

ローイング動作におけるスキルの抽出と教示

柳井 香史朗^{*1}, Qi An^{*1}, 中川 純希^{*1}, 温 文^{*1}, 山川 博司^{*1}, 山下 淳^{*1},
浅間 一^{*1}

Extraction and Education of Skill during Rowing Motion

Koshiro YANAI^{*1}, Qi AN^{*1}, Junki NAKAGAWA^{*1}, Wen WEN^{*1},
Hiroshi YAMAKAWA^{*1}, Atsushi YAMASHITA^{*1} and Hajime ASAMA^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8654, Japan

In rowing motion, experts show high performance by using specific muscles which non-experts are unable to use. In skill education, it is important to extract expert's skill and how to show expert's muscle activity to beginner. For mastering rowing motion, it is important to practice not only rowing motion but also to strengthen muscles by training such as squat motion. In this study, we measured movements of experts and beginners with motion capture and surface electromyography, and extracted skill by analyzing motion during rowing motion. A method of visualizing extracted skills for skill education was proposed. At last, the experiment was carried out in order to verify effectiveness of the proposed method for skill education during squat motion. In the experiment, it was suggested that the proposal method was effective for physical skill education.

Key Words : rowing motion, skill extraction, skill education, electromyography, motion capture

1. 序 論

ローイング動作の基本は協調的な筋活動を要し、全身運動かつ有酸素運動であり、カロリー消費が高いという点からボート競技のトレーニングとしてだけではなく、フィットネス、リハビリテーション、ダイエットにおいても注目される運動である⁽¹⁾。ローイングエルゴメータはボート競技の身体の使い方を陸上で実現するためのマシンで、マシン上の可動式のシートに座り、マシンとチェーンでつながったハンドルを後方にひくことでローイング動作を実現する(図1)。

ローイング動作において、身体の使い方は重要であり、熟練者は非熟練者に対して特有の身体の使い方により高いパフォーマンスを発揮していることが過去の研究により解明されている⁽²⁾⁽³⁾。特徴的な身体の使い方として、使用する筋肉の部位やタイミング、活動度、関節角度の変化などが挙げられる。

非熟練者に対して身体の使い方を教育する際、このような熟練者の動作の特徴を伝えることにより、上達を促している。例えば、熟練者の動作を映したビデオの視聴や非熟練者自身の動作を映したビデオの視聴、特徴を理解した熟練者による言葉によるアドバイス、実際に手本となる動作を実演して理解させる方法が良



Fig. 1 Rowing motion

く行われている。しかし、過去の研究において、熟練者と非熟練者の違いについてのべられた研究はあまりない。動作中のどの部分が熟練者に比べて非熟練者は劣っているのかを調査することは、ローイング動作における教育の効率や効果の上昇につながる。

また、ローイング動作を上達させるためには、ローイング動作を行うとともに筋力トレーニングにより使用する筋の筋力を増強することも重要である。特に膝関節の伸展筋群のトレーニングであるスクワット動作が重要であるといわれている⁽⁴⁾。スクワット動作のトレーニングにおいてもより効率的で効果的なトレーニングを行うために使うべき筋肉や使うタイミングを知ることが大切である。

動作解析により熟練動作の特徴を抽出するのみでは、実際の教育現場に役立てることができない。抽出した熟練動作の特徴を教育現場に役立てるためには、教育を受ける非熟練者に対して熟練者の特徴を分かりやす

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1) yanai@robot.t.u-tokyo.ac.jp

く教示する必要がある。しかし、特に筋活動に関しては、外見から確認することができないため、言葉や外見から筋肉を使うタイミングや強さを非熟練者に伝えることは難しい。この問題を解決するために過去の研究で筋活動の様子を視覚的にフィードバックすることにより教示するトレーニング方法が提案されている⁽⁵⁾。本研究では、抽出した動作の筋活動を視覚的に教示することによる教育システムの開発を行う。先行研究により著者らはスクワット動作における熟練者の筋活動のスキルの抽出を行い、筋活動の可視化を行った⁽⁶⁾が、教育効果の評価が不十分であった。

本研究では、ローイング動作の習熟において重要とされるローイング動作とスクワット動作における筋活動のスキルの抽出と教示を行う。まず、ローイング動作において競技歴により筋肉を使うタイミング、強さにどのような差が生まれるのかを検証するために熟練者と非熟練者の動作中の筋活動の計測を行い、熟練者の筋活動におけるスキルの抽出を行う。次にローイング動作の習熟に重要であるスクワット動作における筋活動の可視化を行い、その教育効果の検証を行う。

2. 熟練動作のスキル抽出

非熟練者に熟練者の筋活動を教示するためには、熟練者と非熟練者の筋活動の違いを解析し、教示するポイントを抽出する必要がある。熟練者と非熟練者の筋活動の違いを解析する上で、筋活動の差を定量的に評価する。筋活動を評価する際、重要なのは筋肉の使用部位、強さ、タイミングである。筋肉の活動の様子を知りたい筋肉の表面筋電図を測定することでどれほどの強さでどのタイミングで筋肉を使用したかを推定することができる。筋活動の計測において、それぞれの被験者間での比較を行うことを可能にするために、動作中の筋電図とは別に最大随意収縮時の筋電図 MVC を用いて、筋電図を正規化する。各筋において、最大収縮時の筋電図に対する割合である %MVC を求める。また、各試行において、筋活動のタイミングを動作の進行に沿って評価するために動作を時間軸で正規化し、動作の進行度を求める。ローイング動作は大きく 2 つのフェーズに分割され、ローイングエルゴメータのハンドルを前方に出た状態から後方に引っ張り、力を発揮する部分であるドライブと呼ばれるフェーズとドライブの終点から再び前方に戻るフォワードと呼ばれるフェーズである。この 2 つのフェーズを繰り返すことでローイング動作は成り立っている⁽⁷⁾。本計測では、特にドライブのフェーズに注目した解析を行う。ドライブにおける始点のハンドル位置を動作進行度 0% とし終点のハンドル位置を 100% とし、動作の前後方向

のハンドルの移動量を用いて動作の進行を正規化した。

また、過去の研究では、筋活動におけるタイミングの違いを定量的に評価するために、筋活動の波形に対して相互相関係数を用いている⁽⁸⁾。本研究では、熟練者と非熟練者の筋肉を使うタイミングのずれを定量的に評価するために相互相関係数 r を用いる (式 (1))。ここで x は熟練者の筋活動、 y は非熟練者の筋活動を表す。 n は進行度 0% から 100% までの筋活動データの総数であり、 x_i は進行度 0% のときから数えて、 i 番目のデータであることを表す。

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

また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 のピーク値が用いられる⁽⁹⁾。本研究では、筋活動の活動量の大きさとして %MVC のピーク値 p を用いる。これらの指標を用いて熟練者と非熟練者の動作解析を行うことにより、非熟練者に教示すべき筋の部位やタイミングの選択を行う。

3. 熟練動作の筋活動の可視化

熟練者の動作の特徴が非熟練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ため、熟練者の筋活動の様子を非熟練者に教示する方法が重要である。どこの部位の筋肉が活動しているのか、またどのくらい強く活動しているのか、そして動作に対してどのタイミングで活動しているのかを同時に示すことが重要となる。本研究ではこれらの点を解決する筋活動の様子を視覚的に表現する手法の提案を行う。提案手法では、実際の動作をイメージしやすくするために、実映像を用いた。また、動作中の筋活動を視覚的に表現するために仮想筋肉を作り、実映像上に実際の人体における筋肉の位置に合わせて描画する。筋活動の強弱、タイミングを明示するために、仮想筋肉の色を変化させる。筋活動の強弱に合わせて筋肉の色が変化する仕様とした。また、教示したい筋肉の筋活動を見やすくするために筋活動が見えやすい複数の視点からの映像を用いる。

筋活動のデータは、筋活動の可視化を行いたい部分の表面筋電図を計測し、データ処理することで取得した。また、教示したい筋肉の部位の仮想筋肉の位置を定めるためにモーションキャプチャを用いて、全身 20ヶ所にマーカーを貼ることにより動作中の関節位置を取得した。動作中の実映像はビデオカメラを用いて撮影する。モーションキャプチャより得られた関節の三次元情報を用いて、仮想の三次元空間に各関節位置をプロットし、動作中の人の 3D モデルを作成する。こ

の3Dモデル上に現実の筋肉の位置にあわせて、筒状の仮想筋肉の描画を行う。筋活動の強さである%MVCに合わせて色のRGBカラーモデルにおけるそれぞれの要素の値を変化させることで筋肉の色を変化させた。筋肉の色は筋活動していないときは青く、筋活動が強くなるにつれ赤くなる。このようにして作成された3Dモデルを実映像上に投影し、重畳することにより筋活動の可視化映像を作成する。

4. ローイング動作のスキル抽出実験

ローイング動作において熟練者と非熟練者の筋肉の使い方の違いを検証するために実際に熟練者と非熟練者の動作中の筋活動の計測を行った。ローイング動作において筋肉の使い方として重要な点は、筋肉を使う部位、タイミング、強さである。ドライブは主に膝関節の伸展により力を発揮する脚主導の部分と股関節の伸展による力を発揮する上体主導の部分、肩関節の回旋、肘関節の屈曲により力を発揮する腕主導の部分に分かれるが、それぞれの部分で使用するべき筋肉は異なる⁽⁷⁾。それぞれの部位の筋肉の筋活動を計測することにより、熟練者と非熟練者のタイミングと強さの違いを検証する。

4.1 計測実験

実際に熟練者と非熟練者のローイング動作中の筋活動を計測・解析することにより、動作のスキルの抽出を行う。被験者は、大学ボート部に所属する男性で、熟練者は4年生(22歳, 身長183cm, 体重70kg, ボート競技歴4年), 非熟練者は1年生(18歳, 身長178cm, 体重67kg, ボート競技歴6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40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表面筋電図, モーションキャプチャを用いて計測する。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。なお被験筋は、Mazzoneがローイング動作に必要な筋肉と指摘した僧帽筋 (Trap), 大胸筋 (PM), 三角筋 (Del), 上腕二頭筋 (BB), 腕橈骨筋 (BrR), 腹直筋 (RA), 菱形筋 (Rh), 脊柱起立筋 (ES), 大殿筋 (GM), 大腿四頭筋 (QF), ハムストリングス (Ham), ヒラメ筋 (Sol), 腓腹筋 (Gas), 前脛骨筋 (TA)の14ヶ所である⁽⁷⁾。人体におけるそれぞれの位置を図2に示す。

4.2 計測装置

本研究では生理計測機器 (S&ME社製, DL-721)を用いて、被験筋の表面筋電図の計測を行った。データはサンプリング周波数1,000 Hzで取得する。また、

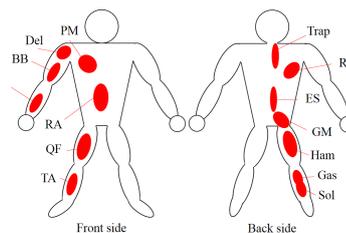


Fig. 2 Subject muscles

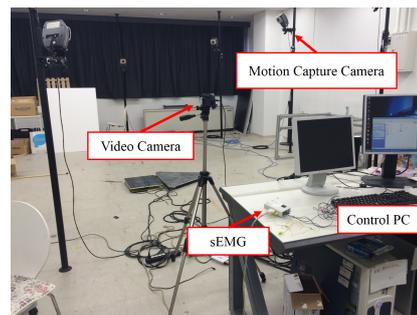


Fig. 3 Measurement devices

光学式モーションキャプチャ (Motion Analysis社製, EVaRT4.6)を用いることで動作中のハンドルの位置を測定する。モーションキャプチャは、赤外線カメラにより、マーカーを撮影することで、マーカーの三次元座標を取得することができる。ハンドル中央にマーカーを貼ることにより動作中のハンドルの三次元位置を取得した。計測装置図を図3に示す。取得した筋電図のデータは、基線合わせを行った後、300 Hzのローパスフィルタと10 Hzのハイパスフィルタをかけ、整流平滑化処理を行う。

4.3 計測結果

図4にローイング動作中の被験筋の筋活動を示す。グラフの縦軸は%MVCを表し、横軸は動作の進行度を表す。また実線は熟練者の筋活動を示し、破線は非熟練者の筋活動を示す。各被験筋毎の熟練者と非熟練者の相互相関係数 r , ピーク値 p を表1に示す。この結果より、いくつかの筋肉の部位において熟練者と非熟練者は異なる筋活動を行っていることがわかる。相互相関係数 r が低く、筋肉を使うタイミングに違いが出たのは、菱形筋 (Rh), 大腿四頭筋 (QF), 腓腹筋 (Gas), 前脛骨筋 (TA)であった。ドライブの始まりにおいて熟練者は、非熟練者よりも菱形筋 (Rh), 大腿四頭筋 (QF)がよく活動している。これより、熟練者はハンドルに菱形筋主導でぶら下がることができおり、ドライブ前半の脚主導の局面においてよく脚の筋肉を使用することができていることがわかる。また、

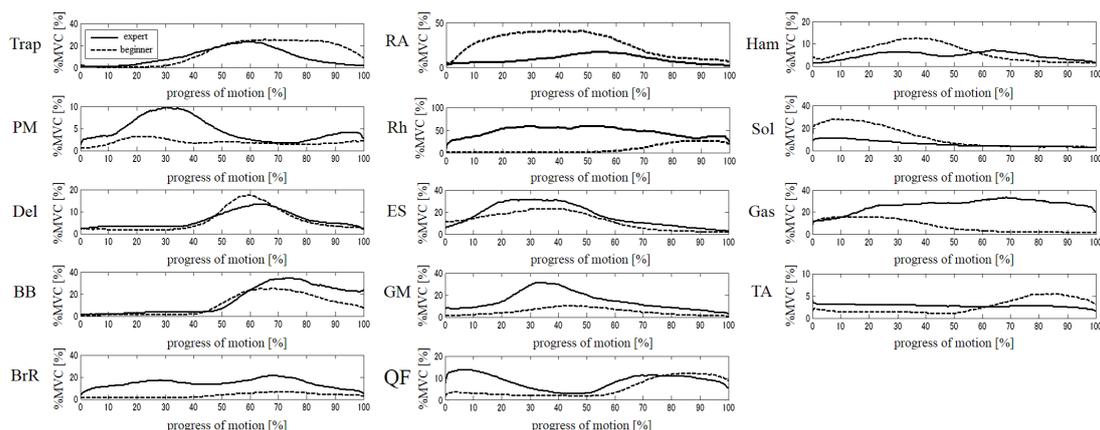


Fig. 4 Muscle activity during rowing motion

Table 1 Crosscorrelation value of muscle activity during rowing motion

	Trap	PM	Del	BB	BrR	RA	Rh
<i>r</i>	0.61	0.76	0.97	0.96	0.45	0.78	-0.35
<i>p</i> [%] (expert)	23.6	9.8	13.4	34.2	21.2	17.1	58.9
<i>p</i> [%] (beginner)	25.4	3.3	17.4	25.0	6.6	41.1	26.9
	ES	GM	QF	Ham	Sol	Gas	TA
<i>r</i>	0.90	0.73	0.28	0.60	0.95	-0.53	-0.47
<i>p</i> [%] (expert)	31.6	31.5	13.7	7.0	11.4	33.1	4.0
<i>p</i> [%] (beginner)	23.0	10.2	12.2	12.4	28.0	15.5	5.4

ドライブ中盤では熟練者の大殿筋（GM）の活動量の上昇が目立つ。これはドライブ中盤の上体重視の局面において、熟練者は股関節の伸展による力を上手く発揮できていると考えられる。僧帽筋（Trap）の筋活動において、ドライブの中盤までのタイミングは似ているが非熟練者はドライブの最後まで筋活動が続いている。非熟練者は、ドライブ後半で方の力みが出てしまう結果であると考えられる。大胸筋（PM）、上腕二頭筋（BB）、腓腹筋（Gas）の筋活動において特に熟練者は非熟練者よりドライブの最終局面においてよく活動していることが分かる。この結果から特に熟練者と非熟練者で違いが出た筋肉についての教示を行うことにより、ローイング動作の習熟を促す。

5. スクワット動作の筋活動の可視化実験

動作の対象は、使用する筋肉の筋力増強のための筋肉トレーニングのひとつとして非常に重要であるスクワット動作とする。スクワット動作を行う上で重要とされる主動筋（大殿筋（GM）、大腿四頭筋（QF））の可視化を行った。可視化対象の熟練者は、日常的にスクワットのトレーニングを積み、スクワット動作に重要である筋肉の使い方や姿勢を理解している男性1

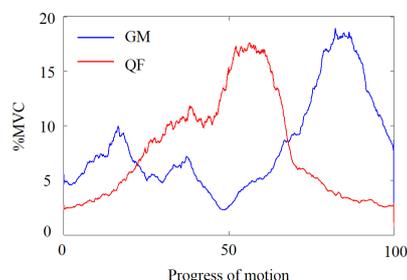


Fig. 5 Muscle activity of expert

名（23歳）とする。計測した熟練者の1試行分のスクワット動作の筋電図の様子を図5に示し、筋活動の可視化映像を図6に示す。図5において、横軸は立った状態から一度しゃがみこみ再び完全に立ちあがるまでの時間を100%としたときの動作の進行度で、縦軸は%MVCの大きさを示している。またもっとも深くしゃがみこんだときの進行度を50%とした。可視化映像では、動作に重要な筋の活動が見えやすいように動作を手前から見た映像と後ろから見た映像を作成する。

図5の熟練者の筋活動を見ると熟練者は、主動筋である大腿四頭筋と大殿筋を主に動作中の立ち上がる

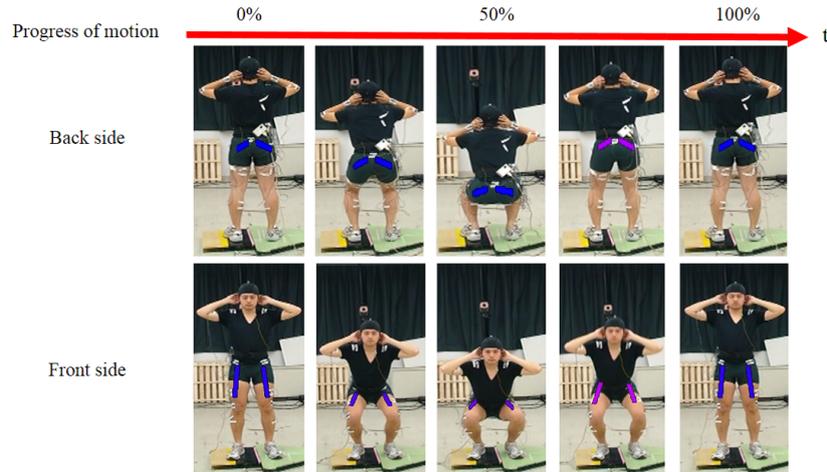


Fig. 6 Visualization of expert's muscle activity

フェーズに用い、立ち上がり時の前半は大腿四頭筋、後半は大殿筋をつかっていることが分かる。筋活動の可視化映像による教育によって、このような筋肉の使い方方を非熟練者に伝える。

5.1 教育効果の検証

作成したスクワット動作の熟練者の筋活動の可視化映像を用いて教育効果の検証実験を行った。被験者はスクワットトレーニングの指導を受けた経験のない男性10名である。実験では、通常の動作教育現場と同様に熟練者が非熟練者である被験者に言葉と自身の身体を用いた手本による教育を行った時と映像を用いた教育を行った時の被験者の筋活動の変化を比較する。被験者のうち5名は提案手法による筋活動の可視化映像を用いた教育を行い、残りの5名は可視化を行っていない熟練動作のみが映った映像による教育を行うことで、筋活動の可視化の教育効果を検証した。実験の手順を以下に示す。

1. 映像は使わず、熟練者の言葉と手本によるスクワット動作の教育を行う。
2. 大殿筋と大腿四頭筋に力を入れるタイミングやイメージを、手本を見せながら言葉で教育する。
3. 右脚の大殿筋と大腿四頭筋の10回のスクワット動作中の筋電図を計測する。
4. 映像を用いた教育を行った。被験者に映像を見せ、それぞれ熟練者の真似をするように指示する。
5. 再びスクワット動作10回の試行を行う。映像による教育前後での大殿筋と大腿四頭筋の筋活動の変化を比較する。

5.2 検証結果

図7に筋活動の可視化のある映像による教育を行った被験者群と可視化のない映像による教育を行った被験

者群のうち、それぞれ代表的な変化を示している被験者1名ずつの筋活動の変化を示す。横軸は動作の進行度で、縦軸は%MVCの大きさを示している。また、映像を用いた教育前後の熟練者の筋活動との相互相関係数の変化と筋活動のピーク値の変化を図8のグラフに示す。上段のグラフは相互相関係数の変化、下段のグラフはピーク値の変化を示している。それぞれのグラフは、被験者群5人の平均値で、青いバーは、大殿筋、赤いバーは大腿四頭筋の値である。検定の結果、可視化映像を用いて教育を行った被験者群の大殿筋の筋活動のみで有意に上昇したため、熟練者の筋活動に近づいたことが分かった。また、筋活動量に関しても可視化映像を用いて教育を行った被験者群の大殿筋のみで活動量が有意に上昇した。この結果より、可視化映像を用いた熟練者の筋活動の教示は、大殿筋の使うタイミング、活動量により影響をあたえることがいえる。これにより提案した可視化手法は、教育に有効である可能性を示唆することができた。

6. 結 論

熟練者と非熟練者の表面筋電計とモーションキャプチャを用いてローイング動作中の筋活動の違いを抽出した。この結果、熟練者は、非熟練者に対して筋肉を使用する部位、タイミング、強さに違いがある可能性があることが分かった。今後の展望として被験者数を増加させることにより、多くの熟練者と被験者に共通する違いを抽出する。

また、ローイング動作の一部であるスクワット動作を対象に筋活動の可視化システムの開発を行った。システムにより熟練者の筋活動を可視化し、提案した筋活動可視化手法の教育効果の検証を行った。この結果、

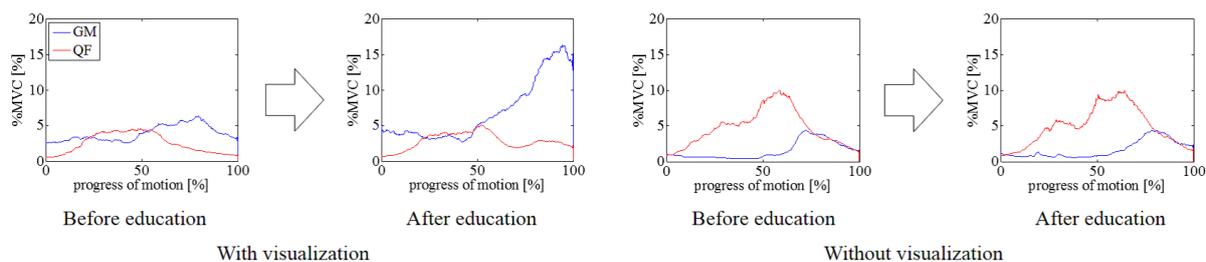


Fig. 7 Beginner's muscle activities before and after education

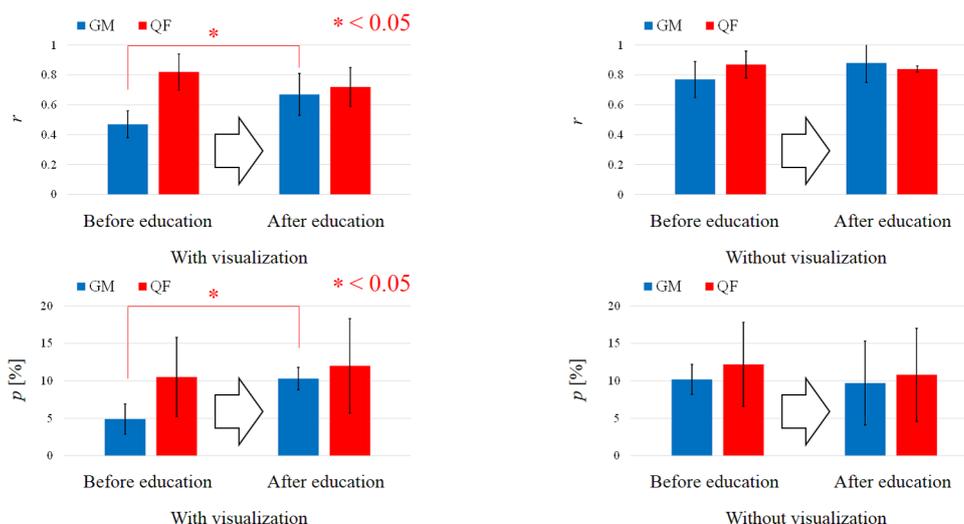


Fig. 8 Crosscorrelation value and peak value of muscle activity before and after education

提案手法により熟練者の筋活動の教育を行うことができる可能性を示した。

謝 辞

本研究の一部は、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），および JST RISTEX 問題解決型サービス科学研究開発プログラムの助成を受けた。

参 考 文 献

- (1) 巖見武裕, 宮脇和人, 山藤和也, 大日方五郎, 島田洋一, 松永俊樹, 佐藤峰善, 渡辺基紀, “高齢者用ローイングマシンの開発”, ライフサポート, Vol.21, No.2(2009), pp.20–26.
- (2) Clara Soper, Patria A. Hume, “Towards an Ideal Rowing Technique for Performance”, *Sports Medicine*, Vol.34, No.12(2004), pp.825–848.
- (3) Nicoras A. Turpin, Arnaud Guevel, Sylvain Durand, Francois Hug, “Effect of Power Output on Muscle Coordination during Rowing”, *European Journal of Applied Physiology*, Vol.111(2011), pp.3017–3029.
- (4) J K. Mcathur, J K. Adair, Ali Boolani, “Correlation Between Weight, Squat, Deadlift and Rowing Ergometer

Times in Collegiate Rowers”, *The Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, Vol.2, Iss.4(2012), pp.16.

- (5) 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, Vol.79, No.805(2013), pp.130–141.
- (6) 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.
- (7) Thomas Mazzone, “Kinesiology of the Rowing Stroke”, *NSCA Journal*, Vol.10, No.2(1988), pp.4–11.
- (8) 斎藤 健治, 松尾 知之, 宮崎 光次, “野球オーバーハンド投球における上肢・上肢帯筋活動の表面筋電図分析”, 体育学研究, Vol.51(2006), pp.351–365.
- (9) 西本 勝夫, 小林 茂, 橋本 努, 大久保 衛, 大堀 隆則, 菊永 弘至, 西本 東彦, 幸田 利敬, “背臥位, 側臥位そして腹臥位からの起き上がり動作における表面筋電図的分析”, 理学療法学, Vol.16, No.5(1989), pp.317–322.