

# MR と筋電位センサを組み合わせた筋力トレーニング効果のリアルタイムセルフモニタリングシステム

大塚勇人<sup>†1</sup> 西垣一馬<sup>†2</sup> 酒井元気<sup>†3</sup> 岩井将行<sup>†1</sup>

**概要:** 本稿では MRHMD である Hololens を用いて筋力トレーニングのビジュアルフィードバックを行うことを提案する。筋力トレーニングのフィードバックを行う研究や製品が既存では様々登場しているが、第三者の助けを得ずに筋力トレーニングのリアルタイムフィードバックを行うことは難しかった。本提案システムは、トレーニングを行う初心者の人がみずから容易に装着でき、安全に筋力トレーニングのリアルタイムフィードバックを行うことで、筋出力が向上する可能性をしめした。また、トレーニングの種目に応じて大きく結果が変わることが判明した。

## 1. はじめに

近年、健康志向の高まりや 2020 年に開催される東京オリンピックが追い風となり、筋力トレーニングやエクササイズを目的としたスポーツジムの会員数は 330 万人を超え、3 年連続で前年を上回った[1]。

筋力トレーニング（以下トレーニング）では無計画にトレーニングするのではなく、鍛えたい部位を意識してトレーニングすることにより漫然とトレーニングをするより効果が上がるとされている[2]。

しかし、トレーニングに初心者の人(以下トレーニング初心者と呼ぶ)にとっては、特定の筋肉の部位を明確に意識しながらのトレーニングは適切なアドバイスが無い場合はイメージが出来ず、特定の部位を十分に意識して鍛えられているかを自己の感覚のみで確認することは困難である。

従来より、運動やトレーニング支援の研究は継続して行われており、特に嵯峨らは運動を支援する際は主体的に運動を行わせる必要があると述べている[3]。

そこで、梶本らは運動後に触覚フィードバックを与えることで主体的にトレーニング研究を行っており、そこでは第三者を介入させずトレーニングのセルフモニタリングが行なっている。一方で、この研究は触覚フィードバックを行ってしまうことで、トレーニングの達成度を未達成状態で十分と誤認してしまう為、かえってトレーニング効率が低下してしまうという弊害も内包する[4]。

現在様々なトレーニング支援の研究や製品が存在するが、多くはリアルタイムでフィードバックが被験者のセンサデータをスマートフォンに対して出力し、トレーニングジムでパーソナルトレーナなどの第三者がその画面を見て指示を行わせる試み[5]や、トレーニング後に筋電位を確認する製品[6]などが存在する。これらは、フィードバックを行う為に第三者が必要であり、フィードバックがリアルタイム

ではないといった制約が存在し、第三者の助けを得ずに筋力トレーニングのリアルタイムフィードバックを行うことは難しかった。そこで、本研究では、負荷を掛ける筋肉部位及びその負荷レベルに対しリアルタイムビジュアルフィードバックを行い、独力でもトレーニング効率が向上するシステムを提案する。

## 2. 提案手法について

透過型の HMD と筋電位センサ、PC を用い、主に Hololens のアプリケーションの作成を行った。

### 2.1 システム構成と手順

トレーニングを行う際は、様々なトレーニング装置に移動することや、常にスマートフォン等を見える置き場所が確保できない問題がトレーニングジムでは多いと想像できる。その為、本稿で提案する手法は、頭に装着するだけで体勢の変化や移動に対応して、目の前に透過的に情報を継続的にフィードバックできるヘッドマウントディスプレイ(HMD)を用いることで解決する。さらに HMD の中でも視野を狭めない透過型の HMD である Microsoft Hololens（以下 Hololens）を用いて複合現実（Mixed Reality : MR）によるビジュアルフィードバックを行うことで高重量のウェイトを扱うトレーニングでは危険を回避し、視野を妨げない安全かつ快適にフィードバックを行う。

本研究では小型無線多機能センサ(ATR-Promotions 社製、TSND151)に生体信号計測用アンプ(AMP-151)を接続し、筋電位を測定する。以下これらの構成を筋電位センサと呼ぶ。生体信号計測用アンプのサンプリング周波数は生体計測に十分な 1000Hz、増倍率を 1000 倍で記録する。ビジュアルフィードバックを行う為に、MRHMD(Mixed Reality Head Mound Display)である Microsoft Hololens を用いた。また、小型無線多機能センサと Hololens の命令やデータを送受信の仲介をするソフトウェア(ATR-Promotions 社製、SensorSever)を中継 PC (Microsoft 社製、Surface Pro2)に入れて用いた。

システム構成図（図 1）と行われる手順は以下に述べる。

<sup>†1</sup> 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科

<sup>†2</sup> 東京電機大学 情報環境学部 情報環境学科

<sup>†3</sup> 東京電機大学 システムデザイン工学部 情報システム工学科

①Hololens のアプリケーションから、データを送るように指示する旨を TCP 通信にて中継 PC に送信。

②中継 PC は SensorServer という専用ソフトを用いて、指示を筋電位センサへ Bluetooth で送る。その間、筋電位センサは内蔵ストレージへ筋電位データを保存する。

③筋電位センサは命令を受け取り、データを BT で中継 PC に送信。

④中継 PC は SensorServer 経由で、センサデータを受け取り、そのデータを TCP で Hololens に送る。

⑤送られたデータを元に Hololens 側のアプリケーションで描画を行う。

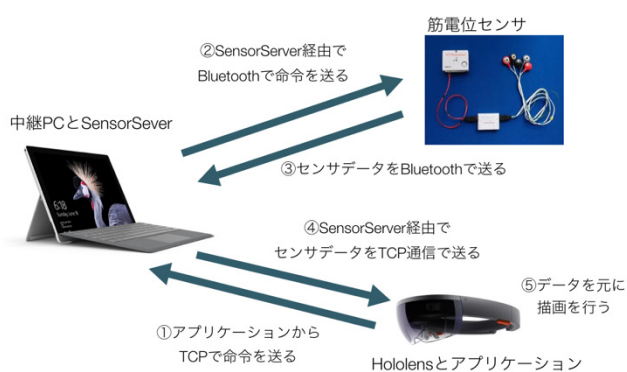


図 1 システム構成図

## 2.2 ビジュアルフィードバックのソフトウェア

ソフトウェアはUnityを用いてHololens用のオリジナルアプリケーションを開発した。

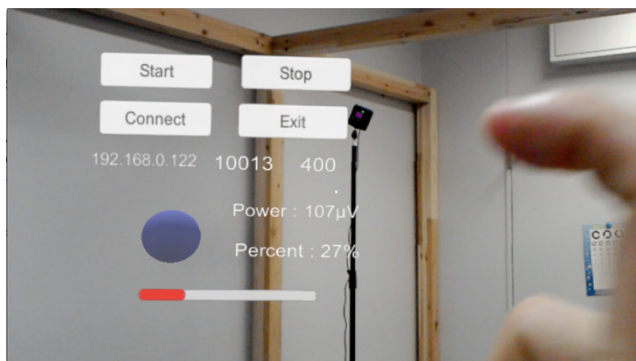


図 2 ソフトウェアのスクリーンショット

リアルタイムビジュアルフィードバックのソフトウェアはUnityを用いてHololens用のオリジナルアプリケーションを開発した(図2)。ビジュアルフィードバックは画面中央から下にかけて行われており、球体の大きさ、球体の色、棒グラフ、数値の4種類で行っている。それぞれ、筋出力が大きくなればなるほど球体が大きくなり、球体の色が白から赤に変わり、棒グラフの赤いゲージが右に動き、筋出力の値がテキストとして表示される。センサデータはこのソフトウェアに送られてきた段階で10~500Hzのバンドパスフィルタをかけた上で、フィードバックする上でデータ

の変動値を滑らかにする目的で過去5回分の移動平均フィルタを掛けている。

## 3. 実験

本実験では、何もフィードバックを行わない場合、提案システムによるビジュアルフィードバックを行う場合、提案システムを体験した後に再度フィードバックを行わない場合の3トライアルを3種類のトレーニングで合計9回行った。3トライアルを行う目的として、何もフィードバックを行わない場合と提案システムによるフィードバックを行う場合で筋出力が向上するかという点を検証する。また、1回目の何もフィードバックを行わない場合と提案システム体験後である2回目の何もフィードバックを行わない場合では筋出力に差が生まれるかという点を検証する為に行う。さらに、提案システムの利便性、筋電位センサやHololensを装着することによりトレーニングの妨害有無という点においても検証を行った。

### 3.1 実験被験者

実験の被験者は20~21歳の男性4人で、トレーニングの頻度は週1~2回1名、月1~2回1名、それ以下の頻度2名といった構成である。トレーニングや運動経験により、結果に差が出ると考えられるので、トレーニングの経験が豊富な者から運動を積極的に行っていない者までできるだけ偏りなく選定した。今回の実験では被験者に実験内容を説明し、ビデオカメラで撮られることと、腕立て伏せの場合の腕と背筋を筋電位センサで測定する際はノイズの混入を防ぐ為、脱衣して頂くこと、実験データ確認後に撮影ビデオは破棄することに関して同意を得た。それとは別に予備実験として、23歳の男性1名にビデオカメラに撮らずに実験を行い、アンケート調査に回答した。

### 3.2 実験内容

本実験ではダンベルカール、腕立て伏せ、背筋のトレーニングの3種類のトレーニングで、それぞれ筋電位センサは装着した状態で、提案システム装着前、提案システム装着、提案システム装着後の3トライアルを行い、1人当たり合計9パターン測定した。本実験の最中は常にビデオカメラで撮影し、何か感じたことなどあれば実験中常に発言可能であることを伝えている。また、実験後にアンケートにその場で回答してもらった。

### 3.3 実験手続き

実験の手続きに関しては、被験者操作修得フェーズ、被験者センサ装着確認フェーズ、1回目測定フェーズ、提案システム練習&2回目測定フェーズ、3回目測定フェーズに分けて説明を行う。実際の手順としては、被験者操作修得フェーズを行った後、被験者センサ装着確認フェーズから3回目実験フェーズをダンベルカール、腕立て伏せ、背筋運動の順番でそれぞれ行った。実験の様子は下記の図(図3)の様な状況で行っている。

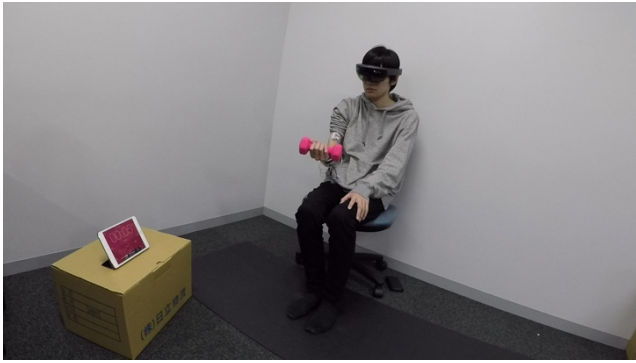


図 3 実験の様子

#### 【被験者操作修得フェーズ】

まず、被験者 Hololens の装置が不慣れであると想定し、Hololens にプリセットインストールされている操作チュートリアルアプリケーションである“Learn Gesture”を用いて、Hololens の操作方法について修得してもらった。その後、Hololens の AirTap と呼ばれる画面をタップする動作を修得できたか尋ね、その動作が苦手な被験者にはボタンを押すだけで AirTap の動作が簡易的に行えるクリッカーと呼ばれるデバイスを貸し出し、それを使って以後の Hololens の操作を行ってもらった。その後は、ダンベルカールを行う前に 2kg, 3kg, 4kg の用意したダンベルの中で、1 回 10 秒で 5 回 1 セットを 3 トライアル行える程度の重さという基準を示し、ダンベルの重さを被験者自ら選ばせた。

#### 【被験者センサ装着確認フェーズ】

最初にアルコール含んだコットンで測定部位を入念に拭くことで筋電位センサにノイズが混入しないように前処理を施し、筋電位センサをダンベルカールは上腕二頭筋、腕立て伏せは大胸筋、背筋は広背筋に貼り付けた。装着時に筋電位センサから伸びるケーブルはサージカルテープで固定し、ダンベルカール時は手首にマジックテープで筋電位センサを固定し、腕立て伏せ時と背筋運動時はポケットに筋電位センサを入れることで、センサが動き回ることによるノイズ混入やトレーニングの邪魔にならない様に配慮した。その後、それぞれのトレーニングをウォーミングアップとして行う様に指示した。実験管理者はその間に中継 PC でウォーミングアップで行っているトレーニングの筋電位をグラフの波形で確認し、現時点で到達している筋電位の値を目安にビジュアルフィードバックするときの目標となる数値（以下目標値）を記録した。この時、グラフの波形の変動幅が明らかに少ない場合は筋電位センサを再度貼り付けなおし、正しい筋電位の取得の有無を確認してから 1 回目測定フェーズに入った。また、トレーニングを行う場所としては、ダンベルカールは椅子に座った状態で、腕立て伏せと背筋運動は床にマットを敷いた上でトレーニングを行った。

#### 【1 回目測定フェーズ（基礎データ取得）】

提案システムを装着する前に基礎データ取得のため 1 回目の測定を行った。ダンベルカールと腕立て伏せは 5 秒で上げて、5 秒で下げる 1 セット 10 秒のペースで行わせ、背筋運動は 2 秒で上げて 2 秒で下げ、5 秒の休憩時間の 1 セット 9 秒を設定した。また、被験者には iPad に表示されているインターバルタイマーを見ながら、負荷のかかる部位を意識してトレーニングを行う様に指示し、トレーニングのフォームなどについての指示は行わなかった。それぞれのフェーズの間には使用した筋肉を休ませる目的で 4 分間の休憩時間を設けた。

#### 【提案システム練習&2 回目測定フェーズ（ビジュアルフィードバック有りでの測定）】

提案手法を装着して本システムの練習と、リアルタイムでフィードバックされる自分自身の筋電位を見ながらどのように筋肉が動いているかの確認を兼ねて、被験者が満足するまで行ってもらった。休憩を挟んだ後、Hololens を装着して 2 回目の測定を行った。提案システムのプログラムと本実験の都合上、Hololens の画面を見ながら iPad に表示されるインターバルタイマーも見て貰った。

#### 【3 回目実験フェーズ（ビジュアルフィードバック後の測定）】

提案システムを体験後に 1 回目と同じ条件で実験を行うことで、1 回目の実験と何か違いがあるのではないかと仮定し、提案システム装着後の 3 回目の実験として 1 回目と同じ条件で実験を行った。

上記の手順が終わったら筋電位センサを全て外し、新しい箇所に筋電位センサを装着し直して再度計測を行った。全ての種目が終わったら実験後調査として、その場でアンケートに回答してもらった。

被験者の休憩時間は毎回 4 分の予定であったが、機材トラブルやデータバックアップ作業が発生した場合には最大 10 分程度の休憩時間とした。

## 4. 評価結果・考察

実験結果に関して、筋電位の比較による定量的な評価とアンケートによる主観評価、実験中に寄せられた意見や感想について結果を記述し、分析する。

### 4.1 実験結果

実験結果の解析は、実験の測定中に筋電位センサの内部ストレージに保存したデータを用いて行う。これらの実験データの解析は、この参考文献[7]を元に 5~300Hz のバンドパスフィルタを掛けている。解筋電位を定量的に評価する為に、それぞれの実験で得られた筋電位をダンベルカール、腕立て伏せで 1 セット 10 秒の間の 6 秒間、背筋運動では 1 セット 4 秒の間の 3 秒間を積分筋電(Integrated Electromyogram: IEMG) をそれぞれ 5 セット分求めた。それらのデータを 1 秒単位の情報に正規化する為に、ダンベルカールと腕立て伏せは IEMG を 6 で除し、背筋運動では

IEMG を 3 で除した。そして、1 回目と 2 回目、1 回目と 3 回目の結果を比較し、それぞれに t 検定を用いて、統計的に優位であるかを検証した。各計測の IEMG の平均値と、それらの数値に t 検定を行った結果が以下の表（表 1, 2）である。また、全ての測定したデータの IEMG の分布を図 4 に示す。この図の横軸は、1 セットのデータである。表 2 の見方として、p 値の欄が黄色く塗りつぶされているセルは、p 値が有意水準 5% 以下になっており、平均の差がプラス（緑の塗りつぶし）であれば統計的に優位、平均の差がマイナス（赤の塗りつぶし）であれば統計的に劣位であることを示している。

|     | ダンベルカール    |            |            | 腕立て伏せ      |            |            | 背筋         |            |            |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|     | 1回目        | 2回目        | 3回目        | 1回目        | 2回目        | 3回目        | 1回目        | 2回目        | 3回目        |
| 1人目 | 2146026.46 | 1418983.59 | 1770929.98 | 1965344.70 | 2104161.75 | 2578560.87 | 1513648.07 | 678186.42  | 1438404.03 |
| 2人目 | 2241662.72 | 2906162.50 | 2585956.50 | 1289025.84 | 1225454.31 | 1604681.09 | 723328.63  | 859138.17  | 545517.23  |
| 3人目 | 3907252.84 | 3064814.48 | 3146190.53 | 2411673.67 | 2596913.00 | 2859140.11 | 999616.94  | 1048794.69 | 956559.84  |
| 4人目 | 2855639.49 | 2768024.55 | 2613162.91 | 1959687.82 | 2406960.99 | 3013506.75 | 935181.03  | 1181105.06 | 1005628.82 |

※黒色は (n-1) を表す

表 1 実験結果 IEMG 平均値一覧

| t検定  | ダンベルカール       |            | 腕立て伏せ     |            | 背筋         |            |
|------|---------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
|      | 1回目と2回目       | 1回目と3回目    | 1回目と2回目   | 1回目と3回目    | 1回目と2回目    | 1回目と3回目    |
| 1人目  | p値<br>0.00081 | 0.063      | 0.18      | 0.00076    | 0.062      | 0.34       |
| 平均の差 | -727042.87    | -375096.48 | 138817.05 | 613216.17  | -635461.64 | -75244.04  |
| 2人目  | p値<br>0.033   | 0.056      | 0.30      | 0.016      | 0.21       | 0.13       |
| 平均の差 | 664499.78     | 344293.79  | -63571.54 | 315655.25  | 135809.54  | -177811.40 |
| 3人目  | p値<br>0.011   | 0.00090    | 0.19      | 0.079      | 0.30       | 0.40       |
| 平均の差 | -842438.36    | -761062.31 | 185139.33 | 447466.44  | 50177.75   | -40057.10  |
| 4人目  | p値<br>0.26    | 0.053      | 0.0081    | 0.0014     | 0.012      | 0.31       |
| 平均の差 | -87604.94     | -242476.58 | 447273.17 | 1053818.93 | 245924.02  | 70647.79   |

表 2 実験結果 t 検定一覧

実験の主な結果としては、腕立て伏せは 4 人中 3 人が 1 回目よりも 3 回目の計測の方が優位に筋出力が向上しており、4 人中 1 人が 1 回目よりも 2 回目の計測の方が優位に筋出力が向上している。しかし、ダンベルカールに関しては 4 人中 3 人が 1 回目よりも 2 回目の測定の方が筋出力が減少している。

#### 4.2 実験の考察

ダンベルカールが優位でない可能性として、上腕二頭筋は胸筋や背筋に比べて意識して力を入れる機会が多く、特にビジュアルフィードバックなどの筋出力の可視化を行わなくとも、特定の筋を意識して力を入れることが容易であり、筋出力が向上しなかったと考えられる。減少した理由に関しては、ある被験者が「Hololens でのフィードバック自体は悪くないが、画面を見ることに集中してしまうと筋肉に意識を寄せることを忘れてしまう」と述べていたので、動かし慣れている筋肉に提案手法を用いてトレーニングすることは向かないと考えられる。また、胸筋は日常で使うことはあっても、意識して使うことが少ない筋肉だと考えられる為、トレーニング初心者には腕立て伏せにビジュアルフィードバックを行うと胸筋を意識するようになるが、上記の理由から 2 回目で提案手法の測定では大きな結果は出ず、ビジュアルフィードバックされた感覚を忘れないうちに 3 回目の実験を行えたことで、本提案システムが有効に働いたと考えられる。

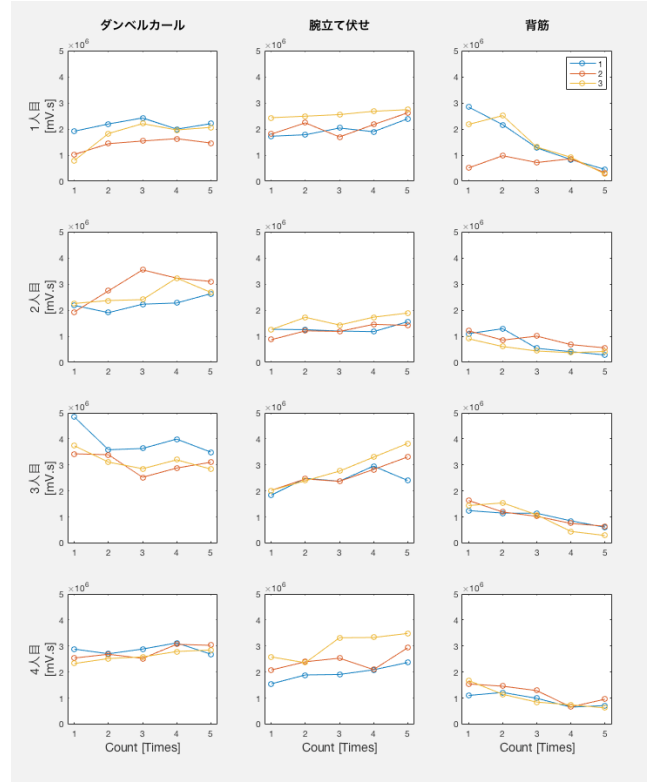


図 4 全 12 回の IEMG 遷移

#### 4.3 定性的評価のためのアンケート結果と考察

実験終了後に主観評価のアンケートを行った。アンケート項目は以下の A～G である。

- センサを装着した状態でのトレーニングは妨げとなるか。
- Hololens を装着した状態でトレーニングは妨げとなるか。
- 筋電位を可視化することでトレーニングの参考になるか。
- どのインジケータが見やすいか。
- 画面の閲覧頻度。
- 1 回目と 3 回目の実験で筋肉に対する意識は変わったか。

アンケート結果は以下に述べる。

- 筋電位センサを付けながらのトレーニングはトレーニングに妨げとならず、不快感も感じる人が少なく、実験中にも「やっている最中は目に意識がいくので、センサを付けてトレーニングすることに違和感はほとんどない」という意見があった。
- Hololens を装着してのトレーニングは妨げになると感じる方が多かった。
- 状態を可視化することで参考になるかという点に関しては、多くの人が参考になると回答した。
- インジケータの見やすさに関しては、球の大きさと球の色が見やすいと回答され、逆に棒グラフは一番

見づらいと結果が出た。これに関しては、「棒グラフが描画されている位置はウィンドウ中央辺りを見ると、Hololensの視野角の関係で見切れる位置にあるので、それが見づらい」ということを実験中に直接口に出す被験者が多かった。

- E. 画面の閲覧頻度は5人中4人が常に見ていたと回答した。残りの1人は「腕立て伏せの時に顔を下に向けると地面とHololensが近すぎて画面が見えなくなる」といった意見があったが、「腕立て伏せの時に下を向くと画面が床にめり込むので、画面が見やすくなる様にナナメ前を向いた」といった自己解決をした例もあり、腕立て伏せは下を向くよりも前を向いた方が良いフォームなので、教示をせずとも自然とフォームの改善に繋がることのできた例とも考えられる。
- F. 1回目と3回目の実験で筋肉に対しての意識に変化があったかという点で、5人中ダンベルカールと背筋運動で2人ずつ、腕立て伏せで1人、3回目の方がより筋肉を意識できたと回答した。しかし、腕立て伏せで1人、3回目より1回目の方の筋肉を意識したといった回答があり、その回答者は特に運動やトレーニングが苦手な被験者であり、腕立て伏せの実験中は「1回片側5秒の腕立て伏せが辛すぎて、早く解放されたかった」と述べていたので、3回目の実験では早くトレーニングを終えることに意識が向いており、筋肉に意識が向かなかった為だと考えられる。

#### 4.4 定性的評価のためのアンケートからの改善要望

この提案手法の評価された点は「自分がキツイと思うところが感覚だけでなく数値として見ることで、ちゃんと負荷がかかっているというのが、デバイスを装着していないときよりも意識できる点」や「行っているトレーニングで筋肉をどれほど使用しているかを視覚的に確認することが出来て、その後のトレーニングにも効果的に作用したと感じた」、「ダンベルを使ったトレーニングは自分自身すぐ飽きてしまうので、可視化されるデバイスを付けながらのトレーニングは飽きない」という意見が得られて、トレーニングの効率上昇だけではなく、モチベーション支援に繋がるという回答を得ることができた。

一方改善点として、アプリケーションのUIは、酔いが発生しないように、頭を動かした後に少し遅れてウィンドウが追従する仕様になっている。しかし、腕立て伏せや背筋運動など頭が動く様なトレーニングは、上記の仕様により「頭の位置を変わっても即座にウィンドウの位置が変わらないので、表示画面が見づらい」という意見が多かった。しかし、HMDの特性として、リアルタイムにウィンドウが追従すると、酔いを生む恐れがあるので、酔わない程度に追従するウィンドウは、より細かな修正が必要であると考え。また、UIの表示内容の改善点として、「トレーニングを行っている時はスタートボタンなどが邪魔であり、

数値の表示だけが見えるといいと思った」という意見が得られ、その他では「Hololensの画面を見ながら、トレーニングのタイマーをiPadで見ていたので、同時に2つの画面をみることがやりづらかった」といった意見も得られた。

## 5 おわりに

本稿ではHMDの中でも視野を狭めない透過型のHMDであるMicrosoft Hololensを用いて複合現実による筋電位センサのビジュアルフィードバックを行うことで高重量のウエイトを扱うトレーニングでは危険を回避し、視野を妨げない快適なトレーニングの情報提示環境を実現した。

今回は3種類のトレーニング種目で測定したが、測定する部位により効果の差が大きいことが判明したので、今後は下半身の筋肉などより様々な筋肉の部位での検証を行いたいとも考える。1トライアルのトレーニングの1セットあたりの時間や1トライアルに行うセット数に応じて結果が変わる可能性があるため、もう一度実験を行う際はトレーニングに不慣れな人でも無理のない範囲のレベルで行いたいと考える。

また、大下らは、写真でトレーニング初心者トレーニングのフォームを教示しても間違った部位に負荷がかかっていると勘違いすることが分かっているため[8]、本提案システムも用いてどこの筋肉にどのように負荷がかかっているのかをビジュアルフィードバックをしながらトレーニングのフォームを教示することで、簡易的なトレーニングのフォームの教示でもトレーニング初心者により正確に教示することができる様になると考えられる。

## 参考文献

- [1] “帝国データバンク”.  
<https://www.tdb.co.jp/report/watching/press/p180906.html>, (参照 2018-12-25).
- [2] 幸田利敬. 筋力トレーニングについて. 日本運動生理学会, Vol.9, pp.131-138, 1994.
- [3] 嵯峨, 川上, 館. 力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.3, 2005.
- [4] 栗原洋輔, 國安裕生, 蜂須拓, 佐藤未知, 福岡政期, 梶本裕之. 腕立て伏せ時の「カチカチ感」付与による運動感覚の拡張. エンタテインメントコンピューティング 2011, 2011.09.07-1.
- [5] “GUNZE”.  
<http://www.gunze.co.jp/corporate/news/2017/09/20170925002.html>, (参照 2018-12-25).
- [6] “Athos”. <https://www.liveathos.com/athletes/>, (参照 2018-12-25).
- [7] 小野弓絵. MATLABで学ぶ生体信号処理. コロナ社, 2018, pp.82-95.
- [8] 大下和茂, 萩原悟一, 門間貴史, 津野天兵, 小泉和史, 大山泰史, 山口恭平, 田代智紀, 船津京太郎, 有吉晃平. 実施経験のない筋力トレーニングの写真提示による鍛錬部位認識について: バックスクワットを例とした調査. 体力科学, Vol.65, pp.421-429, 2016.