

加速度情報を用いたリアルタイム競泳コーチングシステムの開発

生産システム工学専攻 奥浦 航

Development of Real-time Swimmer Coaching System using Accelerator Information

Wataru Okuura

Advanced Course of Production System Engineering, Toba National College of Maritime Technology

Abstract

The objective of this research is to develop a system which enables athlete swimmers and coaches to easily understand the swimming motion in their training. In this system, a tri-axial acceleration sensing unit is worn by the swimmer. And that sensing unit continue to send acceleration value in real-time from underwater. To evaluate the sensing unit, four students wore the device at the waist and carried out 25-m breaststroke. Result of evaluation experiment, It became clear that it was relevant to between a swimming motion and acceleration. And although the deficit of some data occurred, the validity of underwater wireless communications was able to be shown. In this paper, the system structure, analysis method using acceleration of swimming motion, verification of wireless communication in the underwater are described.

Keywords: Swimming Motion, Acceleration, Underwater Wireless Communication, Sports Engineering

1. はじめに

近年における競泳トレーニングの現場では、単に泳者が練習メニューをこなすだけでなく、泳者の泳動作（泳ぎのフォーム）を正確かつ詳細に把握し、より速く泳ぐための泳法を分析することが重要視されている。

上記の要求を満たすシステムとして、画像による動作解析システムが開発されている[1]が、装置が高価かつ大がかり（プール全体にビデオカメラを設置する必要がある）であるため日常的に使用することは困難である。そこで、近年では泳者の体に装着して泳動作の計測を行うウェアラブルタイプの泳動作解析システムが開発・研究されている[2][3]。しかし、これらのシステムは通常泳者が泳ぎ終わった後に泳動作の分析を行うものであり、リアルタイム性（泳者が泳いでいる最中にコーチングを実施）に欠けてしまうといった問題点が挙げられている。

そこで、本研究室ではこれらの問題を解決するシステムとして加速度情報を用いたリアルタイム競泳コーチングシステムを考案した。考案したシステムは、泳者の体の一部（腰部）に取り付けられた加速度測定装置から加速度値を無線通信によりリアルタイムに取得し、PCにおいて分析、そして選手に分析内容をフィードバックするものであり、簡便性・リアルタイム性を期待することができる。

本特別研究では、考案したシステムにおいて基礎的な部分にあたる加速度測定装置の開発、水中における無線通信の可通信性の検証と改善、加速度と泳動作の

関連性の検証を行った。

2. システムの構成

考案したシステムは泳者用装置（測定装置、音声受信装置）とコーチ用装置（加速度値受信・分析用 PC、音声送信装置）から構成される。

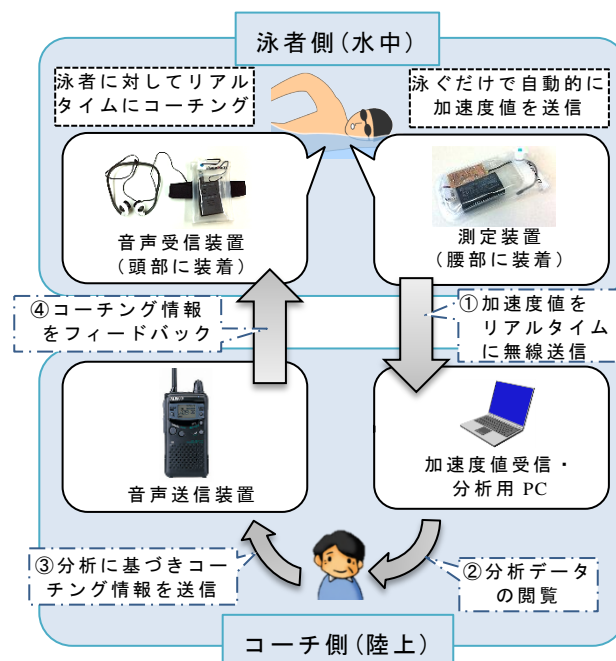


図1 システムの構成と流れ

本システムでは、泳者は測定装置を腰部に、音声受

信装置を頭部に装着した状態で通常の練習と同様に泳ぐ。この時、測定装置からは泳者の泳ぎのデータ（加速度情報）が陸上の PC に対してリアルタイムに無線送信されているため、陸上のコーチは泳者のリアルタイムな加速度情報を閲覧・分析することができる。そして、分析した情報を元にコーチング内容を音声送信装置から音声受信装置に対して送信することにより、泳者に対するリアルタイムなフィードバックを実現することができる。

本稿では主に測定装置に関する部分（無線通信、送信するデータの構成など）と、取得した加速度の分析方法について述べる。

3. 測定装置

3.1. 測定装置の概要

今回開発した測定装置は加速度センサ、無線通信モジュール、データ制御用マイコン、バッテリーより構成され、バッテリーの電源を投入するだけで PC に対して加速度情報をリアルタイムに送信し続ける機能を有する。この測定装置では加速度値を最大で 60 データ/秒の間隔で送信することができる。また、測定装置の寸法は縦約 190mm、横約 110mm、高さ約 20mm となっている。

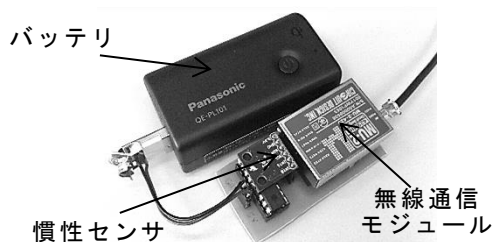


図 2 測定装置

上記の測定装置を防水ケース（DiCAPac α WP-MS11, 3m 防水）に封入し、泳者の腰部に取り付けて泳ぐことにより、泳動作の加速度を陸上の PC においてリアルタイムに取得し続けることが可能である。



図 3 防水ケースに封入した測定装置



図 4 測定装置を泳者の腰部に取り付けた様子

加速度の測定には、直交する 3 軸方向の加速度と 3 軸まわりの角速度を測定可能な慣性センサ（IMU 6Degreesof Freedom[4]）を用いており、±16g の測定範

囲における加速度の計測が可能である。



図 5 慣性センサ（IMU 6DegreesofFreedom）

また、測定装置には無接点充電方式のバッテリー（QE-PL101）を用いたため、図 3 に示す測定装置を防水ケースに封入した状態においても充電を行うことができる。

3.2. 無線通信モジュール

一般的に水中における無線通信の到達距離は無線周波数に依存し、無線周波数が高いほど電波減衰量が大きくなる（図 6）。よって無線周波数が低ければ電波減衰量が小さく、無線通信を行える可能性があると考えられる。

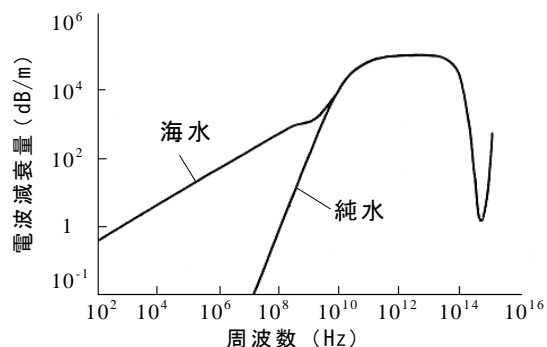


図 6 水中を伝搬する電波の減衰特性（参考文献[5]より引用）

そこで、測定装置における無線通信モジュールには無線周波数ができるだけ低く、使用にあたり免許が不要な特定小電力シリアルデータ伝送無線モデム MU-2-429[6]を採用した（図 7）。この無線通信モジュールの仕様を表 1 に示す。また、この通信モジュールを水中（プールの水質は純水に近いと仮定）で使用した場合、電波減衰量は図 6 より約 100dB/m となる。



図 7 無線通信機（MU-2-429）

表 1 MU-2-429 の仕様

無線周波数帯	400MHz 帯 (429MHz)
空中線電力	10mW
受信強度	-110dBm
最大データ伝送速度	9600bps

3.3. 測定装置から送信するデータの構成

測定装置では、1 回のデータ送信で 3 軸の加速度と 3 軸の角速度を送信することが可能である（本稿における各実験においては角速度による各軸の補正は行わないが、将来の拡張性として角速度を取得できる仕様とした）。測定装置から送信するデータは表 2 のように通信制御用先頭文字列、加速度値、角速度値、通信制御用末尾文字列から構成し、1 つのデータのデータ長は 20Byte となっている。また、無線通信モジュールのデータ通信速度（9600bps）より 1 秒間に最大 60 個のデータを送信することが可能である。

表 2 測定装置から送信するデータの構成

データ項目	データ長
通信制御用先頭文字列	6Byte
加速度値（各軸 2Byte）	6Byte
角速度値（各軸 2Byte）	6Byte
通信制御用末尾文字列	2Byte

3.4. 加速度値閲覧ソフトウェア

加速度値の閲覧には我々の研究室で開発した加速度値閲覧ソフトウェアを用いる。このソフトウェアでは加速度値のリアルタイム閲覧機能の他にもビデオカメラの同時録画機能[7]も実装した。ビデオカメラの同時録画機能を実装することにより、取得した加速度がどのような泳動作に関連性を持つかの検証を行うことができる。

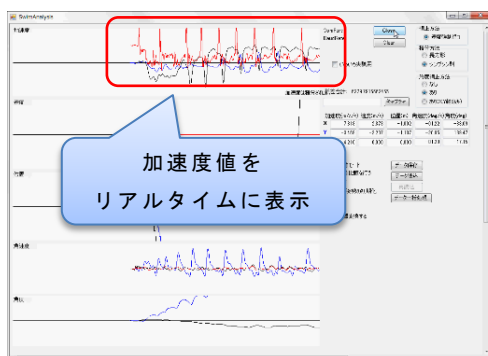


図 8 加速度値閲覧ソフトウェア

4. 評価実験

4.1. 評価実験の概要

測定装置を水中で使用した際、電波減衰によりどの

程度のデータ損失が生じるのかを評価するための実験として『水中での無線通信における可通信性の検証実験』を行った。また、測定装置から得られた加速度値と泳動作の間に関連性があるのかを検証するための実験として『加速度と泳動作の関連性の検証実験』を行った。

どちらの実験も本校の水泳部の学生 1~4 人を被験者とし、水深約 1.5m、距離 25m のプールにて実施した。この実験ではデータ受信用 PC をプールサイドの中心位置（12.5m）から約 1m 離れた箇所に設置した。図 9 にプールにおける被験者とデータ受信用 PC の位置関係を示す。

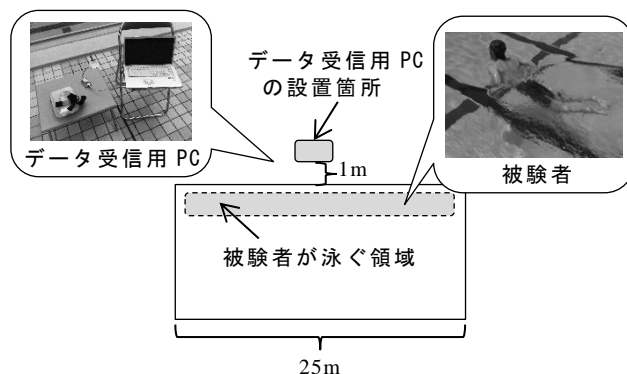


図 9 実験に使用するプールの環境

4.2. 水中での無線通信における可通信性の検証実験

この実験では、被験者の腰部に測定装置を取り付けた状態で 25m の平泳ぎ（スタートは飛び込みではなく水中から行う）を実施し、その間に測定装置が送信したデータ個数と陸上の PC が受信したデータ個数を(1)式を用いて比較することにより、水中においてどの程度データ損失が生じるのか検証する。更に、送信するデータはデータ毎に番号付けを行うため、欠けている番号を見ることにより、どのようなタイミングでデータの欠損が生じるかも同時に検証する。実験は被験者の学生 1 名に対して 5 回行い、測定装置のデータ送信速度は 60 データ/秒とした。

$$\text{データ到達率 [\%]} = \frac{\text{陸上の PC が受信したデータ個数}}{\text{測定装置が送信したデータ個数}} \times 100 \quad (1)$$

4.3. 実験結果と考察

各試行におけるタイム、測定装置が送信したデータ個数、陸上の PC が受信したデータ個数、データ到達率の関係を表 3 に示す。

表 3 可通信性の検証実験結果

実験回数	タイム [秒]	測定装置が送信したデータ個数 [個]	陸上 PC が受信したデータ個数 [個]	データ到達率 [%]
1	26.02	1536	468	30.5
2	25.84	1379	449	32.6
3	24.25	1478	482	32.6
4	24.84	1488	510	34.3
5	23.31	1346	463	34.4

上記の結果より、データ到達率はどの実験回数においても約 30%であることが分かる。これは水中の測定装置から送信されたデータの約 70%が陸上の PC に到達する前に損失してしまうことを意味する。

また、測定装置が送信したデータがどのようなタイミングで損失するかを計測した結果の一例を図 10 に示す（この一例は実験回数が 3 回目のものであるが、他の試行においてもほぼ同様の結果が得られた）。図の横軸は測定装置が送信したデータの番号を表しており、縦軸はその送信したデータが受信された場合は 1、途中で電波減衰等の理由で受信されなかった場合は 0 を表している。



図 10 データが損失するタイミングの計測結果

上記の結果より、データの損失は泳動作の最中に断続的に生じていることが分かる。また、図 10 におけるデータ個数が 1～101 にあたる部分においてデータが受信できていないのは、データの計測開始時から泳動作開始時までの間において、測定装置が連続的に水中に浸かっていたことが理由と考えられる。

4.4. 加速度と泳動作の関連性の検証実験

この評価実験では、被験者の腰部に測定装置を取り付けた状態で 25m の平泳ぎ（スタートは飛び込みではなく水中から行う）を実施し、同時に泳動作の様子をビデオカメラにより撮影する。その後、加速度と泳動作の様子を比較することにより、得られた加速度と泳動作が関連性を持つかを検証する。

この検証における加速度の測定軸は被験者がプールに伏し浮きをした際の逆進行方向、右側方、鉛直上方をそれぞれ x 軸、y 軸、z 軸の正方向とする（図 11）。実験は平泳ぎを専門種目とする者 2 名と平泳ぎを専門種目としない者 2 名に対して各 5 回づつ行い、測定装置のデータ送信速度は 60 データ/秒とした。

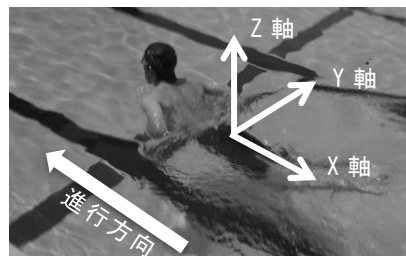


図 11 加速度の計測軸

4.5. 実験結果

各被験者の実験回数とタイムの関係を表 4 に示す。この実験では、平泳ぎを専門種目とする被験者 A、B が、平泳ぎを専門種目としない被験者 C、D より速く泳ぐ結果となった。

表 4 各被験者とタイムの関係

被験者	実験回数	タイム [秒]	受信データ個数
A (平泳ぎを専門種目とする)	1	22.10	451
	2	23.13	522
	3	23.30	615
	4	24.06	616
B (平泳ぎを専門種目とする)	1	25.27	543
	2	24.90	509
	3	25.20	565
	4	25.30	654
C (平泳ぎを専門種目としない)	1	26.50	608
	2	26.84	566
	3	27.30	586
	4	27.46	588
D (平泳ぎを専門種目としない)	1	38.73	858
	2	40.64	882
	3	41.80	975
	4	40.63	883

また、この実験で得られた加速度の一例として被験者 A の実験回数 1 における加速度（実験において最もタイムが短い例）を図 12 に、被験者 D の実験回数 4 における加速度（実験において最もタイムが長い例）を図 13 に示す。

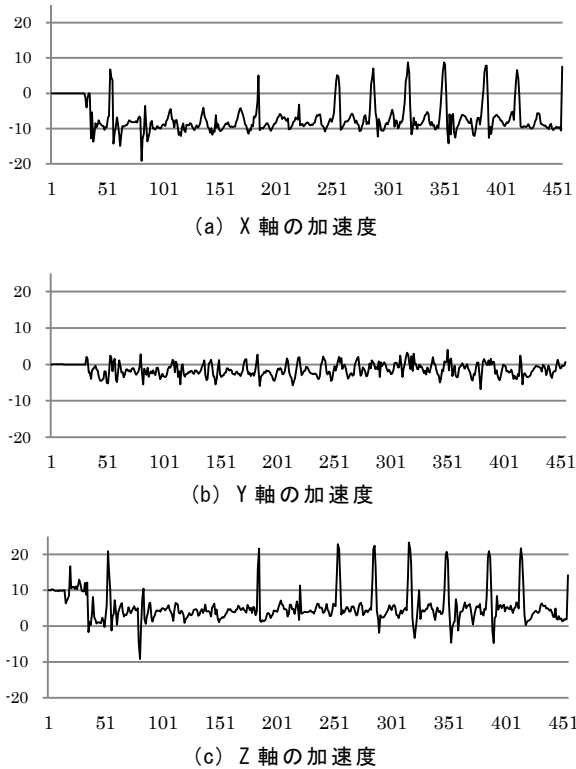


図 12 被験者 A の実験回数 1 における各加速度
(縦軸：加速度 [m/s²] 横軸：データ番号)

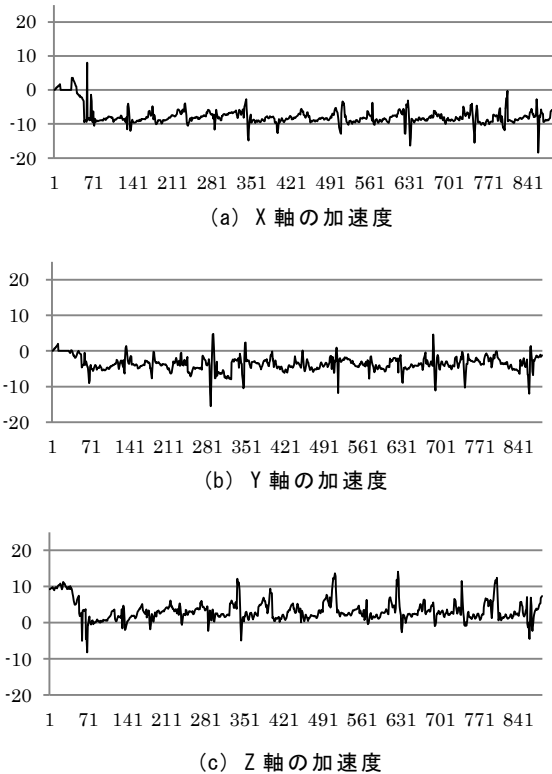


図 13 被験者 D の実験回数 4 における各加速度
(縦軸：加速度 [m/s²] 横軸：データ番号)

4.6. 被験者 A における泳動作と加速度の関連性

両被験者の泳動作は図 12,13 において加速度の周期的な変化が見られる X 軸 (逆進行方向) と Z 軸 (鉛直上方) に関連性があると考えられる。

ここで、更に細かく泳動作と加速度の関連性を調べるため、1 ストロークにおける加速度の遷移を考える。図 14 に示した波形は被験者 A の X 軸と Y 軸の加速度から 1 ストローク分抜粋したもの (データ番号が 287 ~ 319 のもの) である。図 14 の①の範囲では被験者 A は図 15(a)の泳動作を行っており、②・③の範囲においても同様に図 15(b), 図 15(c)の泳動作を行っている。

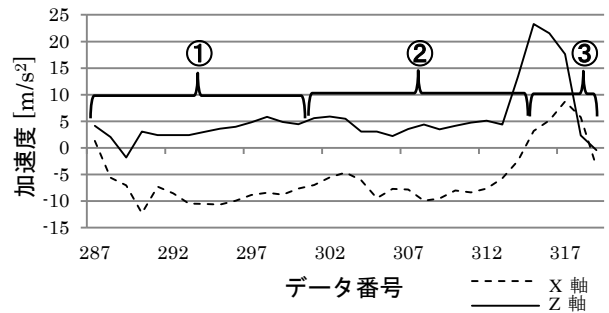


図 14 被験者 A のストロークにおける加速度の遷移

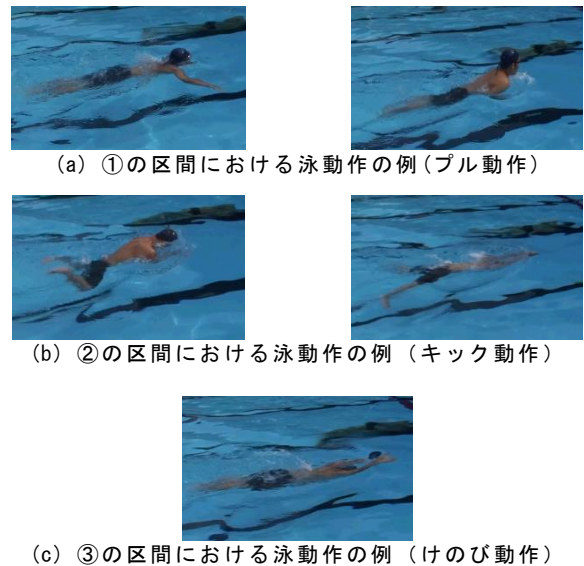


図 15 被験者 A の 1 ストロークにおける泳動作の遷移

平泳ぎは一般的にプル (掻き) 動作, キック (蹴り) 動作, けのび動作を繰り返すことにより前進する泳法である。

①の区間ではプル動作を行っており、手で水を掻く動作が含まれる。水を掻いた後の呼吸動作が前進する際の抵抗となるため、加速度は Z 軸 (鉛直上方) と X 軸 (逆進行方向) の正方向に対して増加傾向にある。

②の区間ではキック動作を行っており、足で水を蹴る動作が含まれる。キック動作は図 15(b)左のよう

な水を蹴る前の段階と、図 15(b)右のような水を蹴った後の段階から構成される。水を蹴る前の段階は腰部に変化を与える動作ではないため、加速度値には特に変化は見られない。しかし、水を蹴った後の段階では腰部が大きく変化する動作（足を蹴り出す際に腰部をうねらせて推進力を得る）を行うので、加速度は Z 軸の正方向（鉛直上方）と X 軸の正方向（逆進行方向）に対して一時的に生じると考えられる。

③の区間では、けのび動作を行っており、キック動作で得た推進力により水中を「伸び」のフォームで前進する。よって、加速度は Z 軸の負方向（鉛直下方）と X 軸の負方向（進行方向）に生じると考えられる。

4.7. 被験者 D における泳動作と加速度の関連性

次に、今回の実験において最もタイムが長かった被験者 D の 1 ストロークにおける加速度の遷移を考える。図 16 に示した波形は被験者 A の加速度から 1 ストローク分抜粋したもの（データ番号 480～541 のもの）である。図 16 の①の範囲では被験者 A は図 17(a)の泳動作を、②・③の範囲においても同様に図 17(b)、図 17(c)の泳動作を行っている。

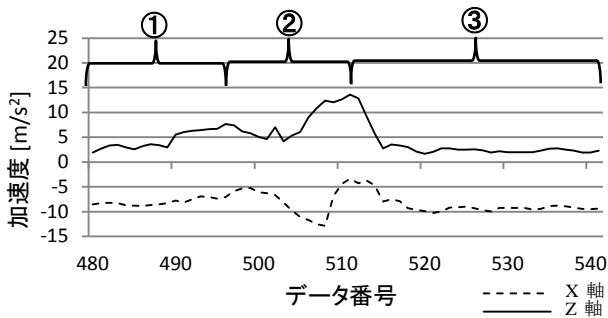
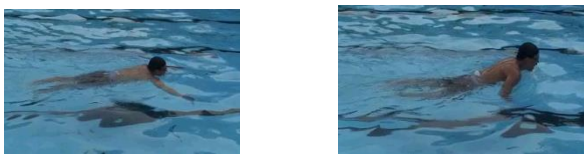
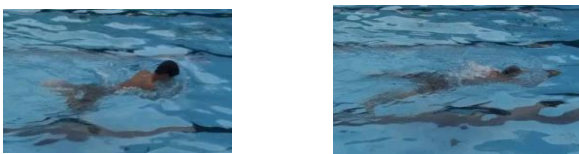


図 16 被験者 D のストロークにおける加速度の遷移



(a) ①の区間における泳動作の例（プル動作）



(b) ②の区間における泳動作の例（キック動作）



(c) ③の区間における泳動作の例（けのび動作）

図 17 被験者 D の 1 ストロークにおける泳動作の遷移

図 16 における加速度の波形は図 14 の波形と差異はあるものの、波形の遷移の傾向としては被験者 A のものとおおよそ同一と考えることができる（②の後半と③において加速度が大きく変化するため）。

4.8. 加速度がタイムに与える影響についての考察

これまでに示した通り、被験者 A と D のタイムには大きな差があるが、1 ストローク全体における加速度の遷移は互いにおおよそ同一の傾向を持つと考えられる。しかし、1 ストロークを各動作で区切って加速度を見た場合、その範囲内における加速度の傾向には互いに差異が見られ、その差異がタイム差を生じさせる要因になると考えられる。

図 14 と図 16 の加速度波形より被験者 A と D においてタイム差が生じる要因として、

- (1) プル動作の所要時間の違い
- (2) キック動作時の加速度値の違い
- (3) けのび動作の所要時間の違い

といった項目が考えられる。以下にこれらの項目について述べる。

(1) については、被験者 A のプル動作は 13 データ分に渡って行われているが、被験者 D では 18 データ分に渡って行われている。そして、どちらの被験者においてもプル動作中は X 軸の加速度が正方向（逆進行方向）に対して徐々に増大する傾向がある。よって、プル動作の所要時間が長くなるほど水からの抵抗を受ける（X 軸の加速度が正方向に増大する）時間が長くなり減速に繋がる可能性があると考えられる。

(2) については、キック動作には腰部をうねらせて推進力を得る動作が含まれており、急激な加速度の変化が生じる。被験者 A ではこの動作にあたる部分の Z 軸の加速度値が一時的に約 22m/s^2 まで上昇しているが、被験者 D では約 12m/s^2 までしか上昇していない。これより、加速度値がより大きく上昇している被験者 A の方が腰部をうねらせる動作を確実に行っており、より大きな推進力を得ていると考えられる。

(3) については、被験者 A のけのび動作は 5 データ分に渡って行われているが、被験者 D においては 29 データ分に渡って行われている。また、被験者 A はキック動作より得られた推進力が減少した（キック動作による急激な加速度の変化が収束した）直後に次のストロークを始めているが、被験者 D においては推進力が減少した後もしばらくけのび動作を行なっている。これより、推進力が減少した後にけのび動作を続けることは減速に繋がる可能性があると考えられる。

5. データ到達率の改善

今回行った各実験により、開発した測定装置では泳動作中のおおよその加速度情報を取得できることが確認できた。しかし、断続的に生じるデータ損失のため、例えば図 12 の前半部（データ番号が 80~190 個あたりの箇所）のように明らかにストロークを行なっていると思われる箇所でも特徴的な加速度情報を得られない場合がある。そこで、データの通信において誤り訂正符号を用い、少しでもデータ損失を少なくすることにより、データ到達率の改善を試みる。

測定装置の無線通信モジュール（MU-2-429）には誤り訂正機能が搭載されているが、今回行った各実験においては本機能を用いていない。また、無線通信モジュールの誤り訂正機能を用いた場合、送信するデータのデータ長も表 5 に示す通り大きくなる。そこで、本機能を用いた際にどの程度データ到達率が改善されるかの実験を行う。

表 5 測定装置から送信するデータの構成

データ項目	データ長
通信制御用先頭文字列	6Byte
ユーザーデータ領域 (加速度値・角速度値含む)	32Byte
誤り訂正符号	8Byte
通信制御用末尾文字列	2Byte

実験方法としては、測定装置を先端に装着したパイプをプールの各水深（0cm~100cm）に沈め（図 18）、誤り訂正があり／なしの場合における到達データ個数を計測する（各水深において 30 秒間の計測を 3 回行い、その平均を到達データの個数とする）。その後、(1) 式によってデータ到達率の算出を行う。



図 18 実験環境

実験結果として、表 6 に示すデータ到達率が得られた。誤り訂正なしの場合、データ到達率は約 30%を示しているが、誤り訂正ありの場合は約 40%を示している。このことより、誤り訂正がある場合の方がデータ到達率は向上することが分かる。しかし、到達データ数は誤り訂正なしの場合と比較して約半分程度になってしまうため、現状では誤り訂正を行わないのが適切と考えられる。

表 6 誤り訂正の有無によるデータ到達率の変化

水深	誤り訂正なし (60 データ/秒)		誤り訂正あり (25 データ/秒)	
	到達データの 平均値	データ 到達率 [%]	到達データの 平均値	データ 到達率 [%]
10cm	618	34.3	321	42.8
20cm	617	34.2	325	43.3
30cm	538	29.9	329	43.9
40cm	619	34.4	323	43.1
50cm	602	33.4	327	43.6
60cm	622	34.6	257	34.3
70cm	611	34.0	319	42.5
80cm	544	30.2	326	43.5
90cm	616	34.2	323	43.1
100cm	425	23.6	321	42.8

6. おわりに

今回、考案したシステムにおいて基礎的な部分にあたる加速度測定装置の開発、水中における無線通信の可通信性の検証と改善、加速度と泳動作の関連性の検証を行った。水中における無線通信では、電波減衰によるデータ損失が少なからず生じ、最終的に受信データ数は送信データ数の約 30%となる。しかし、約 30%分の加速度情報であっても加速度と泳動作の関連性を示すことができたため、考案したリアルタイム競泳コーチングシステムに十分利用可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 「ネイチャー 浜松ホトニクス」
<<http://jp.hamamatsu.com/rd/publication/nature/japanese1001.html>> (2013/1/13)
- [2] 仰木裕嗣, 金田晃一, 高倉昭: “胸部加速度からの泳タイム推定”, 日本水泳・水中運動学会 2012 年次大会講演論文集, pp40-43, (2012/10/20)
- [3] 中島求, 仰木裕嗣, 秋山絵理, 風見直亮: “手首装着型加速度・角速度センサを用いた競泳トレーニング用泳動作表示システムの開発”, ジョイント・シンポジウム講演論文集, pp200-203, (2007/11/13)
- [4] 「IMU Digital Combo Board - 6 Degrees of Freedom ITG3200/ADXL345」<<https://www.sparkfun.com/products/10121>> (2013/01/24)
- [5] 谷口慶治 (2006) 『アンテナと電波伝搬』共立出版 p189
- [6] 「429MHz 帯特定小電力シリアルデータ伝送無線モデム MU-2 製品情報 - サーマットデザイン:」<<http://www.circuitdesign.co.jp/jp/products/products2/mu2/index1.asp>> (2013/01/24)
- [7] 奥浦航, 江崎修央: “無線通信を利用した映像同時録画システムと音楽配信システムの開発”, 鳥羽商船高専特別研究中間発表予稿集, (2011/11/21)