

# 実映像と筋活動の重畳表示によるローイング動作教育システム

Qi AN<sup>\*1</sup>, 柳井 香史朗<sup>\*1</sup>, 中川 純希<sup>\*2</sup>, 温 文<sup>\*1</sup>, 山川 博司<sup>\*1</sup>, 山下 淳<sup>\*2</sup>, 浅間 一<sup>\*3</sup>

## Skill training system for rowing motion using integrated presentation of motion and muscle activation

Qi AN<sup>\*1</sup>, Koushirou YANAI<sup>\*1</sup>, Junki NAKAGAWA<sup>\*2</sup>, Wen WEN<sup>\*1</sup>,  
Hiroshi YAMAKAWA<sup>\*1</sup>, Atsushi YAMASHITA<sup>\*2</sup> and Hajime ASAMA<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

<sup>\*2</sup> Member, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

<sup>\*3</sup> Fellow, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo  
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656, Japan

Received 28 July 2015

### Abstract

In many sports, essential skills exist in terms of muscle activation in order to improve performance. However, it is difficult to identify the important muscle activation, and moreover novices cannot observe and imitate it since muscle activation is hardly visible. This study especially focuses on human rowing motion to extract an important skill in terms of muscle activation and we develop skill education system for novices to learn the skill. Firstly, strength and activation timing of lower leg muscle are evaluated to detect the expert skill based on their peak value and cross correlation during movement. Next, new skill education system is suggested by simultaneous presentation of real human movement and muscle activations of the targeted muscle. In the proposed system, muscle color is continuously changed based on its activation level for novices to perceive their muscle activation visually. Both experts and novices participated at our skill extraction experiment to compare their muscle activation. Results showed that experts had larger peak activation level and different profile in rectus femoris muscle. Therefore, our skill education system focused on rectus femoris muscle to present its activation level and movement simultaneously. In order to evaluate efficacy of the developed system, four different education instructions were conducted to novices; linguistic education, simultaneous presentation of motion and muscle activation of the expert, off-line presentation of novice's motion and muscle activation, and real time presentation of novice's motion and muscle activation. Performance of novices was evaluated after each instruction based on peak activation level, cross correlation, and exerted power on the rowing ergometer. These performance change after each education implied providing integrated view of novice's motion and muscle activation in real-time could improve performance of rowing motion.

**Key words** : Skill education, Muscle activation, Rowing motion, Sports, Visualization

---

No.15-00424 [DOI:10.1299/transjsme.15-00424]

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>\*2</sup> 正員, 東京大学大学院 工学系研究科

<sup>\*3</sup> 正員, フェロー, 東京大学大学院 工学系研究科

E-mail of corresponding author: anqi@robot.t.u-tokyo.ac.jp

## 1. 序 論

スポーツ競技において、運動や動作のパフォーマンスを向上させることは重要であり、競技者はその向上に励む。そのパフォーマンスを左右する要因の1つとして運動の技能がある。技能とは、熟練者が持つ特徴的な身体の使い方のことで、動作のフォームや筋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（村田，岩瀬，2000）（村山他，2011）。

スポーツ競技における非熟練者は、パフォーマンス向上のために技能教育を受け、熟練者の技能を学習し身に付ける（阿江，1992）。多くの場合、技能教育は指導者が熟練者のもつ技能を抽出し、それを非熟練者へ教示することからなる。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非熟練者に伝えることで、その習熟を促す。

特に実際の教育現場では、「そのタイミングではその筋をもっと使うべきだ」、「この筋は、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、筋の使い方が重要視されている（堀野，山崎，2000）。動作のフォームやスピードなどは指導者、非熟練者ともに視覚的に確認できるので、運動を理解しやすい。しかし筋の使い方に関しては外面から確認することが難しく、非熟練者が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、また今自分が筋を使っているかどうかの判断ができず、技能を習得できない。このような問題を解決するために、非熟練者に対して自身の運動感覚に基づいて、筋の使い方を理解させる手法が求められており（Suwa，2008）、筋活動の様子を筋電信号として計測し、その情報を可視化することにより、筋活動の技能教育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教師信号を作成し、その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（横田，大島，2013）。しかし、この手法では学習者は筋活動の信号のみを見るため実際に良いとされる動作がイメージしにくい。そこで、稲葉らは人体の3DCGモデルやアバターを構築し、部位ごとに筋活動の情報を反映させ、動きと筋活動を同時にフィードバックするシステムを構築したが、伸筋や屈筋の区別がなく、必ずしもどの筋を活用すべきかわかりにくいという問題点があった（稲葉他，2003）。また河村らは見本となる熟練者の運動は実映像で与え、筋活動の情報を機能的電気刺激で与えるシステムを提案したが（河村他，2010）、ローイングのような動的な動作の最中に電気刺激を感じることは難しいと考えられる。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、実映像を用いて、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。

本論文では、筋活動の技能教育に問題を抱えているボート競技に着目し、その基本動作であるローイング動作のパフォーマンス向上に寄与する筋の使い方を教示する手法を提案する。ボート競技におけるローイング動作は特徴的な筋活動を必要とする動作であり、通常はエルゴメータを用いてトレーニングする。実際のローイング動作を図1に示す。ローイング動作は負荷のかかったエルゴメータのハンドルを繰り返し後方に引く動作で、各ストロークの最中に筋を活動させる適切なタイミングや強さを調整しなければならず（Smith and Loschner，2002）、動作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（Gee et al.，2011）。これらの動作解析から、下肢の発揮する力がローイング動作のパフォーマンスに重要であることが示されているが、従来研究は下肢の筋の生理学的な側面に着目したもので、筋を活動させるタイミングや強さなどの技能面に着目したものは少ない。そのため、技能の教育の際に、どの筋を訓練すればいいのかわかっていない。そこで、パフォーマンスの向上につながる下肢の筋の使い方を技能として抽出し、筋活動を可視化して非熟練者に提示する技能教育システムを構築することを本研究の目的とする。さらに構築したシステムを利用した技能教育の有効性を検証する。

## 2. 手 法

本研究では、ローイング動作の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。はじめにローイング動作における筋活動に着目した技能の抽出手法を述べ、次に抽出した技能を伝達するための筋活動の可視化手法について説明し、最後に本手法を用いた教示方法に関して述べる。

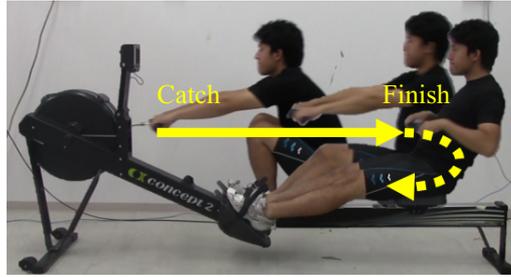


Fig. 1 Rowing motion. Above figure shows how the rowing motion is performed. Humans repeat pulling a wire connected to an ergometer. The beginning of the motion is called “catch” and when they pull to the end, its posture is called “finish”.

## 2.1 技能の抽出

ローイング動作のトレーニングを行う際、通常はエルゴメータに着座した状態で、下肢を伸展させることで、負荷のかかったハンドルを後方に引く。この時に、ハンドルが最も前方にある状態をキャッチ姿勢、最も後方に引ききった状態をフィニッシュ姿勢と呼び、フィニッシュ状態になると、またハンドルを戻して再度キャッチ姿勢に移行する（図1）（Mazzone, 1988）。本研究では、ローイング動作時の、熟練者と非熟練者の筋の使い方の違いを技能として抽出する。筋活動については先行研究でローイング動作に関する先行研究で重要とされた下肢の筋に着目し、図2に示す足・膝・股関節の伸展・屈曲に寄与する6筋（前脛骨筋（TA）、ヒラメ筋（SOL）、腓腹筋（GAS）、大腿直筋（RF）、大腿二頭筋（BF）、大殿筋（GM））を考慮する。

これらの筋に対して、どの筋を、どのタイミングで、どのくらい強く使用しているかに注目して技能とする。筋を使うタイミングの相違を表す指標として、筋活動の時系列波形に関して相関係数  $r$  を算出する（Wren et al., 2006）。相関係数  $r$  は対象とする2つの波形の類似度を表すもので、 $-1$  から  $1$  の間の値をとる。相関係数  $r$  は式(1)で計算され、

$$r = \frac{\sum_{t=1}^{T_{\max}} (x(t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T_{\max}} (x(t) - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^{T_{\max}} (y(t) - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

式(1)の  $x(t)$ ,  $y(t)$  は対象となる2つの時刻  $t$  における筋活動を表し、 $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  はその平均、 $T_{\max}$  は動作の終了時間を表す。相関係数  $r$  は  $1$  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、 $0$  のときは無相関となる。本研究では、熟練者間、熟練者-非熟練者間、非熟練者間で相関係数を計算し、その差を調べることで、熟練者に特徴的な筋活動のタイミングを調査する。一方で筋活動の強さを評価するための指標として、筋活動におけるピーク値  $m_{\max}$  を用いる。ピーク値の  $m_{\max}$  は動作の1ストロークの中での筋活動の最大値を表し、動作中にどのくらい強く筋を発揮させているかの目安となる。熟練者と非熟練者の相関係数  $r$  とピーク値  $m_{\max}$  を比較することで、どの筋において差があるのか調べ、技能を抽出する。

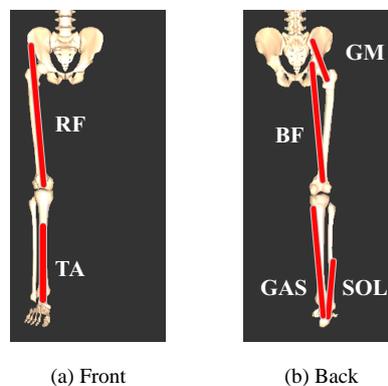


Fig. 2 Considered muscles. Six muscles are focused in this study; tibialis anterior (TA), gastrocnemius (GAS), soleus (SOL), rectus femoris (RF), biceps femoris (BF), gluteus maximus (GM).

熟練者の技能抽出を行う際には、動作時間や筋量などによる個人差が発生するが、比較を行うためにそれらを正規化する。動作時間に関しては、エルゴメータを引く際のストロークに合わせて、引き始めであるキャッチ姿勢を動作の開始とし、引き終わりであるフィニッシュ姿勢を動作の終了と定め、この期間を 100% となるように正規化を行う。筋活動に関しては、事前に各人のそれぞれの筋の最大随意収縮時の筋活動 (MVC) を計測し、その値を 100% として、運動中の筋活動を MVC で除し、%MVC を計算することで正規化を行う (西本他, 1989)。本研究では、熟練者と非熟練者を対象とした運動計測実験を行い、実際のローイング動作における筋活動を測定し、筋活動の違いを評価する。

## 2.2 筋活動の可視化

動作のパフォーマンスを向上させるためには、熟練者の筋の使い方を理解し、模倣することが重要である (阿江, 1992)。通常は見た目から筋活動の様子を判断することは難しいが、運動学習を促進するためには、運動と筋活動が同時に理解でき、かつ筋活動の強弱を理解できるようなシステムが求められる。本研究では、これを実現するために、筋を活動させるタイミングと強さを可視化し、実際の運動と同時に提示するシステムを構築する。

可視化の対象としては、2.1 節の技能の抽出において、熟練者と非熟練者において特に差が見られる筋とする。どこの筋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、動作の実映像上の筋の位置に合わせて追従させるように、棒状の仮想筋の描画を行う。また、筋活動の強弱、タイミングを明示するために、仮想筋の色を時間的に変化させる。さらに、フィードバックする仮想筋の色の変化に熟練者の筋の使い方を反映させることにより、目標との差を認識できるようにし、さらに技能の学習効果を向上させる。具体的には、熟練者の動作中の筋活動のピーク値  $m_{\max}$  まで筋を発揮することを目標とし、仮想筋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の色の変化を定める。このような変化にすることで、熟練者の筋活動を理解し、非熟練者が自分の筋活動の様子も認識できるようになる。本システムでは図 3 に示すように、筋活動が強くなるにつれて筋の色は青色から緑色を経て、赤に変化させる。その際の仮想筋の色を指定するための RGB をそれぞれ  $[c_R(m), c_G(m), c_B(m)]$  とした時に、各色の値は式 (2)–(4) で表される。

$$c_R(m) = \begin{cases} 0 & \text{if } m < \frac{m_{\max}}{2}, \\ \frac{510}{m_{\max}}m - 255 & \text{if } m \geq \frac{m_{\max}}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

$$c_G(m) = \begin{cases} \frac{510}{m_{\max}}m & \text{if } m < \frac{m_{\max}}{2}, \\ -\frac{510}{m_{\max}}m + 510 & \text{if } m \geq \frac{m_{\max}}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

$$c_B(m) = \begin{cases} -\frac{510}{m_{\max}}m + 255 & \text{if } m < \frac{m_{\max}}{2}, \\ 0 & \text{if } m \geq \frac{m_{\max}}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

## 2.3 技能の教示

2.1 節において抽出される筋活動の技能を 2.2 節の可視化手法を用いることで、筋活動を視覚的に確認することができる。しかし、動作をトレーニング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、動作のパフォーマンス向上につながる教示を行う必要があり、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検証する必要がある。特に本研究では、提案した可視化手法を熟練者の動きと非熟練者の筋活動にそれぞれ適用した際に、従来の教示と比べてパフォーマンスが上昇するかどうかを確認する。

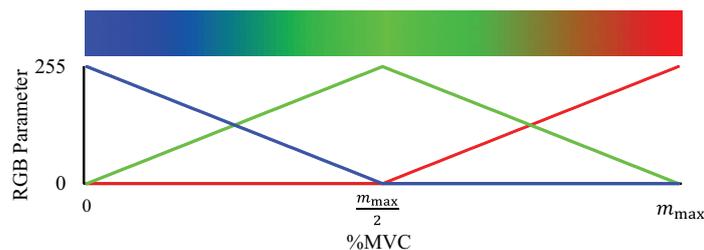


Fig. 3 Color chart. Color of muscles changes gradually from blue to red through green.

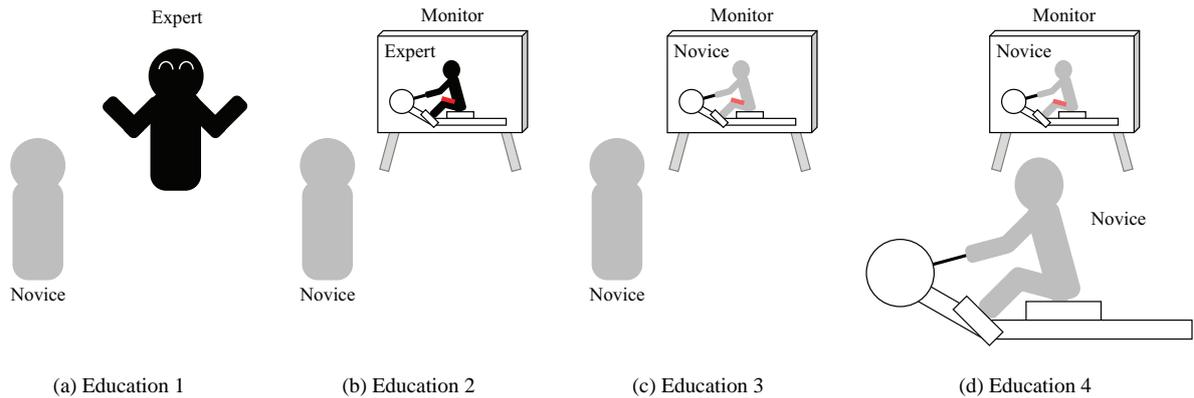


Fig. 4 Skill education protocol. Above figures show how the skill education is performed. (a) Expert tells novice orally about important muscle activation. (b) Novice watches the video of simultaneous presentation of movement and muscle activation of experts. (c) Novice watches the video of simultaneous presentation of movement and muscle activation of novice himself. (d) Novice watches the video of real-time feedback of his own movement and muscle activation.

従来の運動学習では、動作の見本を示すビデオ教材や教科書などを見ることが多く、本研究でも熟練者の筋活動を可視化することで、非熟練者が視覚的イメージを獲得することを目的とした教示を行う。一方で運動学習では、自分が今この筋をどのくらいの強さで使っているかを把握することも重要である。そこで、非熟練者自身の筋活動を計測・可視化し、運動中の自身の筋活動を認識できる教示システムを構築する。非熟練者の筋活動の可視化に関しては、運動を計測した後にオフラインで自身の運動を確認してもらう教示と、運動中にリアルタイムで確認する教示の2種類に関して確認する。

本研究では具体的には、以下に示す4つの教示方法を試すことで、本研究で提案する可視化手法を用いた教示と従来行われていた言語や身振りによる教示のパフォーマンスを比較する。それぞれの教示方法の概要を図4に示す。

- 教示 1: 技能の対象となる筋の使い方を言語で伝え、動作中に意識することを促す
- 教示 2: 熟練者の筋活動を可視化した映像を視聴する
- 教示 3: 非熟練者自身の筋活動を可視化した映像を運動後に視聴する
- 教示 4: 非熟練者自身の筋活動を可視化した映像をリアルタイムで見ながら運動を行う

まず、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。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、熟練者の筋活動を視覚を通して伝えることにより、非熟練者に視覚的イメージを持たせることによる技能の習得を行う。これら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非熟練者に持たせることにより、技能の習熟を促す。3つ目の教示方法は、非熟練者自身の筋活動を可視化した映像を運動後にオフラインで見せることによる教示である。この教示法では、非熟練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わせることができると期待される。自分の筋活動が今どのよう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う。4つ目の教示方法は、リアルタイムでの非熟練者自身の筋活動の可視化によるフィードバックである。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映像を確認することでフィードバックを行ったが、教示4では動作中の自身の筋活動をリアルタイムで可視化することにより、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ことができる。これにより動作中の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ことが期待される。

本研究で想定する技能の教示システムとして、どれか単独の方法で教育することは考えておらず、言葉や熟練者の筋活動可視化映像の教示（教示1, 2）により、理想の筋活動のイメージを持った上で非熟練者自身に筋活動をフィードバックするシステム（教示3, 4）を想定しており、それぞれの教示方法を連続して実施する。技能の習熟度・パフォーマンスの評価には、2.1節にて用いた相関係数と筋活動のピーク値を計算する。さらにローイン

グエルゴメータにて計算される仕事率を評価することで提案システムの有効性を検証する。

### 3. 実 験

#### 3.1 技能抽出実験

本研究では、下肢の筋活動のタイミングと強さに注目して、ローイング動作における熟練者の技能を抽出するための運動計測実験を行った。被験者はボート競技経験の長い熟練者5名(22±0歳, 身長1.75±0.07m, 体重71±6kg, 競技歴5±3年)と非熟練者5名(19±0歳, 身長1.74±0.08m, 体重68±10kg, 競技歴8±1ヶ月)である。実験では、Motion Analysis社製の光学式モーションキャプチャシステム(MAC3D)を用いて、8台のカメラにてローイングエルゴメータ(Concept社)のハンドルの動きを100Hzで計測した。計測時には、エルゴメータのハンドル部に反射マーカを貼り付けた。筋活動の計測には、表面筋電計(S&ME社製, DL-141)により、対象とする6筋の表面筋電図のデータを1,000Hzにて取得した。得られた筋活動に対しては、10Hzのハイパスフィルタ、200Hzのローパスフィルタ、整流化の後に、0.2s間のデータで平滑化した。被験者にはエルゴメータにおいて30秒間、可能な限り全力でローイング動作を行ってもらった。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い、動作の速度を統一するため、各被験者には1分間に20回のストロークのペースでローイング動作を行ってもらった。筋活動の正規化のための各筋の最大随意収縮時の筋活動の計測は、Konradの測定方法に従った(Konrad, 2006)。なお本実験では、実際に熟練者と非熟練者のローイング動作時のパフォーマンスが異なることを検証するため、エルゴメータから算出される運動中の仕事率を用いて評価した。

#### 3.2 熟練者の筋活動の可視化

提案するシステムのモデル図を図5に示す。動作中の技能となる筋活動を実際の動作と重畳して提示するためには、動作中の実映像、筋の活動度、筋の位置を取得する必要がある。本研究ではこれを実現するために、3.1節で使用した光学式モーションキャプチャシステムと表面筋電計を利用して、動作中の筋の3次元マーカ位置と筋活動を取得した。実映像はカメラ(Logicool社, C615)を用いて取得した。筋活動を実映像に重畳するためには、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た。筋活動のデータは、3.1節と同様のフィルタリングを行った。教示4において非熟練者が自身の動作および筋活動をリアルタイムで観察する際には、動作者の前にモニターを設置し、自身の可視化映像を映した。

#### 3.3 ローイング動作における技能教示実験

本研究の技能教示実験に参加した被験者は大学ボート部に所属する男性2名で競技歴1年未満の非熟練者である。2名の非熟練者をそれぞれ非熟練者A(19歳, 身長1.65m, 体重57kg, 競技歴9ヶ月)、非熟練者B(19歳, 身長1.68m, 体重62kg, 競技歴9ヶ月)とする。

ローイング動作における技能教育では、言葉による教示(教示1)、熟練者の筋活動可視化映像を用いた教示(教示2)、オフラインでの非熟練者の筋活動可視化フィードバックによる教示(教示3)、リアルタイムでの非熟練者の筋活動可視化フィードバックによる教示(教示4)を行った際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った。教示3では、熟練者の行うローイング動作中の筋活動の可視化のため、競技歴4年の男性被験者(22歳, 身長1.80m, 体重80kg)に参加してもらい、動作と筋活動を記録し、教示用の映像を作成した。

実験では各教示の後、5分間の練習を行い、その後30秒間の筋活動の計測を行った。その後、次の教示の条件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、次の教示方法により技能教育を行った。30秒間の筋活動計測では、技能抽出実験と同様に1分間に20回のストロークを行うように速度を指定した。それぞれの教示方法による技能教育後の筋活動の相関係数、ピーク値とエルゴメータで計測された仕事率を比較し、教育効果の検証をした。なお本研究における実験は東京大学大学院工学系研究科倫理委員会の承認を受け実施された。

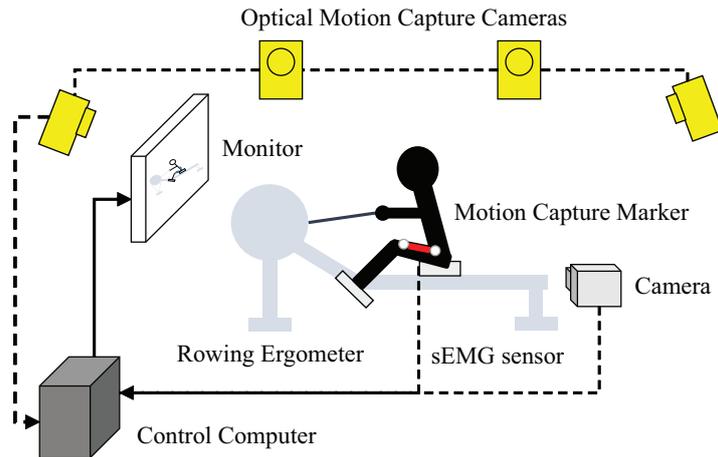


Fig. 5 Suggested system to present integrated view of muscle activation and motion. Above figure shows setup to visualize muscle activation during rowing motion. A participant sits down on the rowing ergometer to perform rowing motion. The optical motion capture system measures marker positions which are attached to muscle. Muscle activation is recorded from the sEMG sensor. The camera is used to record image of rowing movement. All data is collected in the control computer, and monitor is put in front of the participant if real-time visual feedback is necessary.

## 4. 結果・考察

### 4.1 技能抽出の結果

エルゴメータにより計算された仕事率を用いて、熟練者と非熟練者のローイング動作のパフォーマンスの差を評価した結果を図 6 (a) に示す。熟練者の仕事率が  $269.0 \pm 49.1 \text{ W}$  に対して、非熟練者は  $164.2 \pm 8.7 \text{ W}$  であり、 $t$  検定の結果、熟練者と非熟練者のパフォーマンスには有意な差があることが分かり ( $t = 25.69, p < 0.05$ )、熟練者と非熟練者の技能には差があることがわかった。

次に熟練者と非熟練者の筋活動の各筋のピーク値  $m_{\max}$  の平均と標準偏差を図 6 (b) に示す。 $t$  検定の結果、大腿直筋 (RF) と大腿二頭筋 (BF) の 2 つの筋において熟練者群の値が非熟練者群の値より有意に高くなり (RF:  $t = 3.65, p < 0.05$ , BF:  $t = 2.62, p < 0.05$ )、他の筋では、有意な差は見られなかった。このことから、熟練者は非熟練者に比べて、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。

熟練者と非熟練者が各筋を使うタイミングを比較した相関係数の結果について図 6 (c) に示す。相関係数が 1 に近づくということは、ストローク全体を通して筋を使うタイミングが似ており、共通する筋の活動パターンがあることを示し、 $-1$  に近づくにつれて比較した 2 つの筋活動は負の相関が強くなり、筋の使い方が異なることを表す。ヒラメ筋 (SOL)、大腿二頭筋 (BF)、大殿筋 (GM) では相関係数は高く、熟練度や体格などの個人差に関わらず、熟練者と非熟練者ではほとんど差がないことがわかった。また、腓腹筋 (GAS) と前脛骨筋 (TA) においては、非熟練者同士に強い相関があるものの、熟練者間では相関はなく、熟練者はこれらの筋の活動タイミングに関しては重要視していないことが分かる。一方で、大腿直筋 (RF) では熟練者同士には、正の相関があるが、非熟練者同士、熟練者と非熟練者にはほとんど相関はなく、 $t$  検定の結果、熟練者同士と非熟練者同士の相関係数には有意な差が存在した ( $t = 2.99, p < 0.05$ )。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、そのパターンは非熟練者とは共通していないことが分かる。

図 6 (d) 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 (実線: 熟練者, 点線: 非熟練者)。特にストロークの前半に筋活動のピークがあり、そのピークが大きい点に熟練者の特徴がある。ローイング動作では、膝の伸展に加えて、適切に上体を後傾させて、腕を引く必要がある。非熟練者ではこれらのタイミングを合わせることができないため、筋活動のピーク値や相関係数が低くなっていると考えられる。これらの技能抽出の結果、大腿直筋 (RF) の活動量 (ピーク値) とタイミング (相関係数) において熟練者と非熟練者に大きな差があり、大腿直筋 (RF) 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ことが示唆される。以上のことを踏まえ、本研究では熟練者の大腿直筋 (RF) の使い方をロー

イング動作の技能として非熟練者に教示を行うこととした。

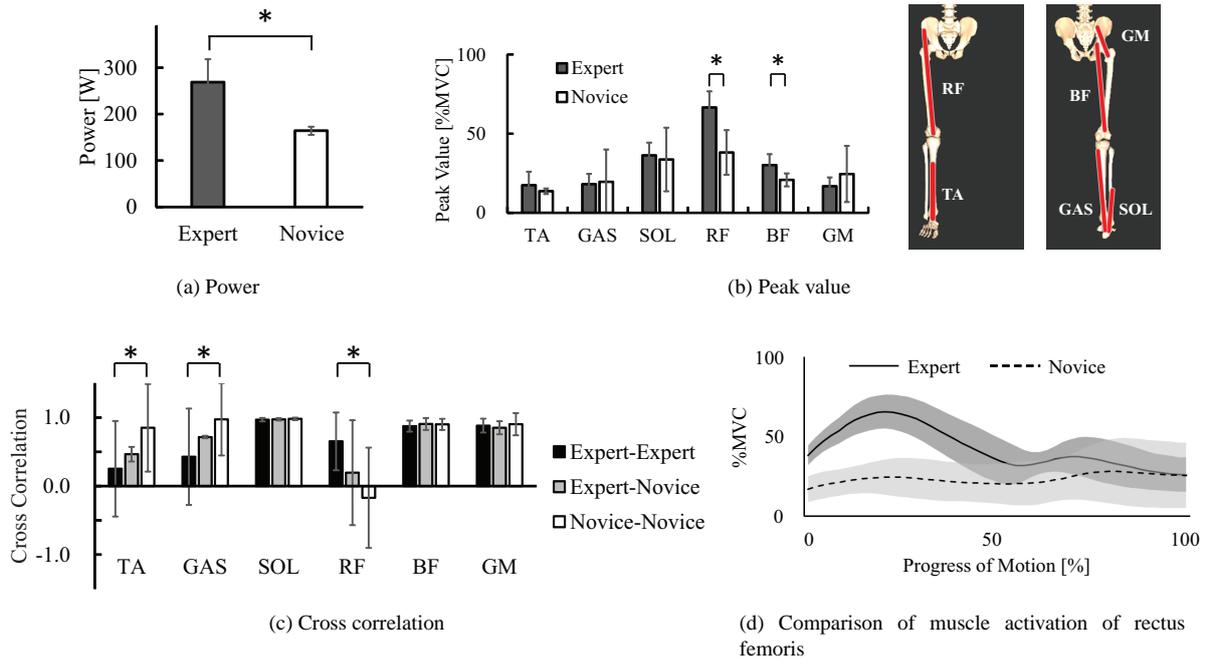


Fig. 6 Results of skill extraction. Above figures show performance comparison between experts and novices. Each graph shows mean and standard deviations. (a) This shows experts could exert statistically significantly larger power than novices do. It implies that there is a different skill among two groups. (b) The peak value of six muscles was compared among two groups. It showed that there was significant difference for amplitude of rectus femoris (RF) and biceps femoris (BF). (c) This implies that expert has characteristic methodology to activate RF muscle rather than novices. (d) Experts have a peak in the early phase of the motion whereas novices activate it later. Also, experts generate larger force than novices do.

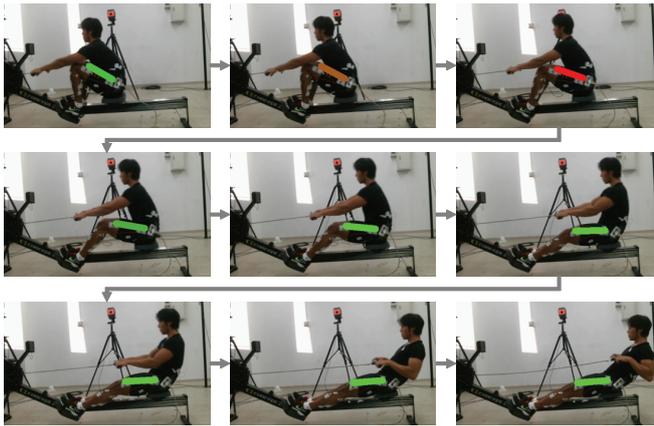
## 4.2 筋活動の可視化システム

本研究で技能として抽出された大腿直筋の筋活動を可視化するためのシステム構築を行った。実映像上で大腿直筋の位置を追従して描画するために、大腿直筋には位置測定用のマーカーを付着し、表面筋電位センサをその筋腹に貼り付けた。実際の動作に筋活動を重畳表示した映像を図7(a)に示す。実際の熟練者の大腿直筋の筋活動に合わせて、仮想筋の色が変化していることが分かる。技能教示の際に、非熟練者が運動をしながら、自身の運動と筋活動をリアルタイムに観察する際(教示4)には、図7(b)に示すようにエルゴメータの前にモニターを置き、動作を確認できるようにした。このように、運動中の実映像と筋活動の様子を重畳して確認することができるシステムの構築を行った。

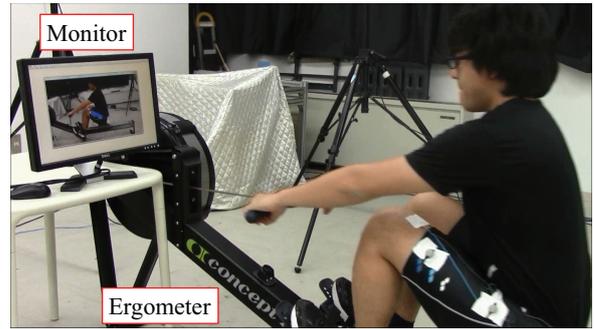
## 4.3 技能教示の結果

4.2節において構築した筋活動の可視化システムを用いて、教示2での熟練者の筋活動の可視化、教示3,4での非熟練者の筋活動の可視化を行った。技能教示を行う前のパフォーマンスとそれぞれの教示後の筋活動のピーク値の推移、相関係数の推移、動作のパフォーマンスである仕事率の推移を図8に示す。

技能教示を行う前と比べて、教示1後の非熟練者Aのピーク値と相関係数は低く、大腿直筋を上手く活動できていないことがわかる。一方で非熟練者Bは相関係数は高く、熟練者に似たタイミングではあったが、筋活動のピークの値が低かった。これに伴い、両名のローイング動作のパフォーマンスである仕事率も低い値を示した。次の教示2での熟練者の可視化映像を見た後、両名共にピーク値と相関係数、仕事率の上昇が見られ、パフォーマンスは向上した。このことから、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が示唆された。教示3での自身の運動時の筋活動の可視化映像を見

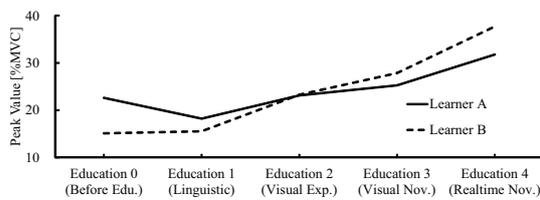


(a) Integration of motion and muscle activation

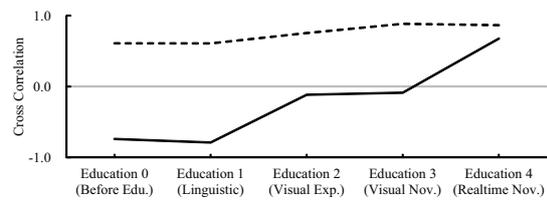


(b) Experimental setup for skill education system

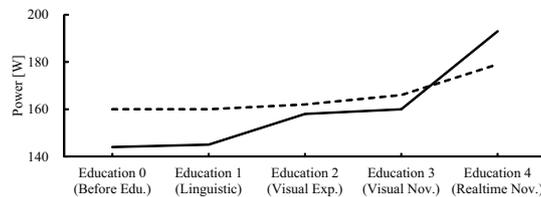
Fig. 7 Integrated presentation of motion and muscle activation. (a) Above pictures show integrated presentation of expert movement and his muscle activation of rectus femoris. Our developed system measures muscle activation and its position simultaneously and it provided overlaid images. (b) Above figure shows how a novice practices rowing motion with real-time feedback. The monitor is put in front of the participant.



(a) Peak value



(b) Cross correlation



(c) Power

Fig. 8 Performance after training. Above figures show performance of two participants after training. These results showed that both participants could improve four outcomes (peak value, cross correlation, and power). This also showed that larger improvement was found after fourth education.

た後では両者共に大腿直筋のピーク値、相関係数に大きな変化がみられなかった。この結果より、オフラインで非熟練者自身の筋活動をフィードバックする教示方法の教育効果は小さいと考えられる。オフラインで自身の筋活動を確認することで、熟練者との差異を理解することはできるが、再度動作を行う際にはそれを十分に活用・反映できていないと考えられる。最後の教示4を受けた後、特に非熟練者Aの筋活動に大きな変化がみられ、ピーク値の大きな上昇に加え、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、仕事率に30Wの改善が見られた。また非熟練者Bについても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。これは本研究の提案システムによるリアルタイムでの可視化から毎ストロークの動きを修正することが可能になったため、それが筋活動に変化を与える技能教育に有効であることが示唆された。

教示実験の結果、熟練者の筋活動の可視化したものから、熟練者の筋活動を視覚的イメージを持ち、さらにリアルタイムでの非熟練者自身の筋活動の可視化を行うことで、非熟練者の筋活動のピーク値、熟練者の筋活動と

の相関係数の上昇につながる事がわかった。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）の使い方を教示し、非熟練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とから、技能抽出実験により抽出した技能の妥当性も示された。

## 5. 結 論

本研究では、ローイング動作のパフォーマンスを向上させる技能教育システムの開発のため、動作中の下肢の筋の使い方に着目し、熟練者の技能を抽出した。また抽出された技能を非熟練者に教示するために、筋活動を可視化し、実際の動作を重畳して提示する教育システムの構築を行った。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教示方法を提案し、実際に非熟練者への教示を行い、提案した教育システムによって技能およびパフォーマンス向上が期待できることを示した。今後の研究では被験者の技能に応じて、効果的な技能教示の方法を調査する。

## 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、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）、および若手研究（B）15K20956 の助成を受けた。

## 文 献

- 阿江通良, スポーツ技術の改善と計測, 計測と制御, Vol. 31, No. 3 (1992), pp. 430-436.
- Gee, T.I., Olsen, P.D., Berger, N.J., Golby, J. and Thompson, K.G., Strength and conditioning practices in rowing, *Journal of strength and conditioning research*, Vol. 25, No. 3 (2011), pp. 668-682.
- 堀野博幸, 山崎勝男, EMG feedback がサッカーのキックパフォーマンスに及ぼす影響-利き脚キック時の僧帽筋活動を feedback 情報として-, *生理心理学と精神生理学*, Vol. 18, No. 3 (2000), pp. 195-203.
- 稲葉洋, 瀧剛志, 宮崎慎也, 長谷川純一, 肥田満裕, 山本英弘, 北川薫, スポーツ動作分析の支援を目的とした人体センシング情報の可視化提示法, *芸術科学会論文誌*, Vol. 2, No. 3 (2003), pp. 94-100.
- 河村拓郎, 山田巧, 藤原大, 神原裕行, 小池康晴, 視覚と筋へのフィードバック情報を用いた運動支援技術に関する研究, *電子情報通信学会技術研究報告. MBE, ME とバイオサイバネティクス*, Vol. 109, No. 460 (2010), pp. 1-6.
- Konrad, P., *The abc of EMG*, Noraxon (2006).
- Mazzone, T., *Kinesiology of the rowing stroke*, *NSCA journal*, Vol. 10, No. 2 (1988), pp. 4-11.
- 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 (2000), pp. 299-309.
- 村山敏夫, 遠藤勇氣, 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 (2011), pp. 911-917.
- 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.
- Smith, R.M. and Loschner, C., *Biomechanics feedback for rowing*, *Journal of sports science*, Vol. 20, No. 10 (2002), pp. 783-791.
- Suwa, M., *A cognitive model of acquiring embodied expertise through meta-cognitive verbalization*, *The Japanese society for artificial intelligence*, Vol. 23, No. 3 (2008), pp. 141-150.
- Wren, T.A.L., Do, K.P., Rethlefse, S.A. and Healy, B., *Cross-correlation as a method for comparing dynamic electromyography signals during gait*, *Journal of biomechanics*, Vol. 39, No. 14 (2006), pp. 2714-2718.
- 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ストレーニング, *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 79, No. 805 (2013), pp. 3110-3121.

## References

- Ae, M., *Biomechanical measurement techniques and improvement in sports techniques*, *Journal of the society of instrument and control engineers*, Vol. 31, No. 3 (1992), pp. 430-436 (in Japanese).

- Gee, T.I., Olsen, P.D., Berger, N.J., Golby, J. and Thompson, K.G., Strength and conditioning practices in rowing, *Journal of strength and conditioning research*, Vol. 25, No. 3 (2011), pp. 668-682.
- Horino, H. and Yamazaki, K., Effect of EMG feedback on kick performances of soccer –feedback concerning EMG reduction of muscle trapezius during the instep kick with dominant leg–, *Japanese journal of physiological psychology and psychophysiology*, Vol. 18, No. 3 (2000), pp. 195-203 (in Japanese).
- Inaba, H., Taki, T., Miyazaki, S., Hasegawa, J., Koeda, M., Yamamoto, H. and Kitagawa, K., Visualization of human body sensing for supporting sports motion analysis, *The journal of the society for art and science*, Vol. 2, No. 3 (2003), pp. 94-100 (in Japanese).
- Kawamura, T., Yamada, T., Fujiwara, T., Kambara, H. and Koike, Y., Perception of movement support technology using feedback information to visual and muscles, *IEICE technical report. ME and bio cybernetics*, Vol. 109, No. 460 (2010), pp. 1-6 (in Japanese).
- Konrad, P., *The abc of EMG*, Noraxon (2006).
- Mazzone, T., *Kinesiology of the rowing stroke*, *NSCA journal*, Vol. 10, No. 2 (1988), pp. 4-11.
- Murata, A. and Iwase, H., On skillful pitch of baseball pitchers –comparison of pitching motion between skilled and nonskilled pitchers–, *The Japanese journal of ergonomics*, Vol. 36, No. 6 (2000), pp. 299-309 (in Japanese).
- Murayama, T., Endo, Y., Kiryu, T. and Ushiyama, Y., A proposal of a quantitative evaluation of physical skills based on lower limb muscle activity during skiing, *Transactions of Japanese society for medical and biological engineering*, Vol. 49, No. 6 (2011), pp. 911-917 (in Japanese).
- Nishimoto, K., Kobayashi, S., Hashimoto, T., Okubo, M., Ohori, T., Kikunaga, H., Nishimoto, H. and Koda, T., Surface electromyographic analysis for sitting from supine, side lying and prone positions, *The journal of Japanese physical therapy association*, Vol. 16, No. 5 (1989), pp. 317-322 (in Japanese).
- Smith, R.M. and Loschner, C., Biomechanics feedback for rowing, *Journal of sports science*, Vol. 20, No. 10 (2002), pp. 783-791.
- Suwa, M., A cognitive model of acquiring embodied expertise through meta-cognitive verbalization, *The Japanese society for artificial intelligence*, Vol. 23, No. 3 (2008), pp. 141-150.
- Wren, T.A.L., Do, K.P., Rethlefse, S.A. and Healy, B., Cross-correlation as a method for comparing dynamic electromyography signals during gait, *Journal of biomechanics*, Vol. 39, No. 14 (2006), pp. 2714-2718.
- Yokota, H. and Ohshima, S., Cybernetic training using optimized muscle activation signals by musculoskeletal model simulation for the upper limb, *Transactions of the Japan society of mechanical engineers series C*, Vol. 79, No. 805 (2013), pp. 3110-3121 (in Japanese).