

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間： 2007 ~ 2008  
 課題番号： 19700496  
 研究課題名 (和文) センサ技術を応用した泳動作ビジュアルフィードバックシステムの開発  
 研究課題名 (英文) Development of a feedback system to visualize swimming motion using sensor technology.  
 研究代表者  
 市川 浩 (Hiroshi ICHIKAWA)  
 独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学研究部・  
 研究員  
 研究者番号： 20375463

## 研究成果の概要：

クロール泳中の身体動作の加速度および角速度をセンサにより計測することで、泳動作をアニメーション化することを目的とした。前腕部を対象とした計測により、センサデータから前腕部の向きが再現できることを確認した一方で、位置推定の精度に課題があることが明らかとなった。アニメーションによる動作の再現は、一般的な水中映像よりも見やすく、あらゆる方向から観察できることから、効果的なフィードバック手法として応用できるものと考えられた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	0	2,200,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	300,000	3,500,000

研究分野：スポーツ工学、バイオメカニクス

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：泳動作情報、視覚フィードバック、センサ技術、動作モデル

## 1. 研究開始当初の背景

スポーツにおける身体運動計測は、ビデオカメラ等で撮影した映像から得る手法によるものが主流であった。しかし映像から必要な情報を定量的に得るためには、撮影時のキャリブレーションや数値化のためのデジタル作業等に多くの労力や時間を要する。さらに水中で行われる競泳競技のトレーニングの場合を考えると、水中環境特有の浸水・浮力・流れ・光の減衰・気泡などが撮影や分析を妨げる要因として作業効率を低下させ

る。このような理由から、運動計測手法としての映像利用は、トレーニング現場において適した手法であるとは言い難い。一方、センサ技術を応用した身体運動計測は即時性に優れ、コンピュータ等による処理・表示が容易であり、計測後短時間でアスリートやコーチにフィードバックすることができることから、トレーニングの現場への応用が可能であると考えられる。運動に関する情報を検知する代表的な加速度センサやジャイロスコープといった慣性センサを用いることで、物

体の運動に関する必要な情報を算出可能であることは以前から提案されている(Morris 1973, Padgaonkar 1975)。

我々はこれまで加速度センサを用いて水泳中の加速度を計測することで、動作定量化の手法としてのセンサ技術の可能性を探ってきた(Ichikawa ら, 1999, 2002, 2003, 2006)。このような計測をトレーニング現場において実用的な身体運動定量化の手法とするためには、アスリートや指導者などの利用者が直感的に理解しやすくするために身体各部位の変位や関節角度を得る必要があると考えられる。クロール泳腕動作モデル(Ichikawa ら, 2005)を加速度計測と組み合わせることで、クロール泳の上肢関節角度を推定する試みでは、肩関節および肘関節の屈曲伸展角度を得ることに成功している(Ichikawa ら, 2006)。この研究の対象が水泳時の腕動作のように三次元的で複雑なヒトの動作であったにも関わらず、単一のセンサから関節角度の算出を成功させたことは、センサ技術を応用したヒトの動作定量化手法の可能性をさらに高めたものと考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究課題はセンサ技術を応用した泳動作分析手法を発展させ、泳動作を視覚的にフィードバックするシステムを提案することを目的とした。

水泳中の計測には、装着しても泳動作やパフォーマンスへの影響を比較的抑えることができる小型慣性センサ(加速度センサ、ジャイロセンサ)を使用する。得られた加速度・角速度情報から、計測部位の姿勢角や変位を推定し、その推定結果を検証する。

推定によって得られた姿勢角や変位情報を使用し、泳動作をアニメーション画像として視覚的に表現するプログラムを作成する。

## 3. 研究の方法

### (1)被験者

日ごろから競泳トレーニングを専門的に実施している男子競泳選手6名(年齢: 20.50 ± 1.40yrs, 競技歴: 8.60 ± 3.44yrs, 身長: 1.77 ± 0.04m, 体重: 67.20 ± 4.09kg)を被験者とした。過去の競技記録から、被験者は50m および 100m 自由形泳のそれぞれについて、24.06 ± 1.11sec, 52.28 ± 1.62sec という非常に高い記録を有していた。競技歴にばらつきがあるものの、いずれの被験者も十分に高いクロール泳技能を有しており、クロール泳動作に関する安定したデータ抽出が行われるものと考えられた。

### (2)実験環境および計測内容

#### ①実験環境

実験は筑波大学屋内プール(50m×7レー

ン)にて実施した。プール側面には水中観察用の窓が設置されている。

#### ②センサによる加速度・角速度計測

クロール泳中の右手関節付近の加速度および角速度をそれぞれ加速度センサとジャイロセンサにより計測した。加速度センサには直交する3軸方向の加速度計測が可能なSTMicroelectronics社製 LIS3L06AL を使用した。ジャイロセンサには、直交する2軸方向の角速度を検知する InvenSense 社製の IDG-300 を2個使用し、これを立体的に配置することで、直交する3軸方向の角速度が計測可能となるようにした。加速度および角速度センサ感知する3つの計測軸が一致するように配置し、水中での計測が可能となるように防水加工を施した。このセンサモジュールを被験者の右前腕部遠位端に固定し、3計測軸が、手掌前額軸(橈骨側を正)、前腕長軸(前腕近位側を正)、手掌矢状軸(手掌側を正)となるように取り付けた。センサモジュールへの電源供給およびセンサモジュールからの信号出力は有線で行い、出力信号はA/D変換器(Interface社製 CBI-320312)を介し、PCにサンプリング周波数200Hzで記録された。得られた加速度・角速度信号に対して、Butterworth特性を有するデジタルフィルタを用い、遮断周波数5Hzによる平滑化処理を行った。

#### ③画像分析による上肢三次元座標の算出

センサ計測による泳動作推定の結果を検証するために、三次元画像分析により被験者上肢の三次元座標の算出を行った。

被験者が試技を行っている際の右側方・右前方・左前方の3か所に水中動作撮影用のカメラを、右前上方・右後上方の2か所に空中動作撮影用のカメラを設置した。被験者が試技を実施する3レーンのスタート側壁から10m地点以降を撮影するように各カメラの画角調整を行った。各カメラのシャッタータイミングは、カメラのGenLock端子に外部同期信号を与えることで同期した。ビデオカウンタ(DKH社製 PH-1540)を介することで、カメラからの出力映像にフィールド番号を重ね合成し、それぞれの映像をデジタルビデオデッキで録画した。ビデオカウンタはカウンタスタート時に外部にトリガ信号を出力することができ、これをセンサ計測に用いているA/D変換器に入力することで、センサ計測-画像撮影間の時刻同期を行った。撮影した映像上において被験者身体の分析対象点の視認性をより良好にするため、白色マーカを被験者の右中指先・右手掌部中央・右手関節・右前腕部中央・右肘関節・右上腕部中央・右肩関節・左肩関節に装着した。

三次元 DLT 法による三次元実座標換算のた

めに、既知の空間座標を得る較正作業を実施した。コントロールポイントを幅 0.8m×長さ 3.45m×高さ 1.7m(水面上 0.7m, 水面下 1.0m)に 50 点 (2×5×5) 配置し、事前に 5 台のカメラで撮影した。この較正用映像と試技を撮影した映像から、動作解析ソフトウェア (DKH 社製 FrameDIAS IV) により上肢各部の三次元座標を算出した。

試技実施前には被験者の上肢に関する計測を行った。計測対象は、右手掌部長・右手掌部中央マーカ-右肘関節間距離・右前腕長・右前腕部中央マーカ-右肘関節間距離・右上腕長・右上腕部中央マーカ-右肩関節間距離・左右両肩峰間距離であった。

### (3) 試技内容

試技はクロール泳 15m とし、泳速度の異なる 3 試技を行った。泳速度は被験者の主観により、Slow (ウォーミングアップ程度)、Middle (長時間継続できる安定した泳速度。持久的トレーニングで用いるペース)、Fast (被験者の技術が最も発揮しやすい高い泳速) をそれぞれ実施するように指示した。試技開始時には、プール壁を蹴らずに、両腕を前方に伸ばした状態で伏し浮き姿勢で一旦静止した後、クロール泳動作を開始することで推進し始めるものとした。角速度データについては、この静止姿勢時の安定した信号を 0 点補正に使用した。右腕入水を基準に完全な 1 ストローク分の上肢動作を 5 台のカメラで撮影できなかった場合には、やり直し試技を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) ストローク時間の算出とデータの自動切り分け

クロール泳を含め、競泳競技で行われる泳動作は全て周期的な運動である。一連の泳動作を何らかの手段で表現する場合であっても、例えばクロール泳であれば、腕の入水時刻を基準に 1 ストロークごとに泳動作を区切って表示することは十分に考えられる。また泳動作を比較する際には 1 ストローク分だけの情報を抽出することもよく行われる。データを処理する上でも、始まりと終わりが存在する方が都合がよく、複数ストロークに渡る場合は処理を繰り返して行えばよい。このようなことから、センサにより計測した加速度・角速度データのみから、右腕入水を基準に 1 ストロークごとデータを切り分けることを試みた。

センサにより計測した加速度・角速度データを周波数解析することで、1 ストロークに要する平均周期を算出し、これを元に腕入水を基準とした 1 ストローク時間の自動抽出を実現した。平均周期算出には、前腕長軸方向の加速度と手掌前額軸周りの角速度の利用

が有効であった。腕入水時刻の推定には、腕が水との衝突によって大きく減速する際に生じたものと考えられる、手掌前額軸方向の加速度の極小値発生時刻を利用した。この結果、センサ計測により 1 ストロークごとのデータを自動で切り分けることが可能となった。この手法は腕が空中から水中へ入水する背泳ぎやバタフライにも有効であると考えられる。平泳ぎの場合も 1 ストローク内の基準箇所を明確にできれば、同様の切り分けが可能であると考えられる。

### (2) センサ信号と姿勢角・並進変位との関係を記述するモデルの構築と泳動作の推定

センサにより計測した加速度と角速度から身体部位の位置や角度を得るために、当初、身体各部位のキネマティックモデルを構築し、これを元に泳動作推定を行うことを想定した。この手法では推定を行う泳動作ごと、部位ごとにモデルを構築する必要があり、効率的ではない。そこで本研究では、センサによって計測する加速度・角速度に対する、計測部位の姿勢角と変位との関係を定式化することで、身体のどの部位にも応用ができる推定法を構築することを目指した。計測する部位の姿勢角をクォータニオン (四元数)

$$\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$$

で表すものとし、その時間微分と計測する角速度ベクトル  $\boldsymbol{\omega}_b$  との間に以下の式の関係があるものとした。

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2} \mathbf{L}^T \boldsymbol{\omega}_b$$

ただし、式中の  $\mathbf{L}^T$  はクォータニオン  $\mathbf{q}$  の成分によって決定する  $4 \times 3$  の行列  $\mathbf{L}$  を転置したものである。

また計測部位上の点の並進変位  $\mathbf{p}$  と計測する加速度ベクトル  $\mathbf{a}_b$  との関係は、以下の式で表わされる。

$$\ddot{\mathbf{p}} = \mathbf{A} \mathbf{a}_b + \mathbf{g}$$

ただし、式中の  $\mathbf{A}$  は計測部位の姿勢を表す回転行列であり、クォータニオン  $\mathbf{q}$  から算出することができる。 $\mathbf{g}$  は重力加速度ベクトルである。

センサによる計測結果である角速度ベクトル  $\boldsymbol{\omega}_b$  と加速度ベクトル  $\mathbf{a}_b$  をこれらの式に与え、積分演算を施すことで右上腕部の姿勢角  $\mathbf{q}$  と並進変位  $\mathbf{p}$  を算出された。この計算結果を三次元画像分析から得られたものと比較したところ、姿勢角についてはほぼ一致することが確認された。一方、並進変位については積分演算時に与える初期姿勢および初期速度が推定結果に大きく影響し、画像分析結果との間に大きな差が発生することが観察された。特に初期速度の影響は大きく、不適切な値を与えた場合、誤差が非常に大きく

なる。加速度および角速度センサのみによる計測では、初期速度の正確な算出はできないことから、より適当な泳動作推定を実現するためには、センサによる加速度・角速度計測だけでなく、付加的な計測が必要であるかもしれない。例えば、泳時間を計測するといった簡易な泳速度計測を行い、この情報をセンサ計測の結果に付加することで、より確実に泳動作の推定が可能になるものと考えられた。

### (3) 泳動作のアニメーション化

計測したセンサデータから推定した姿勢角と並進変位を使用し、コンピュータグラフィックスにより、泳動作をアニメーション化するプログラムを作成した。アニメーションは AVI 形式の動画として保存されることから、WindowsMediaPlayer などの標準的な動画再生ソフトウェアによって再生が可能である。

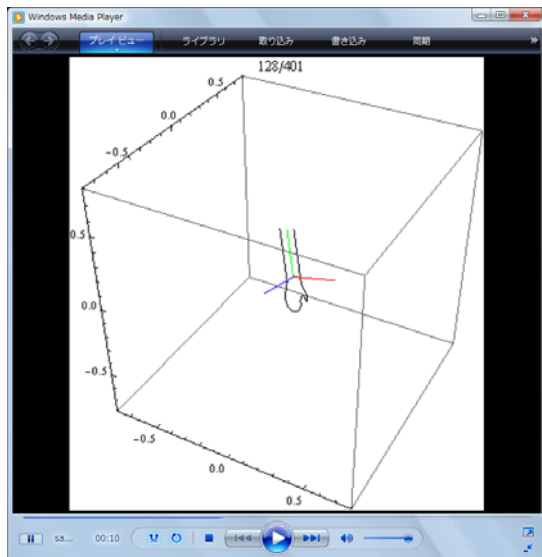


図 Windows Media Player で再生したクロール泳右前腕部のアニメーション動画

今回の計測結果から得られる身体部位は右前腕部となるが、手掌部と前腕部が一体の剛体であると仮定し、両部位を泳者座標系で記述した運動をアニメーションにより再現するものとした。

前節で述べたように、センサから得られた並進変位の推定に誤差があるため、現状では完全な腕動作の再現に至らなかった。その一方で手掌および前腕部の回転運動については視覚的に再現することは十分に可能であった。得られる映像はコンピュータグラフィックスであることから観察視点を自由に移動することが可能である。またセンサ計測したサンプリング周波数である 200Hz の時間分解能で映像が作成される。ビデオカメラによ

る一般的な水中映像の時間分解能は 30fps であることや、また気泡等の影響により手掌部の向きなど細かい動作の視認性は比較的低い。このように、センサ計測から作成されるアニメーション映像は、自由な視点で高い時間分解能で観察可能という利点を持つことから、トレーニングにおける効果的なフィードバック手法として応用できるものと考えられた。

これらの成果は身体の各部位に適用可能であり、下肢や体幹部において同様のセンサ計測を実現することで、最終的には全身のキネマティック情報を推定し、アニメーションによる視覚的なフィードバックが可能となる。

### 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)

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

市川 浩 (ICHIKAWA Hiroshi)

独立行政法人日本スポーツ振興センター

国立スポーツ科学センター・スポーツ科学

研究部・研究員

研究者番号：20375463