

明治大学大学院

2025年度 修士論文

論文題名 エキセントリック動作速度の安定性を高める

聴覚フィードバック手法の研究

先端数理科学研究科 先端メディアサイエンス専攻

指導教員名 中村 聡史

本人氏名 大石 琉翔

2025年度 修士学位請求論文

エキセントリックトレーニングの動作速度の
安定性を高める聴覚フィードバック手法の研究

明治大学大学院先端数理科学研究科
先端メディアサイエンス専攻

大石 琉翔

Master's Thesis

Study on an Auditory Feedback Method to Improve
Stability of Movement Speed in Eccentric Training

Frontier Media Science Program,
Graduate School of Advanced Mathematical Sciences,
Meiji University

Ryuto Oishi

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。特にダンベルなどの重量を3~5秒かけてゆっくりと下ろすことが効果的といわれているが、実際のトレーニングでは、筋疲労によって徐々に動作が速くなり、適切な速度を維持することが難しい。そこで本研究では、動作速度に応じて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聴覚フィードバックシステムを提案した。具体的には、適切な速度ではチャージ音を再生して速度の維持を促し、速度が速くなった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して速度の減速を促す。これにより、ユーザが自身の動作速度を感覚的に把握し、適切に調整できることを狙う。提案手法の有効性を検証するため、まずは従来手法である秒数読み上げおよびフィードバックなし条件との比較を行った。その結果、提案手法は動作時間を増加させ、疲労が蓄積するセット後半においても動作速度を抑制する効果が得られた。また、主観評価において「楽しさ」や「継続意欲」の向上が示された。次に、腕の位置に応じて音階を変化させる位置指標を用いたフィードバックとの比較を行った。その結果、位置指標によるフィードバックでは動作時間が過度に長くなる傾向やばらつきがみられたのに対し、提案手法の速度指標では目標とする時間範囲内で安定したトレーニング動作が可能であることが明らかになった。最後に、提案手法の長期的な効果と、フィードバックがなくなった状態でもその効果が保持されるかを検証した。実験では1ヶ月間にわたり、フィードバックあり・なしのトレーニングを交互に行い、動作の変化を計測した。その結果、システムの長期的な使用によりフィードバックがない状態でも動作時間の増加とばらつきの減少が確認され、フィードバックによって動作制御が保持されることが明らかになった。以上の結果から、提案した聴覚フィードバック手法は、一時的な動作支援のみならず、ユーザ自身が速度感覚を身につける助けとなり、エキセントリックトレーニングの質を向上させる有効な手段であることが示唆された。

Abstract

Eccentric training, which involves muscle lengthening from a contracted state, requires an appropriate movement speed to maximize training effectiveness. Specifically, lowering a weight, such as a dumbbell, slowly over 3 to 5 seconds is considered effective. However, in actual training, muscle fatigue often causes movement to unintentionally accelerate, making it difficult to maintain the proper speed. To address this, we propose an auditory feedback system that uses a "charging sound," inspired by sci-fi games, to indicate movement speed. Specifically, the system plays a charging sound to encourage speed maintenance when the speed is appropriate, and a "power-down" sound, evoking a loss of energy, to prompt deceleration when the movement becomes too fast. This design aims to allow users to intuitively grasp and adjust their movement speed.

To verify the effectiveness of the proposed method, we first compared it with traditional methods: a numerical count method and a no-feedback condition. The results showed that the proposed method increased movement duration and effectively suppressed the increase in movement speed, even in the latter half of sets where fatigue accumulates. Additionally, subjective evaluations indicated improvements in "enjoyment" and "willingness to continue."

Next, we compared the proposed speed-based feedback with a position-based feedback method that changes pitch according to arm position. The results revealed that while the position-based feedback tended to result in excessively long movement times and variability, the proposed speed-based method enabled stable training movements within the target time range.

Finally, we examined the long-term effects of the proposed method and whether these effects are retained even when feedback is removed. We measured movement changes over one month, alternating between training with and without feedback. The results confirmed that long-term use of the system led to increased movement duration and reduced variability even in the absence of feedback, demonstrating that movement control

is retained. These results suggest that the proposed auditory feedback method is an effective means of improving the quality of eccentric training, not only by providing temporary support but also by helping users acquire a sense of speed themselves.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	筋力トレーニングの普及と課題	1
1.2	エキセントリックトレーニング	1
1.3	感覚フィードバックを用いた運動支援	2
1.4	研究目的	3
1.5	本稿の構成	4
第2章	関連研究	5
2.1	筋力トレーニングの支援に関する研究	5
2.2	聴覚フィードバック・ソニフィケーションに関する研究	6
2.3	エキセントリック収縮に関する研究	8
第3章	提案システム	9
3.1	システムの概要	9
3.2	聴覚フィードバックの速度アルゴリズム	9
3.3	フィードバック音のデザイン	10
3.4	ユーザインタフェース	11
第4章	従来手法との比較による効果音フィードバック手法の有用性検証	13
4.1	概要	13
4.2	実験設計	13
4.2.1	条件	13
4.2.2	実験参加者と使用機器	14
4.2.3	実験手順	14
4.3	評価指標	15
4.4	結果	16
4.4.1	動作時間	16

4.4.2	動作速度の一貫性	17
4.4.3	主観評価	18
4.5	考察	20
4.5.1	動作時間・速度への影響	20
4.5.2	速度の安定性への影響	21
第5章	速度指標と位置指標の比較による効果音フィードバックの検討	23
5.1	概要	23
5.2	実験設計	23
5.2.1	条件	23
5.2.2	実験参加者と使用機器	24
5.2.3	実験手順	25
5.3	評価指標	26
5.4	結果	26
5.4.1	動作時間	27
5.4.2	速度の一貫性	27
5.4.3	主観評価	28
5.5	考察	29
5.5.1	動作時間に関する考察	29
5.5.2	速度の一貫性に関する考察	30
第6章	効果音フィードバックの長期使用における動作制御の保持効果検証	32
6.1	フィードバック依存と動作制御の保持	32
6.2	概要	32
6.3	実験設計	33
6.3.1	実験デザイン	33
6.3.2	実験参加者と使用機器	33
6.3.3	実験手順	33
6.4	結果	34
6.4.1	分析手法	35
6.4.2	フィードバックなしセッションにおける動作の変化	35
6.4.3	フィードバックありセッションにおける動作の変化	37

6.4.4	主観評価の結果	40
6.5	考察	41
6.5.1	フィードバックがない状況での保持に関する考察	41
6.5.2	フィードバックありセッションにおける動作特性の考察	42
6.5.3	トレーニング経験の有無に関する考察	43
第7章	総合考察	45
7.1	エキセントリックトレーニングにおける効果音フィードバックの有効性	45
7.2	長期使用による動作制御の保持	46
7.3	制約	47
第8章	結論	48

第1章 はじめに

1.1 筋力トレーニングの普及と課題

20代から30代を中心に筋力トレーニング（以下、筋トレ）への関心が高く [1,2]，実施人口も増加している [3]。筋トレは，健康維持や美容の目的で幅広い世代に支持されており，ジムや自宅など多様な環境で行われている [4]。筋トレの実施方法としては，トレーニング指導者による指導のもとで行う形式だけでなく，自宅やジムにおいて個人で自由に行う形式も一般的である。こうした中，Anytime Fitness¹やchocoZAP²といったセルフ型ジムの普及によって，ひとりで筋トレを行う機会が増加している。ここで，個人で筋トレを行う場合，適切なフォームや動作速度を維持することが難しく，トレーニングの効果を十分に引き出すのが容易ではない。例えば，フォームの崩れにより狙った部位以外の筋肉を使ってしまったり，本来一定の速度を維持すべき運動で動作速度が速くなってしまったりすることが問題として挙げられる。これらの問題は，トレーニング効果の低下や怪我のリスク増大にもつながる。

1.2 エキセントリックトレーニング

筋トレの中でも，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。この動作は，ダンベルを持ち上げるコンセントリック動作と，ダンベルを下ろすエキセントリック動作から構成される。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動作は，コンセントリック動作に比べて1.2～1.5倍の力を発揮できることが報告されており [5-7]，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 [8-11]。エキセントリック動作を主として行うトレーニングはエキセントリックトレーニングと呼ばれ，効率的な筋力向上や筋肥大を促すトレーニング方法として注目される。このエキセントリック動作の効果を最大化するためには，3～5秒程度のゆっくりとした速度で動作することが推奨される [12]。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，回数を重ねるにつれて動作が徐々に速くなって

¹<https://www.anytimefitness.co.jp/>

²<https://chocozap.jp/>

しまうのが問題として挙げられる。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。そのため、エキセントリック動作の速度を安定的に維持するための支援が必要である。

1.3 感覚フィードバックを用いた運動支援

これまで、運動中の動作制御や学習を支援するために、視覚、触覚、聴覚などさまざまな感覚を利用したフィードバック手法が提案されている。例えば、視覚フィードバックを用いた筋力トレーニングの支援では、動作を計測して画面上に可視化することで、フォームのずれや速度を即座に確認できるようにする手法が報告されている [13, 14]。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、提示された情報への依存が生じやすいことが指摘されている [15]。また、長谷川ら [16] も、視覚フィードバックによって練習直後の成績向上が得られるものの、その効果は一時的であると同時に保持効果も乏しく、自立した運動制御の獲得にはつながりにくいことを報告している。

このような課題を背景に、触覚フィードバックを用いた運動支援の研究も行われている。Sigrist ら [17] は、運動学習における視覚、聴覚、触覚フィードバックを包括的に比較し、触覚フィードバックは身体への直接的な刺激を通して動作を支援できる利点がある一方で、リアルタイム性や提示できる情報量に限界があることを明らかにした。Ilhan ら [18] は、筋力トレーニング中の姿勢修正を目的とした触覚フィードバックデバイスを開発し、誤った姿勢を振動で警告する手法を提案している。姿勢修正には有効であったが、振動刺激の弱さなどの刺激の識別性に課題があると報告されている。

一方で、聴覚フィードバックは、画面を見る必要がないため、視線を動作から離すことなく、運動に集中しながらフィードバックを受け取ることができる。Sigrist ら [17] は、聴覚フィードバックが時間的に変化する情報の提示に適しており、運動のリズムなど、動作の速度やタイミングを調整することに有用である可能性を示している。これに対し、Schaffert ら [19] は、スポーツやリハビリ領域において、運動中に提示される聴覚フィードバックが、動作タイミングや速度の安定化に実際に寄与していることを報告している。さらに、Ronsse ら [15] は、感覚フィードバックへの過度な依存が運動学習を阻害する可能性が指摘されている一方で、聴覚フィードバックは視覚フィードバックと比べて、フィードバックに過度に頼らない動作制御が形成されやすく、フィードバックがなくても動作を安定して行えるようになることが示唆されている。ただし、聴覚フィードバックの間

題として、音と動作の対応関係が複雑な場合にユーザは音の解釈に意識をとられてしまい、かえって認知的な負荷が高くなってしまう可能性がある [17]. そのため、聴覚フィードバックの導入においては、直感的に理解できる音のデザインが重要となる. これらの議論を踏まえると、筋活動への集中が求められる高負荷のエキシセントリック動作においては、視線移動を伴わず、連続的な情報を提示できる聴覚フィードバックが、視覚や触覚に比べて適したフィードバック手法であると考えられる.

1.4 研究目的

本節までに述べたように、エキセントリックトレーニングでは、ゆっくりとした速度を維持して動作することが重要であるが、その速度を維持することは容易ではない. そこで本研究では、エキセントリックトレーニングにおいて、適切な動作速度を維持できるよう支援するため、動作中の腕の角速度に基づいてリアルタイムに効果音を提示する聴覚フィードバック手法を提案する. 本手法では、動作速度の状態を直感的に理解できるよう、意味づけされた効果音を用いてフィードバックを行う点に特徴がある.

本研究の目的は、提案する聴覚フィードバック手法が、エキセントリック動作における速度制御およびその安定性に与える影響を明らかにすることである. そのために、まず提案手法と、秒数を読み上げる手法、およびフィードバックを提示しない条件をそれぞれ比較し、離散的な時間提示と比べた場合の有効性を検証する. 次に、提案手法である速度に応じて効果音を提示する速度指標のフィードバックと、腕の位置に応じて音階を提示する位置指標のフィードバックを比較し、聴覚フィードバックにおいて、どのような指標が動作速度の維持に適しているかを明らかにする.

さらに、本研究では、聴覚フィードバックによって調整された動作が、フィードバック提示中の一時的な効果にとどまらず、フィードバックが提示されない状態においても維持されるかに着目する. そのため、提案手法を用いたトレーニングを1ヶ月間継続して実施し、フィードバックを提示しない状況での動作を評価することで、長期的な使用による動作制御の保持について検証する.

これらの一連の実験を通じて、聴覚フィードバックがエキセントリックトレーニングにおける動作制御およびその保持に与える影響を明らかにし、最終的には、フィードバックに依存することなく、自立的に適切な速度で動作を行えるよう支援する手法の構築を目指す.

1.5 本稿の構成

本稿は、本章を含む全 8 章から構成される。本章では、筋力トレーニングの普及と課題を述べ、エキセントリックトレーニングにおける動作速度維持の重要性と、感覚フィードバックを用いた運動支援の有効性を整理したうえで、本研究の目的を示した。2 章では、本研究に関連する先行研究について述べ、筋力トレーニングや聴覚フィードバックに関する既存の知見を整理する。3 章では、動作速度に基づいてリアルタイムに効果音を提示する聴覚フィードバック手法の設計および実装について述べる。4 章では、効果音フィードバック（提案手法）、秒数読み上げ、およびフィードバックなし条件の 3 条件を比較した実験について述べ、提案手法が従来の秒数提示手法と比べて動作速度の制御に有効であるかを検証する。5 章では、速度指標を用いている効果音フィードバック（提案手法）と位置指標のフィードバックを比較した実験について述べ、聴覚フィードバックにおける指標の違いが動作速度の制御に及ぼす影響を明らかにする。6 章では、提案手法を用いた長期トレーニング実験について述べ、効果音フィードバックによる動作制御の保持効果を検証する。7 章では、3 つの実験結果を総合的に考察し、効果音フィードバックの有効性、また長期使用による動作制御の保持について議論する。最後に 8 章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について述べる。

第2章 関連研究

2.1 筋力トレーニングの支援に関する研究

筋トレの支援は、従来からさまざまな観点からアプローチされてきた。まず、トレーニングフォームの改善を目的とした研究では、動作を視覚化して適切な姿勢へ導く手法が用いられている。高久ら [20] は、Kinect によって骨格を推定し、腹筋運動のフォームを視覚的に提示することで、初心者でも正しい姿勢を習得できることを明らかにした。また、Khan ら [21] もスポーツ動作をリアルタイムに解析し、フォームの誤りを自動検出することで改善につながることを示している。さらに、Chen ら [22] は、関節推定技術と機械学習を組み合わせることで、フォームの適正度を判定し、具体的な改善点を提示する仕組みを開発した。実験では、4 種目でフォームを高精度に分類し、フォームの改善の有効性を示している。一方で、単なるフォーム改善にとどまらず、トレーニング効果を低下させる反動の抑制に着目した研究もある。嶋崎ら [23] は、深層学習を用いて姿勢と筋電位の関係から効いている筋肉を推定し、ダンベルカールにおける反動を抑制する効果を明らかにした。

ウェアラブルセンサを用いた動作や負荷の推定に関する研究も行われている。Takata ら [24] は、加速度・ジャイロセンサを身体の複数箇所に装着し、自重トレーニングの種目を高精度に識別できることを示すとともに、認識精度がセンサ位置に大きく依存することを明らかにした。また、Zhou ら [25] の研究では、布製センサを用いて筋活動を推定し、トレーニングの強度や質を評価する実験を行った。その結果、高い精度でトレーニング活動を認識することができ、トレーニングの改善に寄与する可能性を示している。さらに、Noteboom ら [26] は、トレーニング中の累積筋負荷を推定し、筋群ごとの負荷バランスや過負荷のリスクを可視化するアプリケーションを開発した。筋肉のバランスや筋負荷、筋肉痛の改善に寄与するかを調査したところ、フィードバックにより筋負荷のバランスが良くなり、トレーニングの効果が向上することを明らかにしている。

さらに、モチベーションの向上を目指すアプローチとして、トレーニングにゲーミフィケーション要素を取り入れる研究も行われている。深堀ら [27] は、自宅での筋トレにゲー

ム要素を導入することで継続意欲を高められることを示し、Yang ら [28] は、体幹トレーニングにゲーミフィケーションを組み込むことで、筋力や持久力が向上したことを明らかにした。Ozdamli ら [29] は、による系統的レビューでも、ゲーミフィケーションがフィットネス計画への意欲向上に寄与することが示されている。

このように従来の研究は、フォームの可視化、動作や負荷の推定、モチベーション向上といった多様な側面からトレーニングを支援している。一方、本研究ではエキセントリック動作において重要とされる動作速度に着目し、聴覚フィードバックを用いて適切な動作速度でのトレーニングを支援するものである。

2.2 聴覚フィードバック・ソニフィケーションに関する研究

聴覚フィードバックは、スポーツ動作やトレーニング技術の改善を目的として幅広く利用されている。まず、正しい動作が実行された瞬間に離散的な音を提示する手法が用いられている。Vorbeck ら [30] は、逆立ちの動作において正しい動作が取れた際に音を鳴らすことで学習が促進されることを示した。またダンス [31] やゴルフスイング [32,33] においても、正しい動作時にクリック音を与えることがパフォーマンス向上につながるということが明らかになっている。これらの手法は動作の正誤を即時的に知らせる点で有効である一方で、動作の進行状況や速度変化といった連続的な情報を把握するための支援としては十分ではない。

一方で、連続的な音の変化によって動作状態を提示する「ソニフィケーション」も広く研究されている。ソニフィケーションは、動作データを音の特徴（高さ、リズム、音量など）に変換してリアルタイムに提示することで、運動状態を聴覚的に把握できるようにする手法である。この手法は運動学習の促進に有効であることが示されており、複雑な運動スキルの習得 [34] やリハビリテーション課題の遂行改善 [35] など、多様な領域で効果が報告されている [19,36,37]。スポーツ分野では、奥川ら [38] がペダリング動作を音へマッピングすることでスキル向上に寄与することを示したほか、吉岡ら [39] は音楽テンポの調整によってランニング速度やバランスに影響を与えることを示しており、動作の連続的な調整を聴覚的に誘導する方法として有効性を示している。さらに、バスケットボールのジャンプシュート [40]、スピードスケート [41]、ハンマー投げ [42]、ライフル射撃 [43] といった競技でも、ソニフィケーションや聴覚フィードバックを用いた動作改善の効果が明らかにされている。

筋力トレーニング領域においても応用が進んでおり、Murgia ら [44] はベンチプレス

において動作と同期した音響刺激がパワー出力を向上させる可能性を示している。また、Lorenzoni ら [45] はウエイトリフティングに対して、背骨の曲がり量やバー軌道を、音質や聞こえる方向の変化として提示する手法を提案し、デッドリフトのフォーム改善に有効であることを明らかにしている。Yang ら [46] 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 [47]。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となる。

また、学術的な研究にとどまらず、一般消費者向けのフィットネス製品においても聴覚フィードバックの活用が進んでいる。例えば、任天堂の「リングフィットアドベンチャー」¹では、一部の運動において「チャージ音」のような効果音を再生することで、ユーザに対し直感的に動作の維持やタイミングを促すデザインが採用されている。このようなゲーミフィケーション要素を取り入れたフィードバックは、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意欲の向上や動作の安定化に寄与していると考えられる。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、特に本研究が対象とする高負荷のエキセントリック動作における有効性については明らかではない。

このような背景のもと、本研究は高負荷のエキセントリック動作における速度制御の安定化に着目し、聴覚フィードバックの有効性を検証することを目的とする。従来のソニフィケーションが動作データを音響パラメータへ連続的にマッピングする手法であるのに対し、本研究では速度が閾値を超えた際に「チャージ音」や「パワーが抜ける音」といった意味をもつ効果音を用いることで、緩やかな動作を促す点に特徴がある。また、高負荷トレーニングにおける筋疲労による速度のばらつきに着目し、効果音フィードバックが動作時間および速度の安定性に与える影響を明らかにする。これにより、実用面で先行している直感的な効果音を用いたアプローチが、実際の高負荷な動作の制御におい

¹<https://www.nintendo.com/jp/ring/index.html>

て有効であることを定量的に実証し、筋力トレーニングにおける新たな聴覚フィードバック手法の可能性を示すことを目指す。

2.3 エキセントリック収縮に関する研究

筋収縮は、アイソメトリック収縮（等尺性）とコンセントリック収縮（求心性）、エキセントリック収縮（遠心性）の3つに分類される。筋トレでは、これら組み合わせて動作が構成されるが、エキセントリック収縮は特に高い力発揮と効率的な筋肥大を引き起こす収縮様式として知られている。先行研究では、エキセントリック収縮が他の収縮様式と比較して筋力向上や筋肥大に優れることが繰り返し示されている。Sato ら [11] は、上腕二頭筋を対象に、エキセントリックのみ、コンセントリックのみ、および両者を組み合わせた3つのトレーニングを比較し、エキセントリックのみのトレーニングでも、総負荷が半減しているにもかかわらず同等の筋力増加と筋肥大が得られることを報告した。Hather ら [48] も、エキセントリックトレーニングが筋肥大・筋力向上の両面でより高いトレーニング効果を示すことを明らかにしている。同様の結果は多数報告されており、エキセントリック収縮が筋タンパク質合成やアナボリックシグナルの活性化を強く促すこと [49–53]、および筋繊維レベルで大きな機械的刺激を与えることが、その高い効果の背景にあるとされている [54–58]。さらに、エキセントリック動作はコンセントリック動作に比べて主観的負担が小さく、安全性も高いことから、リハビリテーションやスポーツにおけるパフォーマンス向上の観点でも注目されている [59,60]。

しかし、高負荷のエキセントリック動作は筋疲労により動作速度が不安定になりやすいという課題がある。速度が速くなりすぎると負荷が十分にかからず、逆に遅すぎると負荷が過剰となるため、適切な速度で動作を実行することが効果的なトレーニングにおいて重要となる。そこで本研究では、エキセントリックトレーニングの効果を高めるために、高負荷環境下でも適切な速度を維持できるよう支援する聴覚フィードバック手法を検討する。

第3章 提案システム

3.1 システムの概要

エキセントリックトレーニングは筋肥大や筋力向上において効果的だが、反復による筋疲労により動作が加速しやすく、推奨される3~5秒の速度を安定して維持することは容易ではない。そこで、本研究では、運動学習において有効とされる聴覚フィードバックに着目し、エキセントリック動作の速度安定化を支援する手法を設計した。

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、カール動作の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(図1)。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[12]をもとに定義している。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 聴覚フィードバックの速度アルゴリズム

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



図 1: 提案システムのイメージ図

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 $40^\circ/\text{s}$ 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 フィードバック音のデザイン

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。1.3 節で述べた通り、音と動作の対応関係が複雑な場合、ユーザは音の解釈に意識をとられてしまい認知負荷が高くなる可能性がある。ここで、フィードバックの手法としては言語による音声指示も考えられるが、本研究では脳への情報処理負荷を考慮し、非言語の効果音を採用した。Dang ら [61] は、緊急性の高い指示には言語フィードバックが有用である一方、継続的に把握すべき情報提示には、脳への負荷が低い効果音が適していることを示している。エキセントリックトレーニングは数秒間にわたり動作を制御し続ける必要があり、ユーザの注意資源の多くは筋活動に割かれる。そのため、言語処理を必要とする音声指示よりも、聴覚的に直感的な効果音を用いる方が、トレーニングへの集中を妨げずにリアルタイムな速度修正を

促せると考えた。そこで本システムでは、トレーニング動作に伴う身体感覚と、親和性の高い効果音を採用した。

具体的には、適切な動作速度が維持されている際に「チャージ音」をフィードバックとして用いている。一般的なトレーニングでは「持ち上げる（コンセントリック）」動作に意識が向きやすいが、本研究が対象とするエキセントリック（下ろす）動作は、重力に抗って筋肉を伸長させながら力を発揮する「耐える」プロセスである。この時、ユーザは単に脱力するのではなく、次の動作に向けて「エネルギーを抑制しながら溜める」という特有の身体感覚を抱く。そこでエネルギーが蓄積されるメタファーであるチャージ音は、この身体感覚を聴覚的に補強する役割を果たすと考えられる。ユーザは「音が鳴り続ける＝正解（耐えてエネルギーが溜まっている）」と直感的に解釈するため、その状態を維持しようとする心理的動機づけが働き、結果として音を途切れさせないための緩やかな動作が継続されると期待される。

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、筋活動の低下を無意識に認知させ、減速を促すことが期待される。無機質な警告音とは異なり、「力が抜けているため、ブレーキをかけなければならない」という具体的な動作修正のイメージを瞬時に想起させることで、反射的な減速を促す効果を狙う。

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。

3.4 ユーザインタフェース

本システムは、Apple Watch上で動作するユーザインタフェースを備えており、動作データの計測およびフィードバック提示を一体的に行えるよう設計されている。図2に示すように、画面上にはモード選択および計測操作を行うためのボタンが配置されている。

¹<https://se-factory.net/>

²<https://taira-komori.jpn.org/>



図 2: Apple Watch の UI 画面

画面上部には現在のフィードバックモードが表示されており、Apple Watch のデジタルクラウンを回転させることでモードを切り替えることが可能である。本研究では、提案手法である速度フィードバックに加え、実験における比較として後述する秒数読み上げ、位置指標のフィードバック、およびフィードバックなしの各モードも選択可能な構成としている。

画面中央には「START」ボタンが配置されており、これを押すことで動作データの計測およびフィードバックが開始される。計測中はボタンが「STOP」に変化し、再度押すことで計測を終了できる。計測終了後、記録されたデータは iPhone 側のアプリケーションに転送され、実験記録として保存される。

第4章 従来手法との比較による効果音フィードバック手法の有用性検証

4.1 概要

本章では、提案する聴覚フィードバックシステム（以下、効果音フィードバック）が、ダンベルカー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、効果音フィードバック（提案手法）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、提案手法の有用性を検証する。

4.2 実験設計

4.2.1 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でのエキセントリックトレーニングを実施した。

1. **効果音フィードバック条件（提案手法）**：動作速度に基づいて効果音フィードバックを提示する条件（3章に記述）。
2. **秒数読み上げ条件（従来手法）**：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）**：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。

効果音フィードバック条件は、秒数読み上げ条件およびフィードバックなし条件と比較して、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。

4.2.2 実験参加者と使用機器

本実験には、12名の実験参加者（男性12名、年齢範囲：20～24歳）が参加し、実験参加者の多くは筋トレ経験が少ないか、全くない状態であった。なお、実験参加者には所要時間に応じ、謝金を支払った。

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24kgの可変式ダンベルを使用した。実験参加者の個人差を考慮するため、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）を測定した。そのうえで、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24kg（2.5kgから24kgまで約1kg毎に設定可能）の特性上、細かい重量調整が難しかったためである。

4.2.3 実験手順

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、安全面への配慮として、Satoら[11]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。実施過程で一部の実験参加者に実施過程で一部の実験参加者に著しい疲労が観察されたため、安全管理上の追加措置を講じた。具体的には、前セットの最終レップにおいて、疲労により動作速度が過度に速かった参加者について、疲労の蓄積による怪我のリスクを考慮し、呼吸が整い、かつ本人が次セットの遂行が可能と判断するまで休息時間を最大1分まで延長する措置を認めた。

各セッションでは、エキセントリックトレーニングを1セット10回、計3セットを実施した。なお、1セッションあたりの所要時間は約30分であった。全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3参照）。



図 3: エキセントリックトレーニングを実施している様子

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。その上で、各条件における指示内容は以下の通りである。効果音フィードバック条件では、「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。

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。

4.3 評価指標

速度指標に基づい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、動作速度そのものを反映する指標であり、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り、あらかじめ提示した「3~5 秒で下ろす」という目標時間に対して、どの程度適切なペースで動作できていたかを把握することができる。一方、動作速度の一貫性は、

1回の反復動作を通じて速度がどれだけ均一に保たれているかを示す指標である。たとえ動作時間が目標の範囲に収まっても、動作の前半だけ極端にゆっくり、後半で急激に加速するような変動が大きい動作は、適切な筋刺激が得られにくい。そのため、速度の一貫性は、エキセントリック動作の質を捉える上で重要である。本研究では1回の動作における速度の標準偏差を算出し、動作制御の客観的指標として用いた。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。

4.4 結果

12名の実験参加者のうち2名については、事前のヒアリングで強い筋肉痛が残っている旨の申告があり、1セット目の計測においてエキセントリック動作を適切にできていないことが確認されたため、これらを極端な外れ値として除外した。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条件すべてを参加し終えたことから、得られたデータは合計90サンプル ($10 \times 3 \times 3 = 90$) となった。ただし、1サンプルについては計測ミスにより反復動作が10回分記録されておらず9回分のみであった。そのため、当該サンプルについては記録された9回分のデータの平均値を算出し、これを当該セットの代表値として採用した。なお、他の完全なデータセットを用いて検証した結果、9回平均と10回平均の間に実質的な差異は認められなかったため、この処理による分析結果への影響は軽微であると判断した。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、本分析では数値の絶対値ではなく、各条件間の相対的な差異に着目して結果を解釈する。

4.4.1 動作時間

図4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、効果音フィードバック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。

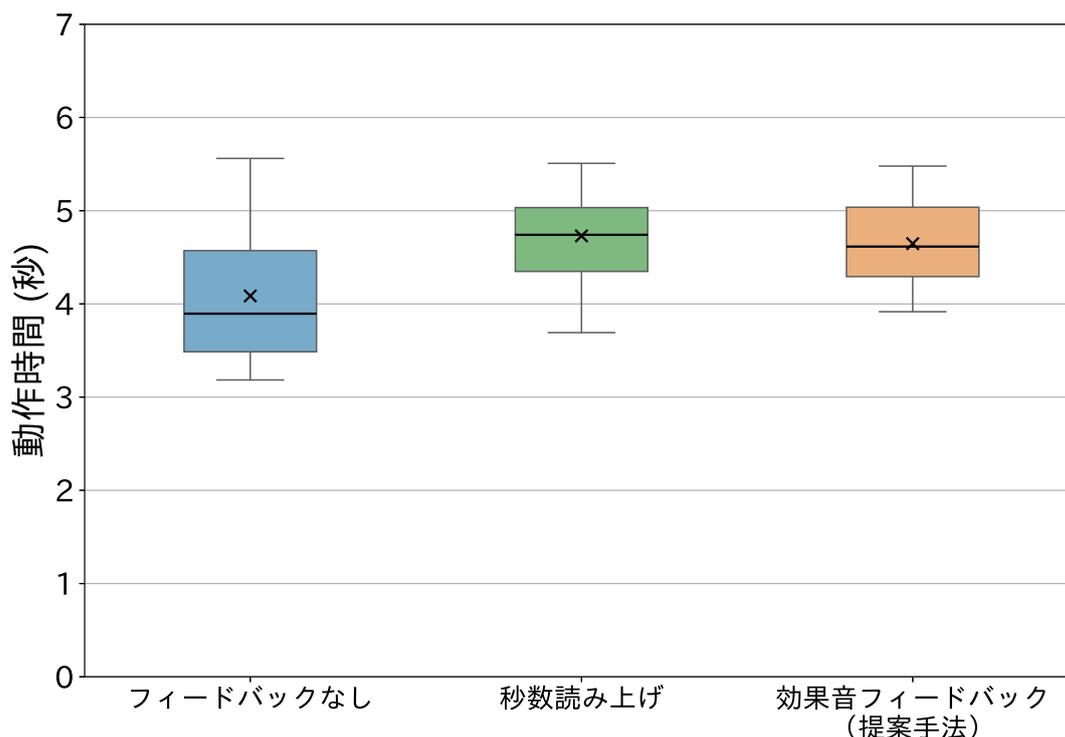


図 4: エキセントリック局面における動作時間

実験参加者ごとの3セットの平均値を代表値とし、反復測定一元配置分散分析 (One-way repeated measures ANOVA) を行った結果、3条件間に有意な差が認められた ($F = 6.70$, $p < 0.01$)。Holm-Bonferroni法により補正した対応のあるt検定を行った結果、効果音フィードバック条件および秒数読み上げ条件はいずれも、フィードバックなし条件と比較して有意に長い動作時間を示した ($p < 0.05$)。一方で、効果音フィードバック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、効果音フィードバック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。

4.4.2 動作速度の一貫性

図5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。その結果、効果音フィードバック条件および秒数読み上げ条件はいずれも、フィードバックなし条件よりも速度のばらつきが小さく、より一貫した動作が行われている傾向が見られた。実験参加者ごとの3セットの平均値を代表値とし、反復測定一元配置分散分析 (One-way repeated measures ANOVA) を行った結果、3条件間に有意な差が認められた ($F = 5.94$, $p < 0.05$)。続いて、Holm-Bonferroni法により補正した対応のあるt検定を行った結果、効果音フィードバック条件は、フィードバックなし条件と比較して有意

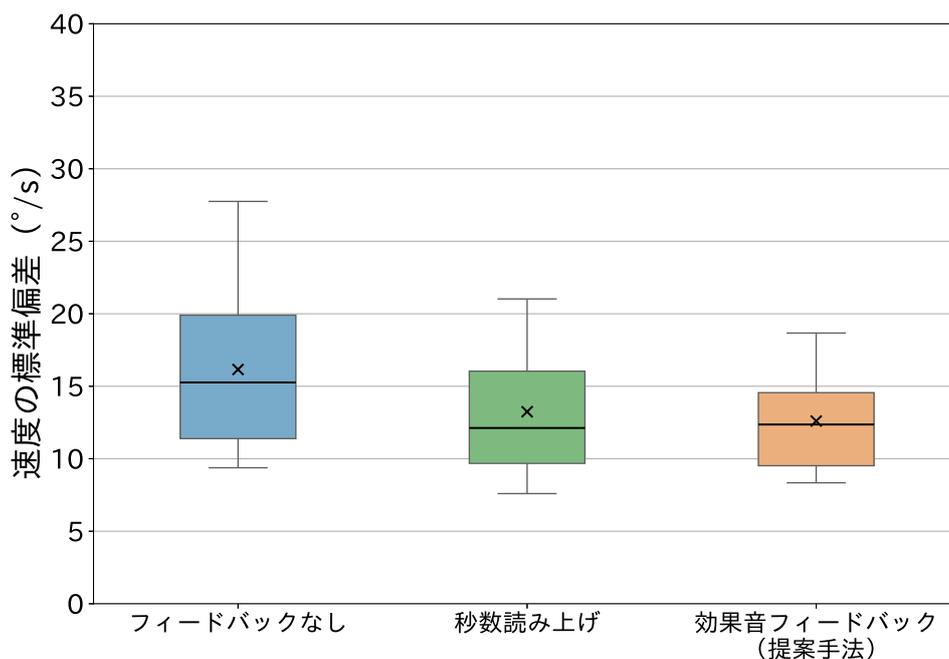


図 5: エキセントリック局面における速度の標準偏差

に標準偏差が小さく ($p < 0.05$), 動作速度の一貫性が高いことが示された。一方, 効果音フィードバック条件と秒数読み上げ条件との間には有意差は認められなかった ($p = 0.086$)。さらに, 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6に示すように, 秒数読み上げと効果音フィードバックの標準偏差の中央値には差は見られないが, 効果音フィードバック条件では四分位範囲が比較的狭い傾向が見られた。

これらの結果から, 効果音フィードバック条件はフィードバックなし条件よりも動作速度の一貫性が高かったものの, 秒数読み上げ条件との統計的な差は確認されず, 動作速度の一貫性の観点において提案手法が従来手法より優れているという仮説は支持されなかった。

4.4.3 主観評価

各トレーニングセッション終了後, 実験参加者に対して, そのセッションで実施した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: 全くそう思わない~5: 非常にそう思う) による評価を行った。図7は, 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。

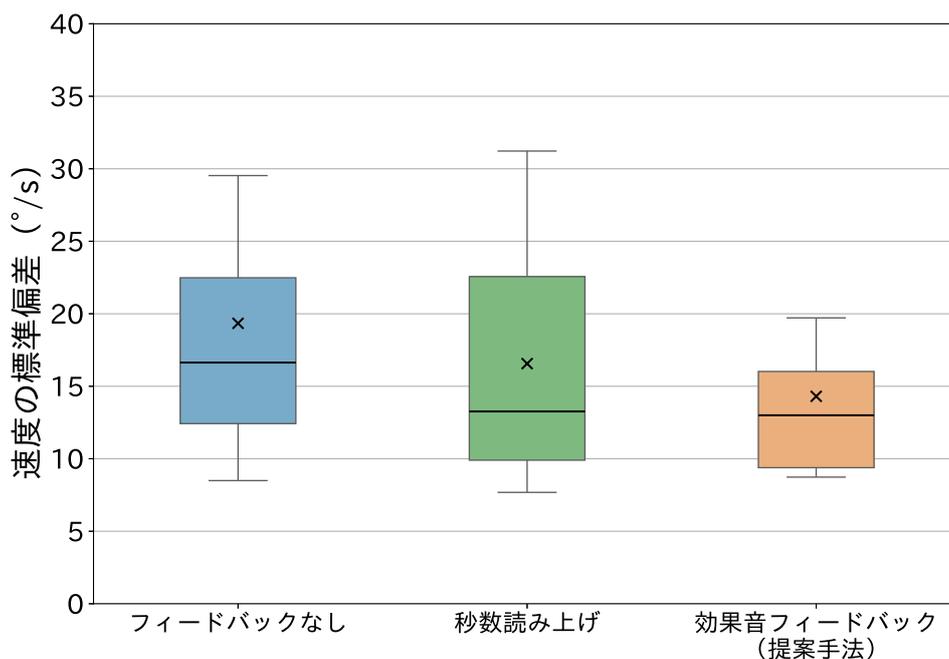


図 6: 3 セット目のみのエキセントリック局面における速度の標準偏差

- **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 の符号付き順位検定 (Bonferroni 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 ($p < 0.05$)。特に「動作の意識」と「継続意欲」では、効果音フィードバック条件と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」では効果音フィードバック条件が他の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、提案した効果音フィードバックは、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。

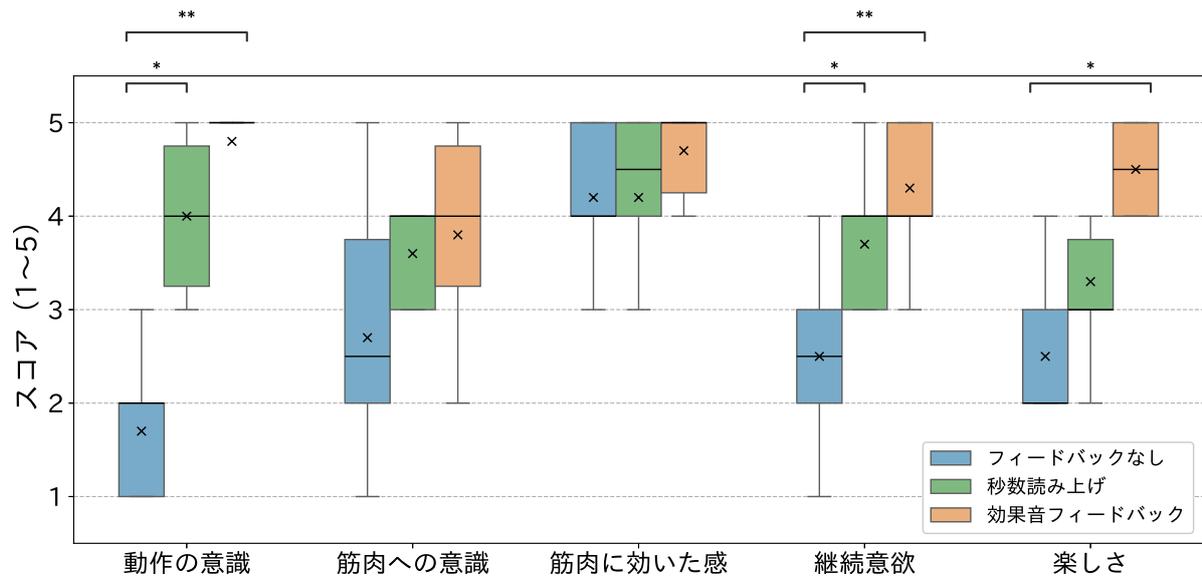


図 7: 主観評価 (5 段階リッカート尺度) における分布

4.5 考察

4.5.1 動作時間・速度への影響

図4に示されるように、効果音フィードバック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有意に長くなる結果が得られた。これは、効果音フィードバックにおいて動作と同期した音提示が行われたことで、実験参加者が自然な動作リズムを維持しやすくなり、その結果、動作をよりゆっくり実行することにつながったと考えられる。また、秒数読み上げ条件においても、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、効果音フィードバック条件と秒数読み上げ条件の間に有意な差が見られなかったことから、両手法はいずれも意図しない加速を抑制できたことを示している、したがって、効果音フィードバック条件、秒数読み上げ条件いずれも、フィードバックなし条件に比べ、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。

また、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8は、3セット目におけるエキセントリック動作の各反復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。図中の曲線は、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。また横軸は、動作時間を10等分した各区間を表している。この図から、効果音フィードバック条件では、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9では、3セット目内の変化を詳細に確認するため、3セット目の10回分のエキセントリック動作について、各反復の動作時間を10区間に正規化したうえで、各反復を横方向に並べ、角速度の変化を可視化している。この図では縦軸が角速度を表し、横軸が反復回数を表している。この図から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回目において効果音フィードバック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わかる。したがって、効果音フィードバック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。

4.5.2 速度の安定性への影響

図5に示すように、効果音フィードバック条件と秒数読み上げ条件の両条件において、フィードバックなし条件よりも動作速度のばらつきが小さかった。フィードバックなし条件でばらつきが大きくなったことは、実験参加者が一貫した動作速度を維持することに困難を感じていた可能性を示唆しており、これは、秒数を自身で数える必要があったことで注意が分散し、動作のリズムが不安定になったことが原因と考えられる。図6での3セット目に着目した分析では、条件間で中央値の差はなかったものの、箱ひげ図の分布からは、効果音フィードバック条件の標準偏差が比較的狭い範囲に分布する傾向が見られた。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速度の揺れ幅を大きくしないように働いていたと考えられる。一方、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実験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上で有効に作用することが示唆された。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ることが期待される。

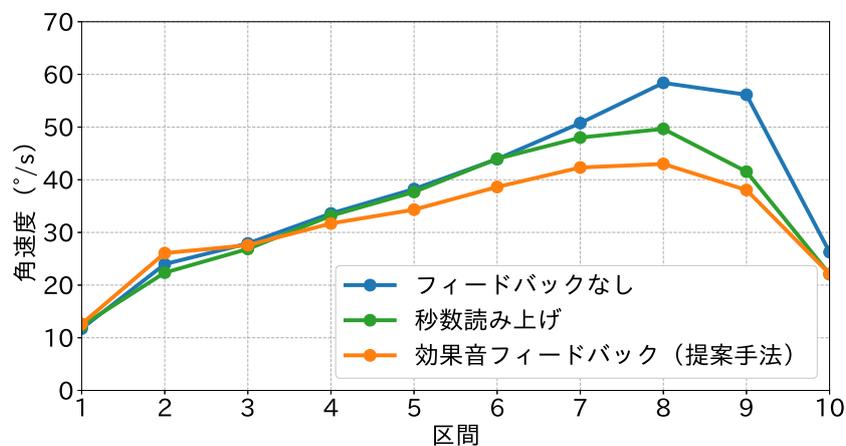


図 8: 3 セット目のみのエキセントリック動作における各反復の平均角速度の変化

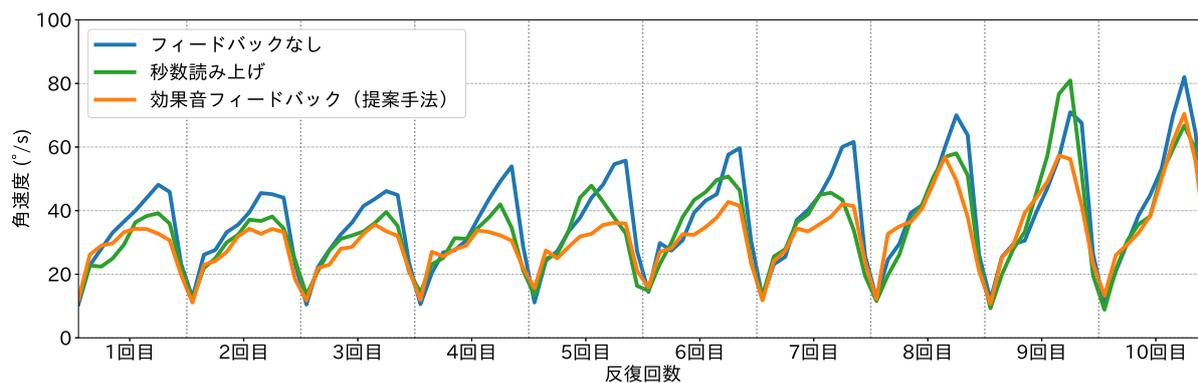


図 9: 3 セット目のみのエキセントリック動作における 10 回分の角速度変化

第5章 速度指標と位置指標の比較による効果音 フィードバックの検討

5.1 概要

本章では、提案手法である効果音フィードバック（速度指標）と、先行研究 [47] 等で一般的に用いられてきた「位置指標」に基づくフィードバック（位置指標）とを比較し、その有効性の違いを検討する。

比較対象として位置指標を選定した目的は、エキセントリックトレーニングにおける動作制御において、「腕の位置（進行度）」と「リアルタイムの動作速度」のどちらを音に反映させることが、より適切な速度維持に直結するのかを明らかにするためである。腕の位置に基づき音階が段階的に変化する位置指標は、ユーザにとって動作の全体像やリズムを把握しやすいという利点がある一方で、一瞬の速度変化に対するフィードバックとしては間接的である。これに対し、動作速度を直接音に変換する提案手法が、筋疲労の影響を受けやすいエキセントリック動作において、目標時間（3～5秒）の遵守や速度の均一性にどのような優位性を持つのかを検証する。

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 実験設計

5.2.1 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. **速度指標条件（提案手法）**：動作速度に基づいて効果音フィードバックを提示する条件（詳細は3章に記述，図1参照）。

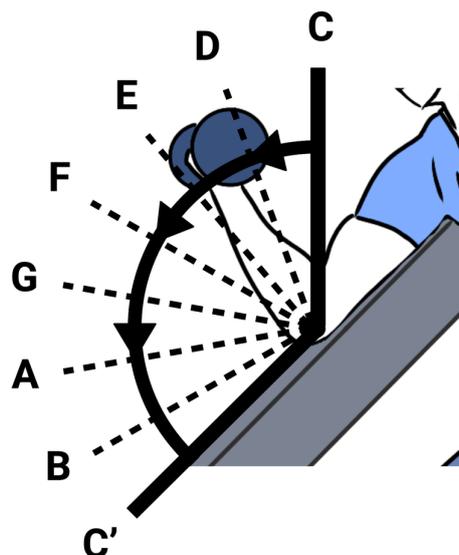


図 10: 位置指標におけるフィードバックシステムのイメージ図

2. **位置指標条件**：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（図 10, 表 1）。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。

本章では、以下の仮説を検証する。

H1 速度指標は、位置指標と比較して、動作時間を目標範囲（3～5 秒）により近づける。

H2 位置指標は、速度指標よりも動作速度のばらつきを低減させる。

5.2.2 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。なお、実験参加者には所要時間に応じ、謝金を支払った。全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、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

表 1: 音階配置

段階	音階 (周波数)	腕の位置 (roll 角度範囲)
1	C (261Hz)	可動域の 0/8~1/8
2	D (293Hz)	可動域の 1/8~2/8
3	E (329Hz)	可動域の 2/8~3/8
4	F (349Hz)	可動域の 3/8~4/8
5	G (392Hz)	可動域の 4/8~5/8
6	A (440Hz)	可動域の 5/8~6/8
7	B (493Hz)	可動域の 6/8~7/8
8	C' (523Hz)	可動域の 7/8~8/8

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、4章での実験と同様であり、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 1RM の 80~90% に設定し、4章で用いた可変式ダンベルを使用した。

5.2.3 実験手順

4章での実験と同様に、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。実験では、実験者内比較を採用し、全ての実験参加者が速度指標と位置指標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。

速度指標条件では、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項で述べたように、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、実験参加者に対して目標範囲である 3~5 秒に動作を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。

位置指標条件では、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。この練習では、目標時間内の動作に伴う音の変化に慣れ、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、4 章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 セッション全てを終了した後には、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。

5.3 評価指標

4 章での実験と同様に、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 つの指標を用いて、フィードバックの効果の評価した。

5.4 結果

本実験には 24 名の実験参加者が参加したが、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、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 セッション実施したため、合計で 378 件のデータサンプル（ $21 \times 6 \times 3 = 378$ ）が収集された。ただし、4 サンプル

については計測ミスにより反復動作が 10 回分記録されておらず 9 回分のみであった。そのため、当該サンプルについては記録された 9 回分のデータの平均値を算出し、これを当該セットの代表値として採用した。

なお、エキセントリック局面の抽出方法は、4.4 節で述べた手法と同様である。

5.4.1 動作時間

図 11 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。動作時間は、エキセントリック局面の開始から終了までの経過時間として算出した。本分析では、中央値および分散の観点から条件間の違いを検討するため、2 種類の統計検定を実施した。まず、実験者内の差を検出するために Wilcoxon の符号付順位検定を行った結果、速度指標条件と位置指標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、速度指標条件で 4.80 秒、位置指標条件で 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、分散の違いを検討するために 2 標本の分散の等質性の検定を実施した結果、両条件間に有意な分散の差が認められた ($F = 33.11, p < 0.01$)。具体的には、速度指標条件の分散は 0.375 であったのに対し、位置指標条件では 0.953 と大きく、速度指標の方が動作時間のばらつきが小さい結果となった。この結果は、速度指標がより一貫した動作時間でのトレーニングを促し、適切な動作時間を実現するという仮説 1 を支持するものである。

両フィードバック手法はいずれも、実験参加者が目標とする 3~5 秒の範囲内で動作を行うことを効果的に促していた。しかし、位置指標条件では速度指標条件と比較して動作時間のばらつきが大きく、これは反復動作や実験参加者間における動作速度の制御の一貫性が相対的に低かったことを示唆している。

5.4.2 速度の一貫性

図 12 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。両条件間の比較には、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 ($p = 0.16, r = 0.31$)。中央値は速度指標条件が $10.22^\circ/\text{s}$ 、位置指標条件は $9.85^\circ/\text{s}$ であり、位置指標の方がわずかに小さく、ばらつきを抑制するという仮説 2 と整合的な傾向が見られた。ただし、効果量は中程度ではあるものの、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。

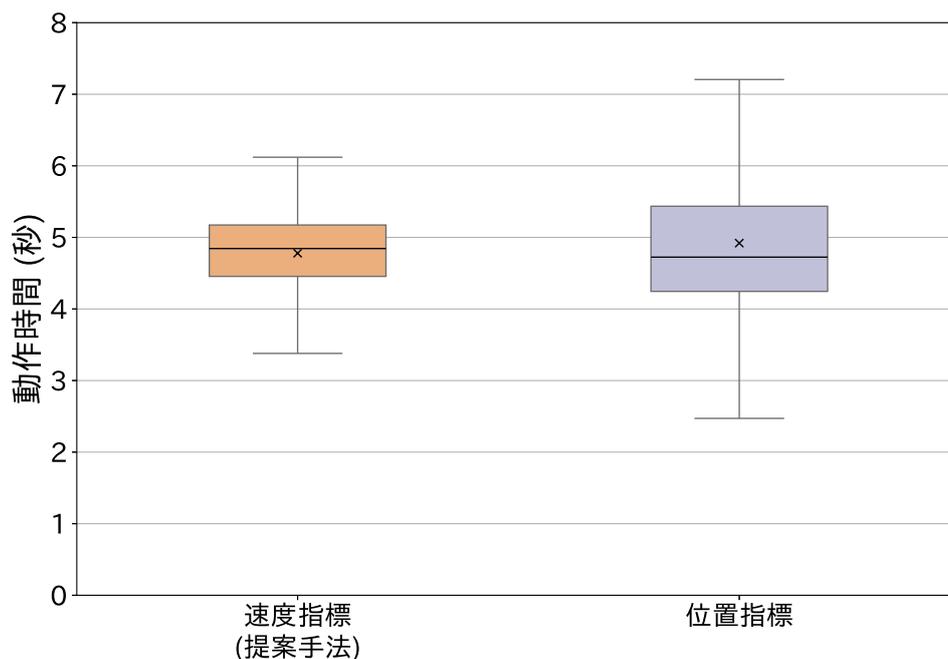


図 11: エキセントリック局面における動作時間

5.4.3 主観評価

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的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効性、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：全くそう思わない～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意見も収集した。

本分析においても、4章と同様にデータが順序尺度であることを踏まえ、条件間の比較には Wilcoxon の符号付き順位検定を用いた。なお、データの傾向を把握しやすくするため、表 2 には平均値と標準偏差 (SD) を示した。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 ($p < 0.01$)。具体的なスコアを見ると、前者の項目では速度指標条件が平均 4.40 点、位置指標条件が平均 3.95 点を示し、速度指標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、速度指標条件が平均 4.44 点、位置指標条件が平均 4.05 点を示し、速度指標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

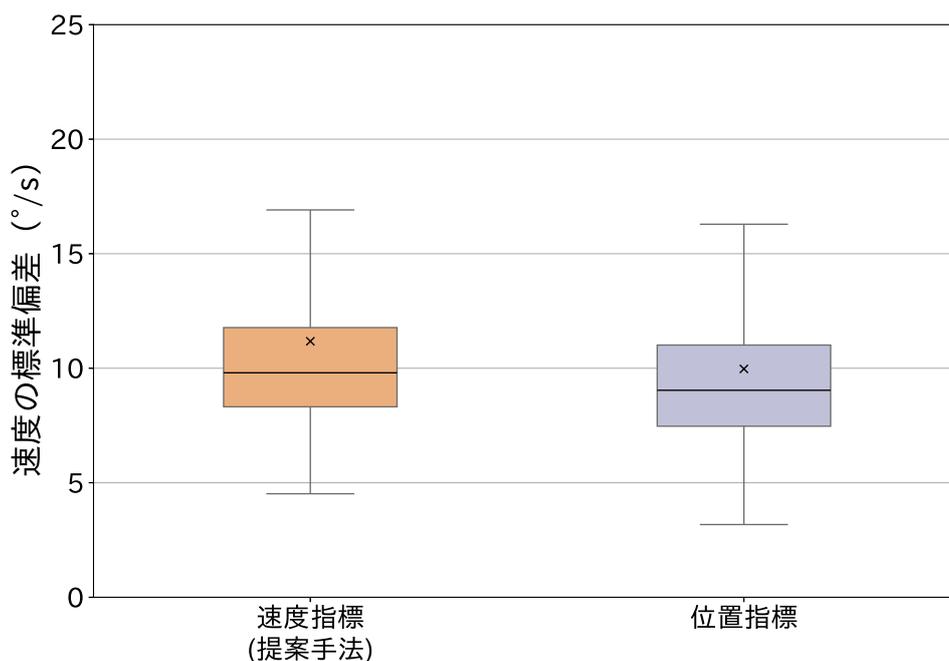


図 12: エキセントリック局面における速度の標準偏差

ている筋肉への意識が薄れた」と感じた意見が 2 件みられた。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」という意見も 1 件みられた。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速度指標条件で 21 人中 19 件、位置指標条件で 11 件得られた。これらの結果から、速度指標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。

5.5 考察

5.5.1 動作時間に関する考察

図 11 に示されるように、速度指標および位置指標のいずれにおいても、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おり、両フィードバック手法が動作時間を目標範囲に導くうえで有効であったことが示唆される。しかし、位置指標では分散が大きく、動作時間のばらつきが大きい傾向が見られた。この違いは図 13 にも明確に示されており、速度指標では 3~5 秒の範囲に動作時間が集中していたのに対し、位置指標では分布が広がり、多くの試行が 6 秒を超えていた。この要因のひとつとして、位置指標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挙げられる。一方、速度指標ではチャージ音の再生時間が

表 2: 速度指標条件と位置指標条件における主観評価の結果 (平均値 (SD))

質問項目	速度指標	位置指標
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 (1.13)	3.16 (0.95)
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 (0.56)	4.34 (0.81)
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 (0.74)	3.95 (0.88)
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 (0.78)	4.08 (0.74)
音があることで、動作に集中しやすくなりましたか？	4.44 (0.67)	4.05 (0.61)
この回のトレーニングは楽しかったですか？	4.53 (0.70)	4.39 (0.73)
トレーニングをまたやりたいと思いますか？	4.39 (0.78)	4.32 (0.90)

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、速度指標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している。位置指標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たことが考えられる。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ことが示唆される。

全体として、速度指標は動作時間のばらつきを抑制し、安定したペースの維持を促す効果を示した。位置指標は、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内で動作を制御することには課題が見られた。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な実験を行う必要がある。

5.5.2 速度の一貫性に関する考察

図12に示すように、位置指標では速度指標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。この結果は、腕の位置に基づく段階的な音のフィードバックが、反復動作の速度をより一定に保つうえで役立った可能性を示している。音の離散的な変化は、動作の進行状況を直感的に伝えるフィードバックとして機能し、速度の一定化を促したと考えられる。興味深いことに、速度指標には位置指標のような段階的な構造がないのにもかかわらず、位置指標とほぼ同程度の速度の一貫性が得られていた。特に、チャー

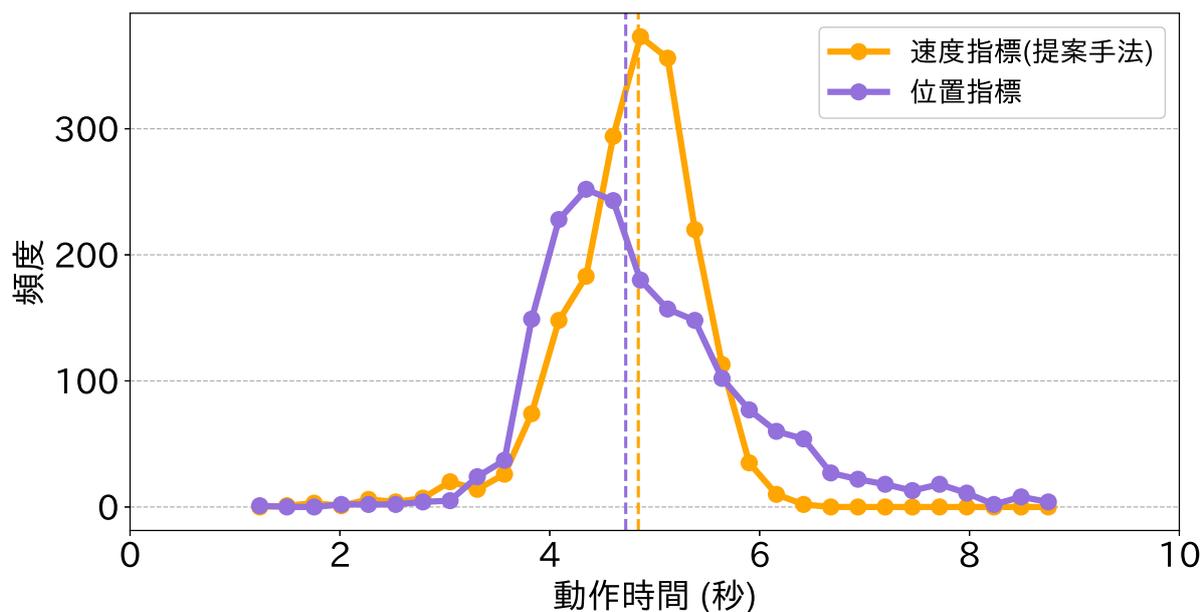


図 13: エキセントリック局面における動作時間のヒストグラム

ジ音には時間の経過に応じて音の高さが徐々に上昇する特徴があり、このような音響変化が、実験参加者に適切な速度を維持させる強い動機づけとなった可能性がある。このような動的なフィードバックが、エキセントリック局面を通じて安定した動作を保つ助けとなったと考えられる。

これらの結果から、位置指標は段階的な音の変化によって速度の一貫性を支援し、速度指標では速度に応じたフィードバックにより目標とした時間範囲内で安定した動作制御を可能にしたといえる。

第6章 効果音フィードバックの長期使用における 動作制御の保持効果検証

6.1 フィードバック依存と動作制御の保持

運動学習の分野では、フィードバックに依存しすぎると学習者が自身の感覚による調整を行わなくなり、フィードバックがない状況で動作の精度が低下することが指摘されている [62]. これはガイダンス仮説として知られ、高頻度でフィードバックを与えることで、学習効果の保持だけでなく、異なる速度や動作への応用が低下することも示されている [63]. そのため、フィードバックによって一時的に改善された動作が、フィードバックがない状況でも維持できるかを評価することが重要である.

6.2 概要

4章および5章では、効果音フィードバックの短期的な使用における有効性が示された. そこで本章では、長期的なトレーニングを行った場合、フィードバックをなくしてもその効果が保持されるかを検証した. 実験参加者は1ヶ月間にわたり週2回の頻度でダンベルカールのエキセントリックトレーニングを実施し、動作の変化や、フィードバックがない状況でも適切な動作速度が保持されるのかを継続的に評価した.

本章で検証する仮説は以下の通りである.

- H1** 長期的にシステムを使用することで、フィードバックなしのセッションにおける動作時間が事前測定より長くなり、週の経過に伴って段階的に増加する. また動作速度の変動は段階的に減少し、速度の一貫性が向上する.
- H2** 長期的にシステムを使用することで、フィードバックありのセッションにおいても、週を追うごとに動作時間が安定し、速度の一貫性が向上する.
- H3** チャージ音による意味づけを伴う効果音フィードバックによって高まった動作への意識、集中度、楽しさといった主観評価は、フィードバックなしのセッションにおいても低下せず、一定程度維持される.

6.3 実験設計

6.3.1 実験デザイン

長期的な変化を評価するため、全実験参加者に同じシステムを利用する単群デザインを採用した。実験参加者は1ヶ月間にわたり週2回のトレーニングを行い、その際、フィードバックありのセッションとフィードバックなしのセッションを交互に実施した。これは、フィードバックを用いたトレーニングを重ねることで、フィードバックがない状況での動作がどのように変化し、定着していくかを評価するためである。なお、フィードバックありのセッションでは、これまでと同様の効果音フィードバックを用いた（3章に記述）。

6.3.2 実験参加者と使用機器

本実験では、日常的にトレーニングを行っている実験参加者においても有効かを確認するため、募集時には男性は日常的にトレーニングを行っている人を対象とし、女性については特に経験を問わず募集を行った。募集の結果、14名（男性7名、女性7名）が実験に参加した。なお、実験参加者には所要時間に応じ、謝金を支払った。

使用機器は、4、5章での実験と同様であり、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1RMの80～90%に設定し、4、5章で用いた可変式ダンベルを使用した。

6.3.3 実験手順

図14に、本実験における全体的な実験の流れを示す。本実験では、1ヶ月間のトレーニングに先立ち、事前測定を実施した。この測定は、フィードバックを提示しない状態での初期パフォーマンスを記録し、トレーニング前後の変化を比較するための基準とするものである。まずエキセントリックトレーニングの正しい実施方法について説明し動作の練習を行った後、事前測定を実施した。実験開始前に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トレーニングの開始日を変更した。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安全に配慮した。

各セッションでは、4章および5章の実験同様に、エキセントリックトレーニングを1セット10回、計3セットを実施した。

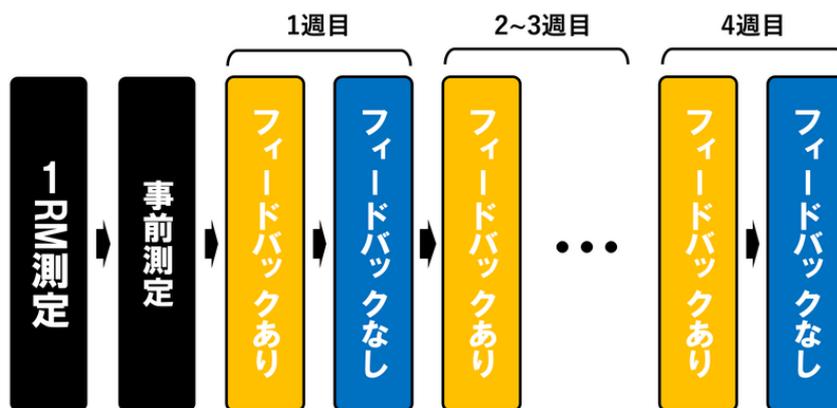


図 14: 長期トレーニング実験の全体的な流れ

フィードバックありのセッションでは、「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、フィードバックなしのセッションでは、自身の感覚に基づいて3~5秒で下ろすよう求めた。なお、いずれのセッションにおいても、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を用いて、各セッションにおける動作への意識や集中度、楽しさなどの全体的なユーザ体験について評価を行った。

また、1ヶ月間のトレーニング終了後に、フィードバック音が動作時間の意識や速度制御に与えた影響について回答を求め、自由記述形式の質問を通じて、音に対する印象や違和感、およびトレーニング全体に関する感想を収集した。

6.4 結果

実験には14名参加したが、事前測定で強い疲労がみられた1名は、トレーニング開始日までに十分な回復が得られず、その後も改善が見られなかったため、安全を考慮してトレーニングには参加しなかった。そのため、最終的に13名（男性7名、女性6名）が実験を完了し、分析対象とした。13名の実験参加者は、1セッションにつき3セットのエキセントリックトレーニングを実施し、事前測定を含めて計9セッションのデータが得られた。そのため、収集したデータの総数は $3 \times 9 \times 13 = 351$ 件となった。

6.4.1 分析手法

本章では、4 章および 5 章と同様に、エキセントリック動作が適切に維持されているか、およびその安定性がどのように変化するかを評価するため、動作時間と速度の一貫性、主観評価の 3 つの指標を用いて分析を行った。

また、本実験は全実験参加者がフィードバックのありとなしのセッションを交互に繰り返す単群デザインを採用した。そのため、トレーニング効果の保持を確認するためのフィードバックなしのセッションと、フィードバックを用いながら動作がどのように安定していくかを確認するためのフィードバックありのセッションそれぞれについて、時系列的な変化を分析した。

6.4.2 フィードバックなしセッションにおける動作の変化

まず、分析手法で定義した指標の一つである動作時間に着目し、フィードバックなしセッションにおける時系列変化を分析した。図 15 は、フィードバックなしセッションにおける動作時間の変化を示す箱ひげ図である。この図から、週の経過に伴って動作時間の中央値が徐々に増加していることがわかる。この上昇傾向が統計的に有意かどうかを確認するため、週を固定効果、実験参加者をランダム効果として、線形混合モデルによる分析を行った。その結果、週の固定効果は有意であり ($\beta = 0.297, SE = 0.027, z = 10.89, p < 0.01$)、週の経過に伴い動作時間が増加することが示された。これは、1 週間あたりが約 0.30 秒動作時間が長くなることを意味しており、ベースラインから 4 週目までにおよそ 1.2 秒の増加に相当し、フィードバックを用いて身につけた動作がフィードバックなしの状況でも保持され、適切な速度でエキセントリック動作する能力が向上したことを示唆する。ここで、反復動作における安定性に着目するため、動作時間の標準偏差について分析を行った。本分析では各セットにおいて 10 回の反復動作の動作時間から標準偏差を算出し、反復間における動作時間のばらつきの指標とした。図 16 はフィードバックなしセッションにおける動作時間の標準偏差の時系列変化を表す箱ひげ図である。この図からは、週の経過に伴う変化傾向はみられない。そこで、週の経過に伴う動作時間のばらつきの変化が統計的に有意かどうかを確認するため、線形混合モデルによる分析を行った。その結果、週の固定効果は有意ではなかった ($\beta = -0.006, SE = 0.007, z = -0.84, p = 0.40$)。これは、フィードバックなしセッションでは、週が経過しても、反復間の動作時間のばらつきは有意に減少せず、1 セットにおける動作時間が一定の値に収束する傾向は認められなかった。

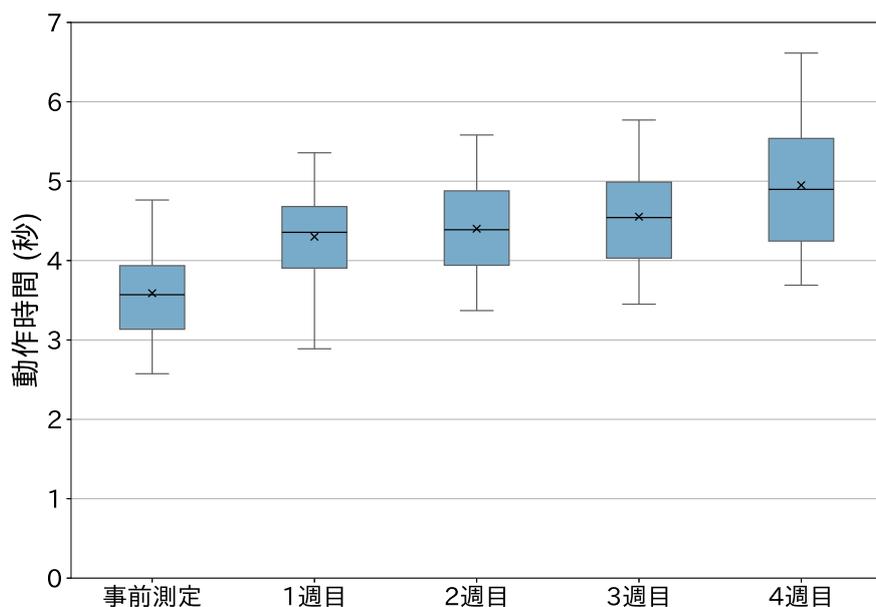


図 15: フィードバックなしセッションにおける動作時間の変化

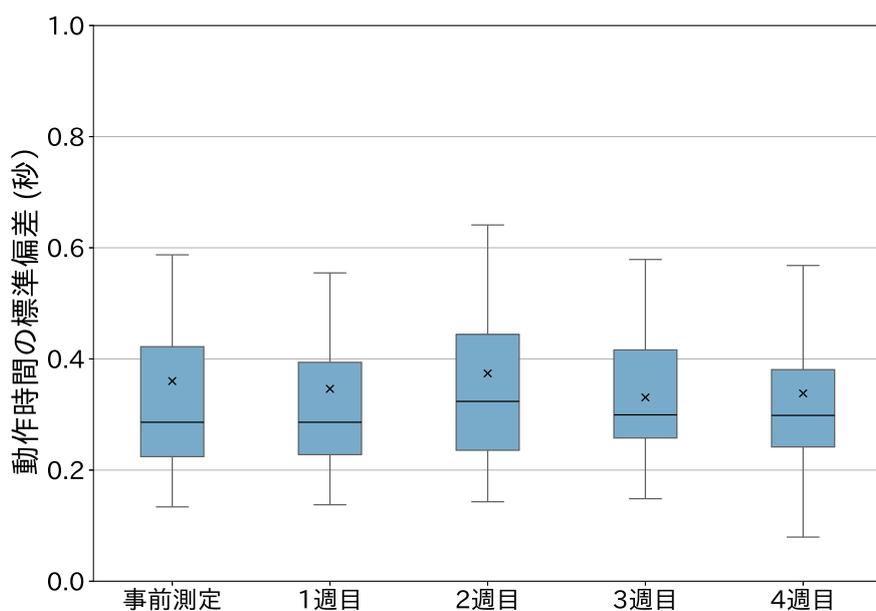


図 16: フィードバックなしセッションにおける動作時間の標準偏差の変化

次に、分析手法で定義したもう一つの指標である速度の一貫性について分析を行った。図 17 はフィードバックなしセッションにおける速度の標準偏差の変化を示す箱ひげ図である。この図では、週の経過とともに標準偏差の中央値が低下し、速度のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が統計的に有意かどうかを調べるため、同様に線形混合モデルによる分析を行った。その結果、週の固定効果は有意に負であり

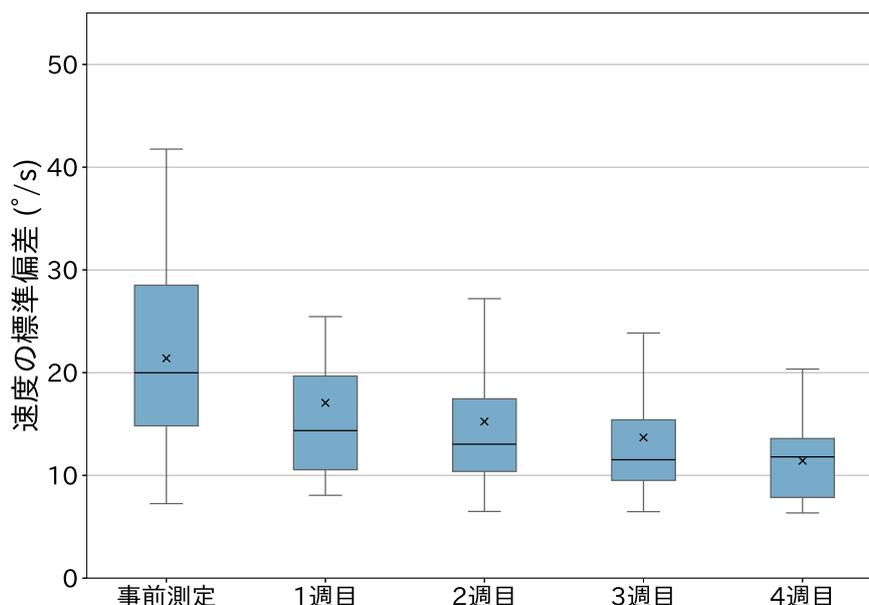


図 17: フィードバックなしセッションにおける速度の標準偏差の変化

($\beta = -2.332, SE = 0.258, z = -9.04, p < 0.01$), 週が経つにつれて速度のばらつきが有意に減少することが明らかとなった。これはフィードバックを用いたトレーニングによって速度を一定に保つ能力が向上し、フィードバックがない状況でも安定した速度で動作できるようになったことを示している。

以上の結果から、フィードバックなしセッションにおける動作時間が週の経過に伴って有意に増加し、また速度の一貫性が向上することが統計的に明らかになり、仮説 1 は支持された。

6.4.3 フィードバックありセッションにおける動作の変化

フィードバックありセッションに関しても、同様に動作時間と速度の一貫性について分析を行った。図 18 は、フィードバックありセッションにおける動作時間の変化を示す箱ひげ図である。フィードバックありセッションにおける動作時間の変化を確認したところ、週の経過に伴い中央値は大きく変動しないものの、わずかな増加傾向が見られた。この傾向を線形混合モデルによって検証したところ、週の固定効果は有意であり ($\beta = 0.058, SE = 0.014, z = 4.25, p < 0.01$), 週が経つにつれて動作時間は緩やかに増加することが示された。具体的には、1 週間あたり約 0.06 秒、4 週間で合計約 0.24 秒の増加に相当する。これはフィードバックありの最初のセッションですでに適切な動作速度を維持して動作できていたため、変化量が小さく安定していたと考えられる。ここで、動作

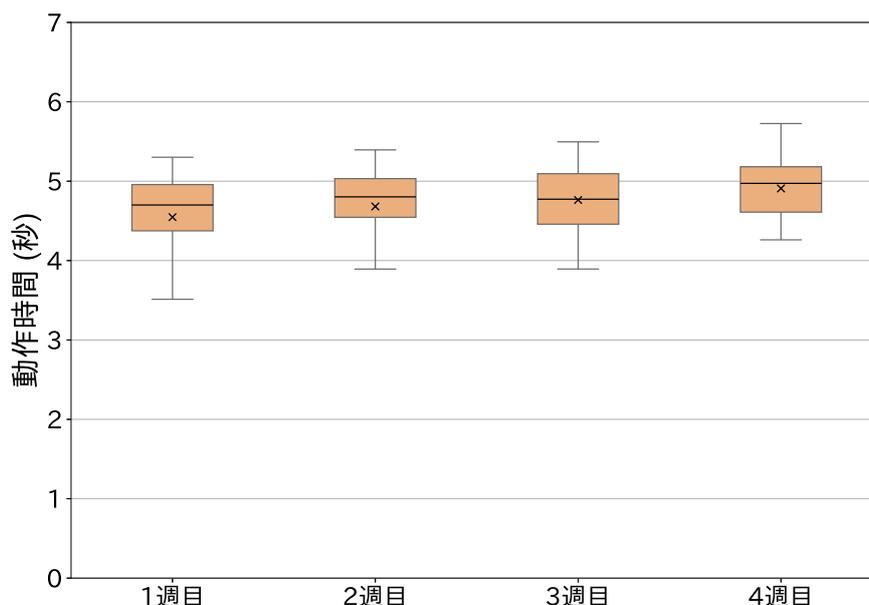


図 18: フィードバックありセッションにおける動作時間の変化

時間の長さではなく、反復間における安定性に着目し、各セットにおいて10回の反復動作の動作時間から標準偏差を算出し、反復間における動作時間のばらつきを分析対象とした。図19はフィードバックありセッションにおける動作時間の標準偏差の時系列変化を表す箱ひげ図である。この図では、週の経過に伴って標準偏差の中央値が低下し、動作時間のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が有意かどうかを調べるため、線形混合モデルによる分析を行った結果、週の固定効果は有意に負であった ($\beta = -0.016, SE = 0.005, z = -3.49, p < 0.01$)。つまり、週が経つにつれて1セット内の反復間における動作時間のばらつきが有意に減少することを示している。すなわち、トレーニングを通して各反復における動作時間を一定に保てるようになり、エキセントリック動作がより安定し、再現性が高くなることが明らかになった。

次に、図20はフィードバックありセッションにおける速度の一貫性の変化を示す箱ひげ図である。この図でも、週の経過に伴って標準偏差の中央値が低下し、速度のばらつきが小さくなっていることが確認できる。この下降傾向が統計的に有意かどうかを調べるため、線形混合モデルによる分析を行った結果、週の固定効果は有意に負であった ($\beta = -0.929, SE = 0.193, z = -4.81, p < 0.01$)。これは、週が経つにつれてほど速度の一貫性が向上し、1回の反復動作に生じる速度のばらつきが有意に減少することを示している。

以上の結果から、フィードバックありのセッションにおいても、週を追うごとに反復間

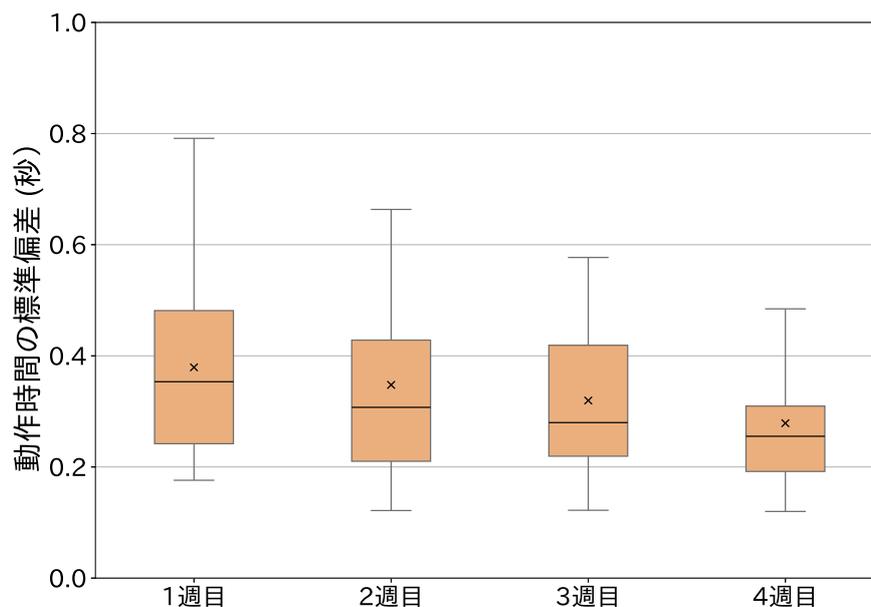


図 19: フィードバックありセッションにおける1セット内の動作時間のばらつきの変化

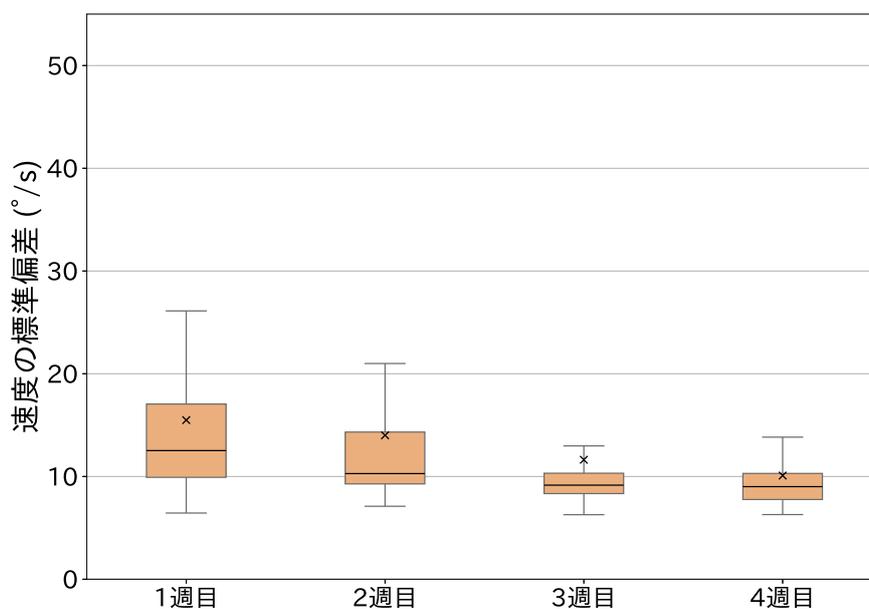


図 20: フィードバックありセッションにおける速度の標準偏差の変化

の動作時間がより安定し、速度の一貫性が有意に向上することが明らかになった。これは、フィードバックを継続的に用いた場合においても、動作の安定性が段階的に向上するという仮説2を支持するものである。

6.4.4 主観評価の結果

フィードバックありのセッションで形成された主観評価が、フィードバックなしのセッションでも維持されるかを検討するため、フィードバックあり・なしセッションにおける主観評価の変化を比較した。なお、本アンケートの回答は順序尺度であるが、週ごとの細かな変化やセッション間の差を捉えるため、本分析では平均値および標準偏差を算出した。表3は、各週の両セッションにおける主観評価の平均値と標準偏差（SD）を示したものである。

まず、フィードバックありセッションに着目すると、全ての項目において1週目から4週目まで平均4.0以上の高い値で推移した。これは実験参加者がフィードバックを用いることで、常に高い意識と集中度を維持しつつ、トレーニングを楽しみながらできていたことを示している。一方、フィードバックなしのセッションでは、1週目のスコアはフィードバックありのセッションと比較して明らかに低い結果となったが、週の経過に伴いフィードバックなしのスコアは段階的に上がっていく傾向がみられた。これは、フィードバックありのセッションで形成された動作への意識や集中度、楽しさといった主観評価のスコアが、フィードバックなしのセッションにおいて初めは一時的な低下がみられるものの、週の経過に伴ってその低下が次第に小さくなり、最終的には維持されるようになることを示している。この結果は、本研究で設定した仮説3と概ね一致する結果である。

表4に1ヶ月間のトレーニング終了後に実施したアンケート結果の一部を示す。3～5秒という目標時間を意識し続けるうえでフィードバックが役に立つかという質問に対して、全実験参加者が最高評価を回答しており、平均値は5.0であった。また、音がなくても3～5秒で下ろせる自信があるかという主観的な自信についても、平均値が3.85と比較的高い評価が得られたが、音がなくなると正確な速度を維持することが難しいと感じる人も存在した。一方、フィードバック音が不快になることがあったかという質問に対しては、平均値が1.38と低く、ほとんどの実験参加者が不快感を感じていないことが明らかとなった。

自由記述回答では、フィードバックがある場合には「秒数を数える必要がなくなり動作に集中できた」「自分の感覚と実際の速度のずれに気づけた」といった意見が多く得られた。一方、フィードバックがない場合でも「頭の中でフィードバック音を思い浮かべながら動作した」「3～5秒を数えながら動作していたが、後半は数えずとも動作できた」といった意見が得られた。この結果は、フィードバックありが形成した速度感覚が、フィードバックなしセッションにおいても一定程度保持されていた可能性を示唆している。

表 3: 各週におけるフィードバックあり・なしセッションの主観評価の変化 (平均値 (SD))

質問項目	FB	1 週目	2 週目	3 週目	4 週目
自分の動作速度を意識できましたか?	あり	4.85 (0.38)	4.54 (0.66)	4.46 (0.97)	4.92 (0.28)
	なし	3.62 (0.65)	3.69 (1.18)	3.62 (1.19)	4.23 (0.93)
動作はコントロールしやすかったですか?	あり	4.31 (0.85)	4.08 (0.86)	4.31 (1.32)	4.62 (0.77)
	なし	2.69 (0.85)	3.38 (0.96)	3.31 (1.25)	4.00 (1.15)
動作に集中できましたか?	あり	4.46 (0.66)	4.54 (0.66)	4.23 (1.17)	4.38 (0.65)
	なし	3.69 (0.63)	3.77 (1.24)	4.00 (1.08)	4.23 (1.01)
トレーニングが楽しいと感じましたか?	あり	4.46 (0.52)	4.23 (0.73)	4.46 (0.66)	4.62 (0.65)
	なし	3.54 (1.13)	3.77 (1.09)	3.77 (1.30)	4.15 (0.99)
トレーニングを続けたいと思いましたか?	あり	4.38 (0.65)	4.23 (0.83)	4.31 (0.95)	4.62 (0.51)
	なし	3.77 (1.01)	4.23 (0.93)	4.00 (1.08)	4.15 (0.99)

表 4: トレーニング終了後アンケートの結果 (平均値 (SD))

質問項目	平均値 (SD)
フィードバックは 3~5 秒を意識し続けるのに役立ちましたか?	5.00 (0.00)
音がなくても 3~5 秒で下ろす動作をできる自信がありますか?	3.85 (0.99)
フィードバック音が不快になることがありましたか?	1.38 (0.87)

6.5 考察

6.5.1 フィードバックがない状況での保持に関する考察

図 15 に示すように、フィードバックなしセッションにおいても、週の経過に伴い動作時間が増加した。この増加傾向は線形混合モデルによる分析においても統計的に有意であり、フィードバックを用いたトレーニングを通じてエキセントリック動作をゆっくりと行う速度の感覚が、フィードバックがない状況においても保持されたと考えられる。また、図 17 に示すように、週の経過とともに速度のばらつきが低下する傾向がみられ、この変化も線形混合モデルによる分析においても有意であった。これは、動作時間が延びるという変化にとどまらず、各反復動作において速度を一定に保つ能力も向上し、フィードバックなしセッションにおいても保持されたと考えられる。しかし、フィードバックなしセッションにおける時系列変化のみでは、最終的にフィードバックありセッション

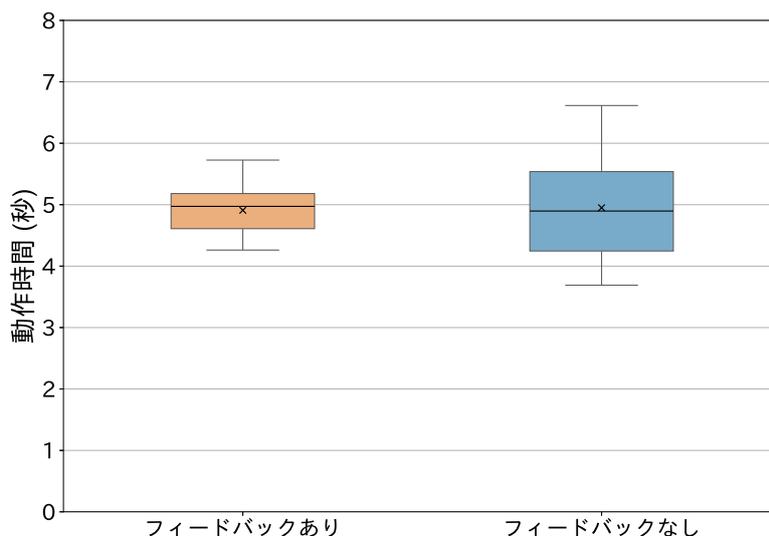


図 21: 最終週におけるフィードバック有無の動作時間の比較

と同等の動作ができているかは明らかにならない。そのため、保持を評価するにあたり、フィードバックなしの最終的な動作をフィードバックありセッションの動作と直接比較することが重要である。

図 21, 22 はそれぞれ、最終週におけるフィードバックの有無による動作時間、速度の標準偏差の比較を表す箱ひげ図である。図 21 では動作時間の中央値は近い値を示したものの、フィードバックなしセッションでは四分位範囲が広く、動作のばらつきが残っていることがわかる。図 22 でも同様に標準偏差の中央値は近い値を示したものの、四分位範囲が広く、速度がばらついていることがわかる。これらの結果から、フィードバックを通じて動作時間や速度の一貫性そのものは保持されつつも、動作の安定性を保つうえでは、フィードバックが有効であることが示された。

6.5.2 フィードバックありセッションにおける動作特性の考察

フィードバックありセッションにおける結果に着目すると、最初のトレーニングから動作時間は目標範囲に近づき分散も小さかった (図 18)。これは、フィードバックがエキセントリック動作の速度調整に対して即時的な効果をもたらすことを示している。一方、速度の一貫性や動作時間の安定性については、セッションを重ねるにつれて徐々に改善する傾向がみられた (図 19,20)。このことから、フィードバックは動作時間そのものを調整するうえでは即時的に機能する一方で、動作の安定性や速度制御の向上には、ある程度の練習や経験が必要である可能性が考えられる。ただし、本実験ではフィードバック

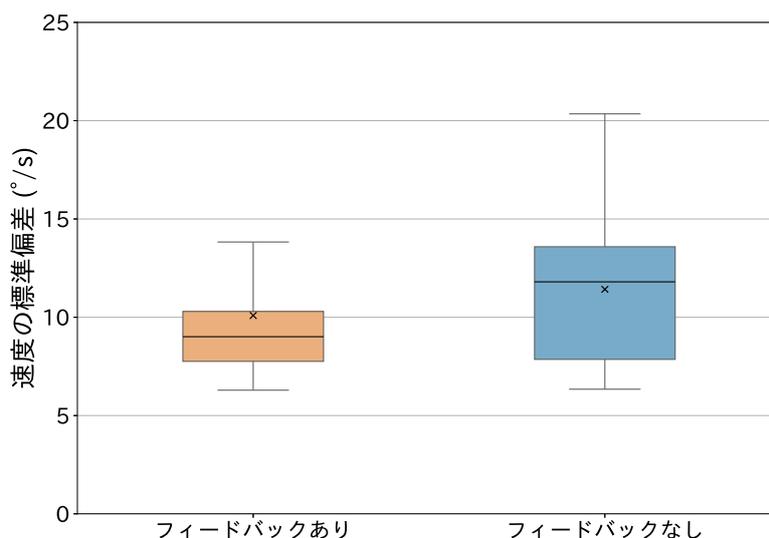


図 22: 最終週におけるフィードバック有無の速度の標準偏差の比較

ありとフィードバックなしセッションを交互に実施しているため、フィードバックありセッションにおける動作の安定化が、フィードバックそのものの効果によるものか、あるいはフィードバックなしセッションを挟んだことによる学習効果の影響を受けているのかを判断することはできない。そのため、フィードバックを継続的に用いた場合においても、同様に速度の一貫性や動作時間の安定性が向上するかについては、今後検討をしていく必要がある。

6.5.3 トレーニング経験の有無に関する考察

トレーニング経験者は、もともと動作速度の調整にある程度習熟していると考えられるため、そのような実験参加者においてもフィードバックの有無によって差が縮小するのであれば、本システムの効果が初心者だけでなく、広く有効である可能性が示唆される。そこで、フィードバックありとなしセッションにおける差が、トレーニングの最初と最後の週でどの程度修正されたのかを確認するため、1週目および4週目における両セッションの差分に着目して探索的な分析を行った。

図 23 は、週に1~2回以上のトレーニングを行っている男性のみを対象とした、動作時間の差分を示している。この図から、1週目に着目すると、差分の中央値は負の値を示し、四分位範囲も全体的に0より下に分布している。ここで差分が負であることは、フィードバックありのセッションと比較して、フィードバックなしのセッションでは動作時間が短くなっていることを意味する。つまり、トレーニング経験者であっても、最初の週では

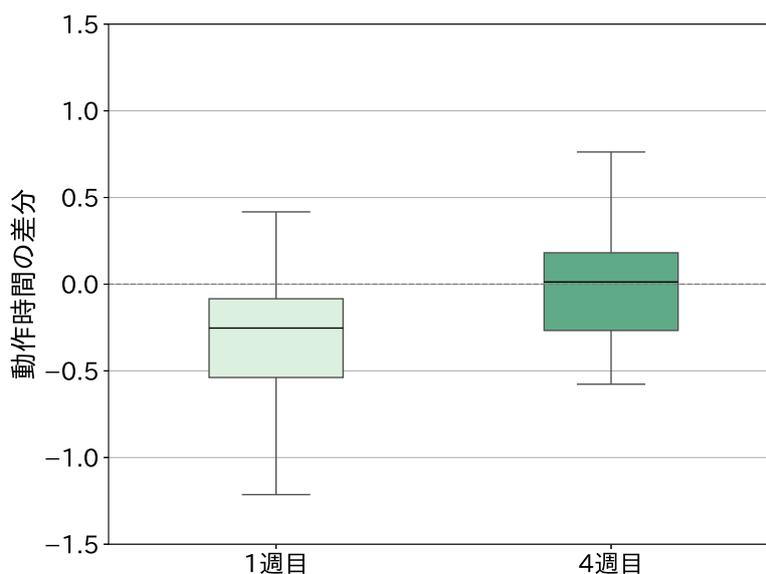


図 23: トレーニング経験者におけるフィードバック有無による動作時間の差分

フィードバックがない状況では意図したよりも動作が速くなってしまったことがわかる。一方、4週目においては、その差分の中央値が0付近に収束しており、フィードバックの有無にかかわらず、ほぼ同等の動作時間でトレーニングを行えるようになったと考えられる。この結果は、効果音によるフィードバックが、初心者に限らずトレーニング経験者においても動作速度の調整を促し、最終的にはフィードバックがない状況においてもその効果が保持されることを示唆している。

第7章 総合考察

本研究では、ダンベルカールのエキセントリック動作において適切な動作速度の維持および動作の安定化を支援する効果音フィードバックシステムを提案し、その有効性を検証してきた。4章では、従来の支援方法である「秒数読み上げ」および「フィードバックなし」との比較を行い、提案手法が動作速度の制御に有効であることが明らかとなった。5章では、フィードバックのもととなる指標が持つ特性に着目し、提案手法である効果音フィードバック（速度指標）と、動作の進行度を提示する位置指標に基づくフィードバック（位置指標）を比較した。その結果、エキセントリック動作の支援においては、速度に基づいた連続的な音変化が、動作のばらつきを抑制したことを明らかにした。さらに、6章では、1ヶ月間の継続的な使用を通じて、本システムが単なる即時的な動作支援にとどまらず、フィードバックがない状況下でも適切な動作を再現できることが明らかとなった。

本章では、これらの実験を統合し、効果音フィードバックの有効性、長期使用による動作制御の保持について考察を行い、最後に本研究の制約について記述する。

7.1 エキセントリックトレーニングにおける効果音フィードバックの有効性

4章の実験結果より、提案した効果音フィードバックは、従来の秒数読み上げ手法と同等以上に、エキセントリック局面の動作時間を増加させ、適切な速度を維持して動作できることが示された。これは、秒数読み上げという言語的な情報を伴う手法と比較して、提案手法「チャージ音」という動作とイメージの合う感覚的に理解できる効果音を用いることで、同等の動作制御を実現しつつ、ユーザの「楽しさ」や「継続意欲」を向上させた。

従来のトレーニング指導では、トレーナによるカウントやメトロノームの使用が一般的であったが、ユーザに対して「外部の基準に合わせる」という受動的な制御を強いる側面があった。これに対し、本研究の提案手法は速度の閾値に応じて音を変化させる設

計であるが、「チャージ音」という力が蓄積される動作イメージと合致した音を採用することで、ユーザ自身の動作によって音をコントロールしているという感覚を高めた可能性が考えられる。アンケート結果において「動作のコントロールのしやすさ」や「集中度」が高く評価された背景には、この音と動作の親和性がユーザの意識をトレーニングに向けさせ、集中を維持する一因となったことが示唆される。したがって、提案システムは、筋肉への負荷を高くするという「トレーニング効果」と、意欲的に取り組めるといふ「ユーザ体験」の両方に対して肯定的な影響を与えており、エキセントリックトレーニングにおける有効な支援手法となり得ることが示唆された。

7.2 長期使用による動作制御の保持

トレーニング支援システムにおいてガイダンス仮説で指摘されるような「フィードバックへの過度な依存」が懸念されることがある。これは、システムを使用している間は良好なパフォーマンスができて、システムを取り除くと動作の質が低下してしまうという課題である。しかし、6章の長期実験の結果をみると、本システムがそのような依存を招くことなく、むしろユーザが自立して動作を制御する能力の習得を促した可能性が示された。

1ヶ月間のトレーニングにおいて、フィードバックなし条件での動作時間が徐々に増加し、速度のばらつきが減少したという結果は、実験参加者がフィードバック音を通じて適切な動作速度（3～5秒の動作時間）を自身の感覚として身につけたことが考えられる。自由記述における「頭の中でフィードバック音を思い浮かべながら動作した」「3～5秒を数えながら動作していたが、後半は数えずとも動作できた」という報告は、トレーニングを通して正しい動作のテンポが体に染み付いたことを表している。これは、フィードバックがなくても、音の記憶に合わせて動くだけで、自然と適切な速度でのトレーニングを再現できるようになったと言える。このように、フィードバックが「自分の感覚」に身についたことは、フィードバックで形成された動作が一時的なものではなく、長期的に保持されることを裏付けるものである。また、トレーニング経験者においても動作改善が見られたことは、本システムが初心者支援だけでなく、経験者のトレーニング効果の向上にも適用可能であることを示している。

7.3 制約

本研究にはいくつかの制約がある。主に、対照群を設けた比較検証には至っていない点と、評価を動作データに限定し、筋活動等の測定を含んでいない点である。

第一に対象群についてである。6章では、フィードバックありとなしのセッションを交互に実施する実験デザインを採用しており、フィードバックを全く使用しない状態での長期的なトレーニング効果については検討できていない。そのため、本研究でみられた動作時間の増加や速度の一貫性の向上が、フィードバックによって形成された速度感覚に起因するものなのか、あるいは1ヶ月間エキセントリックトレーニングを継続したこと自体による学習効果や身体的適応の結果なのかについては、本研究の実験デザインでは、これらの要因を独立して評価することができない。今後はフィードバックを一切用いない対照群を設けた長期実験を行うことで、フィードバック独自の効果を検証する必要がある。

第二に動作データに限定している点である。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。

第8章 結論

本研究では、筋トレにおけるエキセントリック動作の支援を目的とし、動作速度に基づいた効果音フィードバックシステムを提案した。そこで、提案手法の有効性を検証するために3つの実験を行った。

まず、従来手法である「秒数読み上げ」と比較した結果、提案手法である「効果音フィードバック」は、従来手法と同等以上の効果を示した。具体的には、適切な速度を維持するだけでなく、速度の一貫性においても向上がみられ、特に筋疲労が蓄積する状況下においても、速度の上昇を抑制できることが明らかになった。また、トレーニングの楽しさや継続意欲を高める効果があることが示され、トレーニング効果とユーザ体験の向上を両立する支援手法として有用性が示された。

次に、フィードバックの指標設計において、位置指標よりも速度指標を用いることで、各反復ごとの動作のばらつきを低減させ、適切な動作時間を高い再現性で行えることを明らかにした。位置指標に基づくフィードバックは、段階的な音変化により速度の一貫性を高める効果が見られたものの、動作時間が過剰に長くなるなど、動作時間の制御に課題が残る結果となった。一方、速度指標に基づくフィードバックは、目標とする動作時間範囲で安定した動作を促し、意図通りコントロールできることが示された。

最後に、フィードバックの長期的な使用実験において、本システムは単なる一時的な動作支援にとどまらず、ユーザの自立的な動作制御を促進する効果があることが示された。具体的には、フィードバックがない条件においても、週の経過に伴って動作時間が増加し、速度の一貫性が向上することが明らかになった。これはトレーニングを通じて形成された速度感覚が、フィードバックを取り除いた後もユーザ自身の身体感覚として保持されたことを裏付ける結果である。

本研究ではダンベルカールを対象として、上腕二頭筋におけるエキセントリック動作の速度制御を検証した。一方で、筋トレにおいては、下肢や体幹を含むさまざまな筋群においても、エキセントリック動作の制御が重要である。今後は、スクワットやレッグエクステンションなど、上腕二頭筋以外の筋群を対象としたトレーニングにおいても、本研究で提案した聴覚フィードバック手法の有効性を検証していく必要がある。

また、エキセントリック動作の適切な制御は、筋力強化のみならず、高齢者の転倒予防や、怪我や手術後のリハビリテーションにおいても重要である。本研究で提案した、動作速度に基づいてリアルタイムにフィードバックを提示する手法は、視覚に依存せずに動作を支援できるという特徴を有しており、医療・福祉分野においても、安全で負担の少ないリハビリ支援ツールとして応用できる可能性がある。今後は、対象者の身体的特性やリハビリ段階に応じたフィードバック設計を行うことで、より実践的な支援システムへと発展させていくことが期待される。

特にリハビリテーションの現場においては、機能回復に向けた反復運動を継続するための「心理的動機づけ」が重要な役割を果たす。本研究が提案した手法は、単調になりがちなトレーニングをチャージ音のような意味的な体験へと変容させることで、ユーザが自発的に運動へ没入できる環境を提供する。このように、心理的な負担を軽減しつつ、楽しみながら質の高い運動を遂行できるという点は、これからの健康社会において多大な貢献を果たすものと考えられる。さらに、本研究が対象としたエキセントリックトレーニングは、比較的小さい重量設定であっても高い筋肥大・筋力向上効果が得られるという特性を有している。この特性は、高重量を扱うことが困難な高齢者においても、安全かつ効率的に筋力を維持・向上させるための強力な手段となり得る。今後は、本手法をスクワットのような下肢筋群を対象としたトレーニングへと展開することで、歩行能力の維持や転倒予防に寄与し、人々の健康寿命を延伸させるための基盤技術としての発展が期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に多大なるご支援とご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

まず、本研究を通して終始丁寧かつ的確なご指導を賜りました、中村聡史先生に心より感謝申し上げます。研究の指導のみならず、海外発表に向けた発表練習を何度も行ってくださるなど、常に温かくご指導いただきました。これらのご指導のもと、多くの貴重な経験を積むことができ、自身の大きな成長につながったと感じています。また、研究の相談や議論、ならびに実験への参加などにご協力いただいた中村研究室の同期、先輩、後輩の皆様に感謝いたします。研究活動に関する助言だけでなく、日頃から温かく接していただき、多くの場面で支えていただきました。これらの経験は大切な思い出となっています。そして、自身の進路について自由に選択させてくれ、陰ながら見守り、支えてくれた家族に心より感謝申し上げます。常に変わらぬ支えがあったからこそ、研究や学生生活に真摯に向き合うことができました。

最後に、本研究に関わり、支えてくださったすべての皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] Recovery Science, : トレーニングに関する科学的な記事 (2022), (参照日: 2024-12-04, URL: https://recovery-science.jp/date_2022_vol-2/).
- [2] 株式会社オークローンマーケティング: 新型コロナウイルス感染症流行前後での運動・筋トレ実態調査レポート (2020), (参照日: 2024-12-04, URL: <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000373.000001915.html>).
- [3] 笹川スポーツ財団: スポーツライフ・データ (スポーツライフに関する調査) (2022), (参照日: 2024-12-04, URL: https://www.ssf.or.jp/thinktank/sports_life/data/workout.html).
- [4] Nishikori, S., Yasuda, J., Murata, K., Takegaki, J., Harada, Y., Shirai, Y. and Fujita, S.: Resistance training rejuvenates aging skin by reducing circulating inflammatory factors and enhancing dermal extracellular matrices, *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, p. 10214 (2023).
- [5] Komi, P. V. and Buskirk, E. R.: Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle, *Ergonomics*, Vol. 15, No. 4, pp. 417–434 (1972).
- [6] Westing, S. H., Cresswell, A. G. and Thorstensson, A.: Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extension, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, Vol. 62, No. 2, pp. 104–108 (1991).
- [7] Duchateau, J. and Enoka, R. M.: Neural control of lengthening contractions, *The Journal of Experimental Biology*, Vol. 219, No. Pt 2, pp. 197–204 (2016).
- [8] 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).

- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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, in *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, p. 1–12, New York, NY, USA (2019), Association for Computing Machinery.
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] 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).

- [17] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R. and Wolf, P.: Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: A review, *Psychonomic Bulletin and Review*, Vol. 20, No. 1, pp. 21–53 (2013).
- [18] Ilhan, R. and Bouzouidja, F.: Haptic body position improver during a workout, *International Journal of Engineering and Computer Science*, Vol. 12, No. 3, pp. 25658–25664 (2023).
- [19] Schaffert, N., Janzen, T. B., Mattes, K. and Thaut, M. H.: A Review on the Relationship Between Sound and Movement in Sports and Rehabilitation, *Frontiers in Psychology*, Vol. 10, p. 244 (2019).
- [20] 高久大輔, 中島克人: Kinect を用いた筋力トレーニング支援システム, 第 77 回全国大会公演論文集, Vol. 2015, No. 1, pp. 437–438 (2015).
- [21] Khan, M. U., Saeed, K. and Qadeer, S.: Weight Training Analysis of Sportsmen with Kinect Bioinformatics for Form Improvement, *arXiv*, Vol. abs/2009.09776, (2020).
- [22] Chen, S. and Yang, R. R.: Pose Trainer: Correcting Exercise Posture using Pose Estimation, *arXiv*, Vol. abs/2006.11718, (2020).
- [23] 嶋崎浄, 山口高康: 筋肉部位の活動推定による正しいフォームでの筋力トレーニングの研究, 研究報告モバイルコンピューティングとパーベシブシステム, Vol. 2022-MBL-105, No. 18, pp. 1–7 (2022).
- [24] Takata, M., Fujimoto, M., Yasumoto, K., Nakamura, Y. and Arakawa, Y.: Investigating the Capitalize Effect of Sensor Position for Training Type Recognition in a Body Weight Training Support System, in *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and 2018 International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*, pp. 1404–1408 (2018).
- [25] Zhou, B., Sundholm, M., Cheng, J., Cruz, H. and Lukowicz, P.: Never Skip Leg Day: A Novel Wearable Approach to Monitoring Gym Leg Exercises, in *2016 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp. 1–9, IEEE (2016).

- [26] Noteboom, L., Nijs, A., Beek, P. J., Helm, van der F. C. T. and Hoozemans, M. J. M.: A Muscle Load Feedback Application for Strength Training: A Proof-of-Concept Study, *Sports*, Vol. 11, No. 9, p. 170 (2023).
- [27] 深堀悠人, 米村俊一: ゲーミフィケーションにより行動を高める筋力トレーニング支援システムの提案, Technical Report 15, 情報処理学会 (2022).
- [28] Yang, D., Lu, J., Liu, X. and Tang, H.: Research on Gamified Design of Introductory Core Muscle Training, in *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1833, pp. 218–223, Springer (2023).
- [29] Ozdamli, F. and Milrich, F.: Positive and Negative Impacts of Gamification on the Fitness Industry, *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*, Vol. 13, No. 8, pp. 1411–1422 (2023).
- [30] Vorbeck, B. and Bördlein, C.: Using auditory feedback in body weight training, *Journal of Applied Behavior Analysis*, Vol. 53, No. 4, pp. 2349–2359 (2020).
- [31] Quinn, M., Miltenberger, R., James, T. and Abreu, A.: An evaluation of auditory feedback for students of dance: Effects of giving and receiving feedback, *Behavioral Interventions*, Vol. 32, No. 4, pp. 370–378 (2017).
- [32] Yoo, K., Wu, X., Zhuang, W., Xia, Z. and Liu, Y.: The effects of audible feedback as a coaching strategy on golf skill learning for novice players, *International Journal of Performance Analysis in Sport*, Vol. 20, No. 4, pp. 596–609 (2020).
- [33] Tanaka, Y., Nakamura, T. and Koike, H.: Posture-based Golf Swing Instruction using Multi-modal Feedback, *Journal of Information Processing*, Vol. 30, pp. 107–117 (2022).
- [34] 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).
- [35] 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).

- [36] Hermann, T., Hunt, A. and Neuhoff, J. G.: *The Sonification Handbook*, Logos Verlag, Berlin, Germany (2011).
- [37] 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).
- [38] 奥川遼, 村尾和哉, 寺田努, 塚本昌彦: 聴覚フィードバックを利用したペダリングトレーニングシステム, *コンピュータソフトウェア*, Vol. 33, No. 1, pp. 41–51 (2016).
- [39] 吉岡杏奈, 藤波努: 聴覚フィードバックを用いたランニング練習支援システム, Technical report, 人工知能学会 (2018).
- [40] Ramezanzade, H., Abdoli, B., Farsi, A. and Sanjari, M. A.: The effect of sonification modelling on perception and accuracy of performing jump shot basketball, *International Journal of Sport Studies*, Vol. 4, pp. 1388–1392 (2014).
- [41] Godbout, A. and Boyd, J. E.: Corrective Sonic Feedback for Speed Skating: A Case Study, *Proceedings of the 16th International Conference on Auditory Display* (2010).
- [42] Agostini, T., Righi, G., Galmonte, A. and Bruno, P.: The Relevance of Auditory Information in Optimizing Hammer Throwers' Performance (2004).
- [43] 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).
- [44] Murgia, M., Sors, F., Vono, R., Muroli, A. F., Delitalia, L., Di Corrado, D., et al.: Using auditory stimulation to enhance athletes' strength: An experimental study in weightlifting, *Review of Psychology*, Vol. 19, pp. 13–16 (2012).
- [45] Lorenzoni, V., Staley, J., Marchant, T., Onderdijk, K. E., Maes, P.-J. and Leman, M.: The Sonic Instructor: A Music-Based Biofeedback System for Improving Weightlifting Technique, *PLOS ONE*, Vol. 14, No. 8, p. e0222059 (2019).
- [46] Yang, J. and Hunt, A.: Sonic trainer: real-time sonification of muscular activity and limb positions in general physical exercise, in *Proceedings of the ISON 2013, 4th Interactive Sonification Workshop*, pp. 44–51 (2013).

- [47] Yang, J. and Hunt, A.: Real-time Sonification of Biceps Curl Exercise Using Muscular Activity and Kinematics, in *International Conference on Auditory Display* (2015).
- [48] Hather, B. M., Tesch, P. A., Buchanan, P. and Dudley, G. A.: Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training, *Acta Physiologica Scandinavica*, Vol. 143, No. 2, pp. 177–185 (1991).
- [49] Higbie, E. J., Cureton, K. J., Warren, G. L. I. and Prior, B. M.: Effects of concentric and eccentric training on muscle strength, cross-sectional area, and neural activation, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 81, No. 5, pp. 2173–2181 (1996).
- [50] Farthing, J. P. and Chilibeck, P. D.: The effects of eccentric and concentric training at different velocities on muscle hypertrophy, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 89, No. 6, pp. 578–586 (2003).
- [51] Friedmann, B., Kinscherf, R., Vorwald, S., Müller, H., Kucera, K., Borisch, S., Richter, G., Bärtsch, P. and Billeter, R.: Muscular adaptations to computer-guided strength training with eccentric overload, *Acta Physiologica Scandinavica*, Vol. 182, No. 1, pp. 77–88 (2004).
- [52] Norrbrand, L., Fluckey, J. D., Pozzo, M. and Tesch, P. A.: Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size, *European Journal of Applied Physiology*, Vol. 102, No. 3, pp. 271–281 (2008).
- [53] Akinoglu, B., Paköz, B., Yilmaz, A. E., Shehu, S. U. and Kocahan, T.: Effect of contraction type at varying angular velocities on isokinetic muscle strength training, *Journal of Exercise Rehabilitation*, Vol. 19, No. 4, pp. 228–236 (2023).
- [54] Eliasson, J., Elfegoun, T., Nilsson, J., Koehnke, R., Ekblom, B. and Blomstrand, E.: Maximal lengthening contractions increase p70 S6 kinase phosphorylation in human skeletal muscle in the absence of nutritional supply, *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, Vol. 291, No. 6, pp. E1197–E1205 (2006).
- [55] Franchi, M. V., Atherton, P. J., Reeves, N. D., Flueck, M., Williams, J., Mitchell, W. K., Selby, A., Beltran Valls, R. M. and Narici, M. V.: Architectural,

- functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle, *Acta Physiologica*, Vol. 210, No. 3, pp. 642–654 (2014).
- [56] Moore, D. R., Phillips, S. M., Babraj, J. A., Smith, K. and Rennie, M. J.: Myofibrillar and collagen protein synthesis in human skeletal muscle in young men after maximal shortening and lengthening contractions, *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, Vol. 288, No. 6, pp. E1153–E1159 (2005).
- [57] Rahbek, S. K., Farup, J., Moeller, A. B., Vendelbo, M. H., Holm, L., Jessen, N. and Vissing, K.: Effects of divergent resistance exercise contraction mode and dietary supplementation type on anabolic signalling, muscle protein synthesis and muscle hypertrophy, *Amino Acids*, Vol. 46, No. 10, pp. 2377–2392 (2014).
- [58] Willis, C. R. G., Deane, C. S., Ames, R. M., Bass, J. J., Wilkinson, D. J., Smith, K., Phillips, B. E., Szewczyk, N. J., Atherton, P. J. and Etheridge, T.: Transcriptomic adaptation during skeletal muscle habituation to eccentric or concentric exercise training, *Scientific Reports*, Vol. 11, p. 23930 (2021).
- [59] Cvecka, J., Vajda, M., Novotna, A., Loeffler, S., Hamar, D. and Krcmar, M.: Benefits of Eccentric Training with Emphasis on Demands of Daily Living Activities and Feasibility in Older Adults: A Literature Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 20, No. 4, p. 3172 (2023).
- [60] Harris-Love, M. O., Gollie, J. M. and Keogh, J. W. L.: Eccentric Exercise: Adaptations and Applications for Health and Performance, *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, Vol. 6, No. 4, p. 96 (2021).
- [61] Dang, M. D., Luong, D. P., Napier, C. and Kim, L. H.: Co-Design and Evaluation of Visual Interventions for Head Posture Correction in Virtual Reality Games, in *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA (2025), Association for Computing Machinery.
- [62] Salmoni, A. W., Schmidt, R. A. and Walter, C. B.: Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal, *Psychological Bulletin*, Vol. 95, No. 3, pp. 355–386 (1984).

-
- [63] Winstein, C. J., Pohl, P. S. and Lewthwaite, R.: Effects of physical guidance and knowledge of results on motor learning: Support for the guidance hypothesis, *Research Quarterly for Exercise and Sport*, Vol. 65, No. 4, pp. 316–323 (1994).

研究業績

- [1] 松田さゆり, 中川由貴, 友稀奈, 渡邊健斗, 大石琉翔, 中村聡史, 小松孝徳, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行: ドレミハンドル: 操舵角に応じた音提示手法の複数種のカーブを用いた検証, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2022-HCI-200, No. 8, pp. 1-8 (2022).
- [2] 大石琉翔, 中川由貴, 渡邊健斗, 松田さゆり, 中村聡史, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行: 内発的動機付けが運転に及ぼす影響の調査: クリック選択と音声選択の比較, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2023-HCI-201, No. 18, pp. 1-8 (2023).
- [3] 渡邊健斗, 松田さゆり, 大石琉翔, 中川由貴, 中村聡史, 小松孝徳, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行: ドレミハンドルにおける一音階に対する角度幅がカーブ走行の上達に与える影響の調査, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2023-HCI-201, No. 36, pp. 1-8 (2023).
- [4] 渡邊健斗, 松田さゆり, 大石琉翔, 中川由貴, 小松孝徳, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行: 操舵角度に応じた音提示の音高変化がカーブ走行時の操舵に及ぼす影響, 信学技報 ヒューマンコミュニケーション基礎研究会 (HCS) , Vol. 123, No. HCS2023-31, pp. 151-156 (2023).
- [5] 重松龍之介, 大石琉翔, 中川由貴, 中村聡史, 鳥居武史, 澄川瑠一, 高尾英行: 選択肢の表現が音声入力での選択に及ぼす影響, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2023-HCI-205, No. 34, pp. 1-8 (2023).
- [6] 大石琉翔, 中村聡史: エキセントリックトレーニングにおける動作速度の安定性向上のための効果音フィードバック, 情報処理学会 研究報告エンタテインメントコンピューティング (EC) , Vol. 2024-EC-71, No. 24, pp. 1-8 (2024).

- [7] 大石琉翔, 中村聡史: エキセントリックトレーニングにおける適切な動作速度を維持するための聴覚フィードバック手法の検討, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2025-HCI-211, No. 7, pp. 1–8 (2025).
- [8] 村上楓夏, 重松龍之介, 大石琉翔, 中川由貴, 中村聡史, 礼士郎, 鳥居武史: 英文選択肢の長さが発話選択による選択に及ぼす影響, 情報処理学会 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション (HCI) , Vol. 2025-HCI-211, No. 11, pp. 1–8 (2025).
- [9] Oishi, R. and Nakamura, S.: Comparison of Speed-based and Position-based Auditory Feedback in Eccentric Strength Training, in *Proceedings of the 30th International Conference on Auditory Display (ICAD 2025)*, pp. 167–174 (2025).
- [10] Shigematsu, R., Oishi, R., Nakagawa, Y., Nakamura, S., Torii, T. and Takao, H.: Guiding Task Choice in Japanese Voice Interfaces through Vocalization Cost: Click-based vs. Voice-based Selection, in *Proceedings of the ACM Multimedia Asia 2025 (MMAsia '25)*, pp. 1–7 (2025).
- [11] 大石琉翔, 中村聡史: エキセントリックトレーニングにおける動作速度維持を促す聴覚フィードバック手法の保持効果検証, 情報処理学会 研究報告デジタルコンテンツクリエーション (DCC) , Vol. 2026-DCC-42, No. 19, pp. 1–8 (2026).