

音の大きさの変化によるトレーニング支援手法の提案と評価

王 瑞賢^{1,a)} 高橋 伸^{2,b)}

概要：トレーニング支援に音楽を利用した手法が多く提案されてきた。それらの手法の多くは、トレーニング時の姿勢の状態に応じたメロディの変化により、姿勢の矯正とトレーニングを応援する効果を実現する。本研究では、メロディ以外の音楽と音の要素（テンポ、ピンチ、音の大きさ）にもトレーニング支援に応用できる可能性があると考え、音の大きさの変化によるトレーニング支援手法を提案する。具体的には、日常でよく聞かれるポップミュージックの各パートの音の大きさを体の動きに連動して変化させることで、リアルタイムに動作の正確さをフィードバックとして提示する。本稿では、手または足の動きを歌声の大きさの変化に連動させることでトレーニングを支援するプロトタイプと、提案手法が姿勢の正確さとトレーニング体験にポジティブな影響があるかをプロトタイプを用いて調査した実験について述べる。

1. はじめに

日常のトレーニングを支援するため、多くのインタラクション手法が提案されている。その中でも、音を利用した手法は、視覚提示を用いる手法のように画面を見る必要がなく、振動提示を用いる手法のように体にデバイスを取り付ける必要がないなどの利点が挙げられる。トレーニング支援のための音インタフェースは、言葉と音楽を利用することが一般的である。リアルタイムの音楽フィードバックを提供する研究として、[1][2][3][4]が挙げられる。しかし、それらの多くは、姿勢に応じた音楽のメロディの変化による姿勢の矯正とトレーニングを応援する効果を実現する。音楽と音の他の要素（例：音色、リズム、音の大きさ）をトレーニング支援に利用する可能性についての議論は少ない。本研究では、特に音の大きさに着目し、体の動きを音の大きさの変化に連動させることでトレーニング支援を実現する可能性を議論する。

具体的には、提案手法では、体の各部分の動きに音楽の各パート（例：歌声、ベース、ドラム、ギター）の音の大きさを反映させることでトレーニング支援を実現する。例えば、スクワットを行う場合、膝の位置をギターの音の大きさに反映させたり、正しい腰の位置を歌声のラウドネスによって把握できるようにするなどが考えられる（図1）。実現方法として、まず深度センサを利用してトレーニング中の骨格座標を取得し、姿勢評価に必要な関節角度を算出する。

その後、音楽の各部分の音の大きさを各関節角度に対応させて、体の動きにリアルタイムに連動する音の大きさの変化を実現する。音楽各パート毎の音の大きさから、動作中の体の各部位の位置を正確に把握し、自分の姿勢と正しい姿勢の違いを理解することで姿勢矯正効果の実現を目標にしている。同時に、リアルタイムに音楽をコントロールする感覚を与えることで、トレーニングを続けるモチベーションの向上と、姿勢矯正後の報酬感も期待している。

本稿では、音楽内の歌声の大きさの変化による単一の体の部位の動作支援を行うプロトタイプとその評価実験について述べる。

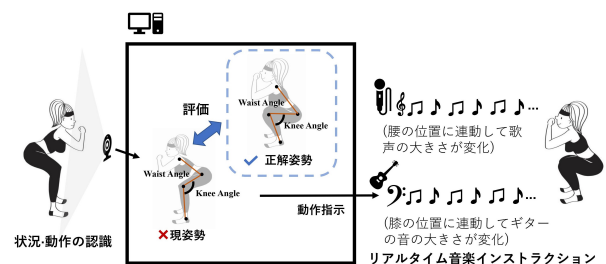


図1 音楽のラウドネスによるスクワット支援

2. 関連研究

2.1 音とトレーニング支援

多くの研究が音楽を利用したトレーニング支援を実現している。KhanらはMIDI音のメロディを使った視覚障害者向けの音楽運動プラットフォームを開発した[1]。Newboldらは、不安定なメロディを適度なストレッチ[2]と正しいスクワット姿勢の提示[3]に使用した。Wallisら

¹ 筑波大学 システム情報学研究群情報理工学位プログラム

² 筑波大学 システム情報系

a) wang@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) shin@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

は脳卒中患者の手指リハビリ体操にメロディを用いた [5]. メロディ以外では, Ghai らは膝の角度をリアルタイムのホワイトノイズのピッチと振幅の変化で把握できるかを議論した [6]. Keesing らは動きに対応するテンポの変化により, HIIT (高強度インターバルトレーニング) を支援するエクササイズゲームを提案した [7]. HealthSit では, 空間音楽によって腰のストレッチを支援した [4].

多くのトレーニング支援システムの音声インタフェースは, コーチの言語を参考にした. EyesFreeYoga は, 基準となる姿勢との差について, コーチの言語を参考に言葉によるリアルタイムフィードバックを行う [8]. また, 多くの商用エクササイズゲームはバーチャルコーチを利用してトレーニングを支援する. 例えば, 任天堂から発売されたフィットネスソフトであるリングフィットアドベンチャー [9] とフィットボクシング [10] は, バーチャルコーチによりトレーニング中のプレイヤーに音声の指示や励ましを行う.

2.2 音以外のトレーニング支援技術

視覚フィードバックを利用した手法も多く提案されている. ユーザの動きに関するリアルタイムなトレーニングのガイドを提示する研究としては以下の研究がある. Clarke らはトレーニングのガイドビデオをユーザの動きに同期させる手法を提案した [11]. Physio@Home はマルチカメラを使ってユーザの動きをガイドビデオと同時に提示する [12]. SleeveAR は腕と床面へ投影される画像でガイダンスとパフォーマンスのフィードバックを提供する [13]. 姿勢矯正を目的とするインタラクション手法としては, BodyLights は体に装着する 3D プリントされた投影デバイスによって投影されるマーカーにより身体のトレーニング中の動きと向きの矯正を補助している [14].

視覚以外では, 振動がよく用いられている. GymSoles はスクワットを行う時の体の重心を足に当たる振動で提示する [15]. Zhang らはランニング中の間違った姿勢を振動により提示する [16].

トレーニング状態の分析については, TTBA はダンベルに RFID タグをつけ, ダンベルの動きの軌跡から, 垂直方向のダンベルトレーニングと円方向のダンベルトレーニングを識別した [17]. RunBuddy はスマートフォンでランニングのリズムを観察する [18]. Li らが提案する自重トレーニングを支援する Wifit は, 市販の Wi-Fi デバイスを二つ使い, Wi-Fi 信号と自重トレーニングの関係を分析することで, トレーニング動作の識別と回数の計測を実現した [19].

3. プロトタイプ支援システム

提案手法を評価するためのプロトタイプシステムを実装した. この実装では, まず体の単一の部位の動作だけを行

う比較的簡単なトレーニングを対象とした. また, 体の動作には音楽内の歌声の大きさの変化を対応させるようにした. 用いる音楽としては, 多くの人が好むと思われるポップミュージックを想定している. ポップミュージックでは歌声が多くの場合最も重要なパートである. そのため, 歌声の変化を用いるのが最も効果的なインタラクションを提供できると期待できる.

なお, 歌声の大きさの変化がどの程度聞き取れるのかについては, 先行研究 [20] において調査した. 具体的には, ポップミュージック内の歌声の大きさだけが線形に変化する場合, その変化をユーザがどのくらい感じられるかを調査した. 結果として, 歌声の大きさの変化の持続時間が比較的長い場合, ユーザはラウドネスの変化をある程度線形に感じられることが分かった. また, ユーザは音の大きさを実際の値より小さく感じる傾向があることが分かった. 図 2 は, 14 秒の歌声の大きさの線形変化に対する感知結果である. 歌声の大きさが原曲の約 26.8% (-41LUFS, -27dB) を超えた後感知され, 53.5% (-36LUFS, -26dB) を超えた後線形の変化を感知していた. 歌声の大きさが原曲の 149.8% の場合, 感知した歌声の大きさが原曲の約 114% であった.

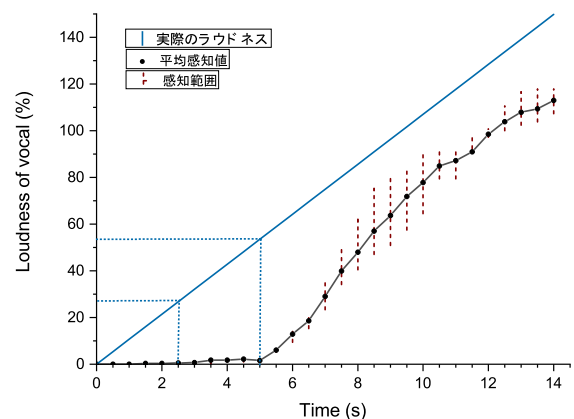


図 2 14 秒の線形型の歌声の大きさの変化に対する感知

この先行研究の結果を踏まえ, 両手を水平に保つ (T1, 図 3) と両足を垂直に保つ (T2, 図 4) という二つのトレーニングを支援するプロトタイプシステムの実装を行った. これら二つのトレーニングの標準的なやり方は, 自然でリラックスした姿勢から一定の速度でゆっくりと (10 秒間) 手または足を持ち上げ, 手または足と体幹が垂直な状態を 30 秒間保ち, その後一定の速度でゆっくりと (10 秒間) 手または足を下げ, リラックスした位置に戻す, である. トレーニング中には体幹と腕または足の筋肉が使われる. トレーニング中, 手や足の動きに応じて歌声の大きさが変化する. 手や足が維持すべき位置にある状態において, 歌



図 3 T1：両手を水平に保つ



図 4 T2：両足を垂直に保つ

声は他のパートの大きさに合った大きさになる。

手足の位置認識には、深度カメラを内蔵した Microsoft Azure Kinect[21] の骨格認識を利用した。Kinect が識別できる 32 個の関節座標中の 4 つを使い、動きを代表するデータとして右手と体幹の夾角 $A1$ (図 3), 右足と体幹の夾角 $A2$ (図 4) を計算した。Kinect の骨格認識精度の問題のため、T2 を行う際には Kinect 側の片足しか検出できない場合が多い。また、T1 も左右対称であることが想定できる。そのため、今回は体の右側 (Kinect 側) のデータのみを用いて歌声の大きさに反映させた。歌声の大きさは関節角度の変化に線形に対応付けた (式 1)。ユーザは音の大きさを実際の値より小さく感じる傾向があるという先行研究の結果に基づき、リラックスした時の姿勢における歌声の大きさを原曲の 15% の大きさで表現し、正しい姿勢 (手または足と体幹を 90 度にした姿勢) における歌声の大きさを原曲の 120% の大きさで表現した。

$$VocalVol = VocalVol_{start} + \alpha (A - A_{start}) \quad (1)$$

今回利用した音楽はリズムが明快な女性歌手が歌う曲である South Of The Water^{*1}である。ユーザは AirPods3[22] を装着して再生音をトレーニング時に聴いた。

4. 評価実験

参加者に上記プロトタイプシステムを使ってもらい、歌声の大きさの変化による単一部分動作トレーニングに対する支援の効果を評価した。

4.1 参加者および実験手順

参加者は 20 歳から 29 歳までの 8 名の音楽および体育を専攻していない健康状態良好な大学生と大学院生 (男性 4 名, 女性 4 名) である。参加者 8 名のうち 4 名は日常的な運動習慣があり、そのうち 3 名は自重トレーニングの習慣があった。

提案手法の目的の一つは、ユーザーが日常的に聴いている音楽を活用してトレーニング支援を実現することであり、支援に使われる音楽に慣れ親しんでいることを想定している。そこで、実験を始める前に実験用の音楽に慣れて

もらった。実験参加者は実験予定日の 3 日前に実験用音楽の WAV ファイルを受け取り、1 日最低 3 回以上実験に用いられる音楽を聞いた。また、評価実験を行う前に、参加者は実験用の AirPods を装着し、実験用音楽を一回聞いた。その際、システム音量は各参加者が実験に最適と感じるレベルに調整し、実験中には固定された。

実験の最初に提案手法の概要と実験の目的および流れを参加者に説明した。その後、支援システムを利用して二つのトレーニング (T1 および T2) を参加者に行ってもらい、「歌声の大きさの変化は体の動きを表現していて、歌声の大きさが調和のとれた状態は正しい維持姿勢を表している」ということを理解してもらった。また、実験で行うトレーニングの正しい方法の説明の後、参加者がトレーニングを行うことに困難がないかを確認した。体力的に支障がある場合はトレーニングを中止できること、実験中は十分な休息を取れることを説明した。そして、歌声の大きさと姿勢の対応関係に慣れるため、練習時間を設けた。練習中には、両手と両足を様々な速度で様々な角度に上げるように依頼した。

実験のタスクとしては、参加者はまず歌声の大きさの変化がない (つまり原曲をそのまま聴く) 条件で、T1 を 3 回行った。その後、歌の大きさのフィードバックがある条件で T1 を 3 回行った。T2 は T1 の後に同じ流れで行った。各トレーニングの間には 5 分以上の休息時間を与え、十分な休息を取ったことを確認した上で次のトレーニングを始めた。

最後に、アンケートで実験参加者の基本情報と提案手法に対する評価を聞き、その回答に基づいて簡単なインタビューを行った。

4.2 実験結果

表 1 はアンケートの結果である。アンケートでは、体の動きを反映できるか (Correspondence), 姿勢を矯正できるか (Correction), トレーニングを継続するモチベーションを与えるか (Motivation), 報酬感が感じられるか (Reward) という 4 項目について、7 段階のリッカート尺度により回答してもらった。

表 1 アンケート結果

	Corresp.	Correction	Motivation	Reward
P1	7	3	4	6
P2	5	5	6	6
P3	7	4	6	5
P4	5	6	4	5
P5	7	6	7	6
P6	7	6	7	7
P7	7	7	6	7
P8	6	7	6	7
Average	6.4	5.5	5.8	6.1

^{*1} South Of The Water, ACTIONS!, 2012.

また、図5は実験参加者が両手を上げるトレーニング(T1)を行った際の手と体幹の夾角(A1)の変化を図示したグラフであり、図6は両足を上げるトレーニング(T2)を行った際の足と体幹の夾角(A2)の変化のグラフである。なお、図で使用したデータは、Kinectが骨格を正しく認識できずに生じた外れ値と思われる部分を除去したものである。

4.3 考察

4.3.1 姿勢矯正の効果

アンケート項目のトレーニング中の歌声の大きさ変化が動きを反映できるか(Correspondence)および姿勢を矯正できるか(Correction)の結果は、それぞれ平均6.4および平均5.5であった。これらの結果から、多くの参加者が歌声のフィードバックから自分の姿勢をある程度把握できること、また歌声のフィードバックが姿勢矯正に有用だと思ったことが分かる。

また、図6を見ると、比較的姿勢の把握と維持が困難なトレーニングT2において、提案手法の効果を推測できる。図6のフィードバック有り無し(青線と赤線)を比べると、P2、P4、P5、P7、P8は歌声のフィードバックがある場合の方が、標準(夾角が90度)に近い角度で両足を上げる状態を維持したことが見られる。また、フィードバックがある場合の方が、より多く姿勢の調整を行っていたことが観察できた。その調整の頻度の差は図6のP1とP4などのデータから推測できる。

姿勢の把握と維持が困難なトレーニングT2における矯正については、インタビューからもポジティブなコメントが得られた^{*1}。P4から「歌声の変化は維持が難しい姿勢への支援効果がいい」、P7から「T2を行った時、正しい大きさの歌声を聞くため、頑張って正しい姿勢を維持した」、P8から「フィードバックによって足を上げる状態の姿勢が間違っていることが分かった。しかし力不足で姿勢を調整できなかった」などのコメントをもらった。図6の結果から、それらの実験参加者がT2を行った時の支援効果が分かる。逆に、難易度が高いトレーニングへの姿勢支援が難しいという次のコメントをP1から得た。「姿勢の維持に専念していたので、歌声の変化から自分の姿勢の正確さを注意できなかった」。

一方、両手を水平に保つトレーニング(T1)は、難易度が低く、姿勢把握と正しい姿勢の維持が容易であった。そのため、今回の実験では姿勢矯正効果が顕著に現れなかったと考えられる。手と体幹の夾角A1の変化から、P7が比較的顕著な姿勢調整を行ったことがわかる。インタビューから、P7は歌声の大きさから手の位置を把握できていたことが分かった。「歌声が小さかったと感じて、手を上げ

てみた」。細かい姿勢調整への支援効果を調べるため、今後は標準姿勢とのずれが生じやすいトレーニングを実験に用いる予定である(例えば、腰が下ろしやすいプランクなど)。また、より正確に運動データの記録ができる装置や方法の使用を検討している。

4.3.2 トレーニング応援効果

アンケート項目の、トレーニングを継続するモチベーションを与えるか(Motivation)は平均が5.8となり、姿勢を調整した後の歌声の変化から報酬感を得られるか(Reward)は平均6.1であった。この結果から、提案手法にはトレーニングを応援する効果がある程度あったと考えられる。

図6からT2における応援効果が推測できる。P1はT2をフィードバックが無い条件では2回で止めてしまったが、フィードバックがある条件では3回行うことができた。P2もフィードバックが無い条件の場合、3回目を途中で諦めたことが分かるが、フィードバックがある場合には3回目のT2を姿勢を調整しつつも最後まで維持できた。この応援効果、つまり姿勢維持を長く継続できたことは、姿勢矯正効果と同時に現れていることから、姿勢矯正効果が応援効果の上に実現されていると考えることもできる。

インタビューでは、4名の実験参加者がトレーニング応援効果を肯定していた。P1より「歌声のフィードバックを聞いたかったので、T2を3回行えた」、P2より「フィードバックがある場合、自分の姿勢の正確さに集中して、トレーニングを諦める考えが少なくなった」、P5から「歌声の変化でトレーニングへの没入感が高まり、動作に集中する状態ができるようになった」、P8から「変化がある歌声でトレーニングが楽しくなった」などのコメントが得られた。

また、応援効果を高めるために、音楽の好みやトレーニングの種類に応じたパーソナルな音楽の推薦を望む声が多くあり、ポップミュージック以外の音楽ジャンルも利用できるようにする必要があるというアドバイスもあった。さらに、トレーニングの時間や繰り返す回数の提示を同時に提供することでモチベーションにポジティブな影響が与えられるなどのコメントをもらった。

4.3.3 総合的な使用感

インタビューでは、「音楽の変化に応じて姿勢の調整が自然にできる」「とても面白い提案だった」という声が多数寄せられた。自重トレーニングの習慣があるP2、P5、P7は、インタビューでより積極的に自分の考えを述べ、日々のトレーニングを支援できるシステムを望んでいるというコメントをもらった。

P2は、「普段からプランクのように姿勢を維持する必要がある無酸素運動と、速い動きが必要な有酸素運動を両方やっている。提案手法は無酸素運動にはとても良く対応できるが、(トレーニング中に)音の大きさが急激に変化することを望まないで、(動きの激しい)有酸素運動には

^{*1} コメントの原文は中国語または英語であり、本稿では翻訳したものを掲載している。

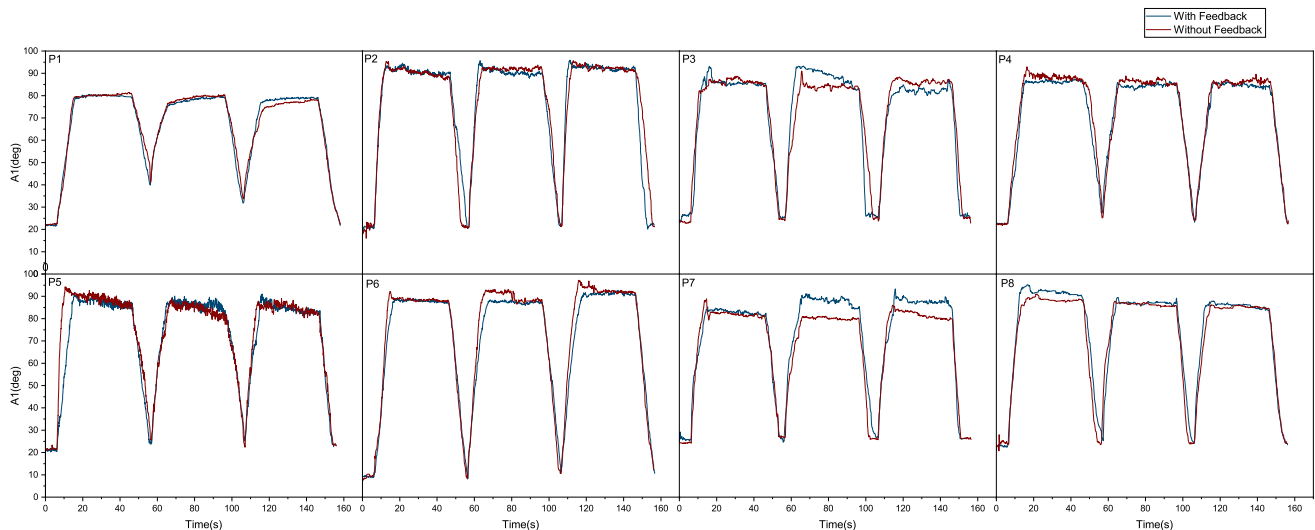


図 5 トレーニング T1 における角度 A1 の変化

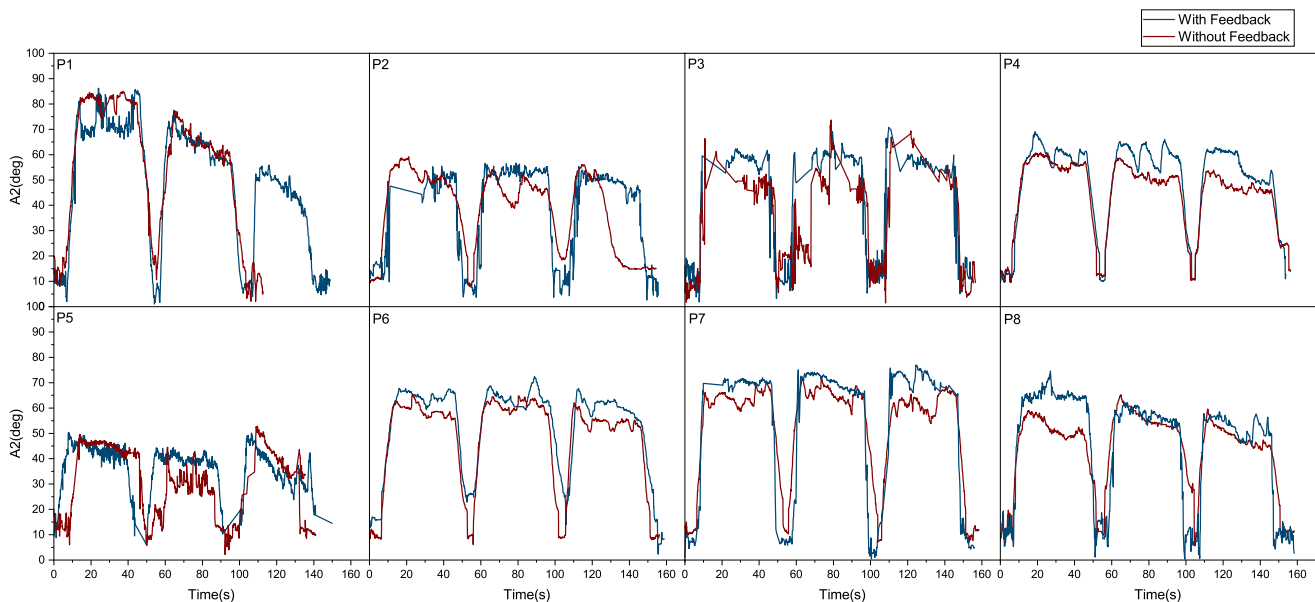


図 6 トレーニング T2 における角度 A2 の変化

向かない」とコメントした。P4 も同様の考えをコメントし、有酸素運動では音楽のテンポの変化による支援をするという提案をした。

また、音楽と言葉を組み合わせフィードバックを提示してはどうかというアドバイスをもらった。P1 からトレーニングの時間や繰り返し回数を音声で知らせてほしい、P8 から難しいトレーニングを行う場合、具体的な姿勢の提示を言葉で知らせてほしいなどのコメントを得た。今後は、より正確で効果的な支援を行うために、音声と音楽を組み合わせ使う手法を検討する。

5. まとめと今後の課題

本研究では、トレーニング支援のための音の大きさを利用したインタラクション手法を提案した。提案手法は音楽の各パートの音の大きさをトレーニング中の動きに連動し

て変化させることで、姿勢調整の支援とトレーニングのモチベーションを高める効果のあるインタラクションの実現を目的にしている。評価実験では、提案手法は姿勢の把握と維持が比較的困難なトレーニングに対して、姿勢矯正とトレーニング応援の効果が現れた。

今回の実験では、比較的簡単なトレーニング T1 と困難なトレーニング T2 の 2 つを対象として、提案手法の体の単一部分動作を行うトレーニングに対する支援の効果を評価した。Kinect の認識精度の問題で、実験中の細かい姿勢の調整を関節データから分析できない場合があったので、今後は、トレーニングの種類を増やし、より精度が高い方法でトレーニング状態を記録し、提案手法の支援効果をより全面的に分析できる評価実験の実施を検討する。

また、今回の実験では、T1 に対する支援効果がよく表れなかったため、今回の支援手法が細かい角度の差を提示

できない可能性があると考えられる。今後、動きと音量の変化の対応関係を調整することで、より細かい差を提示できないか検討する予定である。

また、パーソナライズされた音楽推薦が必要という意見を受け、より幅広い種類の音楽への提案手法の適用と、ユーザの好みやトレーニング状態に基づいた音楽推薦システムの実現を検討する。例えば、トレーニングの難易度の違いによって、テンポの速い音楽、遅い音楽を推薦する、などを考えている。

参考文献

- [1] Khan, R. A., Jeon, M. and Yoon, T.: “Musical Exercise” for people with visual impairments: A preliminary study with the blindfolded, *International Conference on Auditory Display, 2018* (2018).
- [2] Newbold, J. W., Bianchi-Berthouze, N., Gold, N. E., Tajadura-Jiménez, A. and Williams, A. C.: Musically informed sonification for chronic pain rehabilitation: Facilitating progress & avoiding over-doing, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 5698–5703 (2016).
- [3] Newbold, J. W., Bianchi-Berthouze, N. and Gold, N. E.: Musical expectancy in squat sonification for people who struggle with physical activity, Georgia Institute of Technology (2017).
- [4] Ren, X., Yu, B., Lu, Y., Chen, Y. and Pu, P.: Health-Sit: Designing posture-based interaction to promote exercise during fitness breaks, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 35, No. 10, pp. 870–885 (2019).
- [5] Wallis, I., Ingalls, T., Rikakis, T., Olsen, L., Chen, Y., Xu, W. and Sundaram, H.: Real-time sonification of movement for an immersive stroke rehabilitation environment, *Proceedings of the 13th international conference on auditory display*, Georgia Institute of Technology Montréal, Canada, pp. 26–29 (2007).
- [6] Ghai, S., Schmitz, G., Hwang, T.-H. and Effenberg, A. O.: Auditory proprioceptive integration: Effects of real-time kinematic auditory feedback on knee proprioception, *Frontiers in neuroscience*, Vol. 12, p. 142 (2018).
- [7] Keesing, A., Ooi, M., Wu, O., Ye, X., Shaw, L. and Wünsche, B. C.: Hiit with hits: Using music and gameplay to induce hiit in exergames, *Proceedings of the Australasian Computer Science Week Multiconference*, pp. 1–10 (2019).
- [8] Rector, K., Bennett, C. L. and Kientz, J. A.: Eyes-free yoga: an exergame using depth cameras for blind & low vision exercise, *Proceedings of the 15th international acm sigaccess conference on computers and accessibility*, pp. 1–8 (2013).
- [9] Nintendo: RingFit Adventure (2020). <https://www.nintendo.co.jp/ring/index.html>.
- [10] Nintendo: Fit Boxing (2018). : <https://fitboxing.net/>.
- [11] Clarke, C., Cavdir, D., Chiu, P., Denoue, L. and Kimber, D.: Reactive video: adaptive video playback based on user motion for supporting physical activity, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 196–208 (2020).
- [12] Tang, R., Yang, X.-D., Bateman, S., Jorge, J. and Tang, A.: Physio@ Home: Exploring visual guidance and feedback techniques for physiotherapy exercises, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 4123–4132 (2015).
- [13] Sousa, M., Vieira, J., Medeiros, D., Arsenio, A. and Jorge, J.: SleeveAR: Augmented reality for rehabilitation using realtime feedback, *Proceedings of the 21st international conference on intelligent user interfaces*, pp. 175–185 (2016).
- [14] Turmo Vidal, L., Zhu, H. and Riego-Delgado, A.: Body-Lights: Open-Ended Augmented Feedback to Support Training Towards a Correct Exercise Execution, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–14 (2020).
- [15] 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, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12 (2019).
- [16] Zhang, X., Huang, M.-C., Ren, F., Xu, W., Guan, N. and Yi, W.: Proper running posture guide: a wearable biomechanics capture system, *Proceedings of the 8th International Conference on Body Area Networks*, pp. 83–89 (2013).
- [17] Ding, F., Zhang, Q., Zhao, R. and Wang, D.: TTBA: An RFID-based tracking system for two basic actions in free-weight exercises, *Proceedings of the 14th ACM International Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks*, pp. 7–14 (2018).
- [18] Hao, T., Xing, G. and Zhou, G.: RunBuddy: a smart-phone system for running rhythm monitoring, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 133–144 (2015).
- [19] Li, S., Li, X., Lv, Q., Tian, G. and Zhang, D.: WiFit: Ubiquitous bodyweight exercise monitoring with commodity wi-fi devices, *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCCom/IOP/SCI)*, IEEE, pp. 530–537 (2018).
- [20] 王瑞賢, 志築文太郎, 川口一画 and 高橋伸: 音楽のラウドネス変化によるトレーニングにおける動作フィードバック, *WISS2021: 第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ* (2021).
- [21] Microsoft: Azure Kinect (2021). <https://azure.microsoft.com/ja-jp/services/kinect-dk/>.
- [22] Apple: AirPods3 (2021). <https://www.apple.com/jp/airpods-3rd-generation/>.