

# 伸縮センサを用いた呼吸センシングによる 水泳パフォーマンス解析システムの提案

近藤 亮介<sup>†1</sup>

奈良先端科学技術大学院大学

松田 裕貴<sup>†2</sup>

奈良先端科学技術大学院大学

諏訪 博彦<sup>†3</sup>

奈良先端科学技術大学院大学

安本 慶一<sup>†4</sup>

奈良先端科学技術大学院大学

## 1. はじめに

水泳のパフォーマンスは、泳ぎ手のテクニックに強く関係していることから、スイマーは泳ぎに安定性・再現性を持たせるため、速く泳ぐために自身の泳ぎについて理解を深め、トレーニングにおいて水泳スタイルの欠点を改善することが求められる。水泳のパフォーマンスに関係する要因としては、身体的要因では筋力、柔軟性、心肺機能など、また、技術的要因ではスタート・ターン・レースペース・ストローク・キック・ボディバランス・呼吸動作などが考えられる。一方で、練習の量や質といった間接的な要因も存在する。水泳のパフォーマンス改善のため、古くから水泳の動作解析に関する研究が行われてきた [1, 2].

水泳の動作解析のために用いられる手法として、ビデオベースの手法やセンサベースの手法が提案されている。Seifert らは、ビデオ映像から泳ぎ手のストローク速度やストロークあたりの距離を算出し、呼吸パターンがストロークに与える影響を調べている [3]。Pansiot らは、ゴーグルに取り付けた慣性センサからピッチ角とロール角を導出し、水泳中のストロークや呼吸のタイミング、壁際でのターンといった動作の検出および分類を行っている [4]。Bächlin らは、背中の上および右手首の3か所に取り付けた加速度センサから泳速、ストローク数、ストローク長、回転角などのパラメータを抽出し、モデルを作成してストローク効率を評価、フィードバックを行っている [5].

しかし、個人で行うトレーニングではビデオベースの手法は装置が大掛かりであることが多く、公共プールなどではプライバシーの観点からカメラを用いることは難しい。また、水泳の呼吸活動には水上における吸気運動だけではな

く、水中における呼気運動も含まれるが、センサベースにおける従来の解析手法では、吸気運動の回数やリズムを記録することしかできず、水中で行われる呼気運動の長さや呼気量を記録することはできない。

そこで本研究では、胸腹部装着型の伸縮センサを用いて水泳時の呼吸センシングを行い、水泳パフォーマンスを解析するシステムを提案する (図 1)。伸縮センサの変位から、水泳時の胸腹部伸縮や静電容量の変化を計測し、計測値から水上での吸気運動や水中での呼気運動、呼吸量を推測し、水泳パフォーマンスの評価を行うというものである。これにより、水上・水中のスイマーの呼吸活動の特徴を調べることが可能となるため、水泳パフォーマンスの評価・改善に貢献できると考える。

## 2. 関連研究

本研究では、ユーザが装着したセンサから水泳中の呼吸活動をセンシングして解析を行う。そこで本章では、まず水泳の動作解析に関する研究について触れ、その後、呼吸センシングに関する研究について述べる。

### 2.1. 水泳の動作解析

水泳の動作解析で主に用いられる手法はビデオベースのものである。ビデオ解析では、プール内やプール上部のさまざまな位置に設置されたカメラやスイマーに装着されたマーカを利用し、ストローク数、ストロークのあたりの距離を計算し、腕の角度や体の回転角など、スイマーのスタイルの一般的な特性を評価することができる。Castro らは短距離スイマーに着目し、呼吸の有無および泳ぎのペースが、ストローク長、ストローク速度および泳速に及ぼす影響をマーカを用いたモーションキャプチャによって検証している [6]。Pedersen らは2種類の呼吸動作が短距離スイマーのスプリントに与える影響を無呼吸と比較しており、呼吸頻度の計測に映像データを利用している [7].

近年はセンサベースの手法による動作解析も盛んである。

Proposal for a Swimming Performance Analysis System Using Stretch Sensor-Based Breath Sensing

<sup>†1</sup> RYOSUKE KONDO, Nara Institute of Science and Technology

<sup>†2</sup> YUKI MATSUDA, Nara Institute of Science and Technology

<sup>†3</sup> HIROHIKO SUWA, Nara Institute of Science and Technology

<sup>†4</sup> KEIICHI YASUMOTO, Nara Institute of Science and Technology

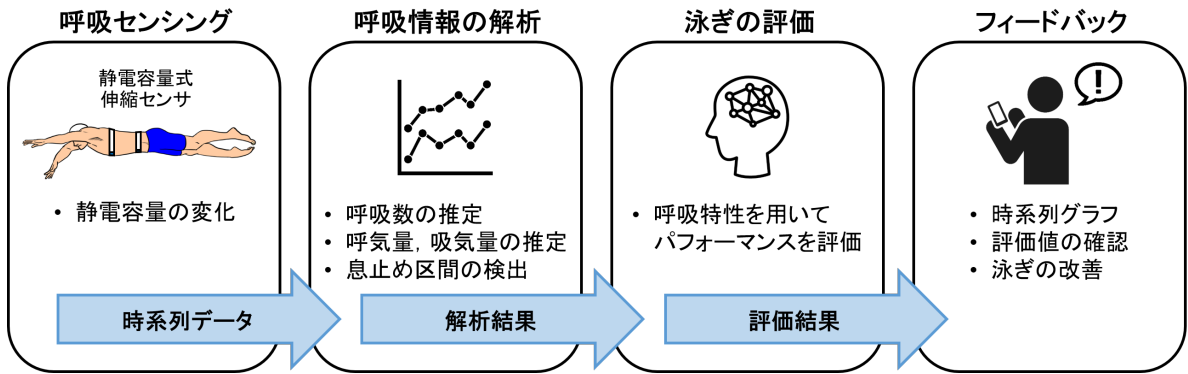


図1 提案システムの概要

センサは小型のモノが多く、スイマーの泳ぎを阻害しにくい利点がある。Wangらは腰椎に装着した慣性センサによるモーションキャプチャから得られたデータを人体力学モデルと組み合わせてスイマーの姿勢推定を行い、ピッチ角およびロール角の推移から被験者の4泳法を解析している[8]。Bardenらは、腰に装着した加速度センサからクロールにおける腰の回転角のピーク値と平均角速度を算出し、呼吸の左右差が腰の回転に与える影響を調べている[9]。

## 2.2. 呼吸と水泳パフォーマンス

Cardelliらは、短距離を高速および長距離を低速で泳ぐで熟練者と非熟練者のグループに対して、クロールのストロークサイクルにおける呼気、吸気、息止めの持続時間をカメラと歯の上部に装着したマイクロホンを用いて測定し、ストローク特性（泳速・ストロークレート・ストローク長）との関係を調べている[10]。グループ間の比較した場合、高速泳では熟練者のグループは非熟練者よりも吸気時間が少なく、呼気時間が多しとしており、相関があるストロークレートと泳速には呼気に比べて吸気の方が関連するとしている。また、低速泳では非熟練者のグループは熟練者よりも息止めの時間が短く、相関があるストローク長と泳速には息止め時間が主に関連するとしている。グループ内で高速泳と低速泳を比較した場合、高速泳では熟練者は吸気時間が短くなり、非熟練者は呼気時間が短く、および息止め時間が長くなるという結果を述べている。

このように、呼吸特性から熟練度や水泳パフォーマンスを予測できる可能性が示唆されている。

## 2.3. 本研究の位置づけ

スイマーの呼吸特性は熟練度や水泳パフォーマンスを評価できる可能性があるにもかかわらず、水泳の動作解析における既存研究では、呼吸動作が他の部位に与える影響を調査している研究は多数あるが、呼吸活動そのものに着目した研究は少ない。水泳の呼吸動作には水上における吸気

運動だけではなく、水中における呼気運動も含まれており、吸気量と呼気量のバランスが浮力にも大きく関わることから、呼吸活動における呼吸量を記録することは有意義であると考えられる。このことから、スイマーの呼吸特性をセンシングして解析・評価を行うことで、トレーニングの効率を向上させることに繋がると考える。しかし、ビデオベースの解析は装置が大掛かりであることや公共の場でのプライバシーの問題があり、また、センサベースの既存手法においては、吸気運動の回数や間隔を記録することしかできず、水中で行われる呼気運動の長さや呼気量を記録することはできない。以上から、本研究では水中・水上での呼吸センシングを実現するために、胸腹部装着型の伸縮センサを用いたシステムを提案する。

## 3. 提案システム

本章では、提案システムの概要について述べる。図1に提案するシステムの概要図を示す。提案システムは1)呼吸センシング部、2)呼吸情報の解析部、3)泳ぎの評価部、4)フィードバック部から構成される。以降ではそれぞれの部分について詳細を述べる。

### 3.1. 呼吸センシング部

スイマーの呼吸をセンシングするため、本研究では呼吸時の胸腹部の動きの変化に注目する。呼吸時の胸腹部の動きを測定するため、伸縮センサを用いる。伸縮センサは計測原理として静電容量式と抵抗式があるが、本システムでは、大高ら[11]の静電容量式伸縮センサを用いた計測事例を参考に、静電容量式の伸縮センサを採用することにする。静電容量式伸縮センサは平行平板コンデンサ構造をしていることから、式1に示すように、センサの静電容量 $C$ は電極間誘電率 $\epsilon$ 、電極間距離 $d$ 、電極面積 $S$ により一意に決まる。伸縮センサは、時系列の胸腹部の周長推移データおよびセンサの静電容量推移データが取得できる。

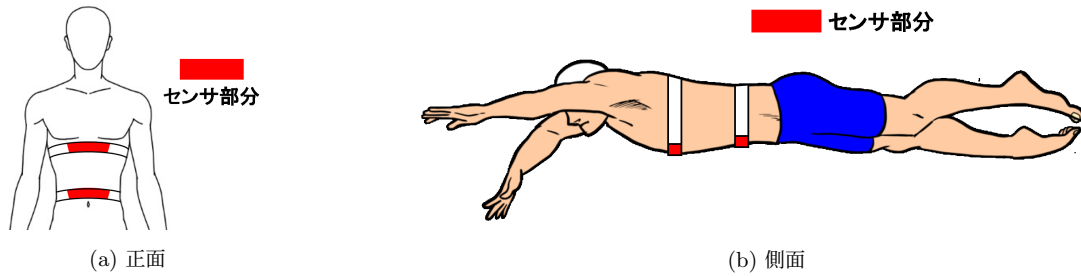


図2 センサ装着のイメージ

$$C = \frac{\epsilon \cdot S}{d} \quad (1)$$

図2に伸縮センサ装着のイメージを示す。人間の肺は、胸骨・肋骨・脊柱で構成される胸壁と、胸部と腹部を隔てる筋肉の膜である横隔膜によって構成される、胸郭の内部に位置する。人間の呼吸は胸式呼吸と腹式呼吸の2種類に分類され、胸式呼吸は肋骨間の筋肉を利用して胸郭を横方向に伸縮させて換気を行うのに対し、腹式呼吸は横隔膜の弛緩による上下移動を利用して縦方向に換気を行う。そのため、胸部と腹部の伸縮による周長推移を計測することで胸式と腹式を含めた呼吸全体を計測できると考える。本システムにおいては、バンドの一部に伸縮センサが組み込まれたものを胸部と腹部の2か所に装着することを想定する。

データの送信については、最終的に本システムはスイマーに対するフィードバックを目的とするため、トレーニングと並行してデータの閲覧や評価結果を確認することを想定すると、取得した時系列データはリアルタイムで出力できることが望ましい。しかし、水中では電波は減衰するため、センサが水中に位置していると出力先との通信は難しい可能性が考えられる。そこで、初期段階ではデータはフラッシュメモリに記録、オフラインでデータを伝送することを想定しつつ、センサが水上に出た際に通信を行う方式などを検討する。

### 3.2. 呼吸情報の解析部

呼吸センシングによって得られた呼吸の時系列データから、呼吸回数や呼吸量、呼吸状態の推定、呼吸頻度の推移などの情報を解析する。特徴量として、胸腹部の周長推移からは呼吸頻度と呼吸量、吸気量が取得でき、静電容量の推移からは息止め区間の検出ができると考える。それぞれの解析方法について以下に詳細を示す。

#### 3.2.1 息止め区間の検出

水泳の呼吸活動の基本は、水上で吸気運動を行い、水中で呼気運動を行うことである。これに加えて、水中では吸気運動を行えないため、息を止めている状態も自然に発生する。ここで式1について、伸縮センサの電極間距離  $d$  を一定とした場合、電極面積  $S$  はセンサの長さに比例すること

から、静電容量  $C$  は吸気運動によってセンサが伸長すると増加し、呼気運動によってセンサが収縮すると減少すると言える。また、息を止めている間は胸腹部の伸縮が止まることから、静電容量の推移は微細な振動を示しながら一定値をとる、または少量の呼気によって緩やかな減少を示すことが考えられる。これより、DTW やコサイン類似度などを用いて息止め区間の検出を行うことで、息止めの時間を定量化できると考える。また、息止め区間の前後の間隔から、息止めを除いた呼吸活動の時間も併せて定量化できる。

#### 3.2.2 呼吸頻度と呼吸量・吸気量

人間の胸腹部は吸気運動で膨張し、呼気運動で収縮することから、センシングによって得られる胸腹部の周長推移は、肺の体積に比例すると考えられる。この周長推移は、陸上での安静時には図3に示すスパイログラムのように正弦波の形を取ると考えられるが、水中においては前述の通り息止めをする必要があるため、図4のようにいびつな形状を取ると考えられる。形状は異なるものの、いずれの場合も呼気・吸気によるサイクルが生じるという点については共通している。ここで、吸気運動を行ってから次に吸気運動を行うまでを1サイクルとした場合、スパイログラムにおける正ピークから次の正ピークまでが1サイクルに相当することから、正ピークを検出し単位時間あたりのピーク数を計算することにより呼吸頻度を導出する。また、1サイクルにおける正ピーク値と次の負ピーク値の差分が呼吸量に、負ピーク値と次の正ピーク値の差分が吸気量に比例することから、胸腹部の周長から胸腹部の体積を推定するアルゴリズムを適用することで呼吸量・吸気量を導出する。

### 3.3. 泳ぎの評価部・フィードバック部

解析部によって得られた呼吸特性の定量データを用いて水泳トレーニングの評価を行い、得られた評価結果を基にスイマーへのフィードバックを行う。

水泳トレーニングの呼吸に対する評価指標としては、呼吸頻度、呼吸リズム、吸気量、吸気量のばらつき、の4つの基準が考えられる。呼吸頻度は、顔を水面に出す行動(泳速を下げる原因となる無駄な動き)の頻度を示す指標であり、

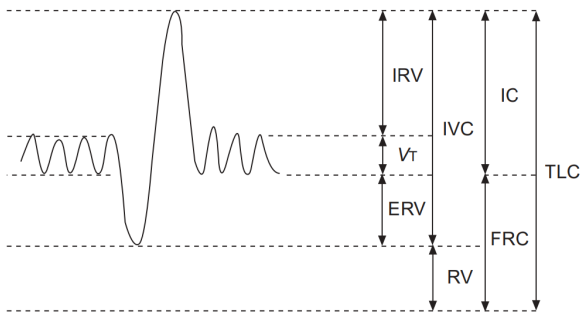


図3 陸上での安静時スパイログラム [12]

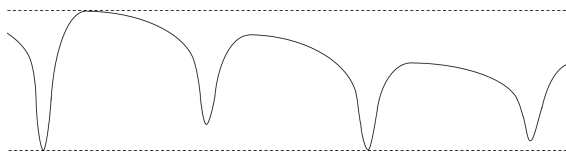


図4 水中でのスパイログラムの想定

例えば短距離泳ではその頻度は低いことが望ましい。呼吸リズムは、呼吸頻度の時系列での変動を示す指標であり、どの程度安定的に呼吸行動が行えているかどうかを評価できる。特に、長距離泳では一定のペースを保つことが望ましいとされる。吸気量は、一度の呼吸でどの程度の体積の空気を体内に取り込むことができたかを示す指標であり、この量が少なくなると疲労が溜まりやすくなることから一定に保つことが望ましいが、時間経過に伴う疲労蓄積によって通常は減少する傾向にある。最後に、吸気量のばらつきは、各呼吸における吸気量の変動を示す指標であり、どの程度安定的に十分な量を吸気出来ているかを評価できる。以上の評価指標の組み合わせによって、スイマーの泳ぎのパフォーマンス評価を行う。この結果を受け、スイマーに対してその結果をフィードバックすることで指標の改善を促す。その方法としては、水中イヤホンや水中 AR ゴーグルを使用し、呼吸の周期に合わせて理想的な吸気リズムを提示することや、各呼吸時にその人のベースラインとなる吸気量との差がどの程度かを提示することで、聴覚的・視覚的にリアルタイムの改善を支援できると考える。

#### 4. おわりに

本稿では、胸部装着型の伸縮センサを用いた水泳時の呼吸センシングから水泳パフォーマンスを解析するシステムを提案した。伸縮センサの変位から、水泳時の胸腹部伸縮や静電容量の変化を計測し、計測値から水上での吸気運動や水中での呼気運動、呼吸量を推測し、水泳パフォーマンスの評価を行うというものである。今後の展望としては、胸部周囲径の変化量から呼吸頻度や呼吸量を導出するアルゴリズムの精査を行い、解析システムの実装を考えている。ま

た、心拍数やストローク特性といった呼吸特性以外の指標を組み合わせた評価も併せて検討する。

#### 参考文献

- [1] Craig Jr, A. B. and Pendergast, D. R.: Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming., *Medicine and science in sports*, Vol. 11, No. 3, pp. 278–283 (1979).
- [2] Chollet, D., Chabies, S. and Chatard, J.: A new index of coordination for the crawl: description and usefulness, *International journal of sports medicine*, Vol. 21, No. 01, pp. 54–59 (2000).
- [3] Seifert, L., Chehensse, A., Tourny-Chollet, C., Lemaitre, F. and Chollet, D.: Effect of breathing pattern on arm coordination symmetry in front crawl, *The Journal of Strength & Conditioning Research*, Vol. 22, No. 5, pp. 1670–1676 (2008).
- [4] Pansiot, J., Lo, B. and Yang, G.-Z.: Swimming stroke kinematic analysis with BSN, *2010 International Conference on Body Sensor Networks*, IEEE, pp. 153–158 (2010).
- [5] Bächlin, M., Förster, K. and Tröster, G.: SwimMaster: a wearable assistant for swimmer, *Proceedings of the 11th international conference on Ubiquitous computing*, pp. 215–224 (2009).
- [6] Castro, F. and Guimaraes, A.: Front crawl kinematic: breathing and pace acute effects, *Portuguese Journal of Sport Sciences*, Vol. 6, pp. 26–28 (2006).
- [7] Pedersen, T. and Kjendlie, P.-L.: The effect of the breathing action on velocity in front crawl sprinting, *Portuguese Journal of Sport Science*, Vol. 6, No. supl 2, pp. 75–77 (2006).
- [8] Wang, Z., Wang, J., Zhao, H., Qiu, S., Li, J., Gao, F. and Shi, X.: Using wearable sensors to capture posture of the human lumbar spine in competitive swimming, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 49, No. 2, pp. 194–205 (2019).
- [9] Barden, J. M. and Barber, M. V.: The Effect of Breathing Laterality on Hip Roll Kinematics in Submaximal Front Crawl Swimming, *Sensors*, Vol. 22, No. 6, p. 2324 (2022).
- [10] Cardelli, C., Lerda, R. and Chollet, D.: Analysis of breathing in the crawl as a function of skill and stroke characteristics, *Perceptual and motor skills*, Vol. 90, No. 3, pp. 979–987 (2000).
- [11] 大高秀夫: 伸縮性ひずみセンサの開発と応用展開, *日本ゴム協会誌*, Vol. 91, No. 2, pp. 41–48 (2018).
- [12] Wanger, J., Clausen, J., Coates, A., Pedersen, O., Brusasco, V., Burgos, F., Casaburi, R., Crapo, R., Enright, P., Van Der Grinten, C. et al.: Standardisation of the Measurement of Lung Volumes, *European Respiratory Journal*, Vol. 26, No. 3, pp. 511–522 (2005).