

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

自重トレーニング支援システムの音声
インタフェースの実装と評価

王 瑞赟

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 高橋 伸

2020年 3月

概要

本研究は自重トレーニングの支援を行うシステムとその音声インタフェースを提案する。現在普及している自重トレーニングとは、自分の体重のみを負荷として用い、機材を使わないトレーニング方法である。しかし、正しい姿勢でトレーニングを行わないと、腰や膝などに悪い影響を及ぼすことがある。また、トレーニングの強度が不足すると、トレーニングの効果がでないこともある。トレーニングの安全性と強度を確保するため、トレーニング時に正しい姿勢かつ適切な強度でトレーニングを行うことを支援するシステムがこれまでにいくつか提案されている。しかし、提案されている多くのシステムはウェアラブルセンサまたは Kinect といった特別な装置を必要としている。また、提案システムの多くはユーザへ視覚のフィードバックだけを提供している。そこで本研究では、スマートフォンとサーバを用いた自重トレーニング支援システムとそこで用いる音声による支援手法を提案する。このシステムは、スマートフォンのカメラでトレーニング時の姿勢を取得し、姿勢が正しいかどうかをサーバで評価する。そして、その評価結果を基に、ユーザに対してスマートフォンから音声でフィードバックを行う。

本研究ではスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムとその音声インタフェースの設計と実装を示す。また本研究では四つの自重トレーニング動作を例として、ユーザスタディを行い、提案システムと音声インタフェースの有用性と改善点について考察した。

目次

| | | |
|------------|---------------------------------|-----------|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 背景 | 1 |
| 1.2 | 目的 | 2 |
| 1.3 | アプローチ | 2 |
| 1.4 | 本論文の構成 | 3 |
| 第2章 | 関連研究 | 4 |
| 2.1 | トレーニング支援のための技術 | 4 |
| 2.2 | トレーニング支援のためのインタラクション手法 | 5 |
| 2.3 | 音声によるトレーニング支援 | 5 |
| 2.4 | 本研究の位置付け | 7 |
| 第3章 | 自重トレーニング支援システムの音声インタフェース | 8 |
| 3.1 | 利用手順 | 8 |
| 3.2 | 音声インタフェース | 9 |
| 3.2.1 | 音声インタフェースの設計方針 | 9 |
| | 完全なトレーニング体験を提供すること | 9 |
| | トレーニングの成果に適切なフィードバックを提供すること | 9 |
| | トレーニングの流れを妨げないこと | 10 |
| | 音声での指示が明確であること | 10 |
| 3.2.2 | 提示音声の内容 | 10 |
| | トレーニング動作についての説明 | 10 |
| | トレーニング中の姿勢矯正 | 12 |
| | トレーニング中の時間と回数の提示 | 12 |
| | トレーニング中の応援 | 12 |
| 第4章 | 自重トレーニング支援システムの構成と実装 | 16 |
| 4.1 | 自重トレーニング支援システムの構成 | 16 |
| 4.1.1 | 姿勢データの取得 | 16 |
| 4.1.2 | 姿勢識別 | 18 |
| 4.1.3 | 姿勢評価 | 18 |
| 4.1.4 | 姿勢矯正 | 21 |

| | | |
|------------|--------------------------------------|-----------|
| 4.2 | プロトタイプシステムの実装 | 21 |
| 4.2.1 | スマートフォン側の実装 | 21 |
| 4.2.2 | サーバ側の実装 | 22 |
| 第5章 | 自重トレーニング支援システムの音声インタフェースの評価実験 | 25 |
| 5.1 | 実験目的 | 25 |
| 5.2 | 被験者 | 25 |
| 5.3 | 実験内容 | 25 |
| 5.4 | 実験用アプリケーション | 27 |
| 5.5 | 実験結果 | 29 |
| 5.6 | 考察 | 31 |
| 5.6.1 | 音声によるトレーニング動作の説明についての考察 | 31 |
| 5.6.2 | 時間と回数の提示音声についての考察 | 31 |
| 5.6.3 | 姿勢矯正音声についての考察 | 32 |
| 第6章 | 自重トレーニング支援システムの評価実験 | 35 |
| 6.1 | 被験者 | 35 |
| 6.2 | 実験内容 | 35 |
| 6.3 | 実験結果 | 36 |
| 6.4 | 考察 | 37 |
| 第7章 | 結論 | 39 |
| 7.1 | まとめ | 39 |
| 7.2 | 今後の展望 | 39 |
| | 謝辞 | 40 |
| | 参考文献 | 41 |

目次

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | 提案システムと音声インタフェースの利用イメージ | 2 |
| 3.1 | 本研究で使った四つのトレーニング動作, 行う順にリストされている | 11 |
| 4.1 | システム構成 | 17 |
| 4.2 | OpenPose による体のキーポイントの検出 [8] | 19 |
| 4.3 | 姿勢データ | 20 |
| 4.4 | 訓練姿勢ステップ 1 | 21 |
| 4.5 | 訓練姿勢ステップ 2 | 21 |
| 4.6 | 自重トレーニングの支援を行うアプリケーション | 23 |
| 5.1 | 音声インタフェースの評価実験の様子 | 26 |
| 5.2 | 音声インタフェースの評価実験中被験者に提示した画像 | 27 |
| 5.3 | 音声インタフェースの評価実験用アプリケーション | 28 |
| 6.1 | 自重トレーニング支援システムの評価実験の様子 | 36 |

第1章 序論

近年、自重トレーニングの普及に伴い、自重トレーニングの支援に関する研究が行われてきた。本研究では、新たな自重トレーニングの支援手法として、スマートフォンとサーバを利用した自重トレーニング支援システムと、そのシステムの音声インタフェースを提案する。本論文では、提案システムと音声インタフェースの設計についてと、評価実験について述べる。本章において、まず、背景として自重トレーニングの概要を示し、現存の自重トレーニング支援手法とその問題点について述べる。次に、本研究の目的と問題解決のためのアプローチを示す。最後は本論文の構成を示す。

1.1 背景

自重トレーニングとは、自分の体重で負荷をかけて行い、機材を用いないトレーニング方法である。腕立て伏せ、スクワットなどの自重トレーニングにより、効果的に健康とフィットネスを維持することができる [1]。自重トレーニングはトレーニングの初心者でも機材を用いず自宅で取り組むメリットがあるため、現在広く普及している。しかし、正しくない姿勢で行うトレーニングは、トレーニングの効果を最大限に発揮できず、また、腰や膝などに悪い影響を与える可能性もある。例えば、スクワットは効率良く下半身の筋力が鍛えられるが、姿勢が正しくない、膝に負担をかける。その潜在的な危険を回避するためには、自重トレーニング時の姿勢を観察し、評価することが望ましい。更に、適切な時間と回数でトレーニングを行うことが重要である。例えば、自重トレーニングで最大の効果を出すには1セット15～30回以上が基本である。自重トレーニングの強度を確保するためには、トレーニング中に時間と回数を提示することやトレーニングを応援することが必要とされている。

一方、自重トレーニング時の姿勢と強度を支援するための、簡易で安価な方法は少ない。インストラクターを雇う方法があるが、高価である。自重トレーニング時の姿勢を観察し、評価する研究が行われているが、これらは深度センサやウェアラブルセンサなど特別な装置が必要であり、あるいはユーザの体にデバイスを取り付けることが必要などの欠点がある。

また、音声だけによる自重トレーニング支援に関する研究が少ない。ユーザに姿勢の正確さと強度を提示するために、視覚、音声、振動などの組み合わせでフィードバックをする研究が多いが、振動による提示方法はユーザの体にデバイスを取り付けることが必要であり、視覚による提示する時ユーザがディスプレイを見るのが困難である場合があるなどの欠点がある。

1.2 目的

上述の問題を解決するため、本研究ではスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムと音声による自重トレーニング支援の実現を目的とする。また、自重トレーニングを支援するための適切な音声インタフェースを検討する。本研究で提案するシステムと音声インタフェースの利用の様子を図 1.1 に示す。

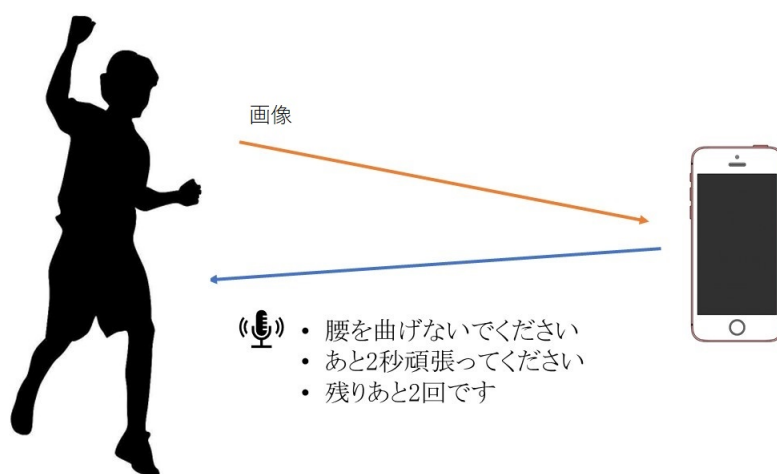


図 1.1: 提案システムと音声インタフェースの利用イメージ

1.3 アプローチ

前節の目的を達成するためのアプローチとして、本研究ではスマートフォンとサーバを利用した自重トレーニング支援システムと音声インタフェースの開発と評価を行う。提案システムはスマートフォンによりユーザのトレーニング時の画像を取得し、サーバへ送る。サーバでは体のキーポイントを検出し、姿勢が正しいかどうかを確認する。スマートフォンを介し、ユーザに音声のフィードバックを提供する。この音声のフィードバックを通じて、姿勢の修正を促し、トレーニングの応援をする。提案する支援システムを評価するため、提案システムを被験者に実際に利用してもらい、使用感と有用性について調査を実施した。更に、提

案する音声インタフェースを評価するため、音声指示を被験者にフィードバックし、音声指示の有用性と改善点について調査した。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下に示す。第1章においては本論文の背景、研究目的とアプローチについて述べる。第2章にて、本研究に関連する研究を紹介し、本研究との関係と区別を示し、本研究の位置付けを紹介する。第3章では提案システムの利用イメージと音声インタフェースを述べる。第4章では提案システムの概要と実装について述べる。第5章では音声インタフェースの評価実験を説明する。第6章では提案システムを実際に利用した評価実験を述べる。第7章ではまとめと今後の課題を述べる。

第2章 関連研究

本研究は、自重トレーニングを支援するシステムとその音声インタフェースに関する研究である。本研究に関連する研究として「トレーニング支援のための技術」、「トレーニング支援のためのインタラクション手法」、「音声によるトレーニング支援」が挙げられる。本章ではそれぞれの関連研究に対する本研究の位置付けを述べる。

2.1 トレーニング支援のための技術

深度センサ、ウェアラブルセンサ、RGB カメラ、RFID 技術を用いて体の動きを検出することで、トレーニングの支援を実現することができる。

深度センサを用いたトレーニング支援システムは多く提案されている。特に、骨格追跡機能を持つ Kinect を用いた運動姿勢の分析と改善に関する研究が多く行われている。Calabら [2] の研究では、Kinect を利用し、自重トレーニングの一つであるスクワットを対象に支援を行っている。この研究は、姿勢を矯正するために、正しいスクワットのやり方について幾つかのルールを定義し、ユーザが満たしたルールと満たさないルールを文字による視覚的なフィードバックを行う。ユーザはそれらの提示を通じて、正しいスクワットのやり方を知ることによって、自身の姿勢の修正が可能となる。Leeら [3] の研究では、運動障害のある患者が自宅で太極拳を行うのを支援するために、Kinect を用いたリハビリテーションシステムを提案している。Kinect の骨格追跡機能を使って、太極拳をしている患者の動きを記録し、動作の認識と評価を行っている。具体的に、患者の動きと事前に記録された標準な動きを比較し、ファジーロジックシステム (FLS) を利用して評価を行う。

ウェアラブルセンサを用いたトレーニング支援システムとして、Guoら [4] が FitCoach を提案している。この研究はウェアラブルデバイス(スマートフォン、スマートウォッチ)の慣性センサを利用し、トレーニングの支援を行う。この研究は、慣性センサのデータからトレーニングの種類、同じ動作の繰り返す回数、訓練中の休み時間を検出する手法を提案した。怪我の予防と訓練の効率の向上のために、動きの範囲の大きさと運動時間によるスコアをつけ、トレーニングを評価する。Haoら [5] が提案する RunBuddy はスマートフォンに内蔵された加速度センサとワイヤレスイヤホンを利用することで、ランニング中の呼吸のリズムを測定する。測定した呼吸のリズムから、ランナーの生理状態が推測でき、トレーナーの自己効力感を向上させることができる。

RGB カメラを用いたトレーニング支援システムに関する研究が行われている。松村ら [6] が提案するトレーニング支援システムは、2 台の PlayStation Eye を並べて作成した 2 眼カメ

ラを用い、立体視用のステレオ映像を取得できる。弓道の練習をするユーザに HMD を装着され、その映像をリアルタイムで提示することで、正しいフォームの修正を促すことができる。Qiao ら [7] は単一の RGB カメラを利用し、太極拳をする際の姿勢をリアルタイムで評価するシステムを提案した。この研究は、OpenPose[8] による体のキーポイントを検出し、関節の運動軌跡のベジェ曲線によって、リアルタイムで姿勢評価を行っている。評価する方法としては、関節を重要度によって三段階に分け、各関節に重さをつけることで、点数をつける。

その他、RFID 技術や Wi-Fi デバイスを用いた研究がある。Ding ら [9] が提案する 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できる。Li ら [10] 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する。

2.2 トレーニング支援のためのインタラクション手法

トレーニング支援はエクササイズゲーム（運動と遊びを組み合わせたビデオゲーム）と同じ、吸引力と有用性という二つの重要な目標がある [11]。トレーニング支援システムを使用することで、楽しくトレーニングの効果を達成することが必要である。ヒューマンコンピュータインタラクションの技術は、トレーニングの観察と促進にポジティブな影響を与えることができる。モーションデータとゲームメカニクスを利用することで、多数のインタラクティブなトレーニング支援システムが提案されてきた [12]。Gerling ら [13] が提案した高齢者向けのエクササイズゲームは、ユーザの動きにより庭の花を育てることでトレーニングを促進する。このゲームは、ある程度まで腕を上げることができない、ゆっくりな動きしかできないなどの体の状態に対応するインタラクションパラダイムを提案する。Mueller ら [14] が提案した GrabApple は、ゲームコントローラとしてユーザの体を使用し、落下するリンゴを拾う、または落下する爆弾に触れないようにするといった規則により、トレーニング効果を実現する。Saraee ら [15] は 3D virtual exercise interface を提案し、バーチャル空間内 3D のボールをユーザに提示する。ユーザが腕を移動し、右側から左側面まで全部のボールを通過することでトレーニングを行う。Zou ら [16] は腕の伸展運動を支援するために、ゲームマップを用いてユーザに腕の動きを提示する。また、音声インタフェースを利用したトレーニング支援方法については、2.3 音声によるトレーニング支援の章において紹介する。

2.3 音声によるトレーニング支援

音声インタフェースにより日常生活を支援する研究が多く行われている。例えば、自然言語処理を用いて、質問に対して回答や推薦などの機能を備える音声アシスタントが利用できている（Apple の Siri[17]、Samsung の S Voice[18]、Google Assistant[19]）。これらのアシスタントは、リマインド、アラーム、メモなどの日常生活の簡単な必要を満たすことができる。また、視覚障害者向けの音声インタフェースとして、Vikas らは [20] 音声コマンドが可能なウェブブラ

ウジングインタフェースを提案した。さらに、感情のある音声でユーザとのインタラクションを実現するため、音声から人の感情を分析する研究や感情のある音声を合成する研究が行われている。Chaoら[21]はLong Short-Term Memory Recurrent Neural Networks (LSTM-RNNs)を利用し、ビデオから感情認識を行うシステムを提案した。Nuance Loquendo[22], CereVoice[23]などの商用エンジンがニューラルネットワーク技術を利用して、人のような自然な音声サービスを提供する。これらのシステムにより音声を生成する際に、ユーザは感情カテゴリの中から表現したい感情を選択できる。

コーチの指導によるトレーニングの場合や、ICT技術の支援によるトレーニングの場合においても、トレーニングの状態を改善するために音声を使用することが一般的である。Rothwellらは[24]、トレーニングの効果とトレーニングの知識に最も貢献する要素は内在的なフィードバックであることを示した。内在的なフィードバックというのは、筋紡錘、腱、関節などの身体内部の受容器から得られる情報として定義された。しかし、Franksらはコーチが提供する外部からのフィードバックも不可欠であることを示した。コーチは、トレーニングをしている人のしたいことと実際にしていることを正確に比較でき、パフォーマンスに影響を与える外部のフィードバックを提供することができる[25][26]。今まで、いくつかの研究では、さまざまなスポーツに関するコーチの言語を調査している。Coach Analysis and Intervention Systemにより、コーチの言語は肯定的なフィードバック、否定的なフィードバック、励まし、指示、意見の相違、提議など12個のアイテムを含める[27]。Guzmánら[28]はハンドボールの試合を分析し、ハンドボール選手の行動とコーチからのフィードバックに関して分析した。この研究は肯定的な選手の行動の後、コーチが肯定的なフィードバックと励ましを行い、否定的な行動の後では、コーチが否定的なフィードバックと質問を行う傾向を示した。Zetouら[29]はバレーボールの試合を分析し、優勝したチームのコーチは否定的なフィードバックをあまり使わないことを示した。

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したバーチャルコーチによる支援を実現している。Rectorら[30]は視覚障害者のヨガの姿勢の修正を補佐するEyes Free Yogaを開発した。この研究は、視覚障害者がエクササイズクラスに参加することを支援する。ユーザが画面を見ていない状態を想定し、基準となる姿勢の差によって、コーチの言語を参考した音声によるリアルタイムなフィードバックを行う。この音声のフィードバックは、ヨガを経験したことがほとんどないユーザにとって有益であることが分かった。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[31]とフィットボクシング[32]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。

また、オーディオストーリーや音楽を利用したトレーニングを支援する音声インタフェースが提案されてきた。視覚的なフィードバックを使用するトレーニング支援システムは、プレイヤーが頻繁にディスプレイを見る必要がある。その問題を解決するため、Chittaroら[33]はオーディオストーリーによりランニング中のユーザにフィードバックする方法を提案した。この研究は、ランニング中にプレイヤーが画面を見る必要がないサウンドスケープを活用す

ることで、オーディオストーリーによりプレイヤーの活動に応じて迅速なフィードバックを提供する。Hakulinen ら [34] は光と音を利用し、トレーニングにストーリーの要素を加える。参加感と娯楽性を高めることにより、子どもたちが学校内でのトレーニングに参加することを促進する。Ren らが提案した HealthSit[35] は、短い休憩の中で腰のストレッチを促進するインタラクティブシステムである。この研究はユーザの腰の動きに応じて、変化する音楽と視覚的な提示により、ストレッチ中のインタラクションを実現する。

2.4 本研究の位置付け

深度センサを使うシステムは、特別な装置が必要であるためコストがかかる。ウェアラブルセンサを利用するには、体にデバイスを取り付けることが必要であるため、トレーニングを妨げることがある。コストの削減と利用の便利さを考慮し、本研究は単一の RGB カメラによる自重トレーニング時の支援システムを提案する。本研究はスマートフォンのカメラでトレーニング時の画像を取得し、動作の正確さや、その動作の繰り返す回数、そしてその動作の維持時間に関する評価を行う。

また、自重トレーニングを行う際、頻繁にディスプレイを見るのが難しいため、視覚的なフィードバックを利用するインタラクション手法が有効ではない場合がある。一方、音声のみによる自重トレーニング支援を実現する研究と、自重トレーニングの支援に適切な音声について検討する研究は少ない。本研究は自重トレーニングシステムの音声インタフェースを提案し、自重トレーニングの支援に必要な音声を検討する。具体的にはトレーニング時の姿勢についての説明、姿勢矯正、時間と回数の提示と応援の音声について検討する。

第3章 自重トレーニング支援システムの音声インタフェース

本研究では、スマートフォンによる姿勢支援を行う。スマートフォンのGUIアプリケーションを利用することで、音声による自重トレーニング時の支援を実現する。本章では提案するスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムの利用手順とその音声インタフェースについて述べる。

3.1 利用手順

提案するGUIアプリケーションの具体的な利用手順について説明する。

1. トレーニング方法の確認. ユーザはGUIアプリケーションで文字と図による正しい自重トレーニング方法の説明を読み、正しいトレーニング方法を確認する。
2. トレーニング項目の選択. GUIアプリケーションで行うトレーニング項目を選択する。
3. カメラの設置. トレーニングが始まる前に、トレーニング時の画像を撮るため、スマートフォンを設置する。姿勢支援には全身の画像が必要であるため、ユーザとスマートフォンの距離を全身の画像が撮れる距離(2, 3メートル)にする。
4. トレーニングを行う. トレーニングの行い方を聞きながら、正しいトレーニング姿勢をとる。トレーニング行う間に、ユーザはフィードバックされる姿勢を矯正する音声により、姿勢の調整を行う。トレーニングを繰り返す回数と姿勢の維持時間を通知する音声により、適当な強度でトレーニングを行う。

腕立て伏せを例として、トレーニング中の流れる音声を説明する。ユーザは腕立て伏せのやり方の説明を聞きながら、正しい腕立て伏せの姿勢をとる。腕立て伏せを行う時の注意点は、足から首まで一直線にすること、下げた状態の維持時間、繰り返す回数であるため、トレーニング中、腰や首が曲がった場合、維持時間が短い場合と繰り返す回数が足りない場合ユーザに音声のフィードバックを行う。

5. トレーニングを終了する. 選択したトレーニング項目を完了した後、音声の指示によるトレーニングを終了する。

3.2 音声インタフェース

本研究はスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムの音声インタフェースを提案する。提案するシステムではスマートフォンのカメラでトレーニング時の画像を撮り、姿勢を評価する。その後、評価結果に基づいてスマートフォンによる音声でのフィードバックを行う。トレーニング中の安全性を確保するため、正しいトレーニング姿勢についての説明と姿勢の矯正方法を音声によってユーザーに伝える。トレーニングの強度を確保するため、トレーニング動作を繰り返す回数と動作の維持時間についてのフィードバックを行う。トレーニングを応援するために、トレーニングが上手く行われている場合、激励する音声でフィードバックされる。

3.2.1 音声インタフェースの設計方針

音声のみによるトレーニングの支援を実現するため、本研究は以下の四つの設計方針に従って提示音声の設計を行う。

完全なトレーニング体験を提供すること

音声により自重トレーニングの全過程を支援し、完全なトレーニング体験を提供することが音声インタフェースの設計方針の一つである。本研究では、トレーニングが始まる前に、次に行うトレーニングの説明が流れる。トレーニング中は姿勢の矯正、時間と回数、支援の音声流れる。トレーニングが終わった後に、トレーニング状態についての評価と完了の提示音声流れる。本研究で提案する音声インタフェースを利用することで、自重トレーニングの全過程の支援を提供し、良いトレーニング体験の実現を目標としている。

トレーニングの成果に適切なフィードバックを提供すること

本研究で提案する音声インタフェースは、エクササイズゲームの設計方針の一つ、「トレーニングの成果に適切なフィードバックを提供すること」に基づいている。エクササイズゲーム、またはフィットネスゲームは、体の動きや反応を追跡する技術を利用することで、トレーニング効果と娯楽性を同時に実現することを目標としたゲームである。エクササイズゲームは、楽しくゲームをすることで、体を鍛えることに成功している。トレーニング支援システムはエクササイズゲームと同じ、効率的なトレーニングの支援と楽しいトレーニング体験を提供することを目的としている。そのため、多くのエクササイズゲームはトレーニング支援システムの要件を満たしている。本研究では、ユーザーが正しくトレーニングを行っている場合、時間と回数を提示することで、ユーザーの努力に対するリアルタイムのフィードバックを提供する。また、トレーニング中、激励の効果がある音声を流す。例えば、「よくできました」、「後2セットです、もう少し頑張ってください」などの音声を流す。

トレーニングの流れを妨げないこと

トレーニングの流れを妨げることなく、分かりやすい音声での指示を設計することが本研究の目標の一つである。ユーザが姿勢についての説明を聞きながら、姿勢をとることができる。また、姿勢を維持する間、ユーザが姿勢を矯正する音声、時間と回数をフィードバックする音声を聞きながら姿勢の調整ができる。提案システムの音声インタフェースを利用することで、ユーザは円滑に自重トレーニングを行うことができる。

音声での指示が明確であること

トレーニング中、ユーザはスマートフォンの画面が見えなく、音声の指示だけに従って行動する必要があるため、明確な指示を出すことが設計方針の一つになっている。本研究では理解しやすい単語を使い、トレーニングを行う前に、標準な自重トレーニングの姿勢のとり方をユーザに伝える。トレーニング中は、ユーザが正しくない姿勢をとる場合、間違っているところを明確的に説明できる矯正音声をフィードバックする。例えば、「膝を曲げないでください」、「腰を上げてください」、「左の手を 30 度ぐらい挙げてください」などの提示が音声でユーザにフィードバックされる。トレーニングの時間と回数についての提示も具体的な時間と回数が分かるような音声で行う。例えば、ユーザが正しい姿勢をとった場合、数秒の人の音声により保った時間が提示される。

3.2.2 提示音声の内容

本研究では四つの自重トレーニング動作を例として、提示音声の設計を行った。四つの自重トレーニング動作を行う順番で図 3.1 に示す。その四つのトレーニング動作は、Keep というトレーニングを支援するアプリケーション [38] と自重トレーニングを指導する本 [37] 中のトレーニング動作を参考に、下半身、腰、腕、体幹の筋力を鍛えることができる。本研究での提示音声は以下の四つの部分で構成されている。

1. トレーニング動作についての説明
2. トレーニング中の姿勢矯正
3. トレーニング中の時間と回数の提示
4. トレーニング中の応援

トレーニング動作についての説明

図 3.1 に示す四つのトレーニングを行う前に、各トレーニング動作のやり方の説明の音声が行われる。ユーザが明確な説明を聞きながら、標準な動作を理解し、正しくトレーニングを行うことができる。本研究で使った四つのトレーニング動作は比較的に簡単であるため、標準なやり方についての説明は第一セットを行う間だけ流れる。具体的な音声を表 3.1 に示す。



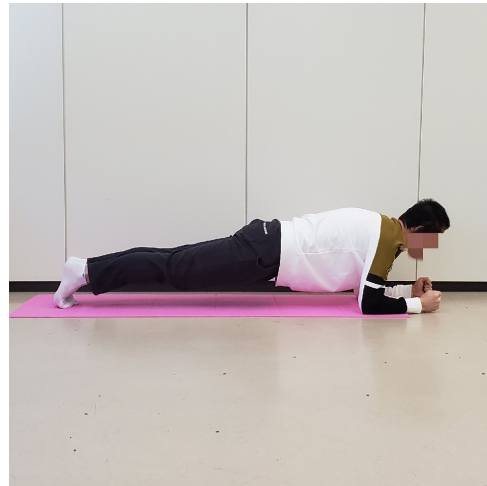
(a)



(b)



(c)



(d)

図 3.1: 本研究で使った四つのトレーニング動作, 行う順にリストされている

トレーニング中の姿勢矯正

トレーニング中、ユーザが正しくない姿勢をとっている場合、具体的な矯正方法が分かる音声によってユーザにフィードバックする。明確な矯正方法を伝えるため、本研究では二種類の矯正音声を提案する。その一つは、程度を表す副詞を使った矯正音声である。例えば、「足を少し上げてください」、「腰をもっと上げてください」などの音声を使う。程度の副詞はトレーナーによるトレーニング矯正や日常生活によく使われているが、明確な指示を出すのが難しいという欠点がある。二つ目は、角度と距離を使った矯正音声である。例えば、「足を10度ぐらい上げてください」、「腰を5センチぐらい上げてください」などの音声を使う。角度と距離を使った矯正音声は日常生活に使う場合が少ないが、明確な指示ができる利点が考えられる。本研究で使った四つのトレーニング動作を矯正するための音声を表3.2に示す。

トレーニング中の時間と回数の提示

ユーザが正しい姿勢を保っている場合、保った時間を提示するため、人の音声による提示方法と機械音による提示方法を提案する。人の音声による提示方法は、「一、二、三…」の音声により維持した時間を提示する。機械音による提示方法は、音調が変化する音声により維持した時間を提示する。

ユーザが一つの動作を終了した後、完了された回数を提示するため、人の音声によるの提示方法と機械音によるの提示方法を提案する。人の音声によるの提示方法は、「残り後三回」などの音声により残っている回数を提示する。機械音による提示方法は、音調が変化する音声により回数の変化を提示する。

トレーニング中の応援

運動中のユーザに肯定的なフィードバックを提供し、すべてのトレーニングタスクを完了するようにユーザを激励する目的を達成するため、トレーニング中の応援音声のデザインを検討する。図3.1に示すトレーニング動作の維持時間が短いため、時間を提示する間に応援音声を流すと、ある程度トレーニングを干渉する問題を避けるため、応援音声はセットが完了した後、あるいは休憩時間に流される。提案する音声には、完了したトレーニングに対する肯定的なフィードバックを含む。例えば、「三回完成しました、よくできました」の音声により、完成したセット数に肯定的なフィードバックを提供する。また、提案する音声には、次に行うトレーニングの提示を含む。例えば、「残り1回だけです、頑張ってください」の音声により残りの回数を提示する。維持時間が長いトレーニングを行う時、時間の提示音声の代わりに、「後20秒頑張ってください」などの応援音声をフィードバックする方法を考えている。更に、全てのトレーニングを完了した後に、トレーニングの習慣の養成を促すため、トレーニング状況を要約し、ユーザにフィードバックする方法を検討する。

表 3.1: 動作の説明に使う音声

| 動作 | 最初のセットの前の説明 | 最初のセットの後の説明 |
|-----|--|-----------------------------|
| (a) | マットに横たわって、両手を下に向けてお尻の両側においてください。そして、両足がはなれないようにまっすぐにして、上半身と垂直になるまでゆっくり上げてください。そのまま十秒維持してください。 | 足をまっすぐにして、ゆっくり下ろしてください。 |
| (b) | マットに横たわって、両手を下に向けてお尻の両側においてください。そして、両足を肩幅に開いて、膝を曲げてマットをしっかり踏んでください。背中のラインがまっすぐになるまで腰をゆっくり上げてください。そのまま十秒維持してください。 | 腰をゆっくり下ろしてください。 |
| (c) | 両足を肩幅に開いて、両手を自然に体の両側において立ってください。そして両手をまっすぐにして同時に地面と水平になるまでゆっくり上げてください。そのまま十秒維持してください。 | 両手をまっすぐにしたままで、ゆっくり下ろしてください。 |
| (d) | マットの上うつ伏せ、両肘を肩幅に開いてマットにつけてください。そして両足を肩幅に開いて、肘とつま先に重点を置き、体を持ち上げてください。体がまっすぐになるように注意してください。そのまま十秒維持してください。 | 両肘を曲げて、ゆっくり体を下ろして下さい。 |

表 3.2: 姿勢矯正に使う音声

| 動作 | 疑似コード | 矯正音声 |
|-----|---|---|
| (a) | <pre>back = vector(shoulderCenter, hipCenter) ankleHipLeft = vector(hipCenter, ankleLeft) hipAngle = calcAngle(back, ankleHipLeft) 1.hipAngle∈(70,80) 2.hipAngle∈(60,70) ankleKneeLeft = vector(kneeLeft,ankleLeft) kneeHipLeft = vector(hipCenter, kneeLeft) kneeAngle = calcAngle(kneeHipLeft, ankleKneeLeft) 3.kneeAngle<170</pre> | <ol style="list-style-type: none"> 1.足を少しあげてください。足を10度ぐらいあげてください。 2.足を大きくあげてください。足を20度ぐらいあげてください。 3.膝を曲げないでください。 |
| (b) | <pre>hipDistance = kneeHipCenterLeftY - hipCenterY 1.hipDistance∈(-5,0) 2 hipDistance∈(0,5) 3 hipDistance∈(5,10)</pre> | <ol style="list-style-type: none"> 1.腰を少し落としてください。腰を五センチぐらい落としてください。 2.腰を少し上げてください。腰を五センチぐらい上げてください。 3.腰を大きく上げてください。腰を十センチぐらい上げてください。 |
| (c) | <pre>armLeft = vector(shoulderLeft, wristLeft) armRight = vector(shoulderRight, wristRight) back = vector(shoulderCenter, hipCenter) armLeftAngle = calcAngle(armLeft, back) armRightAngle = calcAngle(armRight, back) 1.armLeftAngle∈(70,80) 2.armLeftAngle ∈(60,70) 3.armRightAngle∈(60,70) 4.armRightAngle∈(60,70) 5.armLeftAngle∈(70,80) & armRightAngle ∈ (70,80) 6.armLeftAngle∈(60,70) & armRightAngle ∈ (60,70)</pre> | <ol style="list-style-type: none"> 1.左の腕を少し上げてください。左の腕を10度ぐらい上げてください。 2.右の腕を少し上げてください。右の腕を10度ぐらい上げてください。 3.左の腕を大きく上げてください。左の腕を20度ぐらい上げてください。 4.右の腕を大きく上げてください。右の腕を20度ぐらい上げてください。 5.両手を少し上げてください。両手を10度ぐらい上げてください。 6.両手を大きく上げてください。両手を20度ぐらい上げてください。 |

| | | |
|-----|---|---|
| (d) | <p>elbowSoulderLeftLevel = diatance(shoulderLeftX, elbowLeftLeft)</p> <p>1.elbowSoulderLeftLevel\in(-5,0) 2.elbowSoulderLeftLevel\in(0,5) 3.elbowSoulderLeftLevel\in(-5,0) 4.elbowSoulderLeftLevel\in(0,5)</p> | <p>1. 肘を少し前にしてください. 肘を五センチぐらい前にしてください.</p> <p>2. 肘を少し後ろにしてください. 肘を五センチぐらい後ろにしてください.</p> <p>3. 肘を大きく前にしてください. 肘を十センチぐらい前にしてください.</p> <p>4. 肘を大きく後ろにしてください. 肘を十センチぐらい後ろにしてください.</p> |
|-----|---|---|

第4章 自重トレーニング支援システムの構成と実装

本章では、提案するスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムの構成と実装について述べる。

4.1 自重トレーニング支援システムの構成

本システムの構成を図 4.1 に示す。主な処理としては、姿勢データの取得、姿勢識別、姿勢評価と姿勢矯正がある。まず、スマートフォンによりユーザのトレーニング時の画像を取得し、サーバへ送る。サーバでは OpenPose[8] を利用することで、姿勢データを取得する。姿勢データによりユーザがとっている姿勢を識別し、姿勢が正しいかどうかを確認する。スマートフォンを介し、ユーザに音声のフィードバックを提供する。この音声のフィードバックを通じて、姿勢の修正を促す。本研究で用いる姿勢データは、自重トレーニング姿勢の識別と評価に用いる関節距離（関節から体の中心までの距離）、ベクトル間の角度と定義する（図 4.3）。

4.1.1 姿勢データの取得

本研究で用いる姿勢データは以下の手順で取得した。

1. OpenPose を利用し、骨格座標を取得する。
2. 関節距離を計算する。
3. 各キーポイントをつなげるベクトルを取得する。
4. 各ベクトル間の角度を計算する。

カーネギーメロン大学の Zhe Cao らによって提案された OpenPose は、Convolution Neural Network を用いて、RGB 画像だけで複数の人間の体や顔のキーポイントをリアルタイムで検出できる手法である。OpenPose は入力として RGB 画像を取り、画像内の各人物の解剖学的なキーポイントの 2D 位置を取得し、出力として生成する。検出できる体のキーポイントは 25 点ある。従来の研究と違いとは、OpenPose が CNN の組み合わせで体のキーポイントしてから人物を検知する方法を提案し、複数の人物を検出する時の NP-hard 問題を解決した。具体的に、OpenPose はまず体の各部位と各部位間の関連度を検出する。その後、各人物の体の各部位が関連され、最終的に画像内のすべての人物のキーポイントを検出する（図 4.2）。

姿勢識別と姿勢矯正のため、本研究は OpenPose の 25 点の体のキーポイントから、体幹を表示する 15 点の座標（0 から 14 まで）を利用し、関節距離と各ベクトル間の角度を計算す

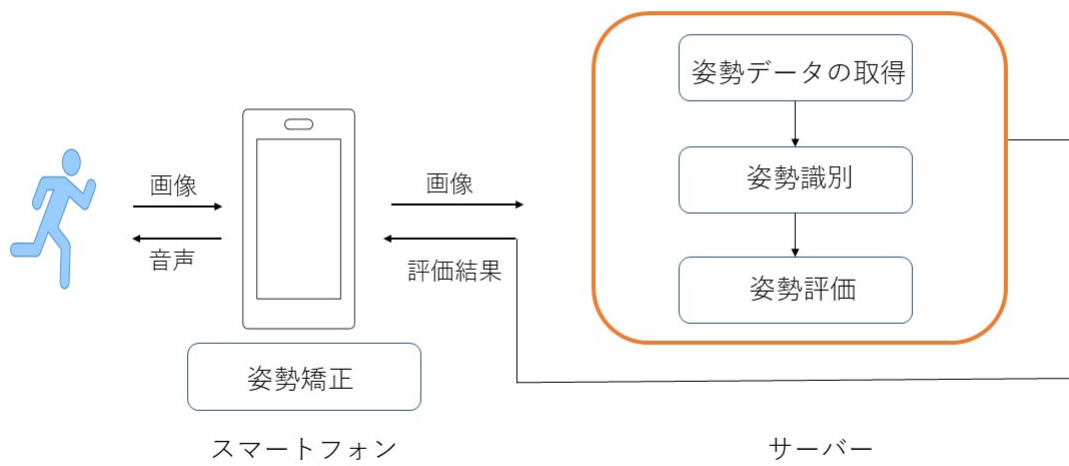


図 4.1: システム構成

る。関節距離とベクトル間の角度は姿勢識別に用い、ベクトル間の角度は姿勢評価に利用する。姿勢評価には全てのベクトル間の角度ではなく、必要な角度のみを用いる。

関節距離とは、図 4.3 の赤線で表示する 8 個の肘、腕、膝、足首の座標と体の中心の座標との距離である。

ベクトル間の角度(夾角)を、キーポイント 0 と 1, 1 と 2 からなるベクトル間の角度を例として説明する(図 4.3)。ここで、キーポイント 0, 1, 2 の座標を (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (0-1) のベクトルを \mathbf{n}_0 , (1-2) のベクトルを \mathbf{n}_1 とすると \mathbf{n}_0 と \mathbf{n}_1 の夾角 θ の余弦は以下の式により計算できる。

$$\cos \theta = \frac{(x_1 - x_0) \cdot (x_2 - x_1) + (y_1 - y_0) \cdot (y_2 - y_1)}{\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} + \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

4.1.2 姿勢識別

本研究では、k 近傍法により姿勢の識別を行う。k 近傍法は特徴空間における最も近い訓練データに基づいた分類の手法で、簡単で分類の正確率が高いという特徴がある。姿勢は関節の角度と関節から体の中心までの距離と定義できるため、今回の分類は、8 個の関節距離と 12 個の各ベクトル間の角度を特徴量にして行う。用いた 12 個のベクトル間の角度は図 4.3 に示す $(\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1)$, $(\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2)$, $(\mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3)$, $(\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_4)$, $(\mathbf{n}_4, \mathbf{n}_5)$, $(\mathbf{n}_5, \mathbf{n}_6)$, $(\mathbf{n}_7, \mathbf{n}_8)$, $(\mathbf{n}_8, \mathbf{n}_9)$, $(\mathbf{n}_9, \mathbf{n}_{10})$, $(\mathbf{n}_7, \mathbf{n}_{11})$, $(\mathbf{n}_{11}, \mathbf{n}_{12})$, $(\mathbf{n}_{12}, \mathbf{n}_{13})$ である。

4.1.3 姿勢評価

怪我の防止と、効果的なトレーニングのため、頻度、強度、持続時間、運動の種類 (FITT) のトレーニングの原則 [36] に従ってトレーニングすることは重要である。筋力のトレーニングを重視する自重トレーニングでは、FITT の原則に従うことで、姿勢の正確さ、動作の繰り返す回数と姿勢が保たれる時間を適切にすることによって、運動の強度と安全性が確保される。そのため、本研究は特定の関節角度を計算し、姿勢の正確さ、同じ動作を繰り返す回数と姿勢が保つ時間により姿勢評価を行う。[37] の中で記述されている腹筋と大腿の筋力を訓練する姿勢(図 4.4, 図 4.5)を例にすると、評価は次のように行われる。

1. まずステップ 1 (図 4.4) の評価を行う。つまり、下腿と大腿の角度(ベクトル \mathbf{n}_0 と \mathbf{n}_1 間の角度)が 90 度であるかを判断する。

2. ステップ 1 で正しい姿勢がとれたら、次にステップ 2 の姿勢を評価する。つまり、上半身と大腿の角度(ベクトル \mathbf{n}_1 と \mathbf{n}_2 間の角度)が 180 度か、さらに下腿と大腿の角度(ベクトル \mathbf{n}_0 と \mathbf{n}_1 間の角度)が 90 度であるかを判断する。

3. ステップ 2 の姿勢を 2 秒間保っているかを判断する。

4. ステップ 1 とステップ 2 を 10 回以上繰り返しているかを判断する。

OpenPose のキーポイントの識別精度を考え、実際に姿勢評価を行う時には、誤差を考え、正しい角度の範囲を設定する。



(a) Input Image



(b) Part Confidence Maps



(c) Part Affinity Fields



(d) Bipartite Matching



(e) Parsing Results

図 4.2: OpenPose による体のキーポイントの検出 [8]

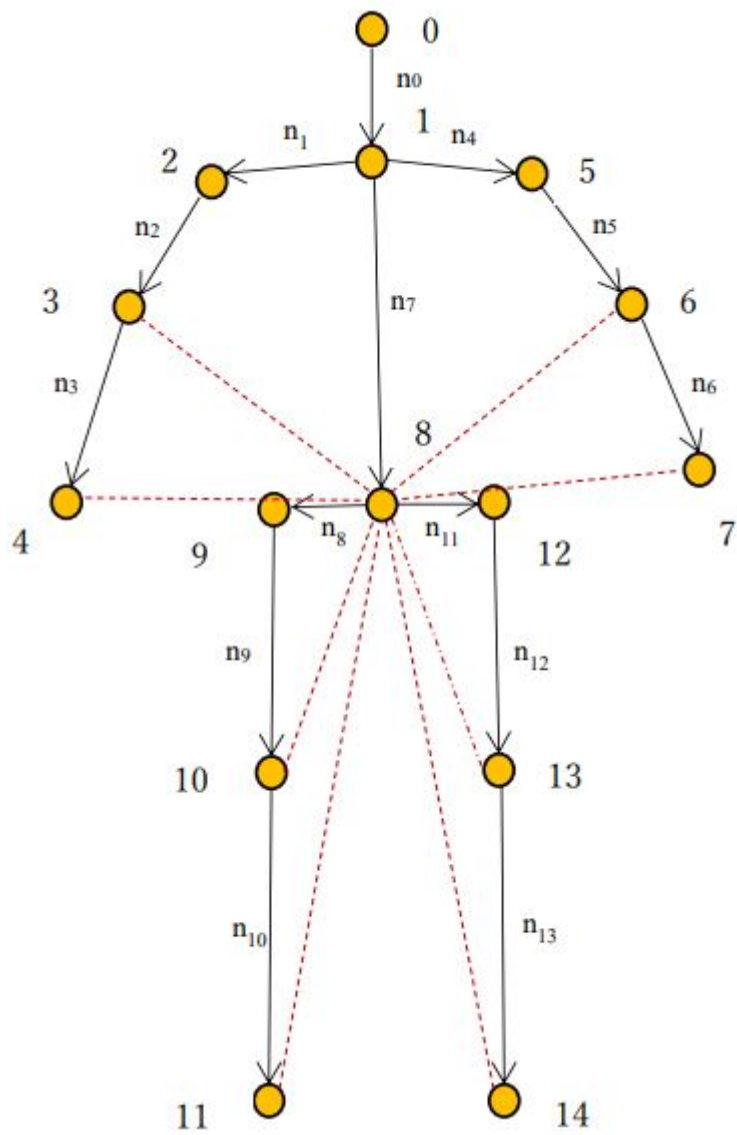


図 4.3: 姿勢データ



図 4.4: 訓練姿勢ステップ 1

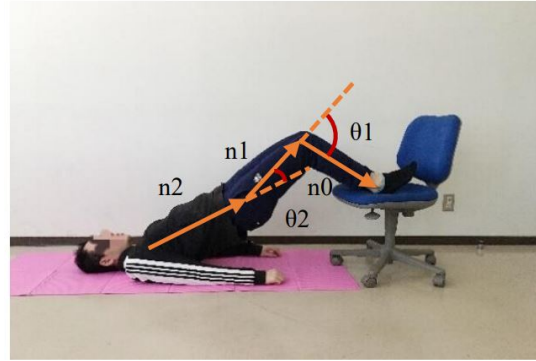


図 4.5: 訓練姿勢ステップ 2

4.1.4 姿勢矯正

トレーニング中、ユーザはスマートフォンの画面が見えないため、スマートフォンにより音声で姿勢の矯正方法、時間と繰り返す回数をユーザに伝える。

例えば、腹筋と大腿の筋力を訓練する姿勢（図 4.4, 図 4.5）の場合、以下の提示を音声で伝えられる。「腰を上げてください」、「あと 2 秒頑張ってください」、「残りあと 2 回です」。

4.2 プロトタイプシステムの実装

本研究では自重トレーニング中に姿勢矯正ができるシステムの作成を行った。提案するシステムのスマートフォン側のソフトウェアの実装は QT for Android で行われている。モバイルデバイスは Android 9 が搭載されている Samsung Galaxy s10 を使用している。Samsung Galaxy s10 のメインカメラは三つのレンズが搭載され、広い視野角を持っているため、2メートルの距離からユーザの全身を撮ることができる。サーバ側のソフトウェアの実装は OpenPose の Python API を利用し、体のキーポイントを検出している。OpenPose は GPU Version が使用され、NVIDIA GeForce RTX 2060 により約 16.0 fps のスピードで画像の分析を行っている。スマートフォンとサーバは同一のローカルエリアネットワークに接続されている。

4.2.1 スマートフォン側の実装

ユーザーはスマートフォンのアプリケーションで行うトレーニングの説明を読み、音声の提示によりトレーニングを行う。アプリケーションには端末のメインカメラを使い、トレーニングを行っているユーザの画像を取得し、サーバへ送る。その後、サーバから送られた姿勢評価の結果によりトレーニング中のユーザに音声のフィードバックを提供する。トレーニ

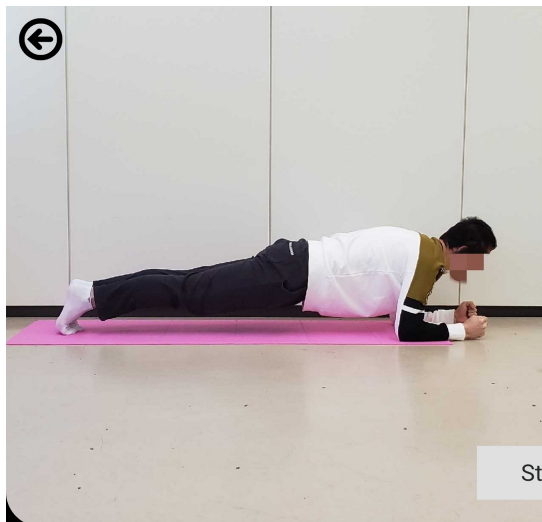
ングが始まる前にはカメラを設置する提示とトレーニングの説明が流れ、トレーニングが完了した後も完了を提示する音声流れる。図 4.6 はスマートフォン側のアプリケーションである。図 4.6 の (a) はトレーニング動作を説明する画面で、(b) はトレーニング中の画像を撮る画面である。アプリケーションの開発言語には qml と c++ を使用した。このアプリケーションの具体的な動作について以下で説明する。

まず、トレーニング動作の説明を読み終わった後に、アプリケーションの下にある start ボタンを押すと、サーバとの接続が始められる。サーバとの接続が確認できたら、カメラから撮る画像と行っているトレーニングの番号が同時に送信される。画像は TCP Socket により送られ、トレーニングの番号は UDP Socket により送られる。スマートフォンのカメラを利用するため、アプリケーションの開発言語は Android のスマートフォンのカメラの利用を支持する qml を使用した。今回、OpenPose の識別時間とユーザにフィードバックする音声の長さを考え、画像を送る間隔が 1000ms に設定された。画像と番号の送信はすべてのトレーニングが終わるあるいはカメラが閉められるまで行う。その後、サーバからの姿勢評価結果に対して、フィードバックの音声流される。姿勢が正しい場合、数秒の音声流される。姿勢が正しくない場合は矯正を促す音声流される。セットが完了した後に、セット完了の提示、次のセットを開始する提示流される。一つのトレーニングが完了した後に、トレーニング完了の提示、次のトレーニング動作の説明、応援する音声流される。トレーニング音声が重ならない、トレーニングを円滑に進行するため、数秒以外の音声流れる間に、サーバからの分析結果に反応しないように設定された。数秒中に正しくない姿勢を撮る場合は、数秒を中止し、音声により姿勢が矯正された後に、時間の計測が再度はじめられる。また、サーバ側からの人の検出が失敗したメッセージが送られたら場合、「カメラが撮れる範囲でトレーニングをしてください」の音声流される。サーバ側からの姿勢評価に必要なキーポイントの検出が失敗したメッセージが送られたら場合、音声前回の評価結果を参考にして流される。サーバ側から音声のフィードバックはすべてのトレーニングが終わるか、カメラが閉められるまで行う。

4.2.2 サーバ側の実装

サーバ側では、スマートフォンから送られた画像を分析し、OpenPose により体のキーポイントを抽出し、ユーザがとっていた姿勢を評価し、結果をスマートフォンに送る。サーバ側のソフトウェアの開発言語には Python 2.7 を使用した。サーバ側のソフトウェアの具体的な動作について以下で説明する。

まず、TCP プロトコルと UDP プロトコルでのスマートフォンとの接続を待つ。接続ができたら、スマートフォンからの画像とトレーニング番号を受信する。受信された画像は OpenPose の Python API により分析され、体のキーポイントを抽出する。OpenPose に分析できるため、スマートフォンから撮った画像は numpy と OpenCV を利用することでフォーマットを nv21 から rgb に変換される。OpenPose から得られる体のキーポイントとスマートフォンから送られたトレーニング番号を使うことで、各ベクトル間の角度を計算し、姿勢の正しさが判断できる。判断の結果が UDP Socket によりスマートフォンに送られる。OpenPose の識別の誤差



ステップ

- ・マットの上うつ伏せる
- ・両肘を肩幅に開いてマットにつける
- ・両足を肩幅に開く
- ・肘とつま先に重点を置き、体を持ち上げる
- ・そのまま10秒維持する
- ・5回繰り返す

(a) トレーニング動作を説明する画面



(b) トレーニング中の画像を撮る画面

図 4.6: 自重トレーニングの支援を行うアプリケーション

を考え、今回は正しい角度を 10 度から 20 度の範囲に設定した。また、OpenPose によりのを検出ができない場合と姿勢評価に必要なキーポイントの検出が失敗した場合、スマートフォン側にエラーを代表するメッセージが送信される。全てのトレーニングが終わるか、カメラが閉められるまで、上記の動作が繰り返される。

第5章 自重トレーニング支援システムの音声インタフェースの評価実験

本研究で提案する自重トレーニングを支援する音声被験者提示し、音声インタフェースの評価実験を行った。本章ではその評価実験について述べ、考察を示す。

5.1 実験目的

提案する音声インタフェースを評価するために、本研究は提案音声を被験者にフィードバックし、実験を行った。本実験の目的は以下3点である。

1. 音声によるトレーニング動作の説明の有用性と改善点を調査する。
2. 時間と回数の提示音声の有用性と改善点を調査する。
3. 姿勢矯正音声の有用性と改善点を調査する。

5.2 被験者

本評価実験は所属研究室の学生を含む、22歳から27歳までの大学院生8名(男性6名、女性1名)を被験者とした。提案した自重トレーニングシステムは自重トレーニングの初心者を対象にしたため、被験者は全員自重トレーニングの経験がない又は自重トレーニングの経験が少ない人にした。実験の音声指示は日本語を用いた、被験者は日本人(2名)また日本語で日常会話ができるレベルの中国人(5名)である。

5.3 実験内容

提示音声の評価実験は四つのタスクで構成されている。被験者は順番にタスクAからタスクDまでを完成する。実験を行う前に、被験者は体の状態について質問され、自重トレーニングができを確認した。図5.1には実験の様子を示す。

タスクA: 本タスクでは音声によるトレーニング動作の説明の明確さ、有用性、改善点と使用感を調査する。被験者は、まず、本タスクの説明を聞いて、音声の指示によりトレーニングを行うことを理解した。次に、被験者がマットの上に立って、動作を説明する音声を聞きながら、図3.1に示す四つの動作を各動作を順番に行った。最後に、被験者に表5.1のQ1-Q5を記入してもらい、これでタスクAが終了となる。

タスク B: 本タスクでは人の音声による時間と回数の提示音声の有用性，改善点と使用感を調査する。被験者は，まず，本タスクの説明を聞いて，トレーニング中に時間と回数を知する人の音声が流されることを理解した。次に，被験者がマットの上に立って，図 3.1 に示す四つのトレーニング動作を各動作五回行った。最後に，被験者に表 5.1 の Q6-Q7 を記入してもらい，これでタスク B が終了となる。

タスク C: 本タスクでは姿勢矯正に使う音声の有用性，改善点と使用感を調査する。被験者は，まず，本タスクの説明を聞いて，音声の提示により姿勢を矯正することを理解した。次に，被験者がマットの上に立って，筆者が提示した画像の中の姿勢をとってもらった。本タスクでは合計七つの画像を提示した。図 5.2 は提示した画像の一部である。その後，程度の副詞を使った姿勢矯正の音声が流れ，被験者は音声により姿勢を矯正した。次に，被験者は提示した画像の中の姿勢に戻り，角度と距離を使った姿勢矯正の音声を聞き，音声によりもう一回の姿勢矯正をする。最後に，被験者に表 5.1 の Q11-Q15 を記入してもらい，これでタスク C が終了となる。

タスク D: 本タスクでは機械音による時間と回数の提示音声の有用性，改善点と使用感を調査する。被験者は，まず，本タスクの説明を聞いて，トレーニング中に時間と回数を知する機械音が流されることを理解した。次に，被験者がマットの上に立って，図 3.1 に示す四つのトレーニング動作を各動作五回行った。タスクが完了した後に，表 5.1 の Q8-Q10 を記入してもらい，これでタスク D が終了となる。

すべてのタスクが終了した後，提案する音声インタフェースについてのコマンドが聞かれ，被験者に表 5.1 の Q16 を記入してもらった。



図 5.1: 音声インタフェースの評価実験の様子



図 5.2: 音声インターフェースの評価実験中被験者に提示した画像

5.4 実験用アプリケーション

実験において使用したアプリケーションの一つの画面を図 5.3 に示す。図 5.3 は図 3.1 の動作 (a) に対応する。

(1) ではウェブカメラが撮っている画面を表示する。ウェブカメラは被験者と 3メートルぐらいの距離に設置された。

(2) ではウェブカメラにより撮影される画像を表示する。画像はボタン (8) を押すと撮影される。その画像はサーバーに送り、被験者の関節角度が分析される。

(3) は姿勢矯正に使う音声を流すボタンである。a11 を押すと「足を少しあげてください」の音声流される。a12 を押すと「足を 10 度ぐらいあげてください」の音声流される。a21 を押すと「足を大きくあげてください」の音声流される。a22 を押すと「足を 20 度ぐらいあげてください」の音声流される。

(4) は機械音による時間と回数を提示する音声を流すボタンである。di1 を押すと十秒間音調が上がる機械音による時間を提示する音声流される。di201 から di205 までは音調が上がる機械音による五セットを提示する音声を流すボタンである。

(5) は人の音声による時間と回数を提示する音声を流すボタンである。od を押すと十秒間数秒の音声流される。od01 を押すと「二回」の音声流される。od01 を押すと「残り二回です」の音声流される。od01 を押すと「最後のセットです」の音声流される。

(6) は姿勢を説明する音声を流すボタンである。before を押すと「マットに横たわって、両手を下に向けてお尻の両側においてください。そして、両足がはなれないようにまっすぐにして、上半身と垂直するまでゆっくり上げてください。そのまま十秒維持してください」の音声流される。after を押すと「足をまっすぐにして、ゆっくり下ろしてください」の音声流される。

(7) は (2) の画像から得られた関節角度を表示する。実験では、筆者はサーバからの関節角度を参考し、被験者に音声の提示を行った。

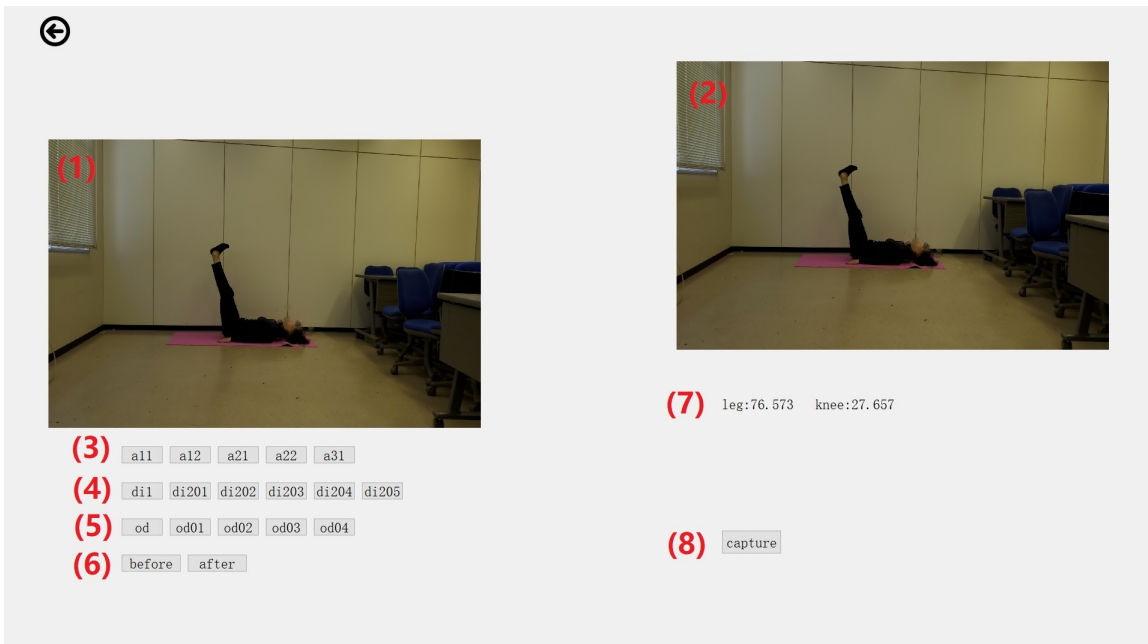


図 5.3: 音声インタフェースの評価実験用アプリケーション

5.5 実験結果

本実験におけるアンケートの一部の結果を表 7.2 と表 7.3 に示す。Q5 においては、以下のような回答が得られた。

被験者 1: 音声によりの説明は理解しやすいが、音声だけの提示により行動することに不安を持っている。トレーニング動作に名前をつけ、具体的な行い方を説明する前に動作の名前を言った方が行動しやすい。

被験者 2: 音声により複雑なトレーニング動作を説明することが難しいと思う。音声で伝えられる情報が限られているから、トレーニング動作の維持時間とセットが少なく、頻繁に変わる場合、音声指示に対する不信感が上がる。

被験者 3: 音声の説明によりトレーニング動作をとった後に、使う筋肉についての提示が欲しい。例えば、「腰に力を入れないで、お腹に力を入れてください」などの音声があった方が正しくトレーニングできる。

被験者 4: 各ステップの説明の後に姿勢を分析し、姿勢の正確さについてのフィードバックがあると嬉しい。

被験者 5: 音声の指示の通りに行動できなかった場合、姿勢を矯正してくれるリアルタイムなフィードバックがあったら嬉しい。

被験者 6: 音声があった方が自然にトレーニングできる。動作自体が知っていれば、音声の説明だけでトレーニングできるけど、全く知らない動作は音声だけで難しいと思う。

被験者 7: 行う前にトレーニング動作に一定な程度の理解があれば、音声の説明により行動することが簡単だが、音声によりまったく知らない動作を行う時不安がある。音声の説明の前に、動作を説明するビデオが必要だ。

Q10 においては、以下のような回答が得られた。

被験者 1: 時間と回数の提示がとても有効だと思う。しかし、人の音声による時間の通知は、維持した時間を提示するより、カウントダウンの形で残りの時間を提示した方が直感的で、応援の効果が比較的によい。また、時間を提示する時は、毎秒に提示しなくて、提示の間隔をどんどん短くする方法が励ましが受けられる。例えば、維持時間が 10 秒の場合、「十、七、五、三、二、一」の音声を使う。機械音による時間の通知は、人の音声と比べてイラつきやすいので、人の音声の方がいい。自重トレーニング中、適当な休憩をとることも重要だから、休憩時間についての提示があると嬉しい。休憩時間の提示はリラックスできる音楽を利用したらいいと思う。

被験者 2: 動作を維持する時、数秒を残り五秒や三秒の時からはじめ、他の時間は応援する音声を流す。トンが上がる機械音は音階があるので、七秒になると終わりの感じがある。

被験者 3: 自分でトレーニングをしている場合、残りの回数をよく忘れてしまうので、回数の提示がとても有効だと思う。人の音声の提示があるから、一人でトレーニングをやっている感じがなくて、機械音よりいいと思う。

被験者 4: 時間と回数を数えてくれる方が頑張れる気がする。機械音による通知は残りの時間と回数がわかれなないので、永遠に続く感じがする。残り時間をカウントダウンしてほしい。

被験者 5: 本当のコーチではないので、短い機械音による提示した方が好きだ。また、時間を

通知する時、人の音声と機械音を同時使って通知する方法もある。例えば、人の音声の通知を五秒の間隔で流し、その五秒間に機械音を使う。

被験者 6: 回数を提示する機械音のトンの変化が分かれにくい。そして、人の音声による時間と回数を提示する場合、時間と回数の提示音声が変わると、自分が間違っているかと思うので、音声をあまり変わらないで欲しい。

被験者 7: 時間と回数の提示は応援効果があるので、有効だと思う。回数の提示は毎回必要だが、時間の提示は毎秒ではなく、一定の間隔があった方がいい。

Q15においては、以下のような回答が得られた。

被験者 1: 程度の副詞を使った音声と角度や距離を使った音声の矯正効果が同じだと思う。角度と距離を使った音声は標準な姿勢との差が説明できるが、角度と距離を正確に把握できない人が多いので、矯正の効果は程度の副詞と同じだと思う。単純な人の音声を使うと比べ、機械音と人の音声を合わせて使う方法がより正確に矯正方法を説明できる。例えば、「手を挙げてください」の指示の後、ユーザが手を挙げる過程に連続的な機械音を提示し、正しい姿勢になった場合短い機械音を提示する。

被験者 2: どのぐらいが少し、どのぐらいが大きくはわからないので、程度の副詞は理解しやすいと思わない。しかし、程度の副詞の使用は角度や距離より自然だから、矯正の効果が高いと思う。矯正の音声が連続的にフィードバックされるなら、程度の副詞を使った矯正音声により正しい姿勢をとることができると思う。

被験者 3: 目標姿勢との距離が大きな場合、音声による姿勢矯正が難しいと思う。距離が小さい場合、程度の副詞を使った矯正音声が好きだ。距離や角度の提示があっても、体の部分が見えない時、移動した角度や距離がわからないから、角度と距離を使った矯正音声あまり有効ではないと思う。

被験者 4: 角度と距離の方が目標をイメージできて矯正しやすい。しかし、トレーニング動作が維持できない時、矯正な音声ではなく、休みを提示する音声が欲しい。そして、目標姿勢との距離に応じ人の音声と機械音を合わせて提示する方法もある。例えば、距離が大きな場合、「大きく上げてください」を提示し、距離が小さい場合、連続的な機械音と短い機械音による提示する。

被験者 5: 角度と距離の提示が明確だ。そして、手など距離を参照できるものがあるから、距離の方が角度より分かりやすい。

被験者 6: 体の部分が見える場合、距離と角度の方がいい。同じ矯正音声が続いて提示される場合、音声の間隔をどんどん長くしてほしい。音声によりの矯正が難しい場合、動画や画像によりもう一回姿勢を確認する提示音声を流す。

Q16においては、以下のような回答が得られた。

被験者 1: 音声の種類を増やしてほしい。

被験者 3: 感情のある音声や好きなキャラクターの音だと嬉しい。

被験者 4: 休みの間に応援する音声が欲しい、やりながらの時は応援を聞いている余裕がない。休憩時間を指示してほしい。

被験者 5: トレーニングの時、スマートフォンなどのデバイスの画像を見るのが難しいので、

音声での提示が大変便利だと思う。動作をリアルタイムで矯正すると実用性がある。
被験者 6: 音声があった方が多少強制されるためトレーニングの効果が保証できる。
被験者 7: トレーニング中リズムミカルな音楽がほしい。

5.6 考察

5.6.1 音声によるトレーニング動作の説明についての考察

音声によるトレーニング動作の説明の有用性を調査する Q3 と Q4 は、平均点数が 3.86 である。また、実験中、被験者は全員音声の提示により正しくトレーニングを行った。これにより、提示した説明音声は明確で、音声だけでトレーニング動作を説明する可能性があることが推測できる。しかし、Q6 において、被験者は音声だけの提示により行動することに不安を持っていることが分かった。その問題を解決するためには、トレーニング動作に名前をつける、各ステップの後に姿勢の正確さを確認してから次のステップに進む、トレーニングをする前に同じ説明音声を使ったビデオをユーザに提示するなどの方法が考えられる。また、筋肉についての提示も必要という意見が得られた。そのため、今後は筋肉についての説明や他の間違いやすい姿勢の提示を追加する。

5.6.2 時間と回数の提示音声についての考察

人の音声による時間と回数の提示音声の有用性を調査する Q6 は、平均点数が 4.86 である。不快感を調査する Q7 の平均点数が 2.29 である。Q10 においても人の音声の通知は有効だ、不快感がないなどのコマンドをもらった。これにより、人の音声による時間と回数を提示する方法の有用性が高く、ユーザにいい体験を提供できることが考えられる。時間をカウントダウンしてほしい、時間提示の間隔を変化してほしい、休憩時間を提示してほしいなどの意見をももらったため、今後は、維持時間が長い姿勢に対する、提示の間隔が変化する方法や、応援音声を入れる方法を考える。また、残りの休憩時間を提示する方法としてリラックスできる音楽を利用する方法を考える。一方、機械音による時間と回数の提示音声の有用性を調査する Q8 の平均点数が 2.72 だけである。不快感を調査する Q9 も比較的の高い 3.00 の平均点数を得た。これにより、機械音による時間と回数を提示する方法の有用性が低い、人の音声ほどの良い使用感を提供できないことが推測できる。Q10 の回答によると、機械音の提示は残り時間と回数がわからない、人の音声よりいらつきやすいなどの欠点があることが分かった。しかし、維持時間が長い場合、機械音と人の音声を同時に使う方法が単純な人の音声を使うより良い体験を提供できる可能性がある。

5.6.3 姿勢矯正音声についての考察

程度の副詞を使った姿勢矯正音声の有用性を調査する Q11 と Q12 は 3.43 と 3.86 の平均点数が得られた。一方、角度と距離を使った姿勢矯正音声の有用性を調査する Q13 と Q14 の平均点数は 3.86 と 3.00 である。これにより、角度と距離を使った矯正音声は程度の副詞を使った矯正音声より理解しやすいという結論が得られる。しかし、手や足が見えない場合、移動した角度や距離が分かりにくいため、角度と距離が姿勢矯正に有効ではない場合もあると考えられる。角度、距離と程度の副詞を同時に使うことが姿勢矯正にもっと有効である可能性がある。そのため、今後は角度、距離と程度の副詞を合わせてよい矯正効果を実現できる方法を考える。それ以外、今後は標準な姿勢との距離が短い場合、人の音声ではなく、機械音を使う方法を検討する。

また、Q16 においては、感情のある人の音声が良い、トレーニング中音楽を流してほしいという意見が得られたため、今後は音楽のトレーニング支援効果を検証する。これ以外、トレーニング状況に応じて感情のある音声でフィードバックを提示する方法を考えている。

表 5.1: 音声インタフェースの評価実験のアンケート内容

| No | 質問 | 回答 |
|-----|---|-----------------------------|
| Q1 | 年齢、性別を教えてください. | 自由記述 |
| Q2 | 普段自重トレーニングをしていますか. | 5-4-3-2-1 よくする⇔しない |
| Q3 | 音声によるトレーニングの説明が理解しやすいと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q4 | 音声の説明によりトレーニングを行うことは容易と思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q5 | トレーニングの説明音声にアドバイスがあれば教えてください. | 自由記述 |
| Q6 | 人の音声による時間と回数の提示が有効だと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q7 | 人の音声による時間と回数の提示がイラつくと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q8 | 機械音による時間と回数の提示が有効だと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q9 | 機械音による時間と回数の提示がイラつくと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q10 | 時間と回数の提示音声にアドバイスがあれば教えてください. | 自由記述 |
| Q11 | 程度の副詞を使った姿勢矯正音声理解しやすいと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q12 | 程度の副詞を使った姿勢矯正音声により姿勢を矯正することは容易と思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q13 | 角度と距離を使った姿勢矯正音声理解しやすいと思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q14 | 角度と距離を使った姿勢矯正音声により姿勢を矯正することは容易と思われましたか. | 5-4-3-2-1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q15 | 姿勢矯正音声にアドバイスがあれば教えてください. | 自由記述 |
| Q16 | 他に思ったことがあれば教えてください. | 自由記述 |

表 5.2: 音声インタフェースの評価実験のアンケート結果 (a)

| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q6 | Q7 |
|-------|----------|------|------|------|------|------|
| 被験者 1 | 25 歳, 男性 | 3 | 4 | 2 | 4 | 3 |
| 被験者 2 | 24 歳, 男性 | 2 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 被験者 3 | 23 歳, 女性 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 |
| 被験者 4 | 22 歳, 男性 | 2 | 3 | 5 | 5 | 1 |
| 被験者 5 | 25 歳, 男性 | 1 | 4 | 3 | 5 | 3 |
| 被験者 6 | 23 歳, 男性 | 3 | 4 | 4 | 5 | 1 |
| 被験者 7 | 27 歳, 男性 | 1 | 4 | 4 | 5 | 1 |
| 平均 | | 2.14 | 3.86 | 3.86 | 4.86 | 2.29 |

表 5.3: 音声インタフェースの評価実験のアンケート結果 (b)

| | Q8 | Q9 | Q11 | Q12 | Q13 | Q14 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| 被験者 1 | 2 | 4 | 5 | 2 | 5 | 2 |
| 被験者 2 | 3 | 5 | 2 | 4 | 4 | 2 |
| 被験者 3 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 |
| 被験者 4 | 2 | 1 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| 被験者 5 | 5 | 1 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| 被験者 6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 2 | 2 |
| 被験者 7 | 3 | 3 | 2 | 3 | 5 | 3 |
| 平均 | 2.72 | 3.00 | 3.43 | 3.86 | 3.86 | 3.00 |

第6章 自重トレーニング支援システムの評価 実験

本研究で作成したスマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムを被験者に実際に利用してもらい、評価実験を行った。本評価実験の目的は、提案するシステムの有用性と使用感を調査することである。本章ではその評価実験について述べ、考察を示す。

6.1 被験者

本評価実験は所属研究室の学生を含む、23歳から27歳までの8名の大学院生(男性5名、女性3名)を被験者とした。提案した自重トレーニングシステムは自重トレーニングの初心者を対象にしたため、被験者は全員自重トレーニングの経験がない又は自重トレーニングの経験が少ない人に依頼した。

6.2 実験内容

被験者はまず、本実験の目的と流れの説明を聞いた。次に、被験者は体の状態について質問され、自重トレーニングができることを確認した。その後、被験者は提案システムを利用しながら、自重トレーニングを行った。実験の対象になる四つの自重トレーニング動作を図3.1に示す。被験者はその四つのトレーニング動作を各10秒、4セットを行った。トレーニング時間は約8分であった。図6.1には実験の様子を示す。

図3.1の動作(a)を例として、実験の流れと具体的な支援方法を説明する。正しい姿勢は、大腿と上半身の角度を90度にし、下腿と大腿の角度を180度にする。OpenPoseのキーポイントの識別精度を考え、今回は、正しい角度の範囲を80度から100度、170度から190度にした。被験者はGUIアプリケーションのstartボタンを押し、「スマートフォンを設置してください」の音声の提示の後に、カメラを設置する。その後、被験者は動作(a)のやり方についての説明を聞きながら、トレーニングを行う。そして、姿勢が正しい場合、数秒の音声が発せられる。大腿と上半身の角度が正しい範囲に収まらない場合、「足を上げてください」という音声が発せられる。大腿と下腿の角度が正しい範囲に収まらない場合、「膝を曲げないでください」という音声が発せられる。数秒中に姿勢が正しくなくなる場合は、数秒音が停止され、矯正音声に従って姿勢を調整した後に時間の計測を再開する。各セットが完成した後に、「一回」、「二回」、「残り2回です」、「最後のセットです」という通知が発せられる。セット数の通知



図 6.1: 自重トレーニング支援システムの評価実験の様子

の後、被験者は「足を上げてください。」の音声を聞いて、次のセットに入る。全てのセットが完成した後、被験者は「よくできました、次の動作に進みます」の音声を聞いて、次の動作を行う。全てのトレーニングが完了した後に、「終わりました、お疲れ様でした」という通知の後、実験を終了する。

実験終了後にアンケートを実施し、本システムの可用性と使用感を調査した。表 6.1 にはアンケートの内容を示す。

6.3 実験結果

本実験におけるアンケートの Q1-Q5 の結果を表 6.2 に示す。Q6, Q7 においては、以下のような回答が得られた。

被験者 1: 全てのトレーニング動作のやり方に慣れた後に、音声だけのトレーニング支援が便利で有効だと思う。

被験者 2: 提案システムは自重トレーニングの支援にとっても有効と思うが、支援できるトレーニング動作の種類を増やしてほしい。

被験者 3: 一人でも家で使えるので、便利だと思う。しかし、識別の精度が良くないみたいので、実際にトレーニングの支援がどこまでできるか疑問を持っている。狭い部屋では使えない、スマートフォンを設置する必要がある不便なところがある。

被験者 4: 姿勢を矯正してもらうのはとてもいいと思う。全身を撮る必要があるため、一定の距離が必要なので、狭い部屋では利用できない。感情のある提示音声がいい。

被験者 5: 画面を見なくても音声の説明により正しい動作のやり方が分かれるので、いいと思

う。トレーニングが全部完成した後に、スコアをつける機能があった方がいい。

被験者 6: 矯正音声があるので、正しい姿勢をとる意識が高くなる。疲れている時、数秒と回数のお知らせがあった方がトレーニングが続けられる。

被験者 7: トレーニングの動作を増やしてほしい。正しい姿勢の範囲をユーザのトレーニング状況による調整できるならいい。

被験者 8: 簡単なトレーニング姿勢の補佐ができるが、より複雑な姿勢の補佐が難しい。

6.4 考察

提案システムの姿勢支援効果について考察する。Q3において、被験者3以外は全員4点以上の回答をしている。平均点数は4.38である。これにより、提案した姿勢評価と姿勢矯正手法が有効である可能性があると推測できる。また提案システムの利便性と再利用について考察するQ4とQ5において、同じ4.25の平均点数出であった。このことから、提案システムは簡単に使え、よい使用感があると考えられる。

また、Q6とQ7において、支援できるトレーニング動作が少ない、より複雑なトレーニングの姿勢の支援が難しいという意見をもらった。そのため、今後はトレーニング動作を増やし、より複雑な姿勢の支援方法を検討する。それ以外、スコアをつける機能があった方がいい、感情のある提示音声がいいなどの意見が得られた。そのため、今後はすべてのトレーニングが完成した後に、トレーニングの状態をまとめ、スコアをつけるなどの次のトレーニングを激励できる機能を考えている。

また、良い支援を行うには、矯正に使う音声の種類を増やすことも望まれる。さらに、現在の音声によるフィードバックは保つ時間が長い姿勢に適用されるが、保つ時間が短い姿勢の場合には有効であるとは言い難い。この問題に対しては、姿勢が間違っていることを示す短い音声を利用することで解決できると考える。そして、実験中トレーニング動作が正しく行えなく、次の動作に進めない状況があった。そのため、ユーザがトレーニング動作を完成できない場合の対策が必要である。また、姿勢が保たれる時間を評価するため、間違った姿勢とトレーニングが止まった状態を区別する方法についての議論が必要である。今回の実験は姿勢評価の部分だけを行ったため、今後はリアルタイムの姿勢識別方法を考え、実験を行う必要がある。

また、本評価実験を通じて、OpenPoseの識別精度は服、画像内の被験者の割合、照明に影響される可能性があることが分かった。被験者がゆるい服を着ている場合、被験者の身長が高い場合、または薄暗い環境で実験を行った場合、OpenPoseの識別精度が低くなる。今回の実験を行った時、識別精度が高い被験者は1度から5度ぐらいの誤差があり、識別精度が低い被験者は10度から15度ぐらいの誤差があった。識別精度を上げるため、今後はOpenPose以外の体のキーポイントを検出する方法を検討する。

表 6.1: 自重トレーニング支援システムの評価実験のアンケート内容

| No | 質問 | 回答 |
|----|---------------------------------------|-----------------------------|
| Q1 | 年齢、性別を教えてください. | 自由記述 |
| Q2 | 普段自重トレーニングをしていますか. | 5・4・3・2・1 よくする⇔しない |
| Q3 | 本システムを利用することで、自重トレーニングの支援ができると思いましたか. | 5・4・3・2・1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q4 | 本システムの利便性について良かったと思いましたか. | 5・4・3・2・1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q5 | 本システムをまた利用したいと思いましたか. | 5・4・3・2・1 とても思う⇔まったく思わない |
| Q6 | 本システムにアドバイスがあれば教えてください. | 自由記述 |
| Q7 | 本システムの使用感を教えてください. | 自由記述 |

表 6.2: 自重トレーニング支援システムの評価実験のアンケート結果

| | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 |
|-------|----------|------|------|------|------|
| 被験者 1 | 23 歳, 女性 | 2 | 5 | 5 | 5 |
| 被験者 2 | 23 歳, 女性 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| 被験者 3 | 26 歳, 男性 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 被験者 4 | 25 歳, 男性 | 3 | 5 | 4 | 4 |
| 被験者 5 | 24 歳, 男性 | 2 | 5 | 4 | 4 |
| 被験者 6 | 24 歳, 女性 | 1 | 4 | 4 | 5 |
| 被験者 7 | 25 歳, 男性 | 3 | 4 | 4 | 4 |
| 被験者 8 | 27 歳, 男性 | 1 | 4 | 5 | 4 |
| 平均 | | 2.25 | 4.38 | 4.25 | 4.25 |

第7章 結論

7.1 まとめ

本稿においては、スマートフォンを用いた自重トレーニング支援システムと音声インタフェースを提案した。提案した提案システムは OpenPose から得た骨格座標を分析し、姿勢の識別、評価と矯正を実現する。姿勢識別の方法は、キーポイントと体の中心の距離とベクトル間の角度を特徴量として、k近傍法によって行う。姿勢評価は姿勢による必要なベクトル間の角度を選んで行う。姿勢矯正は音声による必要なフィードバックを行う。本稿で提案する自重トレーニングを支援する音声インタフェースは、トレーニング動作についての説明、姿勢矯正、時間と回数の提示、トレーニング中の応援を実現する。また、提案する自重トレーニング支援システムの実装を行い、評価実験を行った。結果としては、提案システムの利便性がよく、姿勢支援に有効である可能性があることが分かった。提案する音声インタフェースの評価実験を通して、それぞれの提案音声の有用性を評価した。また、提案システムの問題点と改善する方法について考察した。

7.2 今後の展望

本研究で提案する自重トレーニング支援システムの中では、サーバ側の実装は OpenPose を利用した。OpenPose によるキーポイントの検出はある程度の誤差があり、照明、カメラとの距離、服などの影響で精度が下がることがある。この問題に対し、今後の研究では他の姿勢検出手法を利用する予定である。また、今後の課題として、音声インタフェースの評価実験から得られた問題点と改善方法についての意見を参考にし、提示音声を検討する予定である。

謝辞

本研究を行うにあたり，指導教員である高橋伸准教授，ならび志築文太郎准教授には，丁寧なご指導と適切な助言をいただきました。心より感謝申し上げます。特に高橋伸先生は，研究の進め方，実験の設計，論文の執筆，発表資料の作成など多くのことをご指導いただきました，重ねて感謝いたします。また，インタラクティブプログラミング研究室の皆様，特にユビキタスチームのメンバーの方々には，日本語の修正や研究に関する意見をいただきました。ここに深く感謝いたします。最後に，実験の参加と協力をいただき，大学生活を共に過ごした友人に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Jeffrey S. Harrison. Bodyweight training: A Return to Basics. *In Strength and Conditioning Journal*, vol. 32, no. 2. 2010.
- [2] Caleb Conner, Gene Michael Poor Correcting Exercise form Using Body Tracking. *In Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems(CHI EA ' 16)*, ACM, NY, USA. pp. 3028–3034. 2016.
- [3] Lee Jiann-Der, Hsieh Chung-Hung, Lin Ting-Yang. A preliminary study of using kinect-based physical rehabilitation system to perform tai chi exercises with fls evaluation. *Neuropsychiatry, International Journal of Clinical Skills*, Vol. 8, No. 1. pp. 165–175. 2018.
- [4] Guo Xiaonan, Liu Jian, Chen Yingying. FitCoach: Virtual fitness coach empowered by wearable mobile devices. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications(IEEE INFOCOM 2017)*, IEEE, GA, USA. pp. 1–9. 2017.
- [5] Hao Tian, Xing Guoliang, Zhou Gang. RunBuddy: a smartphone system for running rhythm monitoring. *In Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing(UbiComp '15)*, ACM, Osaka, Japan. pp. 133–144. 2015.
- [6] 松村 海沙, 小池 崇文. Head Mounted Display を用いた三人称視点によるフォーム改善システム. 第 78 回全国大会講演論文集, 情報処理学会. pp. 357–358. 2016.
- [7] Qiao Sen, Wang Yilin, Li Jian. Real-time human gesture grading based on OpenPose. *In 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)*, IEEE, ShangHai, China. pp. 357–358. 2017.
- [8] Cao Zhe, Simon Tomas, Wei Shih-En, Sheikh Yaser. Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. *In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Parttern Recognition*, IEEE, Honolulu, USA. pp. 7291–7299. 2017.
- [9] Ding Feng, Zhang Qian, Zhao Run, Wang Dong. TTBA: An RFID-based Tracking System for Two Basic Actions in Free-Weight Exercises. *In Proceedings of the 14th ACM International Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks(Q2SWinet'18)*, ACM, QC, Canada. pp. 7–14. 2018.

- [10] Li Shengjie, Li Xiang, Lv Qin, Tian Guiyu, Zhang Daqing. WiFit: Ubiquitous Body-weight Exercise Monitoring with Commodity Wi-Fi Devices. *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence and Computing, Advanced and Trusted Computing, Scalable Computing and Communications, Cloud and Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovations(SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCOM/IOP/SCI)*, IEEE, GuangZhou, China. pp. 530–537. 2018.
- [11] Sinclair Jeff, Hingston Philip, Masek Martin. Considerations for the design of exergames. *In Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia(GRAPHITE '07)*, ACM, Perth, Australia. pp. 289–295. 2007.
- [12] Mandryk Regan L, Gerling Kathrin M, Stanley Kevin G. Designing games to discourage sedentary behaviour. *Playful User Interfaces*, Springer. pp. 253–274. 2014.
- [13] Gerling Kathrin, Livingston Ian, Nacke Lennart, Mandryk Regan. Full-body motion-based game interaction for older adults. *In Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems(CHI '12)*, ACM, Texas, USA. pp. 1873–1882. 2012.
- [14] Gao Yue, Mandryk Regan L. GrabApple: the design of a casual exergame. *In Proceedings of the 15th International Conference on Entertainment Computing(IFIP ICEC 2016)*, Springer, Vienna, Austria. pp. 35–46. 2011.
- [15] Saraee Elham, Betke Margrit. Dynamic adjustment of physical exercises based on performance using the proficio robotic arm. *In Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments(PETRA'16)*, ACM, New York, USA. pp. 1–8. 2016.
- [16] Yang Zou, Jie Sun, Yanhao Jin, Yixuan Bian. Interactive Tabletop Arm Reaching Exercise. *In Proceedings of the 9th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments(PETRA'16)*, ACM, New York, USA. pp. 1–8. 2016.
- [17] Apple, Siri. Available from: <http://siri.com/>.
- [18] Samsung, S Voice. Available from: <https://www.samsung.com/global/galaxy/what-is/s-voice/>.
- [19] Google. Google Assistant. Available from: <https://assistant.google.com/>.
- [20] Vikas Ashok, Yevgen Borodin, Yury PuzisI, V. Ramakrishnan. Capti-Speak: A Speech-Enabled Accessible Web Interface. *In Proceedings of the 12th Web for All Conference (W4A '15)*, ACM, Florence, Italy. pp. 327–328. 2015.
- [21] Chao Linlin, Tao Jianhua, Yang Minghao, Li Ya, Wen Zhengqi. Long short term memory recurrent neural network based multimodal dimensional emotion recognition. *In Proceedings*

- of the 5th International Workshop on Audio/Visual Emotion Challenge(AVEC'25), ACM, New York, USA. pp. 65–72. 2015.
- [22] Nuance Loquendo. Available from:<https://www.nuance.com/omni-channel-customer-engagement/voice-and-ivr/text-to-speech/vocalizer/language-availability.html>.
- [23] CereVoice Engine Text-to-Speech SDK. Available from: <https://www.cereproc.com/en/products/sdk>.
- [24] Rothwell, John C. Control of human voluntary movement. *Springer Science & Business Media*. 2012.
- [25] Hughes Mike, Franks Ian M. Notational analysis of sport: Systems for better coaching and performance in sport. *Psychology Press*. 2004.
- [26] Franks IM. Use of feedback by coaches and players. *In Science and football III Journal*, Routledge Chapman & Hall London. pp. 267–278. 1997.
- [27] Cushion Christopher, Harvey Stephen, Muir Bob, Nelson Lee. Developing the Coach Analysis and Intervention System (CAIS): Establishing validity and reliability of a computerised systematic observation instrument. *In Journal of sports sciences*, Taylor & Francis, vol. 30, no. 2. pp. 201–206. 2012.
- [28] Guzmán José Francisco, Calpe-Gómez Vicente. Preliminary study of coach verbal behaviour according to game actions. *In Journal of Human Sport and Exercise*, Universidad de Alicante, vol. 7, no. 2. pp. 376–382. 2012.
- [29] Zetou Eleni, Amprasi Evagelia, Michalopoulou Maria, Aggelousis Nikolaos. Volleyball coaches behavior assessment through systematic observation. *In Journal of Human Sport and Exercise*, Universidad de Alicante, vol. 6, no. 4. pp. 585–593. 2011.
- [30] Rector Kyle, Bennett Cynthia L, Kientz Julie A. Eyes-free yoga: an exergame using depth cameras for blind & low vision exercise. *In Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility(ASSETS '13)*, ACM, Bellevue, Washington. pp. 12:1–12:8. 2013.
- [31] Nintendo, RingFit Adventure. Available from: <https://www.nintendo.co.jp/ring/index.html>.
- [32] Nintendo, Fit Boxing. Available from: <https://fitboxing.net/>.
- [33] Chittaro Luca, Zuliani Francesco. Exploring audio storytelling in mobile exergames to affect the perception of physical exercise. *In Proceedings of the 7th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare and Workshops*, IEEE, Venice, Italy. pp. 1–8. 2013.

- [34] Hakulinen J, Turunen M, Heimonen T, et al. Creating immersive audio and lighting based physical exercise games for schoolchildren. *In Proceedings of the International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology(ACE2013)*, Springer, Twente, Netherlands. pp. 308–319. 2013.
- [35] Ren Xipei, Yu Bin, Lu Yuan, Chen Yu, Pu Pearl. HealthSit: designing posture-based interaction to promote exercise during fitness breaks. *In International Journal of Human–Computer Interaction*, Taylor & Francis, vol. 35, no. 10. pp. 870–885. 2019.
- [36] American College of Sports Medicine and others. ACSM’s guidelines for exercise testing and prescription. *Lippincott Williams & Wilkins*. 2013.
- [37] Lauren Mark, Clark Joshua. You are Your Own Gym: The Bible of Bodyweight Exercises. *Ballantine Books*. 2011.
- [38] Keep. Available from: <https://www.gotokeep.com/>.