

令和2年度 卒業論文

運動過程をフィードバックする  
筋力トレーニング支援システム

宮崎大学工学部 情報システム工学科

田邊 英介

指導教員 棕木 雅之

## 目次

1. はじめに.....	1
2. 従来のトレーニング支援システム.....	2
3. 運動過程のフィードバック.....	4
3.1. 運動過程の利用.....	4
3.2. 処理の流れ.....	6
3.3. 姿勢推定.....	7
3.4. 姿勢の正規化.....	8
3.5. 運動過程の検出.....	9
3.5.1. サイドレイズの運動過程の検出.....	11
3.5.2. アームカールの運動過程の検出.....	13
3.6. フィードバック情報の提示.....	15
3.7. その他の機能.....	16
3.7.1. 正しくないフォームのフィードバック.....	17
3.7.2. トレーニング回数のカウント.....	19
4. 評価実験.....	20
4.1. システムの動作確認.....	21
4.2. 運動過程の検出評価.....	23
4.3. アンケート調査.....	24
5. おわりに.....	26
謝辞.....	27
参考文献.....	28

## 1. はじめに

近年、筋力トレーニングの人気は高まっており、トレーニングを行っている人の割合が増加している。特に去年は、新型コロナウイルス感染症の流行により外出を自粛することが多くなり、運動不足を解消するためにも意識的に筋力トレーニングを行う人が増加した[1]。

筋力トレーニングで最も重要なことは正しいフォームでトレーニングを行うことである。正しくないフォームでトレーニングを行ってしまうと筋肉に負荷をかけることができず効果が低下するだけでなく、怪我をするリスクも高まる。しかし、個人でトレーニングを行う際、自分でトレーニングのフォームが正しいか判断することは難しい。

そこで、本研究では、運動過程をフィードバックすることで、ユーザが正しいフォームでトレーニングが行えているか確認できる筋力トレーニング支援システムを提案する。

## 2. 従来のトレーニング支援システム

トレーニング支援としては、フィットネスジムのトレーナーがトレーニングのサポートを行うことが一般的である。近年では、個人で行うトレーニングをシステムが支援する研究も行われている。

高久ら[2]は、筋力トレーニングの中でも比較的簡易で認知度の高い腹筋運動を対象に支援を行っている。この研究は、深度情報とカラー画像を同時に取得できる Kinect を用いて、ユーザの筋力トレーニングの動作を検知する。また、ユーザの運動へのモチベーションを高める方法として、消費カロリー等の運動の効果や、ゲーム性を付加している。

松村ら[3]は、HMD を用いて、弓道の練習を対象としたフォーム改善システムを提案している。この研究では、あらかじめ用意したお手本動画を半透明にする。リアルタイムで撮影した映像と半透明にしたお手本動画を重畳した映像を HMD に表示することで、お手本動画を参考に真似をしながらフォームを修正する(図 1)。

綿谷[4]は、体幹トレーニングの姿勢支援を行っている。この研究は、参考書のトレーニング画像と実際の映像の姿勢から3次元モデルを生成し、照らし合わせてユーザに提示することでフォームの修正

を行うことができる(図 2)。また、参考書のトレーニング画像を使用していることから画像さえ用意すれば多くの種目への応用もできる。

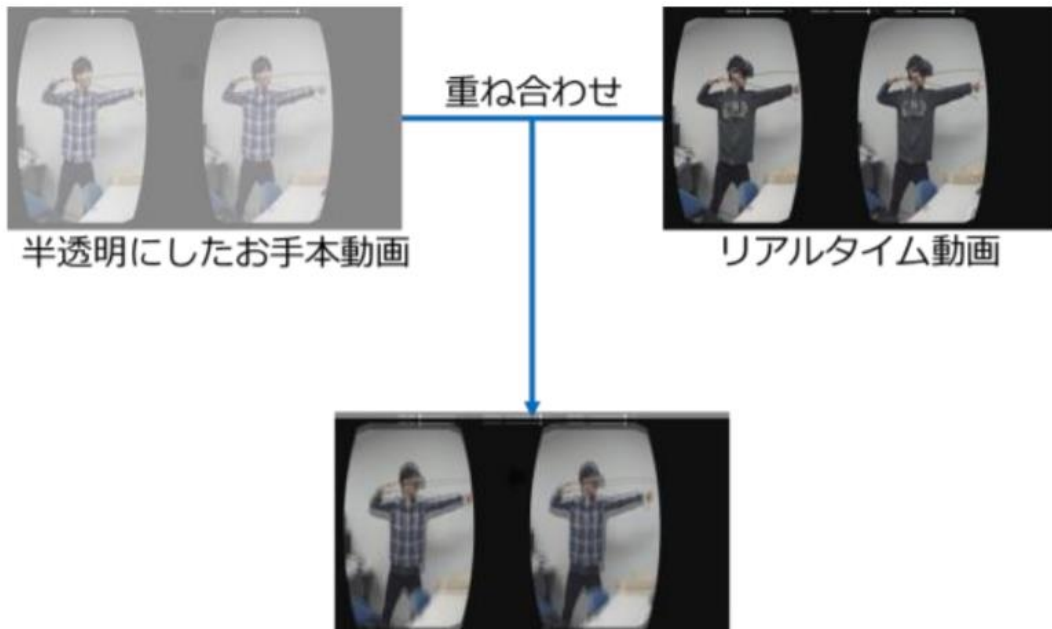


図 1 HMD に表示する映像 [3]

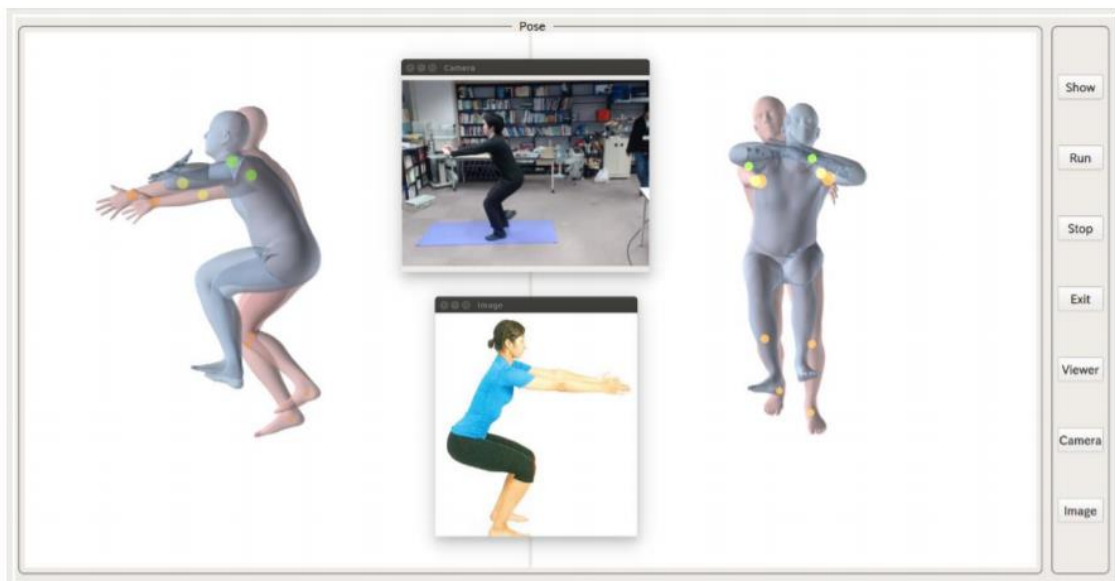


図 2 トレーニング中の映像 [4]

### 3. 運動過程のフィードバック

#### 3.1. 運動過程の利用

本研究では、従来研究のようにフォームを照らし合わせて提示するのではなく、システムがフォームを直接指摘することで、正しいフォームでトレーニングを行うことを支援する。そのために、運動過程をフィードバックする。筋力トレーニングでは一定の運動を反復する。その1回分の運動をフォームとする。フォームは、時間方向にいくつかの姿勢の段階を経る。この姿勢の段階のことを運動過程と呼ぶ。本研究では、筋力トレーニングを運動過程の系列としてモデル化する。ユーザが筋力トレーニングを行う様子をビデオカメラで撮影し、ユーザの姿勢をリアルタイムに運動過程に対応づける。その運動過程に応じたフィードバック情報を提示することで、ユーザが正しいフォームから外れないように支援する。実際にフィードバック情報を提示した例を図 3に示す。



図 3 実行時の画面

## 3.2. 処理の流れ

本研究では、運動過程を検出するために、フォームの最初、途中、終了の3段階の画像をサンプル画像として用意する。このサンプル画像中の人物の姿勢と入力映像中のユーザの姿勢を比較することで、ユーザの姿勢を最初、途中、終了のいずれかに分類する。さらに、分類結果を、筋力トレーニングをモデル化した運動過程の系列と対応づけることで、現在の運動過程を検出する。その運動過程に応じてフィードバック情報を提示する。

本システムの流れを以下に示す。

1. 入力映像中の姿勢推定
2. 取得した姿勢の正規化
3. 運動過程の検出
4. フィードバック情報の提示



### 3.3. 姿勢推定

本研究では、姿勢推定のために PoseNet[5]を使用する。PoseNet は、Google の機械学習ライブラリ TensorFlow を用いた、リアルタイムに人間の姿勢を推定できる手法である。PoseNet では、肩や手首などの17個のキーポイントの座標(図 4)とその点の信頼度スコアを検出できる。本研究では、PoseNet の Python 版である PoseNet-Python[6]を使用している。



図 4 17 個のキーポイント

### 3.4. 姿勢の正規化

姿勢推定を行った入力映像の座標とサンプル画像の座標を直接比較すると、認識したい人物の画像内での位置によって値が変わってしまうので、比較が困難である。そこで、認識したい人物の位置の影響を軽減するために、クリッピングと L2 正規化を行う。

初めにクリッピングを行う。クリッピングでは、人物のキーポイントを含む外接矩形で画像を切り取る。次に、L2 正規化を行う。ここでは、クリッピング結果のキーポイント座標をベクトルとして扱う。そのベクトルが単位ノルムになるようにスケーリングを行う。キーポイントを  $(x_i, y_i) (i = 1 \sim 17)$  とし、 $x$  座標を並べたベクトルを  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{17})$  とする。L2 正規化は以下のように定式化される。

$$\mathbf{x}_{L2\ norm} = \frac{\mathbf{x}}{\|\mathbf{x}\|_2}$$

$y$  座標も同様に変換する。

### 3.5. 運動過程の検出

運動過程の検出では、あらかじめ用意しておいたサンプル画像の姿勢推定結果と入力映像中のユーザの現在の姿勢推定結果を比較することで、どの姿勢の状態か検出する。

フォームの最初(A)、途中(B)、終了(C)の3段階におけるサンプル画像を用意する。サンプル画像は、著者本人がトレーニング参考書[7]を参考にして撮影している。

図5は、サイドレイズと呼ばれる肩のトレーニングの運動過程の画像であり、それぞれA,B,Cの3段階を表している。また、この3つの画像は、あらかじめ姿勢推定と正規化を行っている。このサンプル画像の姿勢と現在のユーザの姿勢のキーポイント同士の位置関係を比較することで、最初、途中、終了のいずれかに分類する。

トレーニングは繰り返しの運動であることから、同じ姿勢が反復して現れる。図5のBの画像は、腕を開く途中の姿勢でもあり、腕を下ろす途中の動作でもあることから、同じ分類であっても現在の状態によって運動過程が異なる。そこで、分類結果をA-B-C-B-A-B-Cのように変化する運動過程の系列にあてはめることで、現在の分類と姿勢の遷移から運動過程の状態を決定する。

本システムでは、サイドレイズとアームカールという2つの運動について、トレーニング支援を実装した。以下それぞれの検出方法を述べる。

### 3.5.1. サイドレイズの運動過程の検出

サイドレイズは、腕を下ろした状態から横に上げていくことで三角筋を鍛える。図 5 のように腕を下した状態の姿勢をフォームの最初(A)、腕を上げる途中の姿勢をフォームの途中(B)、腕を上げた状態の姿勢をフォームの終了(C)として、サンプル画像を用意する。肩から手首までの X 方向の距離が 0 より大きく図 5 の A 以内であればフォームの最初と分類する。また、肩から手首までの Y 方向の距離が C より大きく B 以下であればフォームの途中と分類し、0 より大きく C 以内であればフォームの終了と分類する。具体的に、それぞれの肩と手首の座標を定義して説明する。

状態 A での肩の座標を $(x_s^A, y_s^A)$ 、手首の座標を $(x_r^A, y_r^A)$ とする。状態 A での肩から手首までの X 方向の距離を $d_x^A$ とすると、 $d_x^A = |x_s^A - x_r^A|$ となり、Y 方向の距離を $d_y^A$ とすると、 $d_y^A = |y_s^A - y_r^A|$ となる。また、現在の姿勢の肩の座標を $(x_s^T, y_s^T)$ 、手首の座標を $(x_r^T, y_r^T)$ とすると現在の姿勢の肩から手首までの X 方向の距離は、 $d_x^T = |x_s^T - x_r^T|$ となり、Y 方向の距離は、 $d_y^T = |y_s^T - y_r^T|$ となる。同様に、状態 B、状態 C での肩の座標を $(x_s^B, y_s^B)$ 、 $(x_s^C, y_s^C)$ として、手首の座標を $(x_r^B, y_r^B)$ 、 $(x_r^C, y_r^C)$

とする。それぞれの肩から手首までのY方向の距離は $d_y^B = |y_s^B - y_r^B|$ 、 $d_y^C = |y_s^C - y_r^C|$ となる。

状態ごとの分類の式は以下のようになる。

状態 A :  $0 < d_x^T \leq d_x^A$

状態 B :  $d_y^C < d_y^T \leq d_y^B$

状態 C :  $0 < d_y^T \leq d_y^C$

また、運動過程の系列モデル応じて、現在の状態から次の状態へのみ遷移する。



A : 最初

B : 途中

C : 終了

図 5 サイドレイズの運動過程

### 3.5.2. アームカールの運動過程の検出

アームカールは、肘を固定した状態から曲げていくことで上腕二頭筋を鍛える。図 6 のように肘を伸ばしたまま腕を下した状態の姿勢をフォームの最初(A)、肘を曲げる途中の姿勢をフォームの途中(B)、肘を曲げた状態の姿勢をフォームの終了(C)として、サンプル画像を用意する。肘から手首までの X 方向の距離が 0 より大きく図 6 の A 以下であればフォームの最初と分類する。また、肘から手首までの Y 方向の距離が B 以上で C よりも小さいならばフォームの途中と分類し、C 以上であればフォームの終了と分類する。具体的に、それぞれの肘と手首の座標を定義して説明する。

状態 A での肘の座標を $(x_u^A, y_u^A)$ 、手首の座標を $(x_r^A, y_r^A)$ とする。状態 A での肘から手首までの X 方向の距離を $d_x^A$ とすると、 $d_x^A = |x_u^A - x_r^A|$ となり、Y 方向の距離を $d_y^A$ とすると、 $d_y^A = |y_u^A - y_r^A|$ となる。また、現在の姿勢の肘の座標を $(x_u^T, y_u^T)$ 、手首の座標を $(x_r^T, y_r^T)$ とすると現在の姿勢の肩から手首までの X 方向の距離は、 $d_x^T = |x_u^T - x_r^T|$ となり、Y 方向の距離は、 $d_y^T = |y_u^T - y_r^T|$ となる。同様に、状態 B、状態 C での肘の座標を $(x_u^B, y_u^B)$ 、 $(x_u^C, y_u^C)$ として、手首の座標を $(x_r^B, y_r^B)$ 、 $(x_r^C, y_r^C)$

とする。それぞれの肩から手首までの Y 方向の距離は  $d_y^B = |y_u^B - y_r^B|$ 、  
 $d_y^C = |y_u^C - y_r^C|$  となる。

状態ごとの式は以下のようなになる。

状態 A :  $0 < d_x^T \leq d_x^A$

状態 B :  $d_y^B \leq d_y^T < d_y^C$

状態 C :  $d_y^C \leq d_y^T$

3.5.1 節と同様に、運動過程の系列モデル応じて、現在の状態から次の状態へのみ遷移する。

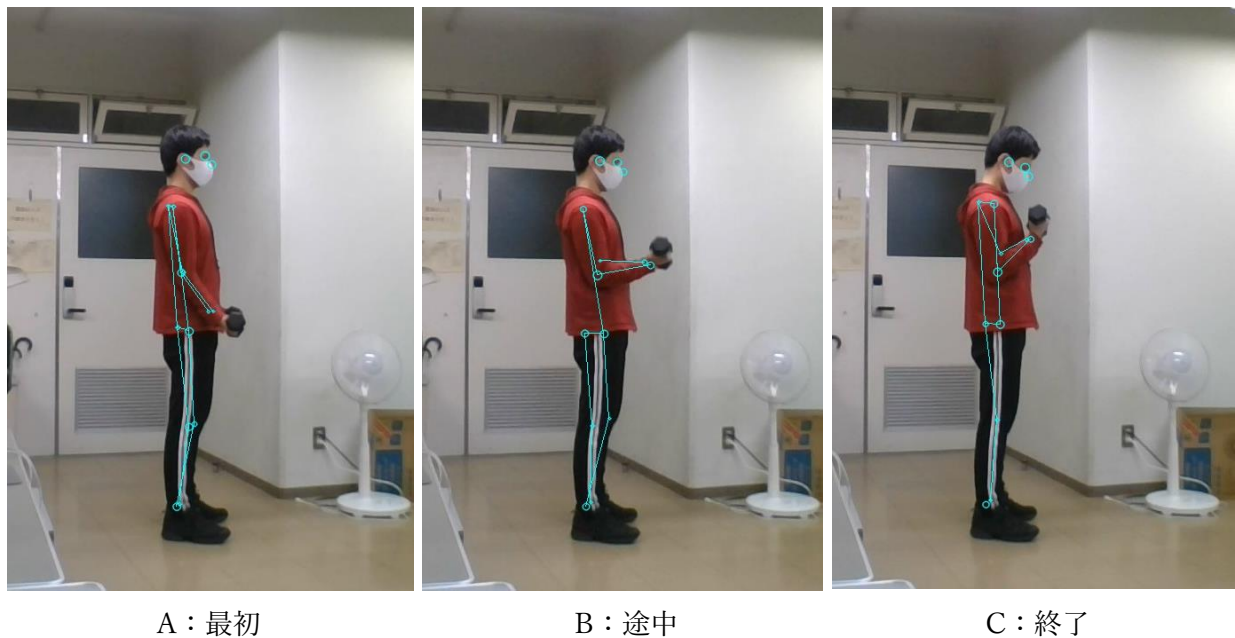


図 6 アームカールの運動過程



### 3.6. フィードバック情報の提示

フィードバック情報により、自分の姿勢が正しいかどうかユーザー自身で確認することができる。それぞれの姿勢によって提示するフィードバック情報は異なる。運動動作の最初(A)、途中(B)、終了(C)において、提示するフィードバック情報を表 1 に示す。

表 1 提示するフィードバック情報

A	「Ready!」と次に行う動作手順
B	「OK!」
C	「Good!」と次に行う動作手順

### 3.7. その他の機能

運動過程をフィードバックすること以外にもトレーニング支援を行う。1つは、フォームの正しくない部分を検出し、フィードバック情報を提示する機能である。この機能により、ユーザーが自分自身でフォームの修正を行う事ができる。もう1つは、トレーニングを行った回数をカウントする機能である。ユーザーが行ったトレーニングが正しいフォームであれば、カウントするように設計している。この機能により、ユーザーがトレーニング回数を数える必要はなく、トレーニングに集中することができる。

### 3.7.1. 正しくないフォームのフィードバック

正しくないフォームのフィードバックを行うために、あらかじめ正しくない姿勢の画像(図 7)を用意し、画像の姿勢と入力映像中のユーザの姿勢を比較する。サイドレイズでは、肩から手首までの Y 方向の距離が図 7 の A 以上であれば、腕が上がりすぎているフォームとみなし、フィードバック情報を提示する。アームカールでは、肩から肘までの Y 方向の距離が図 7 の B 以下になる場合、肘の位置を動かすすぎているフォームとみなし、フィードバック情報を提示する。具体的に座標を定義して説明する。

まず、サイドレイズにおける正しくない姿勢の状態について説明する。図 7 の A の姿勢の肩と手首の座標を  $(x_s^A, y_s^A)$ 、 $(x_r^A, y_r^A)$  とし、肩から手首までの Y 方向の距離を  $d_y^A = |y_s^A - y_r^A|$  とする。現在の姿勢の肩と手首の座標を  $(x_s^T, y_s^T)$ 、 $(x_r^T, y_r^T)$  とし、肩から手首までの Y 方向の距離を  $d_y^T = |y_s^T - y_r^T|$  とすると、 $d_y^A \leq d_y^T$  の場合、サイドレイズにおける正しくない姿勢の状態と分類する。

次に、アームカールにおける正しくない姿勢の状態について説明する。図 7 の B の姿勢の肩と肘の座標を  $(x_s^B, y_s^B)$ 、 $(x_u^B, y_u^B)$  とし、肩から肘までの Y 方向の距離を  $d_y^B = |y_s^B - y_u^B|$  とする。現在の姿勢の

肩と肘の座標を $(x_s^T, y_s^T)$ 、 $(x_u^T, y_u^T)$ として、肩から肘までの Y 方向の距離を $d_y^T = |y_s^T - y_u^T|$ とすると、 $d_y^T \leq d_y^B$ の場合、アームカールにおける正しくない姿勢の状態と分類する。

正しくない部分を指摘する例を図 8 に示す。

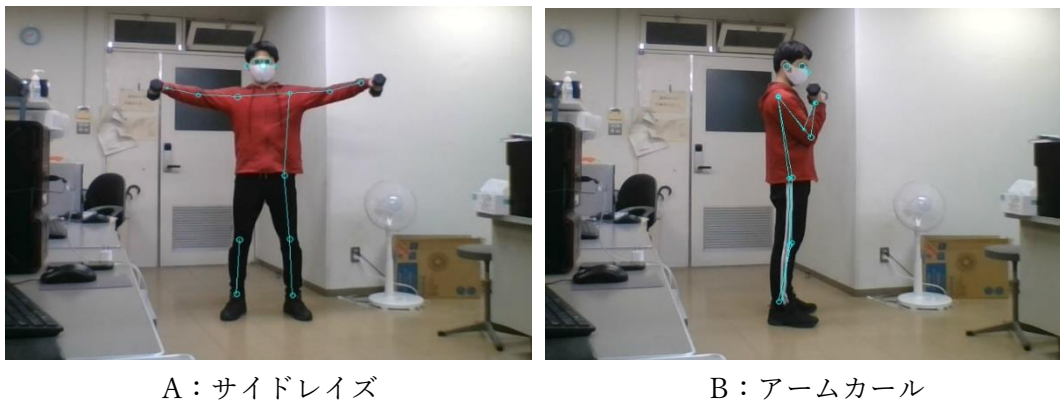


図 7 正しくない姿勢

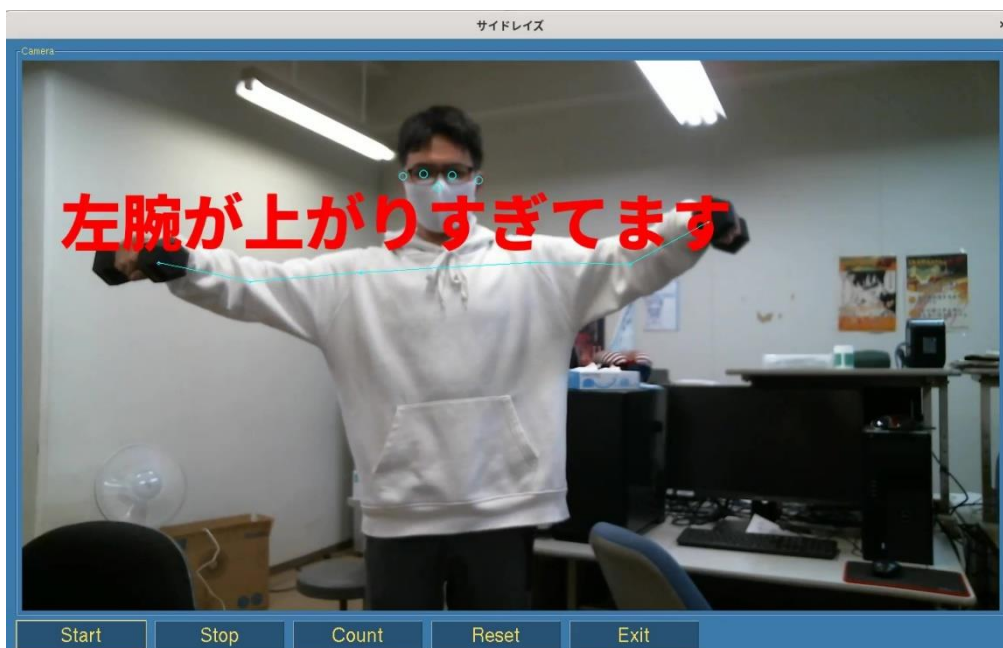


図 8 正しくない部分を指摘する例

### 3.7.2. トレーニング回数のカウント

ユーザがトレーニング回数を数える手間を省くために、システムでトレーニング回数のカウントを行う。分類結果をモデル化した運動過程の系列と対応づけて、1回分の反復運動を A-B-C-B-A の順番に検出できればカウントする。カウントした現在のトレーニング回数は、画面の右下に表示する。トレーニング回数を表示する例を図 9 に示す。

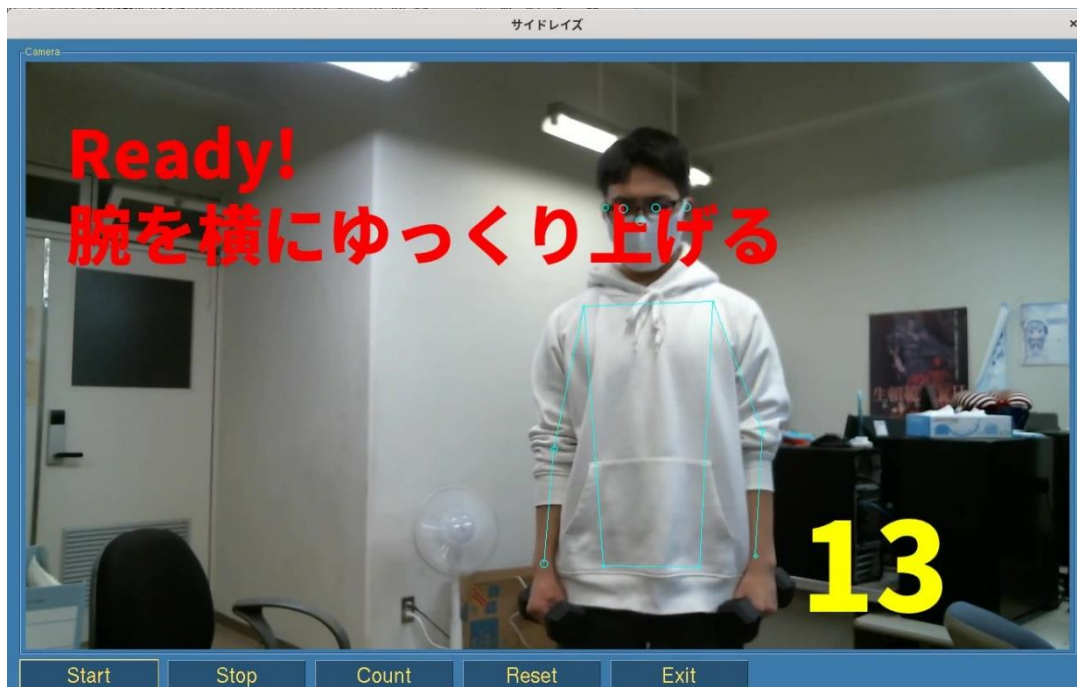


図 9 トレーニング回数を表示する例

## 4. 評価実験

提案システムが異なるユーザに対して正しく動作するか確認するために、本研究で提案したシステムを 5 人の被験者に使用してもらい、運動過程に応じた正しいフィードバック情報が提示されるか評価した。同時に、提案したシステムがトレーニングを正しく行うことに役立つかアンケート調査を行った。

本研究では、3.5 節で述べた 2 種類のトレーニングを実装した。1 つは、サイドレイズと呼ばれるトレーニングで、図 5 のように腕を閉じた状態から開いていくことで三角筋を鍛える。もう 1 つは、アームカールと呼ばれるトレーニングで、図 6 のように肘を固定して曲げていくことで上腕二頭筋を鍛える。サンプル画像として図 5、図 6 を使い、運動過程の検出を行う。

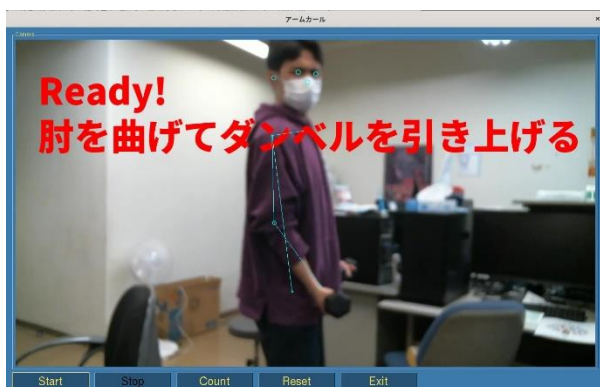
また、撮影する位置は、上半身のキーポイントが検出できる距離として、カメラから 2 m 程離れて撮影する。

#### 4.1. システムの動作確認

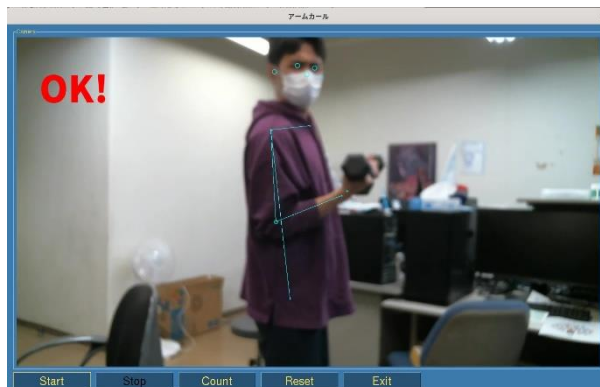
本研究は、2種類のトレーニングを実装する。サイドレイズにおけるフォームの最初、途中、終了と、アームカールにおけるフォームの最初、途中、終了に対応するフィードバック情報を提示した画面を図 10、図 11 に示す。また、本システムを操作するためのボタンの機能について表 2 に示す。



図 10 サイドレイズの運動過程ごとのフィードバック情報



A : 最初



B : 途中



C : 終了

図 11 アームカールの運動過程ごとのフィードバック情報

表 2 ボタン機能

Start	撮影開始
Stop	撮影停止
Count	トレーニング回数表示
Reset	トレーニング回数リセット
Exit	システム終了



## 4.2. 運動過程の検出評価

まず、運動過程に応じた正しいフィードバック情報が提示されているか評価した。評価は、1～4の4段階で、主観的評価によって著者本人が行う。評価基準は、4は「提示される」、3は「ほとんど提示されるが一部問題あり」2は「ほとんど提示されない」、1は「提示されない」とする。結果を表3に示す。

表3 運動過程の検出結果

被験者	A	B	C	D	E
サイドレイズ	4	4	3	4	4
アームカール	3	4	4	4	4

運動過程に応じたフィードバック情報を概ね正しく提示することができていた。しかし、被験者によっては、フィードバック情報が提示されにくい姿勢が存在した。被験者Aはアームカールの終了の姿勢、被験者Cはサイドレイズの途中の姿勢で問題が生じた。ユーザの体格の違いや運動のスピードの速さが原因と考える。

### 4.3. アンケート調査

次に、システムを使用した被験者に、本研究で提案した機能がトレーニングを正しく行うことに役立つかアンケート調査を行った。アンケートの項目を以下に示す。

- ① 運動過程をフィードバックする機能はトレーニングに役立つか
- ② 正しくないフォームを指摘するフィードバックは役立つか
- ③ カウント機能は役立つか

アンケートは1～4の4段階で評価する。評価基準は、4は「役立つ」、3は「ある程度役立つ」、2は「あまり役立たない」、1は「役立たない」とする。結果を表4に示す。

表4 アンケート結果

被験者	A	B	C	D	E
項目①	4	4	4	3	4
項目②	3	3	4	4	4
項目③	4	3	3	4	3

結果から、提案した機能は全体的にトレーニング支援として役立つという評価が得られた。項目①に関して被験者からは、「フィードバック情報が提示されるように運動を行うので、初心者には正しい

フォームが体に染みつくので役立つと思う。」といった意見が得られた。フィードバック情報が提示されるということは、運動過程に従っているので、正しいフォームでトレーニングを行えていると考えられる。また、アンケート項目以外の意見として、「運動のスピードに関するフィードバックが欲しい」、「運動過程を検出したら文字を表示するだけでなく音声も流して欲しい」といった意見があった。

## 5. おわりに

本研究では、筋力トレーニング支援システムとして運動過程をフィードバックするシステムを提案した。実験の結果からトレーニング動作に応じたフィードバック情報を概ね正しく提示することができた。また、アンケート結果からフィードバックがトレーニングを正しく行うことに役立つという結果が得られた。

本研究では、トレーニングサンプルとなる画像を使って運動過程を検出するので、カメラの角度や撮影する人物の向きに制限があるという問題がある。その問題を解決することが今後の課題となる。

アンケート結果では、被験者から運動のスピードに関する機能と音声機能を付けて欲しいといった意見があった。それらを実現することでよりトレーニング支援に役立つシステムを提案できると考える。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、指導教員である棕木雅之教授には、お忙しい中適切なお指導とアドバイスをしていただき大変感謝しております。また、棕木研究室の皆様にも、研究に対するアドバイスや実験の被験者など、様々な面で協力していただいたことを感謝いたします。

## 参考文献

[1][https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000373.000001915.html](https://prt看mes.jp/main/html/rd/p/000000373.000001915.html)

【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】

[2]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”, 情報処理学会第77回全国大会, (2015)

[3]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”, 情報処理学会第78回全国大会, (2016)

[4]綿谷淳史, “カメラ画像を用いた体幹トレーニングの姿勢推定手法の提案”, JAIST Repository, (2019)

[5]<https://github.com/tensorflow/tfjs-models/tree/master/posenet>

[6]<https://github.com/rwightman/posenet-python>

[7]坂詰真二, “坂詰式正しい「筋トレ」の教科書”, カンゼン出版, (2016)