す。このような設計により、ユーザは聴覚情報に基づいて自然に動作速度を調整でき、

動作の制御と加速の防止が期待される。

実験1では、SpeedFB、秒数を読み上げる条件、およびフィードバックなしの3条件を比較した。実験1の目的は、提案する SpeedFB システムの有効性を検証することである。実験2では、SpeedFB と位置指標に基づく聴覚フィードバック (PositionFB) とを比較し、両者が動作速度の調整に与える影響を検討した。PositionFB は、Yang ら [11] により提案された手法であり、動作位置に応じて音を変化させることでフィードバックを提供するアプローチである。しかし、この手法が実際のトレーニング環境と近い高負荷条件での筋力トレーニングにおいて動作速度に与える影響は、これまで十分に検討されてこなかった。そこで本研究では、高負荷条件下において SpeedFB と PositionFB を比較し、それぞれの速度調整への有効性を検証した。本研究は、著者らが国際会議にて発表した研究 [12] を発展させたものであり、既存データを用いた追加分析や、結果に基づく統合的な考察を通じて、提案手法の有効性をより深く検討した。

本研究の主な貢献は以下のとおりである。

- エキセントリックトレーニング中の過度な動作加速を防ぎ、適切な速度の維持を支援する聴覚フィードバックシステムを開発し、携帯性と実用性を考慮して Apple Watch 上に実装した。
- 高負荷条件下における 10 名の実験参加者を対象とした実験により、提案システム (SpeedFB) はフィードバックなし条件と比較してエキセントリック局面の動作時間を有意に長くする効果を示した。
- 21 名の実験参加者を対象とした実験により、速度指標および位置指標に基づく聴覚フィードバック手法を比較し、速度指標に基づくフィードバックでは動作時間のばらつきが有意に小さく、安定した速度で動作を維持できることを明らかにした。また、位置指標に基づくフィードバックはより緩やかな動作を促す傾向を示し、両手法が補完的な特性を持つことを確認した。

2. 関連研究

2.1 フォームや姿勢の改善によるトレーニング支援に関する研究

トレーニング中の動作遂行やフォームの最適化を目的とした支援システムに関する研究は数多く行われている。Khan ら [13] は、Kinect を用いてアスリートの動作をリアルタイムに解析し、フォームの誤りを検出することでトレーニング効果を高めるシステムを提案した。このシステムでは、関節位置や角度、動作速度を計測・解析し、特に全身を使ったバーベルを挙上するプッシュプレスのような動作において速度変動がフォームの安定性に与える影響に着目している。実験では、初心者ほど速度のばらつきが大きく、繰り返しトレーニングを行うことで動作が安定する傾

向が示された。Chen ら [14] は、OpenPose に基づく姿勢推定と機械学習を統合した「Pose Trainer」を開発し、トレーニング中のフォーム誤りを検出し、修正フィードバックを提示するシステムを提案した。このシステムは、トレーニング動画から関節位置を推定し、フォームの正確さを評価する。実験では、4 種類の運動を高精度に分類でき、本システムがフォーム改善に有効であることが示された。

これらの研究が動作フォームや姿勢の補正に着目しているのに対し、本研究は動作速度の調整に着目する点で異なる。特にエキセントリックトレーニングにおいては、推奨される動作速度（3~5 秒）を維持することが、トレーニング効果の最大化に重要であるとされており、本研究ではその維持を支援することを目的としている。

2.2 ソニフィケーションに基づくトレーニング支援に関する研究

運動動作を支援する手段として、効果音を含む聴覚的フィードバックの活用は、運動学習やトレーニングの分野で注目されている。Yang ら [11] は、ダンベルカール動作において、筋活動、動作速度、腕の位置をリアルタイムに音響情報へと変換するソニフィケーション手法を提案した。具体的には、腕の位置を音の高さ（周波数）にマッピングし、動作速度が速い場合にホワイトノイズを発生させる手法や、腕の位置を音階に変換することで、動作の進行度をフィードバックする手法である。これらが動作の知覚支援に有効であることを示した一方で、速度の安定性や運動学習への効果については明確な知見が得られていない。その後の研究では、聴覚フィードバックが動作のペースやユーザの動機づけを高める可能性が報告されている [15]。しかし、これらはいずれも実際のトレーニング環境とは違った低強度のトレーニング条件下で実施されており、高負荷の筋力トレーニングにおける有効性はほとんど検証されていない。高負荷条件下では、筋疲労により動作の安定性が低下し、速度のばらつきが大きくなる傾向があるため、そのような状況においても聴覚フィードバックが動作の安定性や速度制御に寄与するかを検討することが重要である。本研究では、このような高負荷条件下において、聴覚フィードバックが動作の安定性および速度制御の改善に寄与するかを検証する。

なお、聴覚的フィードバックを用いたソニフィケーションは、同じ筋力トレーニングの領域でも応用されている。たとえば、動作と同期した音響刺激により、ベンチプレスの平均パワー出力が向上することが示されている [16]。また、ソニフィケーションに基づく支援は、筋力トレーニング以外の分野でも広く研究されている。視覚と聴覚のフィードバックを組み合わせることで、バスケットボールのジャンプシュートにおける動作精度および学習効率の向上が報告されている [17]。同様の効果は、スピードスケート [18]、

ハンマー投げ [19]、ライフル射撃 [20] といった競技においても確認されている。

一方で、筋力トレーニングの支援に視覚フィードバックを用いた支援手法も提案されている [21], [22]。しかし、視覚フィードバックは動作中に外部情報を参照する必要があるため、注意資源を比較的多く消費し、提示情報への依存が生じやすいことが指摘されている [23]。長谷川ら [24] も、視覚フィードバックは練習直後の成績向上は得られるものの、保持効果が乏しく、聴覚フィードバックの方が自立した運動制御の獲得に有利であることを報告している。これらの議論から、筋活動への集中が求められる高負荷のエキセントリック動作において、視覚よりも聴覚フィードバックが適していることを示唆している。本研究では、ソニフィケーションを筋力トレーニングに応用することで、動作速度の安定性を高め、トレーニングの有効性向上を目指す。

3. 提案システム

3.1 システム概要

本研究では、上腕二頭筋を対象とした代表的な筋力トレーニングであるダンベルカールに特化し、効果音を活用して動作を支援する聴覚フィードバック手法を提案する。具体的には、Apple Watch 上で動作するプロトタイプシステムを開発し、モーションデータを取得しつつ、リアルタイムに音を再生することでユーザの動作を誘導する。提案手法では、単に速度変化に応じて音を鳴らすのではなく、異なる意味を持つ効果音を用いることで、ユーザの感覚と行動に直接働きかける設計とした点が特徴である。動作速度が目標範囲内にある場合には「チャージ音」を再生し、目標速度を逸脱した場合には「パワーが抜ける音」を再生する。「チャージ音」は、SF ゲームに見られるエネルギーを蓄積するような効果音であり、一方の「パワーが抜ける音」は、空気が抜けるような音を模しており、エネルギーが失われている状態を象徴する。動作速度の計測には、スマートウォッチ内蔵のモーションセンサから取得される Y 軸の角速度を用いる。目標とする速度範囲は、1 回のエキセントリック動作における推奨時間である 3~5 秒を基に定義している。モーションデータは 60Hz でサンプリングされ、センサノイズや意図しない手首の急激な動きによる短期的な変動を抑制するため、10 サンプル分の平均角速度を算出し、安定かつ滑らかな聴覚フィードバックの提供を実現している。

3.2 速度指標に基づくフィードバックのアルゴリズム

本システムの聴覚フィードバックはリアルタイムに動作し、閾値に基づく判定アルゴリズムにより、動作速度が目標範囲内にあるかどうかを判定する。個人差のある可動域に対応するため、システムは動作開始時および終了時の

ロール角を記録し、その差からユーザの可動範囲を推定する。これに基づき、個別に適した速度閾値を設定する。たとえば、可動範囲が 120° の場合、推奨されるエキセントリック動作時間の下限である 3 秒をもとに、閾値を 40°/s と設定する。

角速度が閾値以内であれば、「チャージ音」を再生し、適切な動作速度の維持を促す。ただし、極端に遅い動作（5 秒を超える場合）に対しても同様の音が再生され続ける可能性があるため、チャージ音の再生時間は最大 5 秒に制限している。これは、過度に遅い動作を防ぐためである。一方、角速度が閾値を超えて速すぎると判定された場合には、「パワーが抜ける音」を再生し、ユーザに減速を促す。

このように、動作速度に応じてリアルタイムにフィードバック音を動的に切り替えることで、エキセントリックトレーニングにおける動作速度の維持を支援する。

3.3 聴覚フィードバックのデザイン

本システムにおけるフィードバック音は、動作制御を支援し、ユーザの集中力やモチベーションを高めることを目的として選定した。

適切な動作速度が維持されている際には、「チャージ音」をフィードバックとして用いている。トレーニング中は筋肉の収縮に意識が高まりやすいため、エネルギーが蓄積されるような音を提示することで、心理的にその動作を維持しようとする動機づけが促されると考えられる。一方、動作速度が閾値を超えて速すぎる場合には、エネルギーの消失を想起させる「パワーが抜ける音」を再生することで、筋活動が低下を無意識に認知させ、減速を促すことが期待される。

これらの設計により、高負荷条件下においても安定した動作速度の制御が可能となり、効果的なエキセントリックトレーニングの実施が期待される。さらに、チャージ音の提示によってトレーニング中のモチベーションや楽しさが高まり、ユーザの運動への関与や集中力が向上する可能性がある。ユーザの関与を維持することで、トレーニング効果の向上や継続率の改善にも寄与することが見込まれる。

それぞれのフィードバック音は、効果音ファクトリー^{*1}の「エネルギーチャージ(気功波3)」と無料効果音で遊ぼう!^{*2}の「空気が抜ける1」を用いた。

4. 実験1：ガイド・フィードバックの比較

4.1 概要

実験1では、提案する速度指標に基づく聴覚フィードバックシステムが、ダンベルカール動作におけるエキセントリック局面で適切な動作速度の維持に有効かどうかを検証する。本実験では、提案システム（SpeedFB）条件、秒

数読み上げ条件、フィードバックなし条件の3つの条件を比較し、各条件において、エキセントリック局面の動作時間および動作速度の一貫性に与える影響を評価する。

秒数読み上げ条件は、パーソナルトレーナーによって広く用いられてきた従来手法であり、本研究ではこれを比較対象とした。提案手法と従来手法を比較することで、提案手法の有効性を検証する。

4.2 実験条件

本実験は実験者内比較により実施し、実験参加者は以下の3条件すべてでダンベルカールでのエキセントリックトレーニングを実施した。

- (1) **SpeedFB 条件（提案手法）**：動作速度に基づいて聴覚フィードバックを提示する条件（3章を参照）。
- (2) **秒数読み上げ条件（比較手法）**：0～5秒まで1秒ごとに経過時間を音声で提示される条件。
- (3) **フィードバックなし条件（ベースライン）**：聴覚フィードバックを提示せず、実験参加者自身の感覚に基づいて動作を行う条件。

4.3 仮説

SpeedFB 条件（提案手法）では、秒数読み上げ条件に比べて、より適切かつ一貫した速度でエキセントリック動作が実施されると仮説を立てた。

4.4 実験参加者と使用機器

本実験には、21～24歳の男性12名が参加した。実験参加者の多くは筋力トレーニング経験が少ないか、まったくない状態であったため、実験前にダンベルカールのフォームやシステムの使用方法について詳細な説明を行った。また、Satoら[9]の上腕二頭筋における高負荷トレーニングに関する先行研究を参照し、練習セッションの実施やセッション間の休息確保、実験中の補助・観察を行った。実施過程で一部の参加者に強い疲労が見られたため、以降のセッションでは休息の延長や負荷の微調整などの措置を追加し、実験参加者の負担軽減を図った。

動作のモーションデータの取得およびフィードバックには Apple Watch SE（第2世代）を用いた。トレーニング負荷には、最大 24 kg の可変式ダンベルを使用した。個人差に配慮し、事前にダンベルカールにおける 1RM（1回だけ持ち上げられる最大重量）を測定し、エキセントリック動作に適した高負荷条件とするため、ダンベル重量を 1RM の 80～90% に設定した。この 10% の幅は、MRG 可変式ダンベル 24 kg（2.5 kg から 24 kg まで約 1 kg ごとに設定可能）の特性上、細かい重量調整が難しかったためである。

4.5 実験手順

各セッションでは、エキセントリックトレーニングを1

*1 <https://se-factory.net/>

*2 <https://taira-komori.jp.org/>



図 1 エキセントリックトレーニングを実施している様子

Fig. 1 Performing eccentric training.

セット 10 回、計 3 セット実施した。すべての実験参加者は実験者内比較に基づき、3 つの条件すべてを体験した。

筋疲労の影響を最小限に抑えるため、各条件は別日程で実施し、少なくとも 48 時間の間隔を設けた。また、順序効果を考慮し、条件の提示順序は実験参加者ごとにランダムに決定した。

トレーニング前にはウォームアップを行い、3 分間の休憩を挟みながら、3 セットのエキセントリックトレーニングを実施した。動作のコンセントリック局面（ダンベルを持ち上げる動作）では、筆頭著者が補助を行い、実験参加者がエキセントリック局面（ダンベルを下ろす動作）に集中できるよう配慮した（図 1 参照）。

実験参加者には、エキセントリック局面を 3~5 秒かけて実施するように事前に説明した。そのうえで、各条件における指示内容は以下のとおりである。SpeedFB 条件では、「チャージ音」が鳴っている状態を維持するように意識するよう指示した。秒数読み上げ条件では、読み上げられるカウントに合わせて動作するように指示し、フィードバックなし条件では、自身の感覚に基づいて 3~5 秒で下ろすよう求めた。なお、いずれの条件においても、動作テンポやリズムを統一するような明示的な指示は与えなかった。これは、外的な時間指示を与えずに、フィードバック内容の違いが動作速度に与える影響を純粹に評価するためである。

各セッション終了後には、実験参加者に主観評価アンケートへの回答を求めた。このアンケートでは、5 段階リッカート尺度および自由記述欄を用いて、各条件における集中度、トレーニングの負荷、動作制御のしやすさ、および全体的なユーザ体験について評価を行った。

4.6 評価指標

運動に連動した聴覚フィードバックの有効性を評価するため、本研究ではエキセントリック局面の動作時間と、動作速度の一貫性に加えて、フィードバックに対する主観的評価の 3 つの指標を用いた。

エキセントリック局面の動作時間は、動作速度に直接影

響するため、動作が速ければ短く、遅ければ長くなる。これは、動作速度を間接的に評価する手段として有効である。動作速度の一貫性は、1 回の反復動作における速度の変動量をもとに評価した。エキセントリック局面を通じて安定した動作速度を維持することは、一貫した筋活動を引き出し、トレーニングの効果を高めるうえで重要なためである。

なお、速度の一貫性については、1 回の動作における動作速度の標準偏差を算出し、動作制御の客観的な指標として評価した。

さらに、各条件における主観的な体験を把握するため、動作の難易度、フィードバックの有用性、集中度、およびトレーニングの楽しさについて、5 段階リッカート尺度および自由記述によるアンケート評価を実施した。これらの主観指標は、聴覚フィードバックの効果を動作制御および心理的側面の両面から評価するために用いた。

4.7 結果

12 名の参加者のうち 2 名については、筋肉痛や疲労の回復が不十分であり、第 1 セットから適切なエキセントリックトレーニングを実施できなかったため、分析対象から除外した。最終的に、10 名の実験参加者が各セッションで 3 セットのトレーニングを実施し、3 条件すべてを体験したことから、本実験では合計 90 セット分（ $10 \times 3 \times 3$ ）のデータが取得された。ただし、本実験は参加者内比較であるため、統計解析は参加者単位で実施した。具体的には、各参加者について各条件における 3 セットの値を平均し、1 条件あたり 1 つの代表値を算出した。したがって、条件間比較におけるサンプル数は 10 となった。また、1 セットについては計測ミスにより反復動作が 9 回分のみ記録されたが、当該セットでは記録された 9 回分の平均値を算出し、セットの代表値とした。本研究では、エキセントリック局面に着目しており、エキセントリック収縮期間は、角速度が一定時間負の値を示している区間として定義した。ただし、動作終了後に生じる角速度のわずかな変動や、動作開始直後のセンサノイズなどにより、検出されたエキセントリック区間と実際の動作時間に若干のずれが生じる可能性がある。そのため、本分析では絶対的そのものよりも、各条件間の相対的な差異に着目して結果の解釈を行う。

図 2 は、各条件におけるエキセントリック局面の動作時間の箱ひげ図を示している。この図から、SpeedFB 条件および秒数読み上げ条件のいずれにおいても、フィードバックなし条件と比較してエキセントリック局面の動作時間が長くなる傾向が見られた。本研究は、参加者内計画であるため、各参加者の条件別平均値（ $n = 10$ ）を用いて Friedman 検定を実施した。その結果、3 条件間に有意な差が認められた（ $\chi^2 = 7.80$, $p < 0.05$, $W = 0.39$ ）。事後比較として Wilcoxon の符号付順位検定を行い、Holm 法による多重比較補正を適用した。その結果、SpeedFB 条件

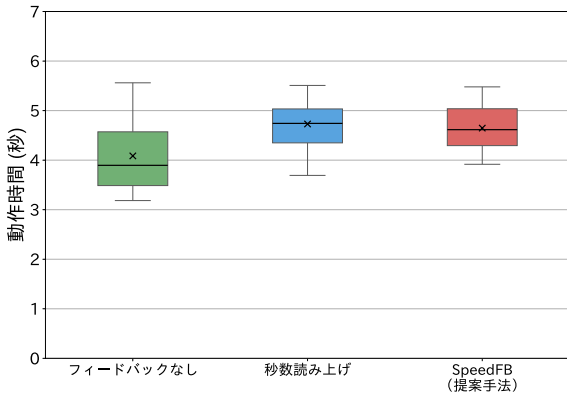


図 2 エキセントリック局面における動作時間
Fig. 2 Duration of the eccentric phase.

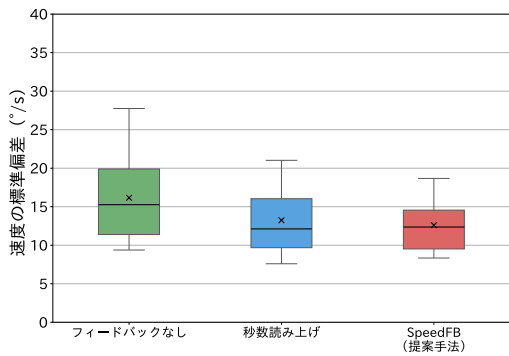


図 3 エキセントリック局面における速さの標準偏差
Fig. 3 Standard deviation of velocity during the eccentric phase.

は、フィードバックなし条件と比較して有意に動作時間が長かった ($p < 0.05$)。一方、秒数読み上げ条件とフィードバックなし条件との間には有意差は認められなかった ($p = 0.056$)。また、SpeedFB 条件と秒数読み上げ条件の間には有意な差は認められず ($p = 0.846$)、SpeedFB 条件における動作の方がより適切な速度で行われるという仮説は支持されなかった。

また、動作時間のばらつきを検討するため、各参加者における各条件の 3 セットそれぞれについてセット内の動作時間の標準偏差を算出した。さらに 3 セット分の標準偏差を平均して条件ごとの代表値とし、Friedman 検定を実施した結果、3 条件間に有意な差は認められなかった ($\chi^2(2) = 1.40, p = 0.497, W = 0.07$)。この結果から、本実験では、動作時間のばらつきに関して条件間で明確な差は確認されなかった。

図 3 は、各条件におけるエキセントリック局面の動作速度の標準偏差を示した箱ひげ図である。各条件における速度の標準偏差について Friedman 検定を実施した結果、条件間に統計的有意差は認められなかった ($\chi^2(2) = 5.40, p = 0.067, W = 0.27$)。

また筋肉の疲労が最も高い 3 セット目に着目して補足的な分析を行った (図 4)。3 セット目の速度の標準偏差に

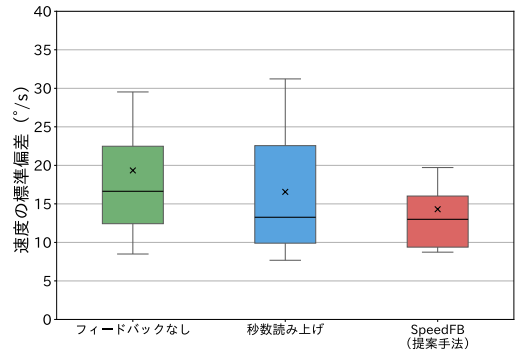


図 4 3 セット目における速さの標準偏差
Fig. 4 Standard deviation of velocity in the third set.

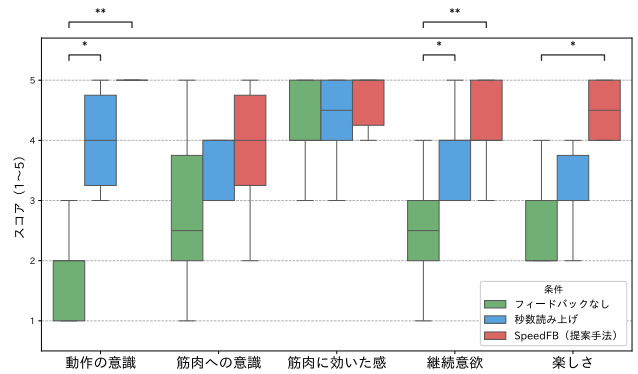


図 5 主観評価 (5 段階リッカート尺度) における分布
Fig. 5 Distribution of subjective ratings (5-point Likert scale).

ついて Friedman 検定を実施した結果、条件間に有意な差が認められた ($\chi^2(2) = 10.40, p = 0.0055, W = 0.52$)。事後比較として Wilcoxon の符号付順位検定を行い、Holm 法による多重比較補正を適用した。その結果 SpeedFB 条件はフィードバックなし条件と比較して速度の標準偏差が有意に小さかった ($p < 0.05$)。一方、秒数読み上げ条件とフィードバックなし条件との間には有意差は認められなかった ($p = 0.129$)。また、秒数読み上げ条件と SpeedFB 条件との間にも有意差は認められなかった ($p = 0.432$)。以上の結果から、3 セット目においては SpeedFB 条件が動作速度の一貫性を向上させた可能性が示唆された。

各トレーニングセッション終了後、実験参加者に対して、各フィードバック手法に関する主観評価アンケートを実施した。アンケート項目は、動作速度に対する意識やトレーニング中のモチベーションなどを含み、5 段階リッカート尺度 (1: まったくそう思わない~5: 非常にそう思う) により評価を行った。図 5 に、各条件における主観評価の結果の一部を示した箱ひげ図である。なお図中のラベルはアンケート項目を短縮したものであり、それぞれ以下の内容を示す。

- 動作の意識：同じリズムでゆっくりと下ろすことは意識しやすかったですか？
- 筋肉への意識：筋肉の伸長を意識しながらできましたか？

- 筋肉に効いた感：トレーニングで筋肉に効いている感じはしましたか？
- 継続意欲：トレーニングをまたやりたいと思いますか？
- 楽しさ：トレーニングは楽しかったですか？

本分析では、順序尺度データであることを考慮し、3条件間の比較にFriedman検定を用い、有意差が認められた項目については事後比較としてWilcoxonの符号付順位検定(Holm補正)を実施した。その結果、「動作の意識」、「継続意欲」、「楽しさ」において有意差が認められた ($p < .05$)。特に「動作の意識」と「継続意欲」では、SpeedFB条件および秒数読み上げ条件がフィードバックなし条件よりも有意に高い評価を示した。また、「楽しさ」ではSpeedFB条件が他の2条件よりも高い傾向を示した。一方、「筋肉への意識」および「筋肉に効いた感」では有意差は認められなかった。

これらの結果から、提案したシステムは、動作速度を意識させながらゆっくりと一定のリズムで動作を行うことを支援し、トレーニング中のモチベーションを高める可能性が示唆された。

4.8 考察

図2に示されるように、SpeedFB条件はフィードバックなし条件と比較してエキセントリック局面の動作時間が有意に長くなる結果が得られた。この結果は、SpeedFBのフィードバック音が動作と同期して再生されることで、実験参加者にとって自然な動作リズムの維持を促し、動作をゆっくりとする助けとなった可能性を示唆している。また、秒数読み上げ条件においてもフィードバックなし条件と比較して動作時間が長くなる傾向が見られたことから、1秒ごとの音声提示により経過時間が明示されることで、目標時間を意識しながら動作を遂行しやすくなったと考えられる。さらに、両条件間に有意な差が見られなかった点から、いずれの手法も意図しない加速を抑制し、フィードバックなし条件と比較して動作を適切な速度で行ううえで

有効であったと考えられる。

筋肉の疲労が最も高い3セット目における動作速度の制御を検討するため、エキセントリック局面の角速度の変化を分析した。図6は、3セット目におけるエキセントリック動作の角速度の変化を示している。各反復動作のエキセントリック局面を開始から終了まで時間的に正規化し、10区間に分割したうえで区間ごとの平均角速度を算出した。図に示す曲線は、これらの値を実験参加者で平均したものである。縦軸は角速度を表し、値が大きいほど動作速度が速いことを意味する。その結果、SpeedFB条件では、動作後半にかけて他条件よりも速度が低い傾向が見られ、特に筋肉の疲労が高い3セット目においても、速度の過剰な上昇を抑える効果が示唆された。さらに図7では、3セット目の10回分のエキセントリック動作における角速度の変化を、各動作10区間に正規化して可視化している。これを見ると、フィードバックなし条件では動作全体が速く、回数を重ねるごとに加速する傾向が見られる。一方で、4~7回目においてSpeedFB条件は秒数読み上げ条件よりも角速度が小さく、より緩やかな動作であることが分かる。これらの結果は、SpeedFBによるリアルタイムな聴覚フィードバックが、疲労下でも安定した動作速度の維持を促す可能性を示している。

図3に示す全セット平均の分析では条件間に統計的な有

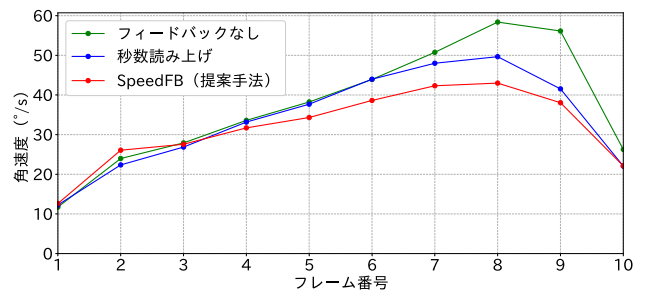


図6 3セット目におけるエキセントリック局面の平均角速度の変化
Fig. 6 Change in mean angular velocity during the eccentric phase in the third set.

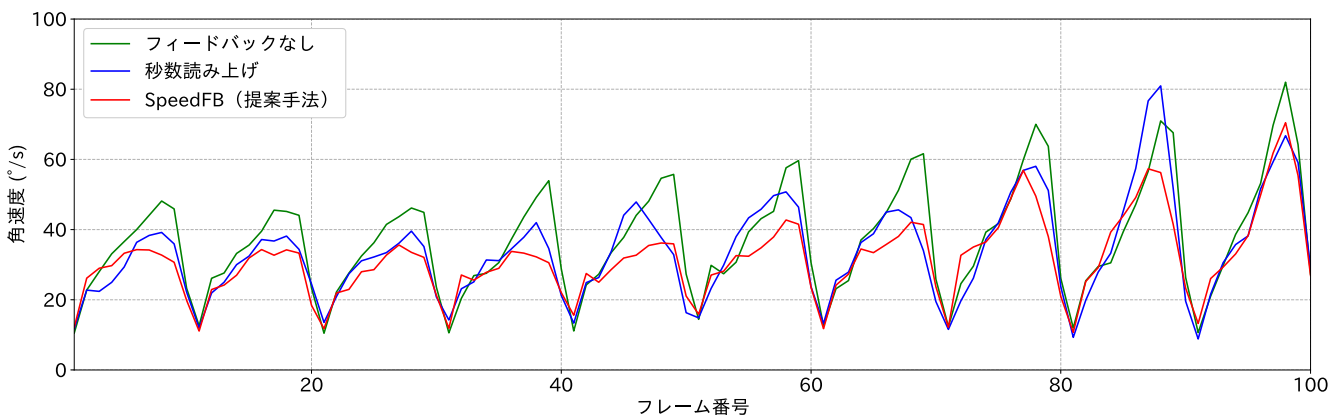


図7 3セット目における10回分の角速度変化

Fig. 7 Angular velocity changes across the ten repetitions in the third set.

意差は認められなかった。このことから、全体としては各条件間で動作速度のばらつきに明確な差が生じたとはいえない。一方で、図 4 に示す 3 セット目の分析では、条件間に有意差が認められた。事後比較の結果、SpeedFB 条件はフィードバックなし条件と比較して速度の標準偏差が有意に小さかった。これは、筋疲労が蓄積する場面においても、速度に基づく連続的な音フィードバックが動作の揺らぎを抑制し、一定の速度を維持する支援として機能した可能性を示唆している。一方、秒数読み上げ条件とフィードバックなし条件との間には有意差は認められなかった。秒数読み上げ条件では、実験参加者が「指定された秒数内に動作を終える」という課題要求が強く、カウントに注意が向きやすいことから、動作中の速度を均一に保つことが難しくなる参加者がいた可能性が考えられる。

これらの結果から、速度に基づく聴覚フィードバックは、エキセントリック局面の動作時間を延長し、動作中の速度の揺れ幅を小さく保つうえで有効に作用する可能性が示された。特に筋肉への疲労が高まる状況においても一定の均一性が保たれていたことから、実際のトレーニング場面においても、安定したエキセントリック動作を支援するツールとなりうる可能性がある。

5. 実験 2：速度・位置フィードバックの比較

5.1 概要

実験 2 では、提案手法である SpeedFB（速度指標に基づく聴覚フィードバック）と、代替手法である PositionFB（位置指標に基づく聴覚フィードバック）とを比較し、それぞれの特性と有効性を検証する。SpeedFB は、リアルタイムの動作速度に応じて音を動的に変化させるのに対し、PositionFB は腕の位置に基づいて段階的に音を提示する。本実験では、実験参加者が両条件下でエキセントリックトレーニングを実施し、動作速度およびその一貫性に着目して分析を行った。これにより両フィードバック手法が動作制御に与える影響を比較検討する。

5.2 実験条件

本実験では、実験参加者は以下の 2 種類の聴覚フィードバック条件下でエキセントリックトレーニングを実施した。

- (1) **SpeedFB 条件（提案手法）**：動作速度に基づいてフィードバックを提示する条件（詳細は 3 章を参照）。
- (2) **PositionFB 条件**：腕の位置に基づいて段階的な音によるフィードバックを提示する条件。具体的には、スマートウォッチから取得されるロール角に基づいて動作範囲を 8 段階に分割し、各段階に異なる音高（ピッチ）を対応させた。動作開始時（腕が屈曲した状態）には C（261 Hz）、動作終了時（腕を完全に伸ばした状態）には 1 オクターブ上の C'（523 Hz）が再生された。ピッチは段階の移行に応じてリアルタイムに変化

し、実験参加者は音の上昇によって動作の進行状況を知覚できる。各段階の動作時間を一定に保つことを意識することで、動作速度の一貫性が向上することが期待される。

5.3 仮説

実験 2 では、以下の仮説を検証する。

- (1) SpeedFB は、PositionFB と比較して、より適切な動作時間を実現する。
- (2) PositionFB は、SpeedFB よりも動作速度のばらつきを低減させる。

5.4 実験参加者と使用機器

本実験には、24 名の実験参加者（男性 18 名、女性 6 名、年齢範囲：20～24 歳）が参加した。すべての実験参加者に対して、実験開始前にエキセントリックトレーニングの正しい実施方法を理解し適切に動作をできるように、練習セッションを実施した。練習後による疲労が報告された実験参加者については、十分な休息時間を設け、回復が不十分な場合は日程を変更した。また、参加継続が困難と判断された場合には、自由に辞退できるよう配慮した。

使用機器は、実験 1（4.4 節）と同様であり、モーションデータの取得およびフィードバックには Apple Watch SE（第 2 世代）を使用した。トレーニング負荷は 1 RM の 80～90% に設定し、実験 1 で用いた可変式ダンベルを使用した。

5.5 実験手順

実験 1 と同様に、各セッションはエキセントリックトレーニングを 1 セット 10 回、計 3 セット実施した。本実験は実験者内比較を採用し、すべての実験参加者が SpeedFB と PositionFB の両条件を体験した。筋疲労の影響を最小限に抑えるため、各条件ごとに 3 回のセッションを実施し、合計 6 回のセッションを 1.5 週間以内に完了するように実施した。各セッション間には少なくとも 48 時間の間隔を設けた。各実験参加者は、いずれか一方の条件で 3 回連続でセッションを実施した後、残りの 3 回を他方の条件で行った。どちらの条件から開始するかは実験参加者ごとにランダムに割り当てた。

また、各トレーニングセッションの冒頭には、その日に提示される聴覚フィードバックに慣れることを目的とした練習時間を設け、システムの特性を理解した。

SpeedFB 条件では、実験参加者は自身の動作速度に応じて変化する聴覚フィードバックの仕組みを理解するための練習を行った。3.2 節で述べたように、動作時間が 3 秒未満であった場合には「パワーが抜ける音」が再生され、動作の減速を促す。一方、3 秒を超えた場合には「チャージ音」が再生され、適切な速度の維持が促されるよう設計されている。ただし、動作が極端に遅くなるのを防ぐため、

チャージ音は5秒を超えると自動的に停止する。これにより、実験参加者を目標範囲である3～5秒に収めやすくなるよう支援されている。各実験参加者には、複数回の反復動作を通じてフィードバックの反応を体験させ、実際に動作速度を調整しながら練習を行わせた。この過程を通じて、実験参加者はフィードバックの仕組みに対する直感的な理解を深め、3～5秒の目標範囲内で動作を維持する感覚を習得した。

PositionFB 条件では、3～5秒の範囲で動作を行った際に対応する音の高さの変化を理解することが重要であった。そのため、トレーニング前に、実験参加者は3秒、4秒、5秒の所要時間でダンベルを下ろす動作を行い、それに対応する音高の変化を聞きながら練習を行った。この練習は、目標時間内の動作にともなう音の変化に慣れ、3～5秒の範囲で動作を実施する感覚を養うことを目的としていた。

指定されたフィードバック条件での練習を終えた後、実験参加者はウォームアップを行い、実験1(4.5節)と同様の手順に従って、3セットのトレーニングを実施した。

各トレーニングセッション終了後、実験参加者には、フィードバック手法に関する主観的評価として、動作の難易度、フィードバックの有用性、およびトレーニングの楽しさについて簡易なアンケートに回答させた。また、各フィードバック条件に対して3セッションすべてを終了した後は、音に対する印象や不快感の有無、全体的な感想などについて自由記述形式で回答を求めた。これらのデータは、ユーザ体験を評価するとともに、今後のフィードバックシステムの改善点を検討するために収集された。

5.6 評価指標

実験2においても、実験1と同様に、エキセントリック局面の動作時間および動作速度の一貫性、およびフィードバック手法に対する主観的評価の3指標を用いて、フィードバックの効果を評価した。

5.7 結果

本実験には24名の実験参加者が募集されたが、練習セッションにおいて疲労が続いた3名については、セッションの延期後も十分な回復が見られなかったため、最終的に実験から除外した。その結果、21名の実験参加者(男性16名、女性5名)が実験を完了した。各実験参加者は1セッションにつき3セットのトレーニングを、計6セッションにわたって実施したため、合計で378件のデータ(21×6×3=378)が取得された。ただし、本実験も参加者内比較であるため、統計解析は参加者単位で実施した。具体的には、各参加者について各条件における9セットの値を平均し、1条件あたり1つの代表値を算出した。したがって、条件間比較におけるサンプル数は21となった。また、計測ミスがあった4セットについては反復動作が9回

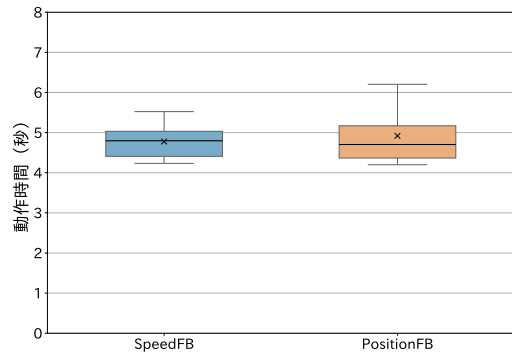


図8 エキセントリック局面における動作時間

Fig. 8 Duration of the eccentric phase.

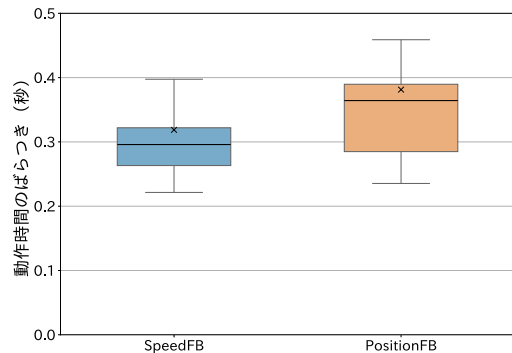


図9 エキセントリック局面における動作時間のばらつき

Fig. 9 Variability in movement duration during the eccentric phase.

分のみであり、当該セットでは記録された9回分の平均値を算出し、セットの代表値とした。なお、エキセントリック局面の抽出方法は、4.7節で述べた手法と同様である。

図8は、各フィードバック条件におけるエキセントリック局面の動作時間を示した箱ひげ図である。まず、中央値の差を検討するために、参加者内比較としてWilcoxonの符号付順位検定を実施した。その結果、SpeedFB条件とPositionFB条件の間に有意な差は認められなかった($p = 0.47$, $r = 0.16$)。中央値は、SpeedFB条件で4.80秒、PositionFB条件で4.70秒あり、両条件の差は0.10秒と非常に小さかった。次に、動作時間のばらつきに着目し、各参加者における動作時間の標準偏差を算出して条件間で比較を行った。図9は、各フィードバック条件における動作時間のばらつきを示した箱ひげ図である。Wilcoxonの符号付き順位検定の結果、SpeedFB条件の中央値は0.296秒、PositionFB条件は0.364秒であり、SpeedFB条件の方が小さい傾向が見られた。しかし、この差は統計的に有意ではなかった($p = 0.076$, $r = 0.39$)。この結果から、「SpeedFBはPositionFBと比較して、より適切な動作時間を実現する」という仮説は、動作時間の観点からは支持されなかった。しかし、動作時間のばらつきに関してはSpeedFB条件で小さくなる傾向が示されたことから、時間制御の安定性という観点では部分的に支持された可能性が

表 1 SpeedFB 条件と PositionFB 条件における主観評価の記述統計量

Table 1 Descriptive statistics of subjective ratings for the SpeedFB and PositionFB conditions.

質問項目	SpeedFB				PositionFB			
	mean	median	SD	IQR	mean	median	SD	IQR
この回の動作はどれくらい難しかったですか？ (1:簡単~5:難しい)	3.03	3.00	1.13	2.00	3.16	3.00	0.95	2.00
音が鳴っていることで、動作のスピードを意識しやすかったですか？	4.60	5.00	0.56	1.00	4.34	4.00	0.81	1.00
音によって動作をコントロールしやすいと感じましたか？	4.40	5.00	0.74	1.00	3.95	4.00	0.88	0.75
ターゲットとしている筋肉に「効いた」と感じましたか？	4.36	5.00	0.78	1.00	4.08	4.00	0.74	1.00
音があることで、動作に集中しやすくなりましたか？	4.44	5.00	0.67	1.00	4.05	4.00	0.61	0.00
この回のトレーニングは楽しかったですか？	4.53	5.00	0.70	1.00	4.39	5.00	0.73	1.00
トレーニングをまたやりたいと思いますか？	4.39	5.00	0.78	1.00	4.32	5.00	0.90	1.00

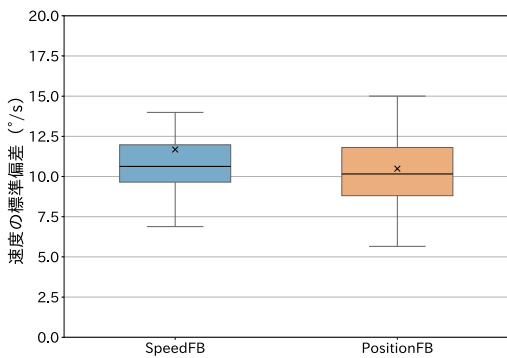


図 10 エキセントリック局面における速度の標準偏差

Fig. 10 Standard deviation of velocity during the eccentric phase.

ある。

図 10 は、各フィードバック手法における動作速度の標準偏差を示した箱ひげ図である。標準偏差は、エキセントリック局面の角速度データに基づいて算出した。2 条件間の比較には、Wilcoxon の符号付順位検定を用いた。その結果、有意な差は認められなかった ($p = 0.24$, $r = 0.26$)。中央値は SpeedFB 条件が $10.63^\circ/\text{s}$ 、PositionFB 条件は $10.16^\circ/\text{s}$ であり、PositionFB の方がわずかに小さく、ばらつきを抑制するという仮説と整合的な傾向が見られた。ただし、効果量は小から中程度にとどまっていることから、その大きさは限定的であり、両条件の実質的な差は小さいと考えられる。

各トレーニングセッション終了後、実験参加者は、各フィードバック手法に関する主観の評価アンケートに回答した。アンケートでは、動作の難易度、フィードバックの有用性、運動中の集中度、およびトレーニングの楽しさについて、5 段階のリッカート尺度 (1:まったくそう思わない~5:非常にそう思う) により評価を行った。さらに、音に対する印象、不快感の有無、全体的なフィードバック

に関する自由記述式の見聞も収集した。主観評価は順序尺度であるため中央値および四分位範囲を用いた分析を行った。中央値に基づく傾向は平均値とも整合的であったため、表 1 では平均値・中央値・標準偏差・四分位範囲の記述統計量を併記して報告する。

本分析も実験 1 と同様に、順序尺度データであることを考慮し、条件間の比較に Wilcoxon の符号付順位検定を用いた。その結果、「音によって動作をコントロールしやすいと感じましたか」、「音があることで、動作に集中しやすくなりましたか」において有意差が認められた ($p < .01$)。前者の項目では、SpeedFB 条件が平均 4.40 点、PositionFB 条件が平均 3.95 点を示し、SpeedFB 条件の方が有意に動作制御をしやすいと評価された。また、後者の項目においても、SpeedFB 条件が平均 4.44 点、PositionFB 条件が平均 4.05 点を示し、SpeedFB 条件の方が有意に動作に集中しやすいと評価された。一方、動作の難易度、筋肉に効いた感覚、およびトレーニングの楽しさについては有意な差は認められなかった。

自由記述の結果からは、両手法において「フィードバック音に注意が向くことで、狙っている筋肉への意識が薄れた」と感じた意見が 2 件あった。一方で、「音に意識を向けることで動作への過度な集中が緩和され、心理的な負担が軽減された」との意見も 1 件あった。また、聴覚フィードバックがトレーニング中の動作意識やモチベーションの維持に役立つ点は共通しており、ポジティブな評価は SpeedFB 条件で 21 人中 19 件、PositionFB 条件で 11 件得られた。これらの結果から、SpeedFB 手法は特に動作制御と集中の維持の側面において有効である可能性が示唆された。

5.8 考察

図 8 に示されるように、SpeedFB および PositionFB の

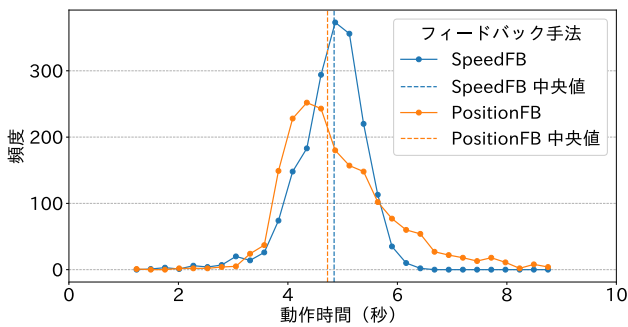


図 11 エキセントリック局面における動作時間のヒストグラム
Fig. 11 Histogram of movement duration during the eccentric phase.

いずれにおいても、エキセントリック局面の中央値は推奨される 3~5 秒の範囲内に収まっていた、Wilcoxon 検定の結果、動作時間の中央値に有意差は認められず、両フィードバック手法は目標時間の達成という観点では同程度に有効であったといえる。一方で、動作時間のばらつきに着目すると (図 9)、SpeedFB 条件の標準偏差は PositionFB 条件よりも小さい傾向が見られた ($p = 0.076, r = 0.39$)。この差は統計的有意差には至らなかったものの、中程度の効果量が観察されたことから、速度に基づく連続的なフィードバックが時間制御の安定性を高める可能性が示唆される。また、参加者すべての試行を示したヒストグラム (図 11) を見ると、SpeedFB では 3~5 秒付近に比較的集中しているのに対し、PositionFB では分布がやや広がる傾向が確認された。特に、PositionFB では 6 秒を超える試行が一定数含まれており、各試行間のばらつきが大きくなっていった可能性がある。この要因の 1 つとして、PositionFB では動作が極端に遅い際のフィードバックが存在せず、実験参加者が自分で修正を行うことが難しかった点があげられる。一方、SpeedFB ではチャージ音の再生時間が最大 5 秒に制限されており、動作が過度に遅くなった場合には音の終了によって実験参加者がそれを認識し、自発的に速度を調整できるようになっていた。これらの結果は、SpeedFB の方が動作時間を最適な範囲に維持するうえで効果的であったことを示唆している。

PositionFB 条件において過度に長い動作が頻繁に見られた一因として、負荷が不十分であった可能性も考えられる。本実験では 1RM に基づいて負荷設定を行ったものの、推定値の誤差や、複数週にわたる実験期間中の筋力向上により、一部の実験参加者にとっては負荷が軽くなっていった可能性がある。その結果、疲労を感じることなく非常にゆっくりとした反復動作が可能となり、各音の変化を丁寧に確認しながら動作を進めたことで、動作時間が長い反復が増加した可能性がある。

全体として、SpeedFB は動作時間のばらつきを抑制する傾向を示し、安定したペースの維持に寄与する可能性が示唆された。PositionFB は、丁寧にゆっくりとした動作を促

す一方で、目標とする時間範囲の上限を超える動作に対する制御は参加者に委ねられていたと考えられる。今後の研究では、個々に適した負荷設定の精度を高めることで、両手法の特性をより明確に比較できるようにする必要がある。

図 10 に示すように、PositionFB では SpeedFB よりもわずかに動作速度のばらつきが小さい傾向が見られたが、この差は統計的に有意ではなかった。したがって、この結果からは、両フィードバック手法の間で動作速度のばらつきに明確な差があるとはいえない。ただし、PositionFB では腕の位置に基づく段階的な音の変化が与えられるため、動作の進行状況を離散的に把握しやすいという特性がある。このような構造が、反復動作の速度制御に何らかの影響を与えた可能性は考えられる。一方で、SpeedFB も時間経過にともなう音の変化を含んでおり、両条件で同程度の速度の一貫性が得られていたことは、連続的な音響フィードバックが一定の速度制御を支援していた可能性を示唆している。

これらの結果をふまえると、本実験においては、SpeedFB および PositionFB のいずれも、目標とする動作時間範囲内でのトレーニングを可能にしていたといえる。一方で、動作時間や速度のばらつきに関しては、両条件間で明確な統計的差は確認されなかった。両手法は異なる設計原理に基づいており、PositionFB は位置に基づく段階的フィードバック、SpeedFB は速度に基づく連続的フィードバックという特徴を持つ。今回の結果では両者の効果は概ね同程度であったが、異なる感覚の手がかりを提供するという点で、将来的には目的に応じた使い分けや組合せの可能性も考えられる。

6. 統合考察

本章では、2つの実験で得られた結果をもとに、各フィードバック手法の特性や効果を整理し、相互の違いや補完関係について考察する。

まず、SpeedFB は実験 1 において、特に筋肉に疲労が蓄積する 3 セット目においても動作の加速を抑制する傾向が示され、動作速度の維持に寄与する可能性が示唆された。リアルタイムに自身の動作速度がフィードバックされることで、ユーザは現在の速度を即座に把握でき、動作の調整が行いやすくなったと考えられる。一方、PositionFB は段階的な音の変化により動作進行を把握しやすい特徴を有していたが、実験 2 では動作時間およびそのばらつきにおいて SpeedFB との間に統計的な有意差は認められなかった。これは、速度に基づく連続的フィードバックである SpeedFB も、段階的構造を持たないにもかかわらず、同程度の時間制御の安定性を実現していたことを示している。

全体として、両フィードバック手法はいずれも目標時間範囲内での動作実行を可能にしており、異なる設計原理に基づきながらも、同程度の速度制御支援効果を示したとい

える。今後は、トレーニング目的や個人特性に応じて適切なフィードバック設計を検討する必要がある。

このような応用展開を見据えるうえでは、いくつかの課題も残されている。本研究では、短期的なセッションにおける効果のみを評価しており、長期的なトレーニング効果や学習の定着に対する影響は明らかになっていない。また、実験参加者の多くがトレーニング初心者であったため、経験者における有効性や負荷に対する反応が異なる可能性もある。さらに、本研究の限界として、実験参加者の性別構成が均等ではない点があげられる。実験1は男性のみ、実験2は男性16名・女性5名であった。筋力トレーニングにおいては、筋力や体格の違いが動作速度や安定性に影響する可能性があるため、今後は性差を考慮した分析やバランスの取れた被験者構成による検証が必要である。これらの点をふまえ、より実践的な環境における長期的かつ多様な対象者を含む検証が求められる。

さらに、本研究では速度制御という動作面の評価に焦点を当てており、トレーニング効果そのものを評価する、筋電図による筋活動は測定していない。そのため、聴覚フィードバックが動作速度の調整に寄与したとしても、それが筋力向上や筋肥大といったトレーニング効果にどの程度影響するかについては、本研究の結果から直接的に判断することはできない。今後は、筋活動の評価を用いて、フィードバックがトレーニング効果に与える影響を検証する必要がある。

7. 結論

本研究では、エキセントリックトレーニングにおける動作制御の支援を目的として、速度指標および位置指標に基づく2種類の聴覚フィードバック手法を設計し、その有効性を2つの実験により検証した。

その結果、SpeedFBは適切な動作時間でのトレーニングや速度の一貫性において安定した効果を示し、特に筋疲労が蓄積する状況下でも実用性が高いことが示唆された。一方、PositionFBは丁寧で緩やかな動作を促すという特性を持ち、フォーム重視のトレーニングにおける補助的な手法としての可能性が示された。

これらの結果は、両手法が補完的な特性を持ち、それぞれの強みを活かしたハイブリッド型の戦略が今後の研究課題として有望であることを示している。今後は、システムの継続的使用による長期的なトレーニング効果の影響の検証や、より実践的な応用を視野に入れたトレーニング経験者を対象とした有効性の検討が求められる。

参考文献

- [1] Hermann, T., Hunt, A. and Neuhoff, J.G.: *The Sonification Handbook*, Logos Verlag, Berlin, Germany (2011).
- [2] Dubus, G. and Bresin, R.: A Systematic Review of Mapping Strategies for the Sonification of Physical Quantities, *PLOS ONE*, Vol.8, No.12, p.e82491 (2013).
- [3] Bernardi, N.F., Müllensiefen, D., Keller, P.E. and Bella, S.D.: A Review on the Relationship Between Sound and Movement in Sports and Rehabilitation, *Frontiers in Psychology*, Vol.10, p.244 (2019).
- [4] Effenberg, A.O., Fehse, U., Schmitz, G., Krueger, B. and Mechling, H.: Movement Sonification: Effects on Motor Learning beyond Rhythmic Adjustments, *Frontiers in Neuroscience*, Vol.10, p.219 (2016).
- [5] Matsubara, M., Kadone, H., Iguchi, M., Terasawa, H. and Suzuki, K.: The effectiveness of auditory biofeedback on a tracking task for ankle joint movements in rehabilitation, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol.31, No.4, pp.341–348 (2013).
- [6] Hortobágyi, T., Hill, J.J., Houmard, D., Fraser, R.F., Lambert, R. and Israel, F.H.: Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans, *Journal of Applied Physiology*, Vol.80, No.3, pp.765–772 (1996).
- [7] Hollander, D.B., Kraemer, R.R., Kilpatrick, M.W., Ramadan, Z.G., Reeves, G.V., Francois, M., Hebert, E.P. and Tryniecki, J.L.: Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise, *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.21, No.1, pp.34–40 (2007).
- [8] Schoenfeld, B.J., Ogborn, D. and Krieger, J.W.: Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-analysis, *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.31, No.9, pp.2599–2608 (2017).
- [9] Sato, S., Yoshida, R., Murakoshi, F., Sasaki, Y., Yahata, K., Kasahara, K., Nunes, J.P., Nosaka, K. and Nakamura, M.: Comparison between concentric-only, eccentric-only, and concentric-eccentric resistance training of the elbow flexors for their effects on muscle strength and hypertrophy, *European Journal of Applied Physiology*, Vol.122, No.12, pp.2607–2614 (2022).
- [10] Bubbico, A. and Kravitz, L.: Eccentric Exercise: A Comprehensive Review of a Distinctive Training Method, *IDEA Fitness Journal*, Vol.7, No.9, pp.50–59 (2010).
- [11] Yang, J. and Hunt, A.: Sonic Trainer: Real-Time Sonification of Muscular Activity and Limb Positions in General Physical Exercise, *Proc. 4th Interactive Sonification Workshop*, Erlangen, Germany (2013).
- [12] Oishi, R. and Nakamura, S.: Comparison of Speed-based and Position-based Auditory Feedback in Eccentric Strength Training, *Proc. 30th International Conference on Auditory Display* (2025).
- [13] Khan, M.U., Shah, K.A. and Qadeer, S.: Weight Training Analysis of Sportsmen with Kinect Bioinformatics for Form Improvement, arXiv preprint arXiv:2009.09776 (2020).
- [14] Chen, S. and Yang, R.R.: Pose Trainer: Correcting Exercise Posture using Pose Estimation, arXiv preprint arXiv:2006.11718 (2020).
- [15] Yang, J. and Hunt, A.: Real-time Sonification of Biceps Curl Exercise Using Muscular Activity and Kinematics, *Proc. 21st International Conference on Auditory Display* (2015).
- [16] Murgia, M., Sors, F., Vono, R., Muroli, A.F., Delitala, L., Corrado, D.D. and Agostini, T.: Using auditory stimulation to enhance athletes' strength: An experimental study in weightlifting, *Review of Psychology*, Vol.19,

- No.1, pp.13–16 (2012).
- [17] Ramezanzade, H., Khosravani, K., Yalfani, A. and Norasteh, A.A.: The Effect of Sonification Modelling on Perception and Accuracy of Performing Jump Shot Basketball, *International Journal of Sport Studies*, Vol.4, No.7, pp.835–840 (2014).
- [18] Godbout, A. and Boyd, J.: Corrective Sonic Feedback for Speed Skating: A Case Study, *Proc. 16th International Conference on Auditory Display* (2010).
- [19] Agostini, T., Righi, G., Galmonte, A. and Bruno, P.: The Relevance of Auditory Information in Optimizing Hammer Throwers' Performance, *Biomechanics and Sports*, Pascolo, P.B. (Ed.), pp.67–74, Springer (2004).
- [20] Konttinen, N., Mononen, K., Viitasalo, J. and Mets, T.: The Effects of Augmented Auditory Feedback on Psychomotor Skill Learning in Precision Shooting, *Journal of Sport and Exercise Psychology*, Vol.26, No.2, pp.306–316 (2004).
- [21] Elvitigala, D.S., Matthies, D.J., David, L., Weerasinghe, C. and Nanayakkara, S.: GymSoles: Improving Squats and Dead-Lifts by Visualizing the User's Center of Pressure, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, pp.1–12, Association for Computing Machinery (2019).
- [22] Stien, N., Andersen, V., Engelsrud, G.H., Solstad, T.E.J. and Saeterbakken, A.H.: The effects of technological and traditional feedback on back squat performance in untrained women, *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, Vol.14, No.163 (2022).
- [23] Ronsse, R., Puttemans, V., Coxon, J.P., Goble, D.J., Wagemans, J., Wenderoth, N. and Swinnen, S.P.: Motor learning with augmented feedback: Modality-dependent behavioral and neural consequences, *Cerebral Cortex*, Vol.21, No.6, pp.1283–1294 (2011).
- [24] 長谷川直哉, 萬井太規, 武田賢太, 佐久間萌, 笠原敏史, 浅賀忠義: 視覚フィードバックと聴覚フィードバックによる動的バランスの学習効果の違い, *理学療法学*, Vol.42, No.6, pp.474–479 (2015).



中村 聡史 (正会員)

1976年生。2004年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年独立行政法人情報通信研究機構専攻研究員。2006年京都大学大学院情報学研究科特任助手, 2009年同特定准教授, 2013年明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科准教授, 2018年同教授, 現在に至る。サーチとインタラクシオンや, ネットバレ防止技術, 平均手書き文字等の研究活動に従事。博士(工学)。



大石 琉翔

2002年生。2024年明治大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科卒業。同大学大学院先端数理学部研究科博士前期課程在学中。エキセントリックトレーニング中の動作制御を支援するインタラクティブな聴覚フィードバック手法の開発に従事。学士(工学)。