

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

大石 琉翔¹ 中村 聡史¹

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。我々のこれまでの研究において、トレーニング動作が速くなってしまいう問題に着目し、動作速度を安定させるために速度に基づいて効果音をフィードバックする手法 (SpeedFB) を提案した。この手法では、適切な動作速度の維持に効果的であることが示された。一方、動作速度の安定を図る別のアプローチとして、腕の位置に基づくフィードバック (PositionFB) が考えられるが、SpeedFB 手法と PositionFB 手法を直接比較した研究はこれまでに行われていない。そこで本研究では、SpeedFB 手法と PositionFB 手法が動作速度に与える影響を比較し、それぞれの効果を検証することを目的とした。実験では、腕のトレーニングであるダンベルカールを対象に SpeedFB 手法と PositionFB 手法を用いたエキセントリックトレーニングを比較した。その結果、PositionFB 手法よりも SpeedFB 手法の方が、動作速度を適切な範囲で安定させ、一貫したトレーニング動作を実現できることが明らかになった。

1. はじめに

20代から30代を中心に筋力トレーニング（以下、筋トレ）への関心が高まり [1][2]、実施人口も増加している [3]。筋トレは健康や美容の維持 [4] を目的として幅広い世代に支持され、ジムや自宅など多様な環境で行われている。

筋トレの実施方法としては、トレーナの指導を受けながら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、エニタイムフィットネス^{*1}やchocoZAP^{*2}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、ひとり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ふことや、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ふことが問題として挙げられる。特に、筋肉を伸長させながら力を発揮するエキセントリックトレーニングでは、適切な速度で動作を行うことがその効果を高めるうえで重要である。しかし、ひとりで行う場合にはその速度を一定に保つことが難しくなるため、効果的な支援が必要である。

この問題に対し、我々はこれまでの研究 [5] で、ダンベルカールにおけるエキセントリックトレーニング中の動作速度を安定させることを目指し、効果音を用いたフィードバック手法を提案してきた。この手法では、動作速度が適切であればエネルギーを蓄えるような「チャージ音」を鳴らし、速すぎる場合には緩めるよう促す音を鳴らすことで、聴覚的な刺激によって自然に動作速度の調整を可能としている。また実験により、フィードバックがない条件と比較して、動作速度を一定に保つ効果があることが明らかになった。

一方、Yang ら [6] は、腕の位置に基づいて音階を鳴らす手法を提案している。この手法は、腕の位置が特定の範囲に達するごとに音階が変化し、動作の進行状況を段階的に示す点が特徴である。Yang らの手法で利用者が音階の変化を意識し、動作中の速度のばらつきを抑え、速度を均一に保てる可能性があるが、動作速度の抑制効果については十分に検証されていない。

動作を安定させるためのフィードバック手法において、我々が提案した速度に基づくフィードバックと、Yang らが提案した腕の位置に基づくフィードバックは、それぞれ異なるアプローチを採用している。速度に基づく手法は、適切な動作速度を維持することを促し、自然な速度調整を可能にする点を特徴としている。一方、位置に基づく手法は、動作の一貫性を高めることに焦点を当てている。しか

¹ 明治大学
Meiji University

^{*1} <https://www.anytimefitness.co.jp/>

^{*2} <https://chocozap.jp/>

し、これらの手法を直接比較した研究はこれまでに行われておらず、どちらの手法がエキセントリックトレーニングにおいて効果的か、またそれぞれにどのような特性や利点があるかを明らかにすることが求められる。

そこで本研究では、これら2つのフィードバック手法を比較し、動作速度や速度の一貫性に与える影響を実験的に検証する。これにより、エキセントリックトレーニングにおけるより効果的な支援方法の可能性を探る。

2. 関連研究

2.1 フォームや姿勢の改善による筋トレ支援の研究

トレーニングの動作やフォームを適切にする支援を行う研究として、高久ら [7] は、Kinect を用いてユーザの骨格を検出し、それを視覚的に与えることで適切なフォームへの改善の支援を行い、腹筋運動でのフォームを改善できることを明らかにした。また、Khan ら [8] の研究では、Kinect を用いてスポーツ選手の動作をリアルタイムで分析し、フォームの誤りを特定することでトレーニングの改善を支援するシステムを提案した。その結果、初心者のフォームを改善する効果を明らかにした。嶋崎ら [9] は、カメラ付きデバイスで撮影されたトレーニング動画から、深層学習により姿勢と筋電位の関係から効いている筋肉の部位を推定し、反動を使ったトレーニングを防止する研究を行った。その結果、ダンベルカールのトレーニングにおいて反動を防止し、効率の良いトレーニングができることを明らかにした。Chen ら [10] は、OpenPose を用いた姿勢推定技術と機械学習を組み合わせた Pose Trainer を開発し、トレーニング中のフォームの誤りを検出することで具体的な改善点をフィードバックするシステムを提案した。このシステムでは、トレーニング動画から関節の位置を推定し、フォームの適正を評価している。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た。これらの研究は、フォームや姿勢の改善に焦点を当てているのに対し、本研究は動作速度に着目しており、動作速度を適切にすることでトレーニング効果を高める支援手法を検討する。

2.2 ソニフィケーションによる支援に関する研究

筋トレの動作支援において、効果音を用いたフィードバックに関する研究が注目されている。Yang ら [6] は、ダンベルのカール運動において、筋肉活動や動作速度、腕の位置をリアルタイムで音に変換する複数の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、動作速度が速すぎる場合には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がある。これらの手法は主観評価で有効性が示唆されているが、定量的な効果の検証や手法間の比較は十分に行われて

いない。

また、Yang ら [11] は、[6] を発展させたフィードバックを用いて、フィードバックの有無による動作ペースの比較を行っている。実験の結果、音響フィードバックが動作ペースやトレーニングの楽しさ、モチベーション向上に寄与することを明らかにした。しかし、これらの研究は、トレーニングの難易度が低く設定されていたため、実際の筋トレの場面における筋肉に高い負荷のかかる状況での効果については十分に検討されていない。本研究では、筋肉に高い負荷のかかる状況下で、音響フィードバックが動作速度に与える影響を検証し、より現実的な筋トレ環境での効果を検証することを目的とする。

筋トレ以外の分野でも、ソニフィケーションを用いた支援に関する研究は数多く行われている。Murgia ら [12] は、聴覚刺激が筋力発揮に与える影響を調査し、ウェイトリフティングのベンチプレスにおいて高強度の音を動作に同期させることで、平均的なパワーの発揮が向上することを明らかにした。また、Ramezanzade ら [13] は、バスケットボールのジャンプショットにおいて、視覚と聴覚を組み合わせたフィードバックが動作の認識、精度、学習を向上させることを示した。特に、視覚で捉えにくい動的情報を聴覚で補完することで、学習効率が向上することが明らかになった。他にも、スピードスケートやハンマー投げ、ライフル射撃など [14][15][16]、さまざまなスポーツにおいてもソニフィケーションの有効性が確認されている。本研究では、このようなソニフィケーションの利点を筋トレ動作の支援に応用し、動作速度の安定化やトレーニング効果の向上を目指す。

3. 実験システム

本研究では、これまでの研究 [5] で実装したプロトタイプシステムを基に、速度に基づくフィードバックはそのまま採用し、新たに腕の位置に基づくフィードバックを追加するよう実験システムを改良した。本システムは、Apple の統合開発環境である Xcode を用いて Swift で実装し、スマートウォッチによる動作データの取得と音響フィードバックのリアルタイム処理を可能にしている。

本章では、まず各フィードバック手法のシステム設計について述べた後、システムの利用方法について記述する。

3.1 速度に基づくフィードバック手法 (SpeedFB)

SpeedFB は、動作速度が適切であれば「チャージ音」が鳴り、不適切であれば「エネルギーが抜ける音」をフィードバックするものである。この動作速度の計測には、スマートウォッチから取得される Y 軸の角速度を使用した。また、パーソナルトレーニングジム Dr.training [17] の推奨するエキセントリックトレーニングの動作時間 (3~5 秒) を基に、適切な動作速度を設定した。本研究では、利用者ご

とに異なる可動域を考慮して、基準の動作速度を定めるよう改良を行った。これまでの研究 [5] では、ダンベルカールの可動域を一律に 135° と仮定して基準を設定していたが、個人差を考慮して可動域を動作開始時と終了時の roll 角から計測する方式に変更した。例えば、利用者の可動域が 120° の場合、動作を 3 秒で完了するには 1 秒間あたり 40° 以下の速度 (40°/s 以下) が適切とみなされる。

データは 60Hz のサンプリングレートで取得されるが、10 フレーム分の角速度平均値を基に適切か否かを判定することで、音の切り替わりが頻繁になるのを防ぎ、自然なフィードバックを実現している。

具体的なアルゴリズムは、可動域を基に適切な動作速度の閾値を設定し、角速度が閾値内であれば「チャージ音」を、閾値外であれば「エネルギーが抜ける音」を再生する。これをリアルタイムで実行することで、速度に基づいたフィードバックを行う。

フィードバック音には、効果音ファクトリー^{*3}の「エネルギーチャージ (気功波 3)」と無料効果音で遊ぼう!^{*4}の「空気が抜ける 1」を使用している。

3.2 腕の位置に基づくフィードバック手法 (PositionFB)

PositionFB は、腕の位置に応じて音階を変化させ、動作の進行度を段階的にフィードバックするものである。ダンベルカールの可動域をスマートウォッチから取得する roll 角を基に計測し、可動域を 8 段階に分割して音をマッピングしている。具体的なマッピングは表 1 の通りであり、開始位置ではドの音 (C: 261Hz)、終了位置では 1 オクターブ上のドの音 (C': 523Hz) で、動作が進むにつれて音階が上昇するようにしている。なお、開始位置は、腕を屈曲させダンベルを上げきった状態の roll 角とし、終了位置は腕を完全に伸ばした状態の roll 角を基準としている。この角度差が可動域に相当し、その可動域を 8 等分して各段階に割り当てている。

データは同じく 60Hz のサンプリングレートで取得され、毎フレームごとに roll 角を取得し、腕の位置が新たな段階に到達した瞬間に対応する音が即座に切り替わる。これにより、動作の進行状況をリアルタイムで利用者に伝えるフィードバックを実現している。

具体的なアルゴリズムは、可動域を 8 段階に分割し、各段階に音階をマッピングする。腕の位置が新たな段階に到達すると対応する音階を再生し、動作の進行度をリアルタイムでフィードバックする。

音階のフィードバックには、魔王魂^{*5}の「ピアノ 1-1」から「ピアノ 1-8」の音を利用している。



図 1 Apple Watch の UI 画面

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

3.3 システムの利用方法

本システムは、Apple Watch を用いて操作可能なインターフェースとして実現しており、動作データを計測できるように設計されている。図 1 に示すように、Apple Watch の画面には主要な機能として、モード選択と計測操作を行うボタンが配置されている。

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、以下の 2 つのフィードバックモードを切り替えることが可能である。

- SpeedFB: 動作速度に応じて「チャージ音」や「エネルギーが抜ける音」をフィードバックする
- PositionFB: 腕の位置に基づいて音階が変化し、動作の進行状況をフィードバックする

画面中央には「START」と表示されたボタンがあり、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。計測データは終了時に iPhone 上のアプリケーションに保存される。

4. 実験

4.1 目的・仮説

本実験では、速度に基づくフィードバック (SpeedFB) と腕の位置に基づくフィードバック (PositionFB) のそれぞれが、動作速度および速度の一貫性に与える影響を比較検証することを目的とする。実験で検証する仮説は以下の

^{*3} <https://se-factory.net/>

^{*4} <https://taira-komori.jp.org/>

^{*5} <https://maou.audio/>

通りである。

- (1) SpeedFB を用いることで、適切な動作速度を維持でき、動作時間が長くなる
- (2) PositionFB を用いることで、各動作における動作速度のばらつきが抑えられ、動作速度の一貫性が向上する

4.2 実験概要

本研究では、ダンベルカールのエキセントリックトレーニングを対象に、SpeedFB 手法と PositionFB 手法の2つのフィードバック手法を比較し、それぞれの手法が動作速度および速度の一貫性に与える影響を検証するための実験を行った。なお、フィードバックがない条件はこれまでの研究 [5] で、SpeedFB に比べて動作速度が速くなりやすく、動作のばらつきが大きくなることが示されているため、本実験ではフィードバックがない条件を除外し、異なるフィードバック手法間の比較に焦点を当てている。

4.3 実験協力者と実験デザイン

実験開始前には、エキセントリックトレーニングに慣れるための練習を実施し、動作の正確性を確認する。この練習による疲労が報告された場合には、疲労が回復するまで実験の開始を延期する措置を講じる。疲労が継続する場合には、実験からの離脱も許容する。実験開始後は、実験協力者ごとに週2セッションのペースでトレーニングを行い、セッション間には最低48時間の間隔を設けることとした。これにより、筋肉疲労の蓄積を防止し安全性を確保する。

実験は、実験者内比較を採用し、SpeedFB 手法と PositionFB 手法の2つの手法をそれぞれ体験してもらうこととした。各実験協力者は、2つのフィードバック手法をそれぞれ1週間半かけて3セッションずつ、合計3週間で6セッション実施してもらう。1つの手法を3セッション続けて実施した後、もう一方の手法でトレーニングを実施する形式とし、どちらの手法を先に行うかはランダムに決定する。



図2 実験の様子

4.4 実験手順

実験開始前に、ダンベルカールでのエキセントリックトレーニングの適切なフォームや使用するフィードバックシステムに慣れるための練習を実施した。この練習では、実験協力者に3~5秒の間でダンベルを緩やかに下ろす動作をしてもらい、正確なフォームを身につけてもらった。その後、別日に1RM（1回の最大挙上重量）の測定を行い、個人の筋力に応じた負荷設定を決定した。1RMの測定は、徐々に重量を増やしながら1回のみ挙上できる重量を確認する方法により実施し、「Science for Sport[18]」に記載された手順を参考に行った。

実験で使用するダンベルの重量は、1RM（1回の最大挙上重量）の80%を基準とした。これは、筋肉に高い負荷がかかる状況下で音響フィードバックの効果を検証し、現実的な筋トレ環境に近い条件を再現するためである。ただし、使用する可変式ダンベルの特性上、細かい重量調整が難しいため、1RMの80~90%の範囲内で重量を設定した。

各セッション前には、使用するフィードバック手法の特性に応じた練習を実施した。SpeedFB 手法の場合、3秒より速い動作では「エネルギー音が抜ける音」が鳴り、5秒以上かかる動作では「チャージ音」が最大で5秒間のみ鳴る。この特性を活用し、動作が速すぎず、かつ5秒を超えないように調整しながら、音の挙動を確認しながら適切な動作速度を自然に把握できるよう練習した。一方、PositionFB 手法の場合、3~5秒でダンベルを下ろす動作に対応した音階の変化を理解することが重要であるため、トレーニング前に3秒、4秒、5秒で動作した際の音階を事前に確認してもらい、音の進行に合わせて動作する練習を行った。

本実験では、実験協力者はエキセントリック収縮（腕を下ろす動作）のみに取り組み、コンセントリック収縮（ダンベルを持ち上げる動作）は著者が補助することとした。これにより、実験協力者の負担を軽減し、エキセントリック収縮に集中できる環境を整えた。図2に実験の様子を示す。

トレーニング後には簡易アンケートを実施し、各フィードバック手法についての動作の難易度、有用性、楽しさなどの主観的な評価をしてもらった。また、1つの手法を終えるごとに、自由記述形式で音の印象や使用中の違和感、全体的な感想を記載してもらい、フィードバック手法の評価や改善に向けた参考情報を得た。

図3に、全体を通じた実験の進行と1セッションごとのトレーニング手順について示す。

5. 結果

本実験では、エキセントリックトレーニングにおける動作速度および速度の一貫性に与える影響を検証するために、「速度に基づくフィードバック（SpeedFB）」と「腕の位置に基づくフィードバック（PositionFB）」を比較した。本

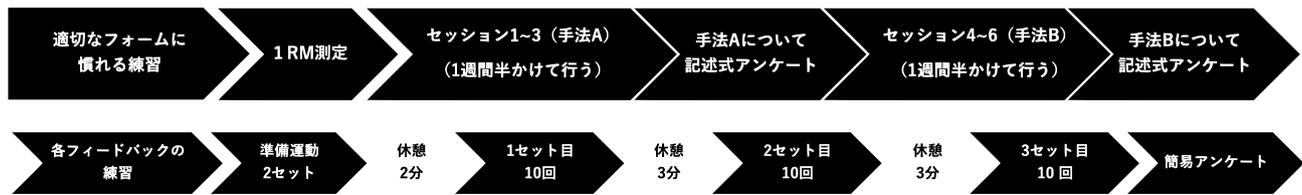


図 3 (上) 実験全体の進行手順, (下) 1セッションのトレーニング手順

章では、これらの手法における動作時間および動作の安定性に関する結果を示す。動作速度が速ければ動作時間は短く、動作速度が遅ければ動作時間が長くなるため、動作時間は動作速度を間接的に評価する指標として有用である。また、エキセントリックトレーニングでは3~5秒間での動作を目指すため、動作速度そのものよりも動作時間の観点から結果を評価の方が実践的であると判断した。

5.1 分析対象データと分析手法

本実験では、20~24歳の成人男女を対象に24名募集した。このうち、実験前の練習日でエキセントリックトレーニングを行った際に、疲労が報告された数名について、実験を延期する措置を取った。しかし、その後も回復が見られなかった3名については離脱を許容し、最終的に21名（男性16名、女性5名）が実験を完了した。21名の実験協力者が1セッションにつき3セットのトレーニングを6セッション実施したため、収集したデータの総数は $21 \times 6 \times 3 = 378$ 件となった。このうち、測定ミスによる4件のデータを除外し、最終的に374件のデータを分析対象とした。

本研究では、エキセントリック収縮局面に絞って分析を行うため、角速度が0未満の数値が一定以上継続する区間をエキセントリック収縮局面とした。しかし、動作終了後の微小な角速度の変動や開始位置でのノイズにより、エキセントリック収縮局面の区間が実際の動作時間と完全に一致しない可能性がある。このノイズは結果に大きな影響を与えないと判断しているが、解釈には注意が必要である。

5.2 動作時間の比較

図4は、各手法の動作時間を示す箱ひげ図である。動作時間は、エキセントリック収縮局面の始まりから終わりまでのフレームで経過時間で求めている。図4によると、SpeedFB手法とPositionFB手法の間で動作時間の中央値は大きな差がみられないが、分散はPositionFB手法の方が大きい傾向が確認できる。ここで、手法間の分散の差を確認するためにF検定を実施し、手法間で分散に有意な差が認められた($F = 33.11, p < 0.01$)。手法ごとの分散は、SpeedFB手法で0.375、PositionFB手法で0.953であった。

手法ごとの中央値は、SpeedFB手法で4.78秒、PositionFB

手法で4.66秒であり、SpeedFB手法を用いることで動作時間が長くなるという仮説通りの結果となったが、両手法の差はわずかであり、SpeedFB手法が動作時間に与える影響は小さいと考えられる。この結果は、動作時間の中央値が手法間で大きく異なることから、いずれのフィードバック手法でも適切な動作時間(3~5秒)を達成できている可能性を示している。一方で、PositionFB手法で分散が大きいことは、実験協力者間や試行間で動作速度にばらつきが生じやすいことを意味している。

5.3 速度の一貫性の比較

図5は、各手法の1回の動作の速度の標準偏差を示す箱ひげ図である。速度の標準偏差は、エキセントリック収縮局面の始まりから終わりまでのフレームの角速度のデータに基づき計算した。図5によると、PositionFB手法の方が標準偏差が小さく見える。ここで、手法間の速度のばらつきに違いがあるかを検証するために、Mann-Whitney U検定を実施した。その結果、手法間で中央値に有意な差が認められた($p < 0.01$)。手法ごとの中央値はSpeedFBで $9.80^\circ/s$ 、PositionFBで $9.03^\circ/s$ であり、PositionFBを用いることで動作速度のばらつきが抑えられるという仮説通りの結果となった。しかし、これも両手法の差はわずかであり、PositionFB手法が動作速度の一貫性に与える効果は小さいと考えられる。

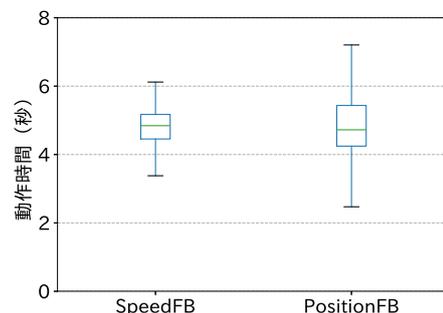


図 4 各手法の動作時間分布を示す箱ひげ図

5.4 アンケート結果

本実験では、トレーニング後に各フィードバック手法に対する主観的な評価を得るため、アンケート調査を実施した。アンケートでは、動作の難易度やフィードバックの有

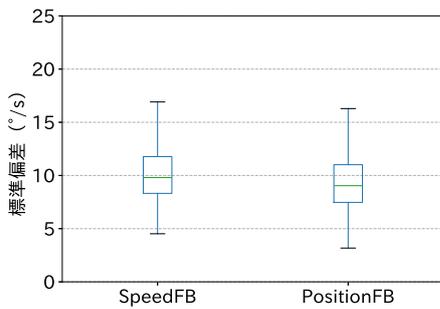


図 5 各手法の速度の標準偏差を示す箱ひげ図

用性、動作への集中度、トレーニングの楽しさなどを評価する項目で構成されており、それぞれ5段階評価で回答を得た。また、自由記述形式の質問を通じて、音の印象や違和感、および全体的な感想についても意見を収集した。

アンケート結果の一部を表2に示す。この表では、各質問項目に対する SpeedFB 手法と PositionFB 手法の平均評価値を比較している。表2のアンケート結果から、SpeedFB 手法と PositionFB 手法は動作難易度において大きな差は見られず、どちらも適切な難易度と評価された。また、SpeedFB 手法は動作速度の意識やコントロールのしやすさ、集中度、楽しさといった多くの項目で PositionFB 手法よりも高い評価を得た。

記述式の回答について、SpeedFB 手法では、「音が動作速度を意識する助けになった」「トレーニングのモチベーション維持につながる」といったポジティブな意見が多く得られた。一方、「速い判定がどの程度の速度なのかわからなかった」といった、速度の判定基準の曖昧さを指摘する意見が得られた。

PositionFB 手法では、「音階のテンポ感が良かった」「音階の変化で速度が調整しやすかった」といったポジティブな意見が得られた一方、「音の間隔が均一に感じない」「音と動作のタイミングに遅延を感じた」といった、間隔の不均一さを指摘する意見も見られた。また、「音に集中することで心理的負荷が増す」といった課題も挙げられた。

2つの手法に共通する課題として、音に集中するあまり筋肉への意識が薄れてしまう点が挙げられた。また、速度判定や音のフィードバック基準が明確でないため、動作の正確さに不安を感じる実験協力者が多かった。一方で、音によるフィードバックがトレーニング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、ポジティブな評価も多く得られた。

6. 考察

6.1 動作時間に関する考察

図4から、SpeedFB 手法と PositionFB 手法のいずれも中央値が適切な動作時間範囲（3～5秒）に収まっており、どちらの手法でもフィードバックが動作時間を調整するのに有効であったことが示された。また、PositionFB 手法の

動作時間の分散が大きいことから、動作時間にばらつきが生じやすい可能性が考えられる。ここで、図6に各手法における動作時間の分布を示したヒストグラムを示す。図6より、SpeedFB 手法では動作時間が3～5秒の範囲に集中しており、動作速度の安定性が高いことがわかる。一方、PositionFB 手法では分布の幅が広く、特に6秒以上の動作時間が観測される頻度が高い。PositionFB 手法では、動作が遅すぎる場合にそれを明確に知らせる機能がないため、動作が適切な範囲を超える事例が多かった可能性がある。これに対して、SpeedFB 手法ではフィードバック音が最大5秒で終了するため、動作が遅すぎることが分かりやすく、動作時間が適切な範囲に収まりやすかったと考えられる。このことから、SpeedFB 手法のほうが動作時間を適切な範囲内に維持する効果が高いことが分かる。

図7に特定の実験協力者における各手法の動作時間を表した箱ひげ図を示す。SpeedFB 手法が狭い範囲で動作時間を適切に収めている一方で、PositionFB 手法では動作時間が大きくばらついており、6秒以上の試行が多く見られる。この実験協力者を含む一部の実験協力者において、PositionFB 手法で動作時間が適切な範囲を超える例が見られた要因として、負荷調整の問題が挙げられる。本実験では、1RM を基に負荷を設定し、ある程度高い負荷環境で行うことを前提としていたが、一部の実験協力者にとって負荷が十分ではなかった可能性がある。その結果、PositionFB 手法では動作を過度に遅くしても容易に継続でき、6秒以上の遅い試行が多く観測されたと考えられる。

これらの結果を踏まえると、SpeedFB 手法では、各動作の動作時間のばらつきが少なく、PositionFB 手法に比べて、動作速度を安定させる効果が高い可能性が示された。一方で、PositionFB 手法では、動作時間のばらつきが大きいことが課題として挙げられ、このばらつきを抑えるための改善策を検討する必要がある。また、本実験では一部の実験協力者において負荷設定が適切でなかったため、今後は動作時間を正確に比較できるよう調整が必要である。

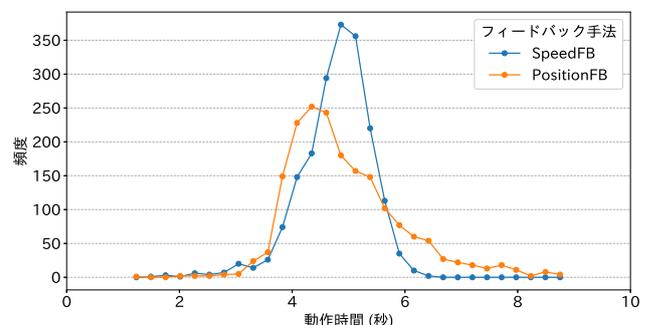


図 6 各手法の動作時間分布を示すヒストグラム

6.2 速度の一貫性に関する考察

図5から、PositionFB 手法の方が速度の標準偏差が小

表 2 アンケート結果

質問項目	SpeedFB 手法	PositionFB 手法
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	3.14
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？	4.59	4.34
音によって動作をコントロールしやすと感じましたか？	4.40	3.97
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	4.10
音があることで、動作に集中しやすくなりましたか？	4.44	4.06
トレーニングは楽しかったですか？	4.53	4.40
トレーニングをまたやりたいと思いますか？	4.39	4.33

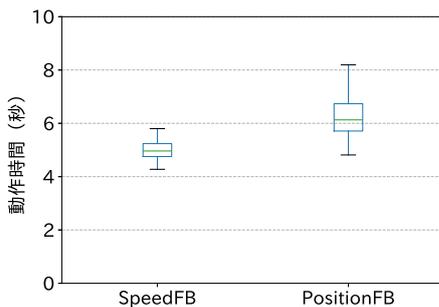


図 7 特定の実験協力者の各手法の動作時間を示す箱ひげ図

さい結果が得られた。音階の変化の方が速度の変化を認識しやすい特徴があり、動作速度のばらつきを抑える要因として考えられる。一方、SpeedFB 手法は速度変化に対する直接的なフィードバックを持たないにもかかわらず、PositionFB 手法とほぼ同等の標準偏差を示していた。この結果は、SpeedFB 手法においても動作速度のばらつきを抑える要因が存在したことを示している。速度のばらつきを抑えられた理由として、動作速度が速い場合にフィードバックされることが、実験協力者に対して動作速度を調整する強い動機づけとなった可能性が挙げられ、速すぎる動作を避けるための意識が働き、動作全体の速度が自然と一定に保たれたと考えられる。また、SpeedFB 手法の適切な速度で提示されるフィードバック音であるチャージ音は、音が段階的に高くなっていく特徴を持つため、動作中の一定な速度を意識する手掛かりとして機能し、結果的に動作速度のばらつきを抑制した可能性がある。

これらの結果を踏まえると、PositionFB 手法は音階の変化を通じて速度のばらつきを抑える効果を持つ一方で、SpeedFB 手法でも動作速度を一定に保つ効果があることがわかった。

6.3 アンケート結果に関する考察

SpeedFB 手法は、「動作速度を意識しやすい」「動作をコントロールしやすい」などの評価項目で PositionFB 手法よりも高い評価が得られた。これは、SpeedFB 手法が動作速度の調整を直感的に行いやすかったことが理由と考えられる。一方、自由記述では速度の判定基準の曖昧さが指摘

された。これは、動作が「速い」か「速くない」かの二択でしかフィードバックされないため、わずかに速くなった場合でも「速い」と判定されてしまうことが原因として考えられる。このため、実験協力者は、わずかに速い場合でも「速い」と判定されるため、速度判定が厳しすぎと感じたり、フィードバックに違和感を覚えた可能性がある。この課題を解決するためには、速度が判定基準をどの程度超過しているか、あるいは現在の速度がどの位置にあるのかを、より具体的にフィードバックする必要があると考えられる。

PositionFB 手法については、「音階のテンポ感が良かった」「速度の調整がしやすい」といった肯定的な意見がある一方で、「音に集中することで心理的負荷が増した」といった課題が指摘された。この課題は、SpeedFB 手法に比べて動作への集中度が低かった要因の一つと考えられる。SpeedFB 手法は、音階の変化に基づいて動作速度を調整するため難易度が高く、音のフィードバックに注意を向けすぎたことで、動作全体への集中度が低下した可能性がある。この課題を解決するためには、フィードバックをより直感的でわかりやすいものにするのが求められる。

これらの結果を踏まえると、快適なフィードバック実現には、フィードバック内容が具体的でわかりやすく、実験協力者が現在の動作状態を正確に把握できる仕組みが必要である。特に、SpeedFB 手法においては、速度がどの程度適切または不適切であるかを聴覚的に示すなど、より詳細なフィードバックが求められる。また、フィードバックが過度に集中力を奪わないよう設計することが重要であり、心理的負荷を軽減するためには、フィードバックが直感的でわかりやすいものにする必要がある。これらの要素を改善することで、動作の正確性と快適性を両立するフィードバックシステムが可能になると期待される。

7. まとめ

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速度の調整と安定性を目的として、速度に基づくフィードバック (SpeedFB) と腕の位置に基づくフィードバック

(PositionFB) の 2 つの手法を比較検証した。その結果、SpeedFB 手法では動作時間を適切な範囲 (3~5 秒) 内で安定させるだけでなく、一定の動作速度でトレーニングを行え、一貫したトレーニング動作を実現する効果が明らかになった。これにより、SpeedFB 手法は初心者などの筋トレに慣れていない人に対して、適切な速度の維持ができるフィードバック手法であることが示された。一方で、PositionFB 手法では動作時間が適切な範囲を超える事例が多く見られ、動作時間を安定させることが難しい傾向があった。また、音階を綺麗に鳴らそうとする意識が動作を遅くする方向に働く効果も得られ、音階の変化が動作中の速度に影響を与えている可能性が示された。さらに、主観評価の結果から、SpeedFB 手法は PositionFB 手法と比較して、動作速度を直感的に意識しやすく動作のコントロールがしやすいことが明らかになった。なお、PositionFB 手法では音階の変化が動作速度の調整を助ける一方で、フィードバックに集中しすぎることによって心理的負荷が増加する課題が見られた。これらの結果から、効果的なフィードバックシステムには、動作速度を正確に把握でき、直感的で使いやすい設計が重要であることが示された。これらを考慮することで、動作の正確性と快適性を両立するシステムが期待される。

本研究を通じて、異なるフィードバック手法がトレーニング動作に与える特性と課題が明らかになったが、研究にはいくつかの制約があった。特に、負荷の高い状況下でのフィードバック効果を検証することが重要であると考えたが、負荷の調節が難しく、実験環境で十分に再現できなかった点が挙げられる。今後は、日常的な筋トレ環境により近い条件を再現し、フィードバック手法の実践的な有効性を検証することが求められる。

今後の研究では、実際のトレーニング環境に近い負荷条件や多様なトレーニングにおけるフィードバック手法の効果を検証することで、汎用性の高いトレーニング支援システムを目指す。また、フィードバックがトレーニング中の筋肉への意識や動作精度に与える影響を明らかにするため、筋電図を用いた筋活動の計測などのデータに基づいた分析を行う必要がある。さらに、SpeedFB 手法と PositionFB 手法を組み合わせた新たなフィードバック手法を検討し、その効果を検証することでより実用的で効果的なフィードバック設計を目指す。

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] 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).
- [6] Yang, J. and Hunt, A.: Sonic trainer: real-time sonification of muscular activity and limb positions in general physical exercise, *Proceedings of the ISON 2013, 4th Interactive Sonification Workshop*, pp. 44-51 (2013).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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イスシステム, Vol. 2022-MBL-105, No. 18, pp. 1-7 (2022).
- [10] Chen, S. and Yang, R. R.: Pose Trainer: Correcting Exercise Posture using Pose Estimation, *arXiv*, Vol. abs/2006.11718 (2020).
- [11] Yang, J. and Hunt, A.: Real-time Sonification of Biceps Curl Exercise Using Muscular Activity and Kinematics, *International Conference on Auditory Display* (2015).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] Agostini, T., Righi, G., Galmonte, A. and Bruno, P.: The Relevance of Auditory Information in Optimizing Hammer Throwers' Performance (2004).
- [16] 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).
- [17] Dr.training: エキセントリックトレーニングとは? 新しい筋トレ方法の意味やメリット (2021). (参照日: 2024-01-26, URL: <https://drtraining.jp/media/10414/>).
- [18] Science for Sport: 1RM Testing: Understanding the Basics and Best Practices (2023). (参照日: 2023-12-14, URL: <https://www.scienceforsport.com/1rm-testing/>).