

筋活動可視化によるローイング動作教育サービスシステムの開発

○柳井香史朗（東京大学） 中川純希（東京大学） Qi An（東京大学）
温文（東京大学） 山川博司（東京大学） 山下淳（東京大学） 浅間一（東京大学）

1. 序論

スポーツ競技におけるパフォーマンスとは、ある動作を行った際に生まれる成果とされている。例えば、陸上競技の短距離走におけるタイムや野球におけるバッターの打撃成績などがその競技のパフォーマンスにあたる。パフォーマンスの良し悪しは、試合の勝ち負けに直結するため、競技者はパフォーマンスの向上に励む。パフォーマンスを左右する要因のひとつとして運動の技能がある。技能とは、高いパフォーマンスを発揮する熟練者が持つ特徴的な身体の使い方である。動作のフォームや筋肉の使い方などにおける正確性、タイミング、スピードが技能の要素となる。多くの競技において、熟練者は技能を修得していることが過去の研究により解明されている [1][2]。

スポーツ競技における初心者は、パフォーマンスを向上させるために技能教育を受けることにより、熟練者の技能を学習・習熟させる。多くの場合、技能教育は、熟練者のもつ技能の抽出と抽出された技能の初心者への教示からなる。

技能は指導者により教示されることが多い。指導者により技能の教示が行われる場合、指導者は言葉や自分の身体を使った手本を見せることにより、技能である動作の特徴を初心者に伝えることで、習熟を促す。

しかし、筋肉の使い方における技能に関してはこのような方法で初心者に理解させることが難しい。なぜなら、動作のフォームやスピードなどは指導者、初心者ともに視覚的に確認できるため、指導することは容易であるが、動作中の筋活動に関しては、外見から確認することができないためである。指導者にとっては、初心者の筋活動を確認できないと効果的なアドバイスが行うことが難しく、初心者の習熟度合いも確認することができない。また初心者にとっても、指導者の筋活動に関するアドバイスを理解できなかつたり、また自分が今筋肉を使っているのか、いないのかといった感覚的な判断を行えず、習熟させることができないといった問題が発生する。筋肉の使い方に関する技能としては、使用する筋肉の部位、タイミング、強さなどがあげられる。多くの教育現場では、「そのタイミングではその筋肉をもっと使うべきだ」、「この筋肉は、リラックスしたほうがよい」といったアドバイスが行われ、パフォーマンスの向上のために技能としての筋肉の使い方が重要視されている。そのため、初心者に容易に筋肉の使い方を理解させる手法が求められている。

この問題を解決するために過去の研究では、筋活動の様子を筋電信号としてセンシングし、その情報を可視化することにより、筋活動の技能の指導を行う手法が提案されている。横田らは、野球の投球動作において動作の最適化シミュレーションにより作成された教師信

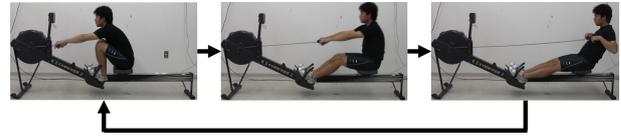


図1 ローイング動作

号となる筋活動の波形を提示することによるトレーニング法を提案した [3]。しかし、この手法では学習者は波形のみを見るため実際のよいとされる動作がイメージしにくい。そこで、本研究では、実際の動作をイメージしながら筋活動を視覚的に理解できることが重要と考え、映像を用いて、動作と同時に筋活動を視覚的に教示する筋活動の可視化手法を提案する。著者は先行研究においてスクワット動作における筋活動の可視化を行い、技能教育における有効性を示唆した [4]。

また、本研究では、筋活動の技能に関する教育の問題を抱えているボート競技におけるローイング動作のパフォーマンスの向上のために筋活動を教示する手法を提案する。

ローイング動作の基本は協調的な筋活動を要する動作であり、エルゴメータを用いてボート競技の体の使い方をトレーニングすることができる (図1)。ローイング動作では全身の筋肉を協調的に使い、負荷のかかったエルゴメータのハンドルを後方に引くことにより、エルゴメータに対して仕事を行う。そのときの仕事率がローイング動作のパフォーマンスとして扱われる。過去の研究においてローイング動作のパフォーマンスには下肢の使い方が大きく影響していることがわかっている [5]。しかし、熟練者と初心者の下肢の筋肉の使い方について述べた研究はない。そこで、本研究では、パフォーマンスの向上につながる下肢の筋肉の使い方を技能として抽出する。

本研究では、筋肉の使い方における技能教育の問題を解決し、パフォーマンスの向上のために動作中の筋活動を可視化することによる技能教育システムの提案を目的として行う。そのためにパフォーマンス向上につながる技能の抽出、技能の教示に用いる筋活動の可視化手法の提案、抽出した技能と提案した手法を用いた技能の教示を行う。

2. 技能の抽出

本研究では、動作の熟練者が行う特徴的な筋肉の使い方を動作の技能の1つとして取り扱う。動作の教育において指導者が初心者に筋肉の使い方を教える際、アドバイスを行う指導者が熟練者の筋肉の使い方をよく理解している必要がある。またアドバイスは、行っている動作のパフォーマンスの向上につながるようなも

のが求められる。そこで本研究では、熟練者の筋肉の使い方を初心者に教示するために、筋活動の計測により、初心者の手本となる熟練者の筋肉の使い方を技能として抽出する。初心者に熟練者の筋活動を教示するための技能の抽出のポイントを整理する。熟練者に対して

- どの筋肉を、
- どのタイミングで、
- どのくらい強く、

使用することにより、高いパフォーマンスを発揮しているのかに注目し、技能の抽出を行う。

このような熟練者の技能を抽出するために、動作計測を行う。筋電計を用いて、筋肉の表面筋電図を計測することにより、動作中の筋活動の様子を観察することができる。また、動作のデータは、モーションキャプチャにより計測する。これらにより計測したデータを解析に用いるには、データの正規化が必要である。次節でデータの正規化について述べる。

2.1 計測データの正規化

熟練者と初心者の両者において筋活動を計測することにより、その筋活動の比較を行うが、計測した表面筋電図の生データでは、計測条件や筋肉量、動作時間などによる個体差が発生するため、単純に比較を行うことができない。そこで計測したデータを処理することにより、異なる個体間での比較を可能にする。

表面筋電図は、電極の貼る位置や電極と皮膚の間の抵抗などの計測条件が異なると同じ人の同じ筋肉において同じ力を発揮させても、表面筋電図の大きさは変わってくる。また、筋線維の数や太さは個人差が大きいため、表面筋電位の大きさで、異なる個体間の比較を行うことができない。そこで異なる人同士で比較を行うために、それぞれの人の最大発揮筋力時の表面筋電位の大きさ MVC を用いて、筋活動の正規化を行う。時刻 i における筋電図の値を $EMG(i)$ 、正規化された筋活動データを $\%MVC(i)$ とすると正規化は式 (1) で表される。

$$\%MVC(i) = \frac{EMG(i)}{MVC} \times 100 \quad (1)$$

この処理を行うことにより異なる個体間での筋活動の比較を行うことができる。

次に動作時間の正規化について述べる。技能の抽出にあたり動作に対してどのタイミングで筋肉を使っているのかが重要である。そこで、動作に対して動作の進行度を定義し、進行度に対する筋活動データを比較することにより、動作のあるタイミングにおける筋活動の違いを検証することができる。動作の進行度を定義するにあたり、筋活動の比較を行いたい動作の始点と終点の決定を行う。ローイング動作では、ハンドルを後方へ引くことに力を要し、動作のパフォーマンスが決定するため、動作の解析区間は、始点 (0%) をハンドルの位置が最も前方に出た状態であるキャッチ姿勢とし、終点 (100%) を最も後方へ引ききった状態であるフィニッシュ姿勢とする。また動作の進行度の基準は、動作中絶えず動き続け、動作の出力として重要

な部分であるエルゴメータのハンドルの位置の移動量とする。ハンドル位置の始点時の位置から終点時の位置までの移動距離を 100% として動作の正規化を行う。

2.2 技能の評価方法

熟練者と初心者の筋肉の使い方の違いを定量的に評価するために、筋活動の評価指標の設定が必要である。筋肉の使い方において、評価するポイントとしては、動作に対して筋肉を使っているタイミングの違いと使っている強さである。計測した筋電図のデータを用いて、それぞれを定量的に評価し、熟練者と初心者の筋肉の使い方の違いを熟練者の持つ技能として抽出する。

まず、熟練者と初心者の筋肉を使うタイミングの違いを定量的に評価する指標について述べる。本研究では、2人の被験者の筋肉を使うタイミングの相違を表す指標として2人の被験者の筋活動の波形に対しての相互相関係数 r を使用する。相互相関係数 r とは対象とする2つの波形の類似度を表すものである。相互相関係数は-1から1の間の値をとり、1に近づくほど正の相関が高く、-1に近づくほど負の相関が高い、0のときは2つの波形は無相関となる。

相互相関係数 r は式 (2) で表される。

$$r = \frac{\sum_{i=0}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \sum_{i=0}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=0}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=0}^n x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=0}^n y_i)^2}} \quad (2)$$

ここで時刻 i における2人の被験者の筋活動を x_i 、 y_i とする。 n は正規化された動作の進行度 0% から 100% までの筋活動データの総数である。

筋活動の強さを評価するための指標として、筋活動における $\%MVC$ のピーク値 p を用いる。 p は動作の1ストロークの中での正規化された筋活動 $\%MVC$ の最大値を表す。このピーク値は、動作中に自分の最大発揮に対して、どのくらい強く筋肉を発揮させているかの目安となる。

2.3 技能の抽出実験

ローイング動作の筋活動に関する技能の抽出を行うために実験を行う。そのために、熟練者と初心者の動作計測を行う。その後、設定した評価指標を用いて、計測データの解析を行うことにより技能の抽出を行う。計測では、筋電計 (S&ME 社製, DL-141) により筋肉の表面筋電図のデータを取得し、モーションキャプチャ (Motion Analysis 社製, Hawk Digital RealTime system) により動作データを取得する。

被験者はボート競技経験のある熟練者 5 名 (22 ± 0 歳, 身長 1.75 ± 0.07 m, 体重 71 ± 6 kg, 競技歴 5 ± 3 年), 初心者 5 名 (19 ± 0 歳, 身長 1.74 ± 0.08 m, 体重 68 ± 10 kg, 競技歴 8 ± 1 ヶ月) である。

被験者にはローイングエルゴメータ (concept 社) においてそれぞれ 30 秒間、可能な限り全力でローイング動作を行ってもらい、動作中の筋活動とハンドルの軌道をそれぞれ筋電センサ、モーションキャプチャを用いて計測する。ハンドルの軌道を計測するために、エルゴメータのハンドル部に反射マーカを貼り付ける。ベストパフォーマンスを出してもらうために計測の前に 10 分間のウォーミングアップを行う。ローイング動作中の 1 分間あたりの何回ストロークするかという動

作のペースを表すストロークレートは 20 stroke/min に指定した。

被験筋は、Mazzone がローイング動作に必要な筋肉と指摘した筋肉のうちの下肢の筋肉とする。大殿筋 (Gluteus Maximus: GM), 大腿直筋 (Rectus Femoris: RF), 大腿二頭筋 (Biceps Femoris: BF), ヒラメ筋 (Soleus: Sol), 腓腹筋 (Gastrocnemius: Gas), 前脛骨筋 (Tibialis Anterior: TA) の 6ヶ所である [6]。人体におけるそれぞれの位置を図 2 に示す。

大殿筋 (GM) は股関節の屈曲位からの伸展, 大腿直筋 (RF) は膝関節の伸展, 大腿二頭筋 (BF) は股関節の伸展, ヒラメ筋 (Sol), 腓腹筋 (Gas) は足の底屈, 前脛骨筋 (TA) は足の背屈を行う筋肉である。

ローイング動作の動作計測後, 筋電図データの量的な正規化のため, 各筋の最大発揮時の筋活動の計測を行う。それぞれの筋肉における最大随意収縮させる際の姿勢は, Konrad の測定方法に従った [7]。計測データを量的正規化, 時間的正規化し, それぞれの被験者のデータの比較を行った。

熟練者と初心者のローイング動作のパフォーマンスであるエルゴメータにより計算された仕事率の計測結果を図 3 に示す。

この結果, 熟練者と初心者のパフォーマンスには有意な差があることが示された。この差がどこの筋肉のどのような使い方により生まれるのかを解析により抽出する。

被験者の筋活動を提案した評価指標によって定量的に解析を行う。熟練者群と初心者群の筋活動の平均ピーク値をグラフに示したものを図 4 に示す。赤いバーが熟練者群, 青いバーが初心者群の値である。縦軸は%MVCを表し, エラーバーは標準偏差を示している。単位は%である。左から大殿筋 (GM), 大腿直筋 (RF), 大

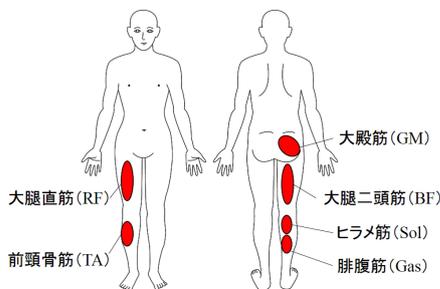


図 2 被験筋

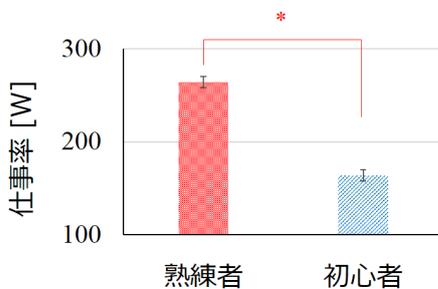


図 3 熟練者と初心者の仕事率

腿二頭筋 (BF), ヒラメ筋 (Sol), 腓腹筋 (Gas), 前脛骨筋 (TA) の値を熟練者群と初心者群の筋活動の平均ピーク値を示している。

検定の結果, 大腿直筋 (RF) と大腿二頭筋 (BF) の 2つの部位において熟練者群の値が初心者群の値より有意に高くなった。そのほかの筋肉では, 有意な差は見られなかった。熟練者は大腿直筋 (RF) と大腿二頭筋 (BF) の 2つの部位において, 動作中に強い出力を生み出しているという特徴があることが分かる。

次に筋肉を使うタイミングの違いについて評価するために, 筋活動の相互相関係数について述べる。熟練者同士の筋活動の相互相関係数と初心者同士の相互相関係数と熟練者と初心者の筋活動の相互相関係数の 3通りについて求める。熟練者同士, 初心者同士の筋活動の相互相関係数は, 熟練者同士全ての組み合わせについて求める。熟練者と初心者の筋活動の相互相関係数は, 熟練者と初心者の全ての組み合わせについて求める。図 5 にそれぞれの相互相関係数の比較を行ったグラフを示す。縦軸は相互相関係数を表す。横軸は左から大殿筋 (GM), 大腿直筋 (RF), 大腿二頭筋 (BF), ヒラメ筋 (Sol), 腓腹筋 (Gas), 前脛骨筋 (TA) の値を示し, 各筋肉において赤いバーは熟練者同士の相互相関係数の平均値, 青いバーは初心者同士の相互相関係数の平均値, 緑のバーは熟練者と初心者の相互相関係数の平均値を表し, エラーバーは標準偏差である。

大殿筋 (GM), 大腿二頭筋 (BF), ヒラメ筋 (Sol) において 3通りの相互相関係数は全て高くなった。大腿直筋 (RF) においては熟練者同士には, 正の相関があるが, 初心者同士, 熟練者と初心者にはほとんど相関は見られなかった。また, 腓腹筋 (Gas) と前脛骨筋

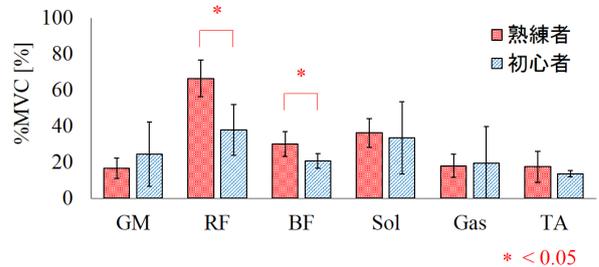


図 4 熟練者と初心者のピーク値

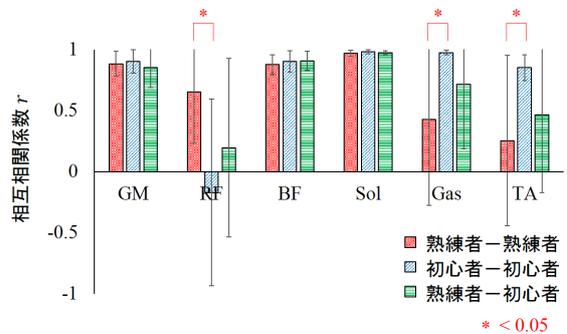


図 5 熟練者と初心者の相互相関係数

(TA)においては、初心者同士に強い相関があり、熟練者と初心者にも中程度の相関が存在した。相互相関係数が1に近づくということは筋活動のパターンがよく似ているということであり、ドライブ全体を通して筋肉を使うタイミングが似ていることを表す。-1に近づくにつれ比較した2つの筋活動は負の相関が強くなり、筋肉の使い方が異なることを表す。熟練者同士の相互相関係数が1に近く相関が強いということは、熟練者同士に共通する筋肉の活動パターン、筋肉の使い方が存在するというを表す。初心者同士の相互相関係数についても同様のことが言える。熟練者と初心者の相互相関係数が高いとき、熟練者と初心者は同じような筋肉の使い方をしていることが分かり、反対に低いときは、熟練者と初心者は筋肉の使い方に違いが存在することが分かる。

相互相関係数は筋肉を使うタイミングのみを評価するもので、大きさに依存しない。つまり、筋肉を使うタイミングが同じであれば、筋活動の発揮する大きさに関係なく相互相関係数は高くなる。大殿筋 (GM)、大腿二頭筋 (BF)、ヒラメ筋 (Sol) においては熟練度や体格などの個人差に関わらず、同じような使われ方がされるということを表している。腓腹筋 (Gas)、前脛骨筋 (TA) においても熟練者、初心者にある程度同じような筋活動のパターンがあることが分かった。大腿直筋 (RF) において熟練者同士の筋活動には、相関があることが分かった。これに対して熟練者と初心者には高い相関は見られず、また初心者同士でも相互相関係数は低くなった。これより、大腿直筋 (RF) の使うタイミングには、熟練者特有のパターンが存在するが、そのパターンは初心者とは共通していないことが分かる。図6に熟練者の大腿直筋 (RF) の代表的な筋活動パターンを示す。グラフの縦軸は%MVCで横軸は動作の進行度を表す。ドライブの始点から終点まで活動させている点と前半に筋活動のピークがある点に熟練者の特徴がある。解析の結果、熟練者と初心者の活動量の差が大きく、使うタイミングにも違いが存在する大腿直筋 (RF) の筋活動がローイング動作のパフォーマンスに大きく影響していると考え、熟練者の大腿直筋 (RF) の使い方を技能として初心者に教示を行う。

3. 筋活動の可視化

ローイング動作のパフォーマンスを向上させるためには、熟練者の筋肉の使い方を真似することが有効で

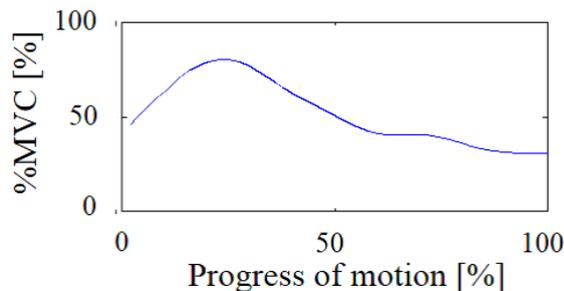


図6 熟練者の大腿直筋 (RF) の筋活動

ある。第2章において熟練者と初心者で筋肉を使うタイミングや強さに差があることを示した。しかし、熟練者の動作中の筋肉の使い方が初心者に理解できなければ、トレーニングの効果、効率の向上に役立てることができない。筋活動の様子を初心者に対して分かりやすく教示する方法が重要である。しかし、筋活動は見た目から確認することができないため、教えるのが難しいので、筋活動を感覚的にイメージできる手法が必要となる。そこで本研究では、筋活動を可視化することにより、見た目から筋活動をイメージすることができる手法の提案を行う。技能の向上のための筋活動の可視化の要求仕様としては以下の通りになる。

- どの筋肉を、
- どのタイミングで、
- どのくらい強く、

活動させているのかを示す。

本研究ではこれらの点を満たし、筋活動の様子を視覚的に表現する手法の提案を行う。これらの仕様を満たすには、パフォーマンスの向上に重要な筋肉の部位において、動作と筋活動が同時に理解でき、かつ筋活動の強弱を視覚的に理解できるようなシステムが求められる。

本研究では、パフォーマンスに重要な部位として、2章の技能抽出により抽出された部位の可視化を行う。この筋肉が活動しているかを動作の進行とともに明示するために、動作の実映像を用いて、実際の人体上の筋肉の位置に合わせて、棒状の仮想筋肉の描画を行う。仮想筋肉は、実映像の動作に合わせて、人体上の位置を常に追従し続ける。また、筋活動の強弱、タイミングを明示するために、仮想筋肉の色筋活動の強弱に合わせて変化する仕様とした。このような筋活動の可視化手法を実現するための手順を次節で述べる。

3.1 可視化の手順

本手法では、筋活動の可視化をモーションキャプチャ、表面筋電図、ビデオカメラを用いて実現する。モーションキャプチャにより動作中の身体位置の座標データを取得し、表面筋電図により筋活動のデータを取得し、カメラにより動作の実映像を取得する。仮想筋肉の描画は、モーションキャプチャにより人体における可視化する筋肉の位置情報を取得し、その情報を用いて実映像上に仮想筋肉を描画する。得られる位置情報は、実際の人体における可視化したい筋肉の上に2個のマーカーを貼ることにより、モーションキャプチャを用いて取得する。しかしこの際、モーションキャプチャ上の3次元座標の位置情報を実映像上の2次元座標の位置情報に変換する必要がある。そのために、動作計測とは別にカメラキャリブレーションを行って、モーションキャプチャ上の3次元座標の位置情報を実映像上の2次元座標の位置情報に変換するための変換行列を求める。また、筋活動は、可視化する筋肉の上に電極を貼り、表面筋電図により取得する。これにより得られた筋活動のデータは、基線合わせや整流化、平滑化した後、筋肉の最大出力した際の値である最大随意収縮時の筋電図の値 MVC により正規化を行い、%MVC に変換する。この正規化された筋活動の活動度 %MVC にあわせて仮想筋肉の色情報を決定する。このとき、仮想筋

肉の色情報は、RGBによって表されるため、 $\%MVC$ をRGB情報の各パラメータの値に変換する。これにより決定された色情報を描画された仮想筋肉に反映させる。仮想筋肉の色の変化のカラーチャートを図7。このとき色の変化の最大値は動作中の $\%MVC$ のピーク値 p とする。このような手順により、筋肉の活動度によって色が変化し、実際の人体の位置に合わせた仮想筋肉を実映像上に描画することができる。

3.2 熟練者の筋活動の可視化

図8に提案手法により大腿直筋(RF)の筋活動の可視化を行った熟練者(22歳,身長1.80m,体重80kg,競技歴4年)の映像を示す。熟練者の筋活動に合わせて、仮想筋肉の色が変化していることが分かる。

4. 技能の教示

本研究の目的は、ローイング動作における動作のパフォーマンスを向上させる教育システムの開発である。第2章では、パフォーマンスを向上させるために、熟練者の筋活動に注目し、その特徴的な筋肉の使い方の抽出を行った。第3章では、筋活動の可視化手法の提案を行い、本来眼で見ることができない筋活動を視覚的に確認できるようにした。しかし、動作を教育するためには筋活動の可視化という手法の提案だけでなく、手法を用いた教示方法まで提案することが必要である。教示方法においては、初心者に対して動作のパフォーマンス向上につながるような教育を行う必要がある。そのためには提案した筋活動の可視化手法の活用方法が重要となってくる。筋活動の可視化を用いて、誰の筋活動をどのように見せることで効果的な動作教育が行えるかを考える。本研究では、熟練者の筋活動を可視化することによる教示方法と初心者自身の筋活動を可視化する教示方法の2つを提案する。

4.1 熟練者の筋活動の可視化による教示

初心者は、運動のイメージを持つときに視覚的なイメージに頼ることが多い。しかし、通常外見から確認することができないため、筋活動に対して視覚的なイメージを持つことができない。そこで提案手法である筋活動の可視化により、熟練者の筋活動に対して視覚的なイメージを獲得することを目的として熟練動作の筋活動の可視化による教示を行う。可視化する筋肉の部位は第2章で抽出した技能とされる筋肉の部位とする。その部位の筋活動の変化により、パフォーマンスの向上が期待される。

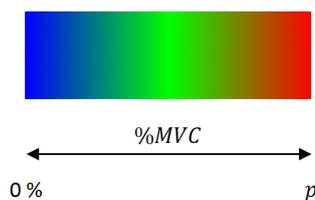


図7 筋活動の色の変化

4.2 筋活動のリアルタイムフィードバックによる教示

技能の熟練過程において、動作の視覚的なイメージを筋運動感覚的なイメージにつなげることが重要である。自分が今この筋肉を使っているのか、どれくらい強く使っているかを理解し、さらに筋活動を動作中にコントロールできるようになると常に自分の中でパフォーマンスと対比させながらフィードバックが行えるため、思い通りのパフォーマンスが出しやすくなる。熟練者の筋活動の可視化による教示では、視覚的によい動作を提示することはできるが、初心者自身の動作をフィードバックすることはできない。そこで、初心者自身の筋活動を可視化し、フィードバックを行うことにより、自分が今筋肉をどれくらい強く使っているかという感覚を養うことのできる教示システムを提案する。システムでは、フィードバックをリアルタイムで行う、つまり、常に自分の筋活動を見ながら動作を行うことによって、動作をとめることなく、毎回修正を加えて試行錯誤できるようになるため、技能の教育効果の向上が見込まれる。さらに、フィードバックする仮想筋肉の色の変化に熟練者の筋活動に対する達成度を反映させることにより、目標との差を認識することができるようになり、さらに技能の教育効果が向上する。

ここで熟練者の筋活動を反映させた仮想筋肉の色の変化のさせ方について述べる。第2章のローイング動作の技能の抽出において、ドライブの前半において大腿四頭筋を強く発揮するという筋活動の特徴を抽出した。今回はこのような強い筋肉の発揮を要求する類の技能教育に特化した教示方法を提案する。今回の場合、技能教育の目的を熟練者と同じ動作中の $\%MVC$ のピーク値 p まで筋肉を発揮することであると設定する。そこで、仮想筋肉のカラーチャートにおける最大の値を熟練者の動作中の筋活動における最大値として仮想筋肉の色の変化を定める。

このような変化にすると、目標値として熟練者の筋活動の可視化映像と同様の色に変化させるために試行錯誤を行うようになり、かつ自分の筋活動の強弱が認識できるようになる。このようなシステムを用いて技能の教示を行う。

提案するシステムのモデル図を図9に示す。動作者の前にモニターを設置し、自身の可視化映像を映す。

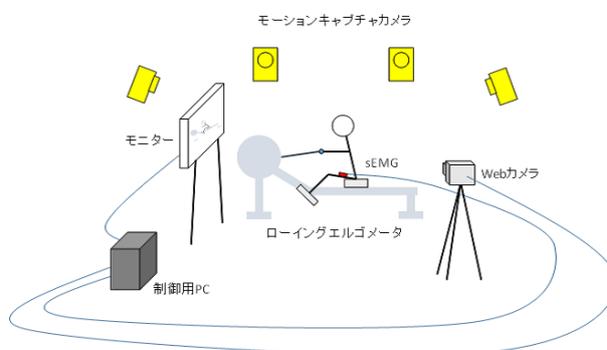


図9 リアルタイムフィードバックシステム

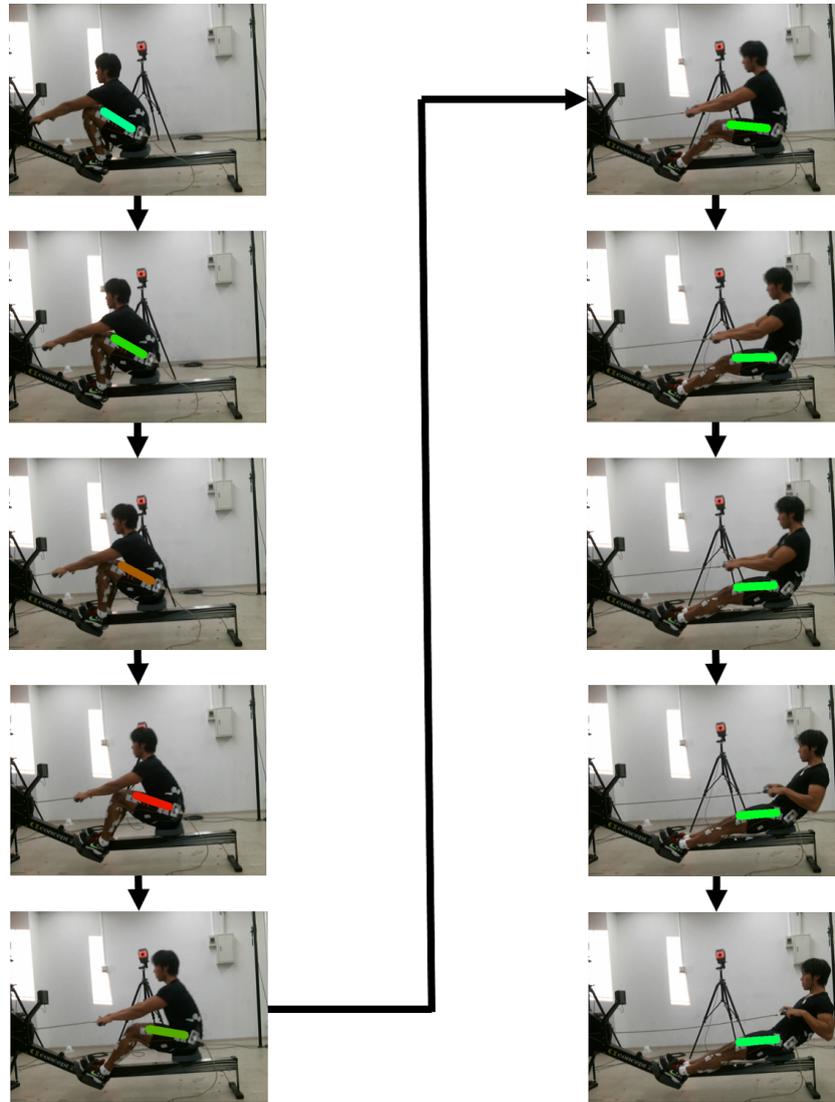


図8 筋活動の可視化

4.3 ローイング動作における技能教示実験

ローイング動作における技能教育について、言葉による教示、熟練者の筋活動可視化映像を用いた教示、オフラインでの初心者の筋活動可視化フィードバックによる教示、リアルタイムでの初心者の筋活動可視化フィードバックによる教示を行った結果の筋活動の変化を観察し、提案システムの教示効果の検証実験を行う。教える技能は第2章で抽出した熟練者の大腿直筋（RF）の使い方である。

本実験では、教育効果を検証する技能の教示方法を4種類提案した。1つ目の教示方法は、通常の競技のトレーニング現場で行われている言葉による教示である（教示A）。第3章で抽出した熟練者の大腿直筋（RF）の使い方を言葉で伝え、動作中に意識することを促した。

2つ目の教示方法は、熟練者の筋活動を可視化した映像による教示である（教示B）。熟練者の筋活動を視覚を通して伝えることにより、視覚的イメージを持つことによる技能の習得を目指す。ローイング動作の熟練者の筋活動を可視化した映像を初心者に見せ、熟

練者の筋活動を意識して真似するように指示を行った。

3つ目の教示方法は、オフラインで初心者の筋活動を可視化した映像をみせることによる教示である（教示C）。先の2つの教示では、熟練者の手本となる筋活動のイメージを持つことにより、技能の習熟を促したが、この教示法では、初心者自身の筋活動のフィードバックを行うことにより、自分の動作を確認した上で修正を行っていくことができる。1分間の動作を行った後、動作を停止して自分の筋活動の確認を行う。自分の筋活動が今どのようなになっているかを認識した上で再び熟練者の筋活動に近づけるように動作の修正を行ってもらった。このサイクルを5回行った。

4つ目の教示方法は、リアルタイムでの初心者自身の筋活動の可視化によるフィードバックである（教示D）。3つ目の教示方法では、一定時間動作を行い、動作を停止してからフィードバックを行ったが、この方法は動作中、常に初心者自身の筋活動をリアルタイムで可視化することにより、いままさに自分の筋活動がどうなっているかを知ることができる。これにより動

作中に1ストロークごとに修正することができるため、技能の習得速度が早まると考えられる。常に熟練者の筋活動を意識して動作の修正をしながら練習するように指示した。

実験結果として示された値は、それぞれ提案した指示方法による技能教育を行った結果、教育効果が反映された筋活動における定量的な評価、動作のパフォーマンスであると考えられる。それぞれ熟練者の言葉による指示、熟練者の筋活動の可視化映像の視聴による指示、オフラインでの初心者自身の筋活動の可視化によるフィードバックによる指示、リアルタイムでの初心者自身の筋活動の可視化によるフィードバックによる指示の教育効果を受けていると考えられる。しかし、全ての指示方法について連続して行っているため、それぞれの段階での結果は、それまでに行われた指示方法による教育の合計の結果であると考えられる。

ここで想定する技能の指示システムとして、リアルタイムでの初心者自身の筋活動の可視化フィードバックのみで教育するという事は考えておらず、言葉や熟練者の筋活動可視化映像の指示により、理想の筋活動のイメージを持った上で初心者自身の筋活動をリアルタイムフィードバックを行うシステムを想定している。そのため、今回の検証方法で連続して異なる種類の指示を行うことにより、前の指示方法による教育効果が残るのは問題ない。しかし、それぞれの指示後の筋活動、パフォーマンスの差を比較することによりそれぞれの指示方法による教育効果を検証できると考えられる。指示Aと指示Bの比較では、言葉だけによる指示を行ったときと言葉と熟練者の筋活動映像を見せることによる指示を行ったときの教育効果の差、つまり言葉に加えて、熟練者の映像を見せる意味があるのかどうかを検証できる。もし値が上昇した場合は、熟練者の可視化映像の視聴による指示は技能の教育に有効であるということが分かる。同様に指示Bと指示Cの比較では、初心者への自身の筋活動のフィードバックの有効性、さらに指示Cと指示Dの比較では、リアルタイムでフィードバックすることの有効性を検証できる。

実験では指示の後、5分間の練習を行い、その後30秒間の筋活動の計測を行う。その後、次の試行に疲労を残さないように5分間の休憩時間をとった。休憩後、次の指示方法により技能教育を行う。この流れを4つの指示方法について連続して行った。30秒間の筋活動計測では、ストロークレートを20 stroke/minに指定した。それぞれの指示方法による技能教育後の筋活動の比較を行い、教育効果の検証をした。筋活動を計測する部位は大腿直筋(RF)のみとする。

被験者は大学ボート部に所属する男性2名で競技歴1年未満の初心者である。2名の初心者をそれぞれ初心者A(19歳, 身長1.65m, 体重57kg, 競技歴9ヶ月), 初心者B(19歳, 身長1.68m, 体重62kg, 競技歴9ヶ月)とする。

図10に初心者の指示による筋活動のピーク値の推移、図11に初心者の指示による筋活動の熟練者との相互相関係数の推移、図12に動作のパフォーマンスである仕事率の推移を示す。グラフの縦軸は、図10では筋活動のピーク時の%MVCの値、図11では筋活動の可

視化を行った熟練者の筋活動と被験者である初心者の筋活動の相互相関係数、図12ではローイング動作のパフォーマンスである仕事率を示す。横軸は指示後の値を表し、左から指示前、指示A後、指示B後、指示C後、指示D後の値の順番で値が示されている。初心者A、初心者Bの両方で指示が進むごとに筋活動のピーク値は上昇した。特に指示Dを行うことにより、ピーク値は大きく上昇した。初心者Aは指示A後の相互相関係数は非常に低い値を示し、指示B、指示Cと進むにつれ相互相関係数は上昇したが、依然として低い値であることが分かる。指示Dを行った後、相互相関係数は大きく上昇し、高い値を示した。また、初心者Bは指示Aの後の筋活動から高い値であったが、指示B、指示Cと進むにつれ、上昇した。しかし、指示Dを行った後は、相互相関係数に変化はみられなかった。指示が進むごとに動作の仕事率は上昇していることが分かる。初心者Aでは、指示C、指示Dを行うことにより大きく仕事率が上昇した。初心者Bでは、指示A、指示B、指示Cによる仕事率の上昇は少ないが、指示Dにおいて、大きく上昇した。

指示Aの後の筋活動では、初心者Aは、熟練者の筋活動との相互相関係数において非常に低い値を示した。それに加え、筋活動のピーク値も低く、大腿直筋(RF)が使えていないことが分かる。初心者Bに関しては相互相関係数は比較的高く、熟練者に似たタイミングで筋活動が行われていることが分かる。しかし、初心者Aと同様、筋活動のピーク値が低く、大腿直筋(RF)から強い力を発揮できていないことが分かった。これに伴い、ローイング動作のパフォーマンスで

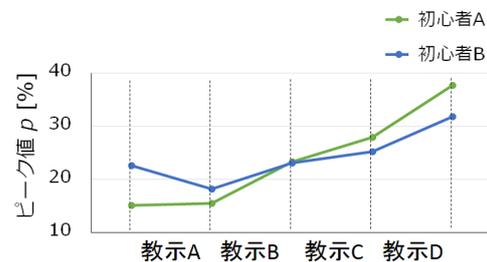


図10 ピーク値の変化

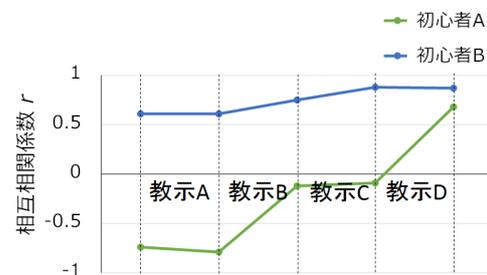


図11 相互相関係数の変化

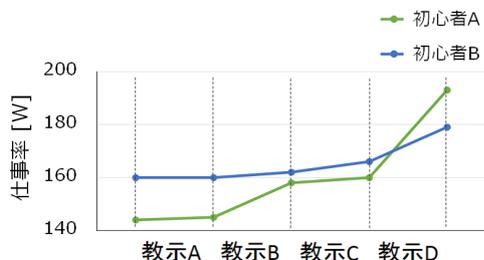


図 12 仕事率の変化

ある仕事率も低い値を示した。

指示 B を受けた後、初心者 A のピーク値の上昇が見られ、指示 A 後の筋活動では熟練者の筋活動と負の相関が強かったが、正の相関はないものの負の相関が弱くなった。筋活動の変化に伴い、仕事率の上昇がみられ、パフォーマンスは向上した。初心者 B においては、相互相関係数、ピーク値ともに少し上昇した。この結果、パフォーマンスはわずかに上昇した。これより、熟練者の筋活動の可視化映像をみて、筋活動の視覚的なイメージを持つことは、技能の習熟につながる可能性があることを示した。

指示 C を受けた後、初心者 A と初心者 B の筋活動にあまり変化がみられなかった。初心者 A の筋活動では、ピークの値は少し上昇したが、相変わらず熟練者の筋活動との相関はなく、前半と後半に同じくらいの強さのピークが存在している。相互相関係数にもほとんど変化はみられなかった。この結果、ほとんどパフォーマンスの向上も見られなかった。初心者 B についてもピーク値、相互相関係数ともにわずかに上昇し、その結果、パフォーマンスが少し向上した。この結果より、オフラインで初心者自身の筋活動をフィードバックする指示方法の教育効果は小さいと考えられる。オフラインでフィードバックを受けることにより、自分の筋活動が熟練者に比べてまだまだ弱いということは理解できるが、動作を止めて確認し、また動作を行うというサイクルでは、自分の今筋肉を使っているという感覚とどのくらい使っているのかという情報を照らし合わせるには時間があきすぎているため、有効なフィードバックが行えていないと考えられる。

指示 D を受けた後、特に初心者 A の筋活動に大きな変化がみられた。ピーク値の大きな上昇に加え、相互相関係数が大きく上がり、熟練者との正の相関が見られた。この結果、パフォーマンスも大きく向上し、30W の改善が見られた。また初心者 B についても相互相関係数に変化はなかったもののピーク値に上昇が見られ、パフォーマンスは 13W の改善が見られた。これはリアルタイムでの可視化フィードバックにより毎ストローク動きの修正することができたためであると思われる。この結果、リアルタイムでの筋活動の可視化フィードバックは筋活動に変化を与える技能教育に有効であるといえる。

指示実験の結果、熟練者の筋活動の可視化映像の視聴により、熟練者の筋活動を視覚的イメージを持つこ

とに加え、リアルタイムでの初心者自身の筋活動を可視化しフィードバックすることは、初心者の筋活動のピーク値、熟練者の筋活動との相互相関係数の上昇につながることがわかった。また、技能抽出実験により抽出された技能である熟練者の大腿直筋 (RF) の使い方を指示し、初心者の筋活動が熟練者の筋活動に近づいた結果、ローイング動作のパフォーマンスの向上がみられた。これより技能抽出実験により抽出した技能の妥当性も示されたといえることができる。

5. 結論

本研究では、ローイング動作のパフォーマンスの向上のための動作中の筋活動を可視化することによる技能教育システムの開発のために、技能の抽出、筋活動の可視化、技能の指示を行った。ローイング動作におけるパフォーマンスの向上させる技能として、熟練者の下肢の筋肉の使い方に注目し、熟練者の動作から技能の抽出を行った。技能教育における問題解決のための手法として筋活動の可視化手法を提案した。抽出した技能をもとに、提案した筋活動の可視化手法を用いた技能の指示方法を提案し、実際に初心者への指示を行った。この結果、提案した技能教育システムによって技能の向上、パフォーマンスの向上を期待できることが示唆された。

謝辞

本研究の一部は、JST RISTEX 問題解決型サービス科学研究開発プログラム、および JSPS 科研費新学術領域研究「脳内身体表現の変容機構の理解と制御」(課題番号 26120005)、特別研究員奨励費 24・8720 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 村田厚生, 岩瀬弘和: “投球のよい動作に関する考察-熟練群と非熟練群での投球動作の比較-”, 人間工学, Vol.36, No.6, pp.299-309, 2000.
- [2] 村山敏夫, 遠藤勇気, 木竜徹, 牛山幸彦: “スキー滑走を対象にした下肢筋活動に基づく運動スキルの定量的評価の提案”, 生体医工学 Vol.49, No.6, pp.911-917, 2011.
- [3] 横田紘季, 大島成通: “上肢筋骨格モデルシミュレーションにより導出された最適な筋活動信号を用いたサイバネティックトレーニング”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 805 pp. 3110-3121, 2013.
- [4] Koshiro Yanai, Qi An, Yuki Ishikawa, Junki Nakagawa, Wen Wen, Hiroshi Yamakawa, Atsushi Yamashita, Hajime Asama “Visualization of Muscle Activity during Squat Motion for Skill Education”, *Proceedings of the 2nd International Conference on Serviceology*, (2014), pp.86-90.
- [5] 毛利良嗣, 山本博男: “ローイングエルゴメーター作業における各種分解消費のエネルギー消費量及び作業量”, 日本体育学会大会号, NO.38A, pp.277 1987.
- [6] Mazzone T: “Kinesiology of the rowing stroke”, *NSCA Journal*, Vol.10, No.2, pp.4-11, 1988.
- [7] P Konrad: “The ABC of EMG”, Noraxon, 2006.