

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月23日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700645

研究課題名（和文） 競泳トレーニングのための推進加減速フィードバック

研究課題名（英文） Feedback of propulsive acceleration for competitive swimming training

研究代表者

市川 浩（ICHIKAWA HIROSHI）

福岡大学・スポーツ科学部・助教

研究者番号：20375463

研究成果の概要（和文）：本研究課題では平泳ぎ中の腰部加速度と角速度を慣性センサにより計測することで、泳推進方向の加減速を精度よく推定することに成功した。この計測から演算までの処理をリアルタイムで泳者にフィードバックすることは困難であったが、計測した加速度の1成分が推進方向加減速と部分的に一致するという知見を活用し、泳推進方向の加速度を音の高低で出力するデバイスを開発した。これにより泳中の加減速フィードバックを実現可能にした。

研究成果の概要（英文）：The acceleration and angular velocity of swimmer's lumber in breaststroke swimming was measured using an inertial sensor logger, and it was accurate to estimate the swimming acceleration along the propulsive direction using the sensor data. Although it was difficult to execute the estimation in real-time by the methodology, it was found that the measured acceleration along longitudinal axis of swimmer's trunk was partially corresponded with the swimming acceleration. The findings were applied to develop a device, which was able to express changes of the swimming acceleration by frequency of sound. The developed system made possible the feedback of the swimming acceleration during breaststroke swimming.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 2011年度 | 1,700,000 | 510,000 | 2,210,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |

研究分野：スポーツ科学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：トレーニング科学、フィードバック、加減速、競泳競技

## 1. 研究開始当初の背景

スポーツなどの身体運動を撮影・計測し、その情報をフィードバックすることはトレーニング効率を高め、パフォーマンス向上に貢献できると考えられている。しかし、何らかの情報を選手にフィードバックし、そのパ

フォーマンスへの影響や貢献を検討した研究は決して数多くなく、トレーニングやコーチングの現場のニーズに研究が対応しきれていない現状がある。即時性に優れたセンサ計測技術を応用することで、運動を行っている最中に選手へ計測結果をリアルタイムで

フィードバックできる可能性があると考えられる。過去、センサ装着による身体拘束がパフォーマンスへ及ぼす影響が懸念されていたが、加速度や角速度といった運動に関する情報を感知できる慣性センサは、近年の小型軽量化により水中での利用も容易となってきた。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、競泳のトレーニング現場で利用することを想定した聴覚フィードバックシステムを開発し、水泳中の推進方向加減速のフィードバックがパフォーマンス向上に貢献する可能性について議論することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究課題の目的をたっせいするために、以下の小課題を設定し、それぞれについて実施した。

### (1) センサによる泳加減速を定量化する手法の検討

競泳競技経験のある健康な男性 12 名を被験者とした実験を行った。被験者は腰部に加速度センサとジャイロセンサを内蔵したセンサモジュールを装着した状態で、クロール・背泳ぎ・平泳ぎ・バタフライの 4 種類の泳試技を実施した。センサモジュールを装着した腰部の挙動はビデオカメラ 2 台で撮影した。センサによる計測で得られた腰部加速度と角速度から推進方向の加減速を推定することを試み、その結果をビデオ撮影した映像から算出した腰部加減速と比較することで、推定の妥当性を検討した。

### (2) コンピュータによるフィードバックシステムのシミュレーション

センサ情報から推進の加減速を推定する演算は、積分や座標変換を含む複雑なものとなる可能性があった。演算処理に時間を要すると、センサ計測から音声出力までに時間遅れが発生することとなり、そのリアルタイム性が低下する。ここでは計測から出力までのシステムをシミュレートするために、演算を PC で繰り返し行った。推定データを出力する際のリアルタイム性と精度のバランスを考慮し、効率のよい演算手法を検討した。

### (3) 水泳中の加減速を聴覚フィードバックするシステムの開発

実験、分析およびシミュレーションから得られた情報をもとに聴覚フィードバックシステムを開発した。加速度センサおよびジャイロセンサの信号をもとに、演算により推進方向の加減速を算出し、さらにこれを音出力周波数の高低に変換して出力するものとし

た。センサの選定、演算の手法、音声出力のパターンなどの仕様を決定し、デバイス製作は専門業者に委託した。音出力には水中利用可能な防水型骨伝導ヘッドバンドを利用するものとした。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

#### ① センサによる泳加減速を定量化する手法の検討

慣性センサを用いて計測した腰部加速度と角速度データから、平泳ぎの推進加減速を精度よく推定することが可能となった(図 1)。

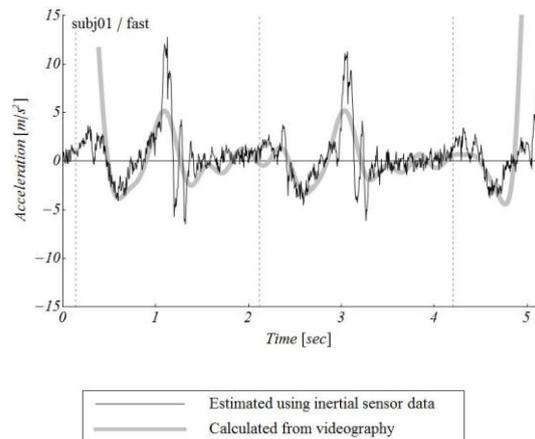


図 1 慣性センサデータから推定した平泳ぎ中の腰部加速度推進方向成分と画像分析から計算したものの比較した一例。図中の鉛直破線は腕ストローク動作開始時刻を示す。

以下にその推定手法の手順を示す。式中の太字はベクトル量もしくは行列を表し、斜字はスカラー量を表す。

測定した加速度・角速度データから泳試技を行っている時間帯とストロークの基本周期を算出した。また、矢状面内の体幹部回転を表す角速度データから、各ストロークでグライド姿勢から上体が起き始めるタイミングを算出した。これをストロークの開始時刻とし、加速度・角速度データを 1 ストロークごとに分割した。

動座標系に基づいた慣性センサからのデータを静止座標系に変換するためには、慣性センサと一体になって運動する腰部姿勢の情報が必要となる。ここでは慣性センサロガーを装着した腰部姿勢を四元数(クォータニオン)で表すものとした。静止座標系に対して、慣性センサロガーの感度軸と一致する動座標系が回転軸  $\lambda = (\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)^T$  まわりに回転角度  $\theta$  だけ回転しているときの腰部姿勢は四元数  $\mathbf{q}$  で、

$$\mathbf{q} = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta/2 \\ \lambda_x \sin\theta/2 \\ \lambda_y \sin\theta/2 \\ \lambda_z \sin\theta/2 \end{pmatrix} \quad (\text{式 1})$$

と定義できる。この  $\mathbf{q}$  の時間微分と慣性センサロガー上で計測される角速度ベクトル  $\boldsymbol{\omega}_{\text{measure}}$  との間には以下の関係がある。

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{d}{dt}\mathbf{q} = \frac{1}{2}\mathbf{L}^T \boldsymbol{\omega}_{\text{measured}} \quad (\text{式 2})$$

ただし  $\mathbf{L}$  は  $4 \times 3$  の行列であり、行列  $\mathbf{L}$  の成分は姿勢を表す四元数の成分で構成され、

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} -q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ -q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{pmatrix} \quad (\text{式 3})$$

と定義される。ストローク開始時刻  $t = t_0$  における腰部姿勢  $\mathbf{q}(t_0)$  を初期値とし、次のストローク開始  $t_f$  までの 1 周期に渡って、(式 2) を積分することで時々刻々の腰部姿勢  $\mathbf{q}(t)$  が得られる。

$$\mathbf{q}(t) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{\mathbf{q}} dt \quad (\text{式 4})$$

なお、腰部姿勢の初期値  $\mathbf{q}(t_0)$  は、この時刻の加速度データに含まれる動的な加速度は十分小さく、重力加速度のみで説明できるものと仮定して算出した。時々刻々の腰部姿勢  $\mathbf{q}(t)$  から、動座標系表記のベクトルを静止座標系表記に変換する座標変換行列  $\mathbf{A}$  を得ることができる。

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_2^2 + q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 1 - 2(q_1^2 + q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & 1 - 2(q_1^2 + q_2^2) \end{pmatrix} \quad (\text{式 5})$$

測定した加速度データ  $\mathbf{a}_{\text{measured}}$  は動座標系に基づいたベクトルであり、重力加速度ベクトル  $\mathbf{g}$  を含んでいる。これを静止座標系に基づいた加速度ベクトル  $\tilde{\mathbf{a}}$  へ変換は、

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{pmatrix} \tilde{a}_x \\ \tilde{a}_y \\ \tilde{a}_z \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{a}_{\text{measured}} - \mathbf{g} \quad (\text{式 6})$$

とすることで得られ、その推進方向成分 (Y 軸方向成分) は  $\tilde{a}_y$  となる。なお、本研究の推

定では 1 ストローク前後で推進方向の速度は変化しないものと仮定した。つまり 1 ストローク中の平均推進方向加速度がゼロとなるように、 $\tilde{a}_y$  から 1 ストロークの平均値  $\bar{a}_y$  を減じ、これを推進方向の加速度  $a_y(t)$  として扱った。

$$a_y(t) = \tilde{a}_y(t) - \bar{a}_y \quad (\text{式 7})$$

ここで本来の目的から外れるが、この加速度の推進方向成分  $a_y(t)$  を時間積分することで、速度変化  $\hat{v}_y(t)$  を算出することを試みている。

$$\hat{v}_y(t) = \int_{t_0}^{t-t_0} a_y(t) dt \quad (\text{式 8})$$

$$\hat{v}_y(t_0) = 0$$

なお、ここで得られる速度情報  $\hat{v}_y$  は腰部速度の絶対値ではなく、平均値をゼロとした相対的な速度変化を表していることに注意が必要である。この速度変化推定結果の一例を図 2 に示した。

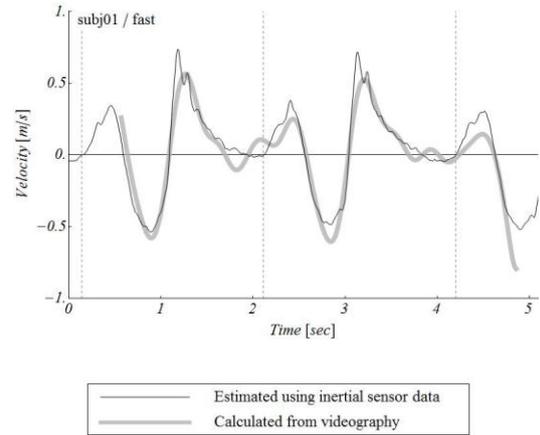


図 2 慣性センサデータから推定した平泳ぎ中の腰部速度変化推進方向成分と画像分析から計算したものの比較した一例。図中の鉛直破線は腕ストローク動作開始時刻を示す。

ここで用いた加減速および速度変化推定手法は慣性センサ以外の計測および撮影機器を必要とせず、泳加減速を定量化する手法としては簡便かつ十分な精度を有するものであると考えられた。

その一方で、平泳ぎ以外の 3 泳法 (クロール、背泳ぎ、バタフライ) の推定では十分な精度を得ることができず、解決すべき今後の課題として、さらなる試行錯誤が必要であるものと考えられた。

## ② コンピュータによるフィードバックシス

#### テムのシミュレーション

平泳ぎにおいて適用可能となった泳加減速の定量化手法では、慣性センサによる計測からリアルタイムで加減速データの算出は困難なものであった。これは、姿勢算出のために(式4)で1ストローク時間の積分を行うこと、また、1ストローク前後で推進方向の速度はしないという仮定から(式7)で1ストロークの平均加速度を使用することが、大きな理由として挙げられる。積分時間の短縮や、(式7)を使用せずに(式6)で得られた加速度を推定結果に使用するなどを試みたものの、そのようにして推定した加速度はドリフトし、時間経過にしたがって大きな誤差を含んだものとなった。しかし、体幹部長軸がほぼ水平となるキック局面やグライド局面において、計測した加速度の身体体幹部長軸方向成分が推定した推進方向加減速とほぼ同様の挙動を示すことが確認された。平泳ぎ全局面への適用は困難ではあるものの、この知見を活用することで、計測データが直接活用でき、リアルタイムでの聴覚フィードバックが可能となると考えられた。

#### ③ 水泳中の加減速を聴覚フィードバックするシステムの開発

慣性センサにより計測した加速度の身体体幹部長軸方向成分を抽出し、その信号の大きさを音周波数の高低と対応させ、これを防水型骨伝導ヘッドフォンで出力するデバイスを開発した(図3)。



図3 開発した泳加減速聴覚フィードバックシステム。慣性センサを搭載したロガー部(図中左)と防水型骨伝導ヘッドフォン(図中右)により構成される。

これにより慣性センサを内蔵したロガー部を腰部に、ヘッドフォンを頭部に装着するだけで、聴覚を介した泳加減速フィードバックが実現可能となった。またロガーに内蔵したメモリに記録することで、泳試技後の遅延

的フィードバックも可能となった。

#### (2) 得られた成果の位置づけと今後の展望

今回フィードバック情報として利用する推進方向の加減速は、動力学的にパフォーマンスを説明するという点からも都合がよい。つまり身体が水から受ける流体力の総和が前向きであれば加速し、後向きであれば減速するという動力学的な議論を可能にするパラメータである。運動学習の視点では、競泳のような closed skill な運動に対しては、筋運動感覚など体内からの情報を含む内的フィードバックが重要であることが知られている。「腕が外側を掻いている」、「膝が深く曲がっている」といった姿勢に関する運動学的情報は、視覚的に認識しやすいことから、映像によるフィードバックにおいてよく用いられており、その報告も多数あるものの、その物理的な意味合いや力感覚との関係は薄い。力学的に意味を持つ加減速情報は、「発揮した力で加速する」、「余分な動作で減速した」というように内的な感覚を補足するのに適していると考えられる。過去にこのような物理量を競泳のフィードバックの対象にした例はない。本研究課題はこの泳加減速フィードバックシステムを開発することで、泳技能へのフィードバックの影響や効果を検討することが可能にしたと言える。

今後、このシステムを使用したトレーニング実験を実施し、加減速フィードバックのトレーニングへの効果について検討していく。また、開発したシステムは、泳加減速のリアルタイム聴覚フィードバックだけでなく、内蔵したメモリにデータを一旦蓄積することで泳試技後の遅延的フィードバックも可能であることから、この機能を活用することでフィードバック手法の違いについても検討する。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 市川浩、下門洋文、三輪飛寛、馬場康博、下山好充、大庭昌昭、田口正公、慣性センサによる平泳ぎ中の腰部加減速推定、日本水泳・水中スポーツ学会 2011 年次大会論文抄読集、査読無、2011、pp. 112-115

[学会発表] (計1件)

- ① 市川浩、下門洋文、三輪飛寛、馬場康博、下山好充、大庭昌昭、田口正公、慣性センサによる平泳ぎ中の腰部加減速推定、日本水泳・水中スポーツ学会 2011 年次大会、平成 23 年 10 月 15 日、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 浩 (ICHIKAWA HIROSHI)  
福岡大学・スポーツ科学部・助教  
研究者番号：20375463

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：