

和歌浦湾におけるセーリング競技振興のための セーリング競技航跡情報基盤システムの実証評価

塚田 晃司^{1,a)} 満田 成紀¹ 廣崎 清司²

受付日 2013年10月23日, 採録日 2014年4月4日

概要: 和歌山県北部に位置する和歌浦湾は、全国有数のマリンスポーツに適した地の利であり、セーリング競技がさかんである。セーリング競技では、これまでは競技者育成のために指導者の過去の経験に基づく主観的な指導方法がとられることが多いが、競技艇の速度など各種センサ情報による客観的データに基づく指導の取り組みもある。また、セーリング競技は陸上から数 km 離れた海上に設定されたレース海面において実施され、観戦者は陸上から観戦せざるを得ず、競技の状況を把握するのが難しい。そこで、これらの課題を解決し、セーリング競技振興のために、地域の NPO 法人、民間企業、および、大学が連携して、(1) 競技者の育成・強化のためにセンサデータなどの客観的データを活かす、(2) 観戦者に競技艇の平面的位置関係を分かりやすく提示する、の 2 点を目標に研究開発に取り組み、セーリング競技の航跡情報基盤システムのプロトタイプシステムを構築した。本論文では、このプロトタイプシステムと国際・国内レースで試用した結果について報告する。

キーワード：セーリング競技, 航跡記録, センサネットワーク

Experimental Evaluation of A Sail Tracking System for Sail Racing Promotion in Wakaura Bay

KOJI TSUKADA^{1,a)} NARUKI MITSUDA¹ SEIJI HIROSAKI²

Received: October 23, 2013, Accepted: April 4, 2014

Abstract: Wakaura Bay in the northern part of Wakayama Prefecture is one of the best places for marine sports, especially sail racing, in Japan. Many sail racing trainers coach sailing athletes in subjective methods based on trainers' personal experiences in the past races. On the other hand, some are trying to coach in objective methods based on sensor data such as sailboat speed and direction with use of information technologies. Most sail racings are held on racing areas several kilometers away from land, so audiences have to watch the racings from land, and it is difficult for them to get a grasp of racing situations such as positional relation among sailboats. In order to resolve the above issues, an NPO, an industry company, and a university in local area of Wakaura Bay have been working cooperatively to achieve following two goals: (1) To make effective use of objective data from various sensors toward sail racing athlete development, (2) To show ongoing racing situation for audiences in a manner to understand positional relation among sailboats easily. As the result of our research and development, we have developed a prototype of a sail tracking system. This paper reports the prototype system, and the results of trial use in some international and domestic sail racings in Wakaura Bay.

Keywords: sail racing, sail tracking system, wireless sensor network

1. はじめに

和歌山県北部に位置する和歌浦湾は、その立地から全国有数のマリンスポーツに適した地の利であり、以前からセーリング競技がさかんである。和歌浦湾に面した和歌山マリーナ周辺海域では、セーリング競技の国内、および、

¹ 和歌山大学システム工学部
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University,
Wakayama 640-8510, Japan

² 株式会社宮崎エンジニアリング
Miyazaki Engineering Co., Ltd., Wakayama 640-8482, Japan

^{a)} ktsukada@sys.wakayama-u.ac.jp

国際競技大会が毎年多数開催されている。2008年5月には、オリンピック選手強化を目的としたトップ選手トレーニング施設であるナショナルトレーニングセンターの競技別強化拠点（セーリング競技）にも指定された [1]。

各種スポーツ競技では、これまでは競技者育成のために指導者の経験に基づく主観的な指導方法がとられることが多かった。しかし、近年、ITの普及にともない、競技者育成のために各種センサ情報など客観的データに基づく指導方法の研究開発、実践研究が数多く取り組まれている [2], [3], [4], [5]。セーリング競技においても、ITを活用した研究が行われている [6], [7], [8], [9], [10]。しかし、まだ広く普及している段階ではない。和歌山マリーナのナショナルトレーニングセンターにおいても、競技者強化をすすめていくために、どのように取り組んでいけばよいか検討課題となっている。

一方、セーリング競技は、他の多くの競技と異なり、競技を実施している場所と、観戦者が観戦可能な場所との距離が非常に離れているという特徴がある。一般にセーリング競技は、陸上から数 km 離れた海上に設定されたレース海面において実施される。そして、そのレース海面には競技関係者以外は近づくことができないため、観戦者は、陸上から観戦せざるを得ない。その際は、双眼鏡や望遠レンズを装着したビデオカメラなどを使用して、遠方のレース海面上の競技艇を眺めることになる。水平方向から観戦することしかできないため、競技の順位に関わる競技艇どうしの前後左右の相対的な位置関係の把握が非常に困難である。そのため、他の多くの競技と比べて迫力に乏しく、観戦者人口をいかに増加させていくかが課題となっている。

そこで2008年より、NPO法人和歌山セーリングクラブ、株式会社宮崎エンジニアリング、および、和歌山大学が連携して、(1) 競技者の育成・強化のためにセンサデータなどの客観的データを活かす、(2) 観戦者に競技艇の平面的位置関係を分かりやすく提示する、の2点を目標とした研究開発に取り組んでいる。

本論文では、上記2点を実現するシステムの基盤となるセーリング競技のための航跡情報基盤システムの構築と、その実証評価の結果について報告する。

2. 関連システム

セーリング競技の指導法に関する研究についてはいくつかの取り組みがあるが、そのなかでもITを活用したものとしては、千足ら [6] の研究がある。これは、競技者の練習時に、各競技艇にGPSロガーを搭載し、競技艇の航跡情報を記録しておく。練習終了後、GPSロガーを回収し、指導者が航跡情報をアニメーションにより可視化して競技者に対して提示しながら指導を行う。従来であれば、指導者、競技者ともに海上での練習時の記憶を頼りに振り返りながら指導しなければならなかったが、GPSロガーに記録

された航跡情報を用いた客観的データに基づく指導が可能となった。しかし、練習終了後に航跡情報を回収することになるため、客観的データを用いてはいるが、やはり、練習時の記憶を振り返りながら指導することしかできない。海上での練習時にその場で指導する場合には、従来どおり指導者の主観的経験に基づいて指導せざるを得ない課題がある。

セーリング競技の観戦者向けの中継は、今でも陸上から望遠レンズを装着したビデオカメラで撮影、あるいは、海上の取材用の船から撮影する手法が主である [11], [12]。しかし、望遠レンズには被写体間の距離感が薄れる圧縮効果があるため、競技艇どうしの位置関係の把握が困難となる。また、海上からの撮影では、撮影範囲が局所的となるため、競技全体の状況把握が困難である。

一方で、競技艇の位置をグラフィカルに可視化するシステムがいくつか開発されている (表1参照)。

どこでもヨットレース [13] は、競技艇にGPSロガーを装着し、競技中の航跡情報をすべて記録しておく。競技終了後にすべてのGPSロガーから競技艇の航跡情報を回収し、その情報を統合することで、競技の状況を地図上に再現することが可能となっている。

TracTrac [14] は、GPS受信機能と携帯電話のデータ通信機能とを備えた専用通信端末を競技艇に装着して、測位した競技者の位置情報をリアルタイムに収集可能なシステムである。収集した位置情報は、専用サーバに蓄積され、専用アプリケーションソフトウェアを使用することにより、リアルタイムに競技の様子を地図上への表示、過去の競技の様子を地図上での再現が可能となっている。

SailVision [15] は、スマートフォンのGPS受信機能によって測位した位置情報を専用サーバに収集するサービスである。登録された競技にチェックインすることで位置情報を登録することができる。また、専用サーバにアクセスすることで、競技のライブ航跡を観戦することが可能である。

表1 関連システムの機能比較

Table 1 Functional comparison of related products.

| | どこでもヨットレース | TracTrac | SailVision |
|----------|------------|---------------|---------------|
| 競技利用 | 対応 | 対応 | 対応 |
| 航跡情報蓄積方式 | 端末蓄積 | サーバ蓄積 | サーバ蓄積 |
| 使用機材 | GPSロガー | 専用端末 | スマートフォン |
| 通信方式 | — | 携帯電話網 | 携帯電話網 |
| 観戦形態 | アーカイブ | ライブ, アーカイブ | ライブ, アーカイブ |

3. 提案システム

3.1 要求条件

競技者の観点、および、観戦者の観点からの課題を解決するシステムを検討するにあたって、ナショナルトレーニングセンターのセーリング競技関係者にインタビューを実施した。すると、以下のような要求があきらかとなった。

- (要求 1) 現在実施中の競技状況の観戦（以降、ライブ観戦と呼ぶ）、および、過去の競技状況の観戦（以降、アーカイブ観戦と呼ぶ）が可能である。
- (要求 2) 多数の競技艇が参加する競技にも対応できる。
- (要求 3) レース海面は沖合にあり、競技中の競技艇が広範囲に散らばっても使用できる。
- (要求 4) 競技艇に載せる装置は、小型・軽量で、1日の競技実施中バッテリーで駆動する。
- (要求 5) システムを稼動する際の運用コストを抑えられる。

これらの要求に対して、前述の既存システムでは以下のような課題がある。

どこでもヨットレースでは、競技艇に載せるのは GPS ロガーのみであるので（要求 5）は満たしているが、（要求 1）のライブ観戦に対応することができない。

TracTrac, SailVision は、競技艇に載せるすべての通信装置に携帯電話網によるデータ通信機能が搭載されているためデータ通信料が必要となり、台数が増えると運用コストが大きくなり（要求 5）を満足することが難しい。

SailVision は、スマートフォンを通信装置として利用しているが、現在入手できる多くのスマートフォンはバッテリー容量が少ないものが多く、（要求 4）のバッテリー駆動を満足することが難しい。また、SailVision は競技者の個人所有のスマートフォンを利用可能であるが、機種による GPS 受信性能にばらつきがあるため [9]、取得した位置情報の信頼性を確保することが難しい。さらに、レース運営の面からは、競技大会の帆走指示書により、競技中の無線通信が制約される場合があり、個人所有の無線機材を持ち込むことは難しい。

次に、前述の（要求 1）～（要求 5）を実現するシステムを提案するにあたって、具体的な（目標 1）～（目標 5）を定めた。

- (目標 1) ライブ観戦では競技全体での航跡情報の受信成功率を 80%以上、競技艇の動きと航跡表示との遅延時間を 5 秒以下にする。また、アーカイブ観戦では航跡情報を 100%回収する。そして、その結果をグラフィカルに表示する。
- (目標 2) 最大艇数 40 艇まで利用できる。
- (目標 3) 陸から 4～5 km 沖合で、競技艇が 1.5 km 四方に広がっても使用できる。
- (目標 4) 500 ml ペットボトル飲料のサイズと重量におさ

める。バッテリーだけで 10 時間駆動できる。

- (目標 5) 全競技艇に携帯電話網によるデータ通信機能を使用する場合よりもコストを下げる。

3.2 システム構成

前述の要求条件に応えるために、以下の構成のプロトタイプシステムを提案する。

(1) 航跡情報の収集には、ライブ観戦にも対応できるように無線通信を用いる。さらに、通信コストを抑えつつ、通信可能範囲を大きくするために、携帯電話網によるデータ通信と特定小電力無線によるデータ通信とを併用した構成とする（図 1 参照）。無線 LAN, Bluetooth は実用的な通信可能距離が短く、消費電力が大きいものしか入手できなかったことから候補から除外した。競技艇からの航跡情報は特定小電力無線によるデータ通信を用いる。特定小電力無線の実用的な通信可能距離は 200～300 m 程度であるため、競技艇からの航跡情報をいったん集約するための中継船をレース海面上に配し、そこを経由して携帯電話網によるデータ通信で陸上の専用サーバに送信する方式とする。

また、陸から離れた海上であるため、外来雑音や混信などに起因するバストエラーは少なく、1～2 回程度の受信失敗継続が多いと想定している。そのため、受信失敗時には再送処理はせず、直前までの航跡情報から補外して航跡表示する。通信範囲を超えて長時間受信失敗となった場合に備え、航跡送信装置の記憶装置にも航跡情報を記録して補完する。

これにより（目標 1）、（目標 3）、（目標 5）を実現する。

(2) 競技艇に搭載する装置は、GPS 受信機で測位した位置情報を、ライブ観戦に対応するために特定小電力無線で遅滞なくつねに送信する。競技に参加する競技艇の数が増加すると通信の衝突が発生する。そこで、バッテリー駆動可能な小型 PC を用いて多重アクセス制御を行う構成とする。これにより（目標 1）、（目標 2）を実現する。

(3) 競技艇の航跡情報を収集する専用サーバは、専用アプリケーションソフトウェアに対して、ライブ観戦のためにリアルタイムに航跡情報を中継する。また、それと同時に、アーカイブ観戦用に航跡情報を競技ごとにアーカイブ

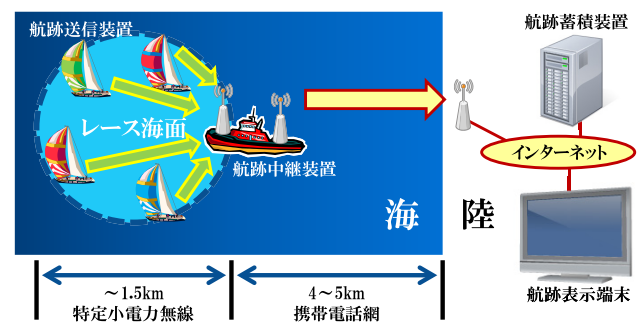


図 1 航跡情報基盤システムの全体構成

Fig. 1 Configuration of the sail tracking system.

する。PC、スマートフォン向けの専用アプリケーションソフトウェアでは、競技に参加している各艇の航跡情報などをグラフィカルに表示する。これにより（目標1）を実現する。

4. プロトタイプシステムの実装

提案システムの構成に基づいたプロトタイプシステムを実装した。その詳細について述べる。プロトタイプシステムの装置構成は図1に示したように、大きく4つの部分から構成される。

4.1 航跡送信装置

航跡送信装置は、競技艇に装着され、バッテリーで駆動し、GPS受信機で測位した航跡情報を、特定小電力無線により送信し続ける。構成部品は表2のとおりである。これらを防水パックに収めて、防水性能を確保している（図2参照）。

航跡情報は、GPSモジュールが周期1Hzで出力するNMEA（National Marine Electronics Association）0183センテンス（以降、NMEAセンテンス）の出力タイミングをトリガとして、あらかじめ航跡送信装置ごとに設定している一意の装置IDとNMEAセンテンスとを結合した文字列を無手順方式で送信処理を行っている。また、受信エ

表2 航跡送信装置の構成

Table 2 Configuration of a transmission device.

| 部品名 | 型式等 | 備考 |
|------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 制御用小型PC | アットマークテクノ Armadillo A-220 | Linux 2.6 |
| GPSモジュール | Canmore Electronics GT-730F/L | |
| 特定小電力無線 モジュール | サーキットデザイン MU-2-429 | 429MHz帯 約3.4kbps |
| バッテリー | ダイヤテック FPS440 | LiPoバッテリー 3.7V/4,400mAh |



図2 航跡送信装置の外観

Fig. 2 External appearance of transmission devices.

ラーによる再送はしない。

多数の航跡送信装置を同時使用する場合、各々の装置から航跡情報の送信の衝突を避ける処理が必要となる。今回使用している特定小電力無線モジュールMU-2-429は、ARIB STD-T67[16]に準拠しており、電波資源を有効に共有するためのキャリアセンス機能を備え、他の通信があるときは、再送処理はせず、そのまま送信要求処理が失敗するようになっている。また、特定小電力無線方式の多くは、通信可能距離が長いものは通信速度が遅い。MU-2-429も通信可能距離は200~300mで、通信速度は通信チャンネル1チャンネルあたり3.4kbpsとなっている。NMEAセンテンスは75octet（600bit）程度であることから、多数の航跡送信装置を収容するためには、効率良く通信チャンネルを使用しなければならない。キャリアセンスの結果、他の通信が行われていると判断すると、そのタイミングで送信しようとしていた航跡送信装置すべての送信が失敗し、受信側で多数の欠損が生じてしまう問題がある。

そこで本実装では、TDMA/FDMAハイブリッド方式による多重アクセス方式を採用することで、航跡送信装置間での通信の衝突を積極的に避けるようにした。多重アクセス方式は、制御用小型PC Armadillo A-220上のアプリケーションソフトウェアで制御している。TDMAにおける時刻同期は、GPS受信機が1Hz周期で出力するメッセージの出力タイミングが、GPS衛星の原子時計に同期していることを利用し、複数の航跡送信装置間でタイミング同期がとれているという前提をおいている。しかし、GPS衛星と同期が取れるまでの期間は他の通信と衝突する可能性があるが、再送処理はせず、送信失敗としている。FDMAにおける通信チャンネルの分割は、ARIB STD-T67において連続送信可能なチャンネルを使用している。

また、通信可能範囲外に競技艇が移動してしまった場合の航跡情報をあとで補完できるように、装置内部の記録メディアにも航跡情報を同時に記録するようにしている。

4.2 航跡中継装置

航跡中継装置は、特定小電力無線の通信可能範囲の狭さを補完するために、航跡情報を海上で集約する中継艇に装着する。構成部品は表3のとおりである。

表3 航跡中継装置の構成

Table 3 Configuration of a retransmission device.

| 部品名 | 型式等 | 備考 |
|------------------|------------------------------|---------------------------|
| 制御用PC | パナソニック タフブック CF-19 | Windows XP |
| 特定小電力無線 モジュール | サーキットデザイン MU-2-429 | 429MHz帯 約3.4kbps |
| データ通信 モジュール | Huawei Technologies D01HW | HSDPA/W-CDMA 送信384kbps |

特定小電力無線により無手順方式で受信した航跡情報を、携帯電話網のデータ通信により、UDP を用いて無手順方式で航跡蓄積装置に送信する。前述のように特定小電力無線側は TDMA/FDMA ハイブリッド方式により多重化されている。しかし、受信する単位時間あたりのデータ量に比べて、データ通信側の通信速度の方が高速であるため、航跡中継装置では、転送中継するだけの処理としている。

航跡中継装置を装着する中継船は、競技艇とは異なり船外機などを備えた動力船であるため、電源を確保できる前提である。したがって、本実装ではノート PC を用いて制御している。また、中継船には、風向・風速計が備えられており、その出力データ形式も NMEA センテンス準拠であるため、競技艇からの航跡情報とあわせて専用サーバに送信する。

4.3 航跡蓄積装置

航跡蓄積装置はインターネットに接続され、航跡中継装置より送信された航跡情報を受信し、データベースに蓄積する。

ライブ観戦では、HTTP を用いて接続してくる航跡表示端末に対して、航跡情報をリアルタイムにその HTTP コネクションを用いて転送する。多数の航跡表示端末とのコネクションが確立しても転送処理性能を低下させないために、UDP による受信処理と、HTTP による送信処理とをマルチスレッドにより並列処理する構成としている。

アーカイブ観戦には、受信した航跡情報を競技ごとにアーカイブとして蓄積するが、受信した航跡情報のみでは、通信可能範囲から外れたときに受信データの欠損が発生するため、競技終了後に航跡送信装置内に記録されている航跡情報を用いて欠損データを補完できるようにしている。

4.4 航跡表示端末

航跡表示端末はノート PC やスマートフォンを想定しており、航跡蓄積装置に対して HTTP で接続し、ライブ観戦用に中継されてくる航跡情報、あるいは、アーカイブ観戦用に航跡蓄積装置からダウンロードした航跡情報をもとに、競技艇の位置・航跡を地図上に表示する。使用する端末のハードウェアや OS のプラットフォームに依存しないように、本実装では Adobe AIR のアプリケーションとして開発した。

5. 評価と考察

実装したプロトタイプシステムを、NPO 法人和歌山セーリングクラブの協力のもと、実際のセーリング競技大会(平成 21 年度全国高等学校総合体育大会ヨット競技)において試用して、実証評価を行った。

また、競技艇への無線装置の持ち込みは帆走指示書により禁止されていたが、当該レース委員会の協力により、公

式通告により搭載することができた。

5.1 装置サイズ

航跡送信装置のサイズは、実測で表 4 の結果となった。当初目標の 500 ml ペットボトル飲料のサイズ、重量を達成している。

評価実験を実施した競技大会では、参加している全艇に航跡送信装置を搭載することができなかったため、装置の搭載艇と非搭載艇との間での公平性を期するため、非搭載艇にはサイズ、重量がほぼ同じ 500 ml ペットボトル飲料 1 本を搭載して公式競技として実施した。

一方で、500 ml ペットボトル飲料のサイズは、競技艇への装着場所の自由度が乏しく、競技艇のマスト根元付近に装着する選択肢しかない。しかし、その位置では、送信アンテナ高が低くなってしまい、遠距離通信に不利な条件である。そのため、装着場所の自由度を高めるため、さらなる小型・軽量化が必要である。

5.2 バッテリー駆動性能

航跡送信装置は、LiPo バッテリー (3.7V/4,400mAh) で駆動している。航跡送信装置の電源を入れると、特定小電力無線で送信すると同時に、内部の記録メディアに航跡情報を記録していくので、記録メディアに記録された最初の航跡情報の時刻と最後の時刻との差をバッテリー駆動時間とした。競技艇 20 艇に同一構成の航跡送信装置を装着してバッテリー駆動時間を測定した結果を図 3 に示す。

防水パック内の浸水などにより途中で停止したもの (ID 8, 11, 16) を除くと平均 15,899 秒 (約 4 時間 25 分)、標

表 4 航跡送信装置のサイズ
Table 4 Size of a transmission device.

| | 縦×横×高 | 重量 |
|------------------------|----------------|--------|
| 航跡送信装置 | 約 300×100×40mm | 445g |
| 【参考】 500ml ペットボトル飲料 | 約 210×65×65mm | 約 500g |

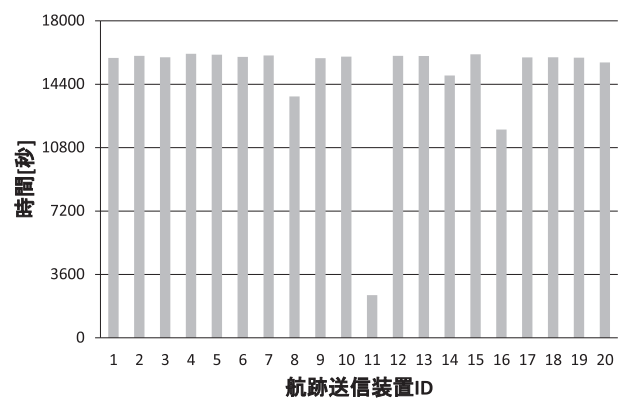


図 3 バッテリー駆動時間
Fig. 3 Battery runtime.

標準偏差 280.62 秒となった。20 台すべての機材で使用している部品、実験条件が同一であるため、ばらつきの小さい結果になった。

しかし、バッテリー駆動時間は 4 時間半程度であり、当初目標である 10 時間には達していない。これは、プロトタイプシステムでは、市場で入手可能な完成部品を用いて実装しているため、消費電力を減らすことが容易でなかったためである。特に制御用小型 PC が消費電流 300 mA（仕様上の Typ. 値）であり、OS としても Linux を使用しているため、航跡情報の送信処理をするためだけであればオーバスペックといわざるを得ない。

そこで、低消費電力のパーツを使用してハードウェア的に消費電力を抑える、ソフトウェア的に処理が不要なときはスリープ状態に設定することなどで、改善を図る必要がある。

5.3 通信性能

特定小電力無線では通信可能範囲が狭いため、航跡中継装置を介して航跡蓄積装置まで航跡情報を送信している。しかし、競技艇はレース海面内で広範囲に広がるため、競技艇と中継船とが離れてしまうと航跡情報を受信できない。これはライブ観戦では問題となる。

そこで、1 隻の中継船によって、どれだけ範囲の競技艇の航跡情報を回収できるかを評価した。評価実験では、競技大会に参加している競技艇 20 艇に航跡送信装置を装着し、中継船 1 隻のみで受信した。航跡送信装置は競技艇中央の金属製マストの根元付近（アンテナ高：海面から約 0.5 m）、航跡中継装置は中継船に設置した樹脂製パイプ（アンテナ高：海面から約 3 m）に装着した。

(1) 受信成功率の分析

航跡送信装置に記録されていた 19 艇分（競技艇 20 艇のうち、競技開始直後に装置が停止した ID 11 を除外）の航跡情報、および、中継船で同時に記録していた中継船の位置情報を用いて、中継船と競技艇との距離を求めた。そして、航跡中継装置で受信できた航跡情報を用いて、中継船と競技艇との距離を区間距離 10 m で区切り、各区間における航跡情報の受信成功率を解析した。横軸を各区間の上限值、縦軸をその区間における受信成功率としたグラフを図 4 に示す（総サンプル数：N = 68,400）。

受信成功率は、距離が離れるにつれてなだらかに減少している。これは、距離が離れると受信電界強度が低下し、それにもとない S/N 比が劣化したことによる。使用している無線モジュール MU-2-429 は、エラー訂正機能を備え、ある程度の受信エラーは訂正可能だが、本実装では実効通信速度が低下してしまうことを避けるため、エラー訂正機能を無効にしている。受信エラー時は再送要求をせず、データ欠損としている。実測結果をみると、80%の受信成功率を確保できるのは約 120 m、50%は約 220 m となる。セー

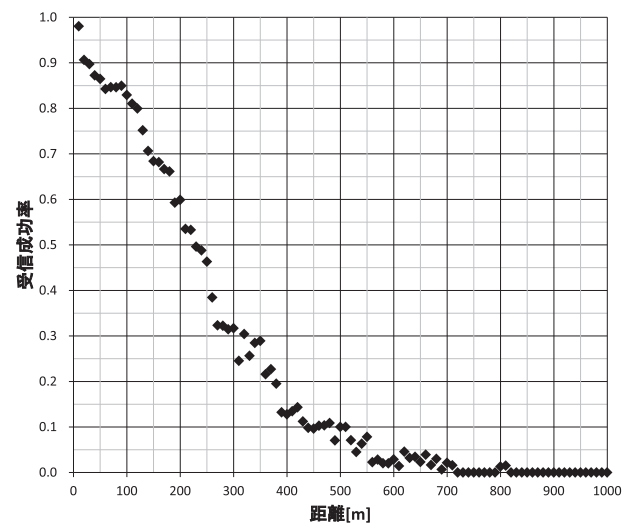


図 4 航跡情報の受信成功率と距離との関係（総サンプル数：N = 68,400）

Fig. 4 Receive success rate curve (sample size: N = 68,400).

リング競技観戦では、マークバイ周辺での競り合いが観戦の醍醐味であり、その周辺では競技艇は非常に狭い範囲に集中する。したがって、中継船も 120 m より近くまで競技艇に接近でき、80%以上の受信成功率を十分確保可能であり、ライブ観戦に耐え得るものと考えられる。

一方、ヨット部の日常の練習においては、競技の場合と異なり、競技艇の後方を動力船で追走する形で指導することが多い。その場合、指導者が乗った船に中継装置を装着するが、競技艇との距離は 100 m 以下にまで接近する。そのため、受信成功率も 90%以上確保でき、海上で練習しているその場でライブにより航跡を確認しながらの指導が可能である。

(2) 受信失敗時の分析

前述の実証評価時の結果を用いて、連続して受信失敗したときの継続回数と、その継続回数の出現頻度との関係を図 5 に示す（総サンプル数：N = 11,425）。

図 5 に示した結果では、継続回数 1 回の出現頻度は 0.633、2 回は 0.157、3 回は 0.062 となり、継続回数 3 回以下で全体の 9 割を超えている。そのなかでも継続回数 1 回が大半をしめている。セーリング競技では、風上に進む場合や、競技コースを示すマークバイを周る場合など方向転換するとき以外は、基本的には一定速度で直進する特徴があるため、ライブ観戦では数回航跡情報が欠損しても、直前までの情報から補外することが可能である。

結果では継続回数が 10~1,000 回となるバースト的な受信失敗が稀に発生しているが、外来雑音などに起因するものではなく、中継船と競技艇の距離が通信可能距離を超えており、もともと通信できない状態である。このような欠損については、競技終了後に航跡送信装置に記録してある航跡情報を用いて欠損部分を補完することで対応する。

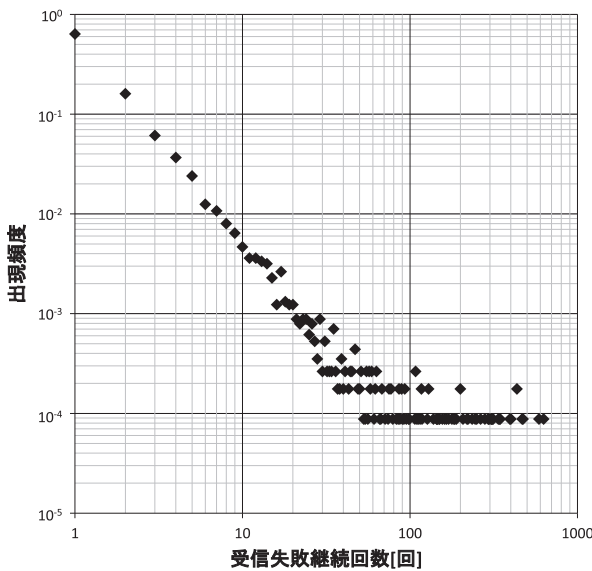


図 5 受信失敗継続回数の出現頻度 (総サンプル数: N = 11,425)

Fig. 5 Occurrence rate of consecutive receive errors (sample size: N = 11,425).

(3) 中継船の隻数による効果

レース海面は約 1.5 km 四方であるため、中継船 1 隻では不十分であることは明らかである。中継船の隻数を増やすことで競技全体での受信成功率を向上させることが必要である。そこで、中継船が 1 隻の場合と 3 隻の場合とで受信成功率がどれだけ改善するか解析した。

中継船 1 隻の場合と 3 隻の場合の 19 艇 (途中で停止した ID 11 を除外) の各受信成功率と全体での受信成功率を表 5 に示す (総サンプル数: N = 68,400)。3 隻の場合は、少なくとも 1 隻で受信できていれば成功として集計している。また、航跡送信装置が送信するメッセージは航跡送信装置の装置 ID と NMEA センテンスとを連結した形式である。同一航跡送信装置からのメッセージを複数の中継船で受信した場合、中継船が受信したメッセージを陸上の航跡蓄積装置に転送した時点で、NMEA センテンスの時刻情報と装置 ID との組合せから重複を検知し、除外する方式をとっている。

表 5 に示した結果では、全体の受信成功率だけでなく各艇の受信成功率も向上していることが分かる。全体では 30% 受信成功率が向上した。しかし、競技全体での受信成功率は 67% で (目標 1) は達成していない。また、各艇の向上率は、9~80% とばらつきが大きい。これは中継船 3 隻と競技艇との位置関係に依存するところが大きい。この実証評価では、レスキュー艇を中継船として利用しているため、競技中に自由に中継船を移動させることができなかった。しかし、その状況でも受信成功率向上の効果が認められた。

競技艇の配置が大きく分散した場合、集団から離れた艇の航跡情報が欠損する可能性がある。これは前述のように中継船の隻数を増やすことである程度改善可能である。し

表 5 中継船の隻数と受信成功率の関係 (総サンプル数: N = 68,400)

Table 5 Relationship between number of relay boat and receive success rate (sample size: N = 68,400).

| 装置 ID | 競技全体での受信成功率 | | 比率 (B/A) |
|-------|-------------|------------|----------|
| | 中継船 1 隻(A) | 中継船 3 隻(B) | |
| 1 | 0.459 | 0.704 | 1.53 |
| 2 | 0.523 | 0.692 | 1.32 |
| 3 | 0.499 | 0.651 | 1.30 |
| 4 | 0.550 | 0.757 | 1.38 |
| 5 | 0.469 | 0.625 | 1.33 |
| 6 | 0.493 | 0.587 | 1.19 |
| 7 | 0.553 | 0.683 | 1.24 |
| 8 | 0.469 | 0.677 | 1.44 |
| 9 | 0.619 | 0.808 | 1.31 |
| 10 | 0.316 | 0.569 | 1.80 |
| 12 | 0.616 | 0.852 | 1.38 |
| 13 | 0.380 | 0.584 | 1.54 |
| 14 | 0.628 | 0.769 | 1.23 |
| 15 | 0.523 | 0.623 | 1.19 |
| 16 | 0.634 | 0.718 | 1.13 |
| 17 | 0.608 | 0.745 | 1.23 |
| 18 | 0.610 | 0.667 | 1.09 |
| 19 | 0.413 | 0.500 | 1.21 |
| 20 | 0.434 | 0.523 | 1.20 |
| 全体 | 0.516 | 0.670 | 1.30 |

かし、すべての中継船の受信可能範囲を超えた地点にいる場合には、航跡送信装置の記録メディアに記録してある航跡情報を用いて欠損部分を補完する。

5.4 収容台数

本実装では、TDMA/FDMA ハイブリッド方式の多重アクセス方式を使用している。評価実験では、お互いに通信が干渉しない 3 チャンネルを使用し、また、1 チャンネルごとに 8 台収容できる設定で実証実験を実施している。この設定では、最大 24 台の航跡送信装置を収容することができる。

ARIB STD-T67 では、チャンネル番号 7~46 の 40 チャンネル分が連続送信可能として使用可能である。しかし、MU-2-429 では、1 チャンネルあたりの占有帯域幅が広く、隣接チャンネルと干渉するため、干渉なく使用できるのは最大 5 チャンネルである。したがって、チャンネル分割が最大 5 チャンネルの場合、1 チャンネルに 8 艇であるので当初目標 40 艇を収容できる。

5.5 航跡表示

GPS 受信機が位置情報を出力してから、実際に航跡表

表 6 処理遅延時間の積算

Table 6 Estimation of delay time.

| 装置 | 処理 | 所要時間 | 備考 |
|--------|------------------|----------|------------------|
| 航跡送信装置 | GPS 出力 | — | 1Hz 出力 |
| | TDMA/FDMA | 平均 0.5 秒 | タイムスロット待ち時間 |
| ↓ | 特定小電力無線 | 0.1 秒 | 312bit/3.2kbps |
| 航跡中継装置 | 中継処理 | 0.1 秒 | 暫定値 |
| ↓ | データ通信網・IP ネットワーク | RTT/2 | 暫定値 RTT=0.5 秒 |
| 航跡蓄積装置 | 蓄積処理 | 0.1 秒 | 暫定値 |
| | 転送処理 | 0.1 秒 | 暫定値 |
| ↓ | IP ネットワーク | RTT/2 | 暫定値 RTT=0.5 秒 |
| 航跡表示端末 | 画面表示 | 平均 0.5 秒 | 1 秒間隔で画面更新 |
| 合計 | | 1.9 秒 | |

示端末に表示されるまでの遅延時間について考察する。航跡送信装置から航跡表示端末までの処理遅延時間の積算を表 6 に示す。

競技艇に装着された航跡送信装置は 1Hz 出力の NMEA センテンスをトリガとして送信処理をしているが、TDMA/FDMA ハイブリッド方式のタイムスロット待ち時間が必要である。1 チャンネルあたり 1 秒間 8 スロットに 8 台を収容しているため、平均 0.5 秒必要である。航跡情報は 39 octet (312 bit) に圧縮し、特定小電力無線 (3.2kbps) で送信に約 0.1 秒必要である。航跡中継装置は航跡蓄積装置に転送するが、この部分はデータ通信網 (384 kbps) が高速であるため転送時間は無視できる。航跡表示端末は 1 秒間隔で画面更新するので、表示のずれは平均 0.5 秒である。その他、航跡中継装置と航跡蓄積装置間、および、航跡蓄積装置と航跡表示端末間の IP ネットワークの通信時間が RTT (Round Trip Time) (往復) の半分 (片道) を要する。RTT は変動する可能性があるが、暫定的に RTT を 0.5 秒とすると、合計 1.9 秒の遅延時間となる。

望遠レンズを装着したビデオカメラで陸上から撮影したリアルタイムの競技映像と並べて表示させて表示遅延時間の大きさを測定した結果、航跡表示端末での表示の遅れは 2~3 秒程度であり、積算値に近い結果であった。ただし、IP ネットワークで輻輳が発生すると RTT が延び、遅延時間が 5 秒を超過する可能性がある。

航跡表示端末では、受信した航跡情報をもとに、地図上に競技艇の位置、および、進行方向を 20 艇分同時に画面表示させてもスムーズな動きで表示できることが確認できた (図 6 参照)。



図 6 航跡表示画面の例

Fig. 6 A typical screenshot of a tracking viewer.

表 7 目標達成度

Table 7 Status of achievement of goals.

| | 達成度 | 備考 |
|--------|-----|--|
| (目標 1) | △ | 5.3 節, 5.5 節参照 ライブ観戦の受信成功率が未達 |
| (目標 2) | ○ | 5.4 節参照 |
| (目標 3) | ○ | 5.3 節参照 実競技で使用できたので達成 |
| (目標 4) | △ | 5.1 節, 5.2 節参照 バッテリー駆動時間が未達 |
| (目標 5) | ○ | 5.5 節参照 中継船 3 隻にだけ携帯電話網によるデータ通信装置を装着するだけで良いので達成 |

航跡蓄積装置、航跡表示端末ともに今回の評価実験では問題なく動作した。しかし、航跡蓄積装置については、観戦者人口が増加し、航跡表示端末からの接続要求が増加した場合、どこまで対応可能であるかが未検証であるので、引き続き評価をしていく。

また、航跡表示端末については、表示遅延はライブ観戦に十分応えられるものである。今後、競技艇の位置、進行方向、過去の航跡以外に必要な表示項目などについて、実際の利用者 (観戦者だけでなく競技者育成・強化の指導者も含む) の意見をもとに改善を進めていく。

5.6 目標の達成度

実証評価の結果に基づいて、3.1 節であげた (目標 1) ~ (目標 5) の達成度について表 7 にまとめる。

6. 評価結果をふまえた改善

2009 年に実施した実証評価の結果をふまえ、2010 年以

表 8 航跡送信装置の新旧プロトタイプと比較

Table 8 Comparison of old and new model of the transmission device.

| | 2009 年式 | 2013 年式 |
|-------|----------------|---------------|
| 縦×横×高 | 約 300×100×40mm | 約 120×75×30mm |
| 重量 | 445g | 220g |
| バッテリー | 4,400mAh | 2,000mAh |
| 駆動時間 | 4.5 時間 | 12 時間 |

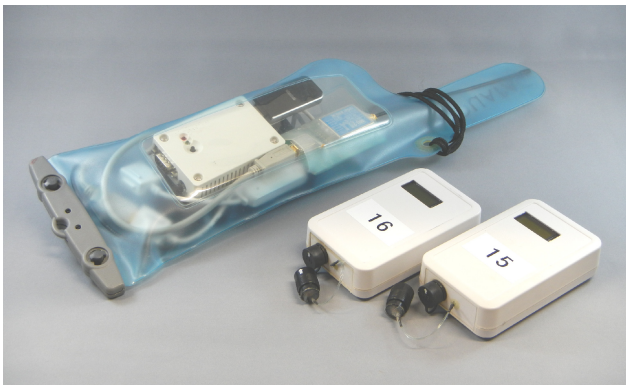


図 7 2009 年式 (左) と 2013 年式 (右) の外観

Fig. 7 External appearance of old and new model of the transmission device.

降, 地元自治体の補助事業などを活用して航跡送信装置のプロトタイプの改善を行っている。

6.1 装置サイズおよびバッテリー駆動時間

これまで述べてきた 2009 年式プロトタイプシステムでは, 市場で入手可能な完成部品を用いて実装しているため, 重量, サイズ, 消費電力を減らすことが容易ではなかった。

そこで, 2013 年式では機能はそのままに, 低消費電力の CPU, GPS モジュール, 無線モジュールを新規に選定し直し, 専用基板も新たに設計して, 航跡送信装置の改善を図った。2009 年式と 2013 年式の比較を表 8, 図 7 に示す。表 8 の 2013 年式では, (目標 4) を達成した。

6.2 通信性能

2009 年式では, 通信距離が長く, かつ, できるだけ消費電力の少ないという条件に合致するものとして, 429 MHz 帯の特定小電力無線モジュールを採用した。しかし, 通信速度が 3.2 kbps という制約があり, 緯度経度以外のセンサ情報 (移動方向, 速度など) を扱うように拡張するには限界がある。また, 429 MHz 帯は日本国内仕様であり海外で使用できない。

そこで, 2013 年式では, 通信速度を優先し, 海外でも使用可能な IEEE802.15.4 PHY [17] 準拠の 2.4 GHz 帯無線通信モジュールを採用した。周波数帯が高いことから直進性が強いことが想定できる。これが通信性能に与える影響に

ついて実証評価するのと並行して, (目標 1) のライブ観戦の受信成功率向上について現在取り組み中である。

7. 地域への貢献

はじめに述べたように, セーリング競技における競技者の育成・強化, 観戦者への競技状況の提示の 2 点を目標として, その基盤となるセーリング競技における航跡情報基盤システムを構築した。

この成果は, プロトタイプシステムの評価実験も兼ねて, 観戦者へ競技状況を提示するために国内・国際競技大会で実運用し, 競技者の育成・強化のために日常練習で試用してもらうことで地域に貢献している。

7.1 国内・国際競技大会での使用

2009 年に和歌山マリーナを会場として開催された国内・国際競技大会において, 本システムを使用し, ライブ観戦, および, アーカイブ観戦のサービスを実際に提供した。その使用実績を表 9 に示す (総サンプル数は備考欄に記載)。

FJ 級ヨット選手権大会では, 中継船 1 隻のみで運用した。当然ながら通信可能距離に対してレース海面が大きくなり, 全域を受信することができなかった。受信成功率が最大 49%, 最小 0.3% と非常に悪い結果であった。この結果をふまえ, これ以降の競技では, 中継船を 3 隻に増やして運用している。増隻の効果は 5.3 節で述べたとおりである。しかし, 競技全体での受信成功率は 80% に達しておらず, 受信成功率向上が今後の課題である。

テザー級世界選手権大会, JSAF インターナショナルレガッタでは, マークブイにも航跡記録装置を装着した。マークブイは風向に応じて設置場所を移動する必要がある。そして, 移動するたびにマークブイの緯度経度の情報を, 口頭で本部に連絡していた。それを自動化することが可能となったのと同時に, 航跡表示画面にマーク位置を表示させることで, 競技展開が分かりやすくなったという副次効果もあった。

SHIMA SEIKI CUP を除く他の 4 つの競技大会は, 艇種が小型であるため, 2009 年式プロトタイプのサイズでは装着場所が制約され, また, 競技中の操船への影響も懸念され, 装置の小型化の要望があった。2013 年式では体積で 1/4 にまで小型化を実現したが, このサイズでも小型の艇種では装着場所が限定される。受信成功率向上とも関連するが, 最適な競技艇への装着場所の検討も含めて改良を進めていく必要がある。

全国高等学校総合体育大会ヨット競技大会では, 望遠レンズを装着したビデオカメラで撮影した映像と, 本システムにより競技艇の位置を地図上に表示した映像とを, 大画面で並べて提供した。これを大会関係者に公開したところ好評であった (図 8 参照)。

表 9 国内・国際競技大会での使用実績

Table 9 Records of usage of the system in international and domestic sail racings.

| 競技大会名 | 開催期間 | 装着艇数 | 中継船数 | 各艇の受信成功率 | | | 備考 |
|-----------------------------|------------------|------|------|----------|-------|-------|---|
| | | | | 全体 | 最大 | 最小 | |
| 第 27 回全日本 FJ 級ヨット選手権大会 | 2009/8/7 ~10 | 24 艇 | 1 隻 | 0.257 | 0.491 | 0.003 | 中継船 1 隻で運用したところ受信成功率が低かったため、これ以降は 3 隻で運用 (総サンプル数 : N=11,039) |
| 平成 21 年度全国高等学校総合体育大会ヨット競技大会 | 2009/8/13 ~17 | 40 艇 | 3 隻 | 0.670 | 0.852 | 0.500 | 20 艇+20 艇の 2 群に搭載し 40 艇で運用 (総サンプル数 : N=68,400) |
| 2009 年テザー級世界選手権大会 | 2009/9/18 ~27 | 24 艇 | 3 隻 | 0.652 | 0.994 | 0.216 | 競技艇以外にマークブイにも航跡送信装置を装着しマーク位置を取得 (総サンプル数 : N=15,557) |
| 2009 年度 JSAF インターナショナルレガッタ | 2009/10/9 ~12 | 24 艇 | 3 隻 | 0.711 | 0.864 | 0.167 | 同上 (総サンプル数 : N=49,800) |
| 第 7 回 SHIMA SEIKI CUP | 2009/10/31 ~11/1 | 24 艇 | 0 隻 | — | — | — | 外洋レースでレース海面が携帯電話の通信圏外であったため、アーカイブ観戦のみ提供 |



図 8 本システムで観戦する大会関係者

Fig. 8 Race officials watching an ongoing sail racing with the use of our system.



図 9 ヨット部の練習で指導者が使用している様子

Fig. 9 A trainer of a yacht club who uses our system in a real training.

7.2 日常の練習での使用

2010 年以降は、主に競技者の育成・強化の場面での試用にも重点をおいている。和歌山マリナを拠点としてセーリング競技の練習活動をしている和歌山県立星林高等学校ヨット部、および、和歌山大学ヨット部に、2011 年より日常の練習の際に使用してもらう機会を設け、実証評価、および、必要機能に関する聴き取り調査を実施している。また、ナショナルトレーニングセンターで実施される国内・国際大会出場候補選手の強化合宿などにおいても使用してもらい、実戦的な選手強化への適用可能性についても実証

評価を進めている。図 9 にヨット部の練習時に指導者がシステムを使用しているところを示す。写真中央のタブレット端末を航跡表示端末とし、ライブ観戦機能で練習中の競技艇の航跡を海上で表示させながら、前方を航行する競技艇を追走しているところである。

8. おわりに

本論文では、セーリング競技を対象として、(1) 競技者の育成・強化のためにセンサデータなどの客観的データを活かす、(2) 観戦者に競技艇の平面的位置関係を分かりや

すく提示する, の両者を実現する基盤となる航跡情報基盤システムについて報告した.

本システムを実際のセーリング競技のもとで実証評価した結果, 当初設定した(目標 1)~(目標 5) はほぼ達成したが, 航跡情報の受信成功率の向上, バッテリ駆動時間の延長など一部改善が必要な項目が明らかになった. 一方で, 複数の国内・国際競技大会での使用にも十分に耐え, ヨット部の日常の練習にも使用できることを確認した.

今後は, 競技者育成・強化用のアプリケーションの実際のユーザとなる指導者, ならびに, 競技者の意見をもとに検討していく. そして, 観戦者への競技状況提供サービスについても実用化を図っていく.

和歌浦湾では, 2015 年には第 70 回国民体育大会, および, 全国高等学校総合体育大会が開催される. さらに, 2015 年以降, 全国高等学校総合体育大会ヨット競技大会は和歌浦湾で定点開催されることが決定している. 本システムを和歌山で開発・発信することにより, 全国的に和歌浦湾とセーリング競技の認知度をさらに高めることができれば, 国内・国際競技大会開催地を和歌浦湾に誘致することができ, 地域活性化にも貢献できることが期待できる.

また, このシステムの適用先は, セーリング競技支援に限定されるものではなく, たとえば, 斜面防災のセンサ情報, 独居老人見守り情報, スマートグリッドの電力センサ情報など安全・安心・エコロジーの分野でセンサ情報を利用する領域にも幅広く適用可能である. 防災, 高齢化などに関わる地域課題の解決にも応用可能である.

謝辞 本研究は, 和歌山大学平成 23 年度独創的研究支援プロジェクト, 公益財団法人わかやま産業振興財団平成 23 年度新連携共同研究事業, および, 同財団平成 24 年度わかやま中小企業元気ファンド事業の助成を受けたものです. また, 実験に協力いただいた和歌山県セーリング連盟, NPO 法人和歌山セーリングクラブ, 和歌山県立星林高等学校ヨット部, および, 和歌山大学ヨット部の皆様に感謝いたします.

参考文献

[1] 和歌山県: ナショナルトレーニングセンター (NTC) 競技別強化拠点 (セーリング競技) の指定について (オンライン), 入手先 <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/500400/sinchaku/ntchijikisyakaiken1.pdf> (参照 2013-10-20).

[2] 平野貴也: ウインドサーフィン競技における GPS を活用した指導法の検討, 名桜大学紀要, No.13, pp.103-110 (2007).

[3] 藤原 昌, 中村夏実, 山本正嘉: 高精度 GPS を用いたカナディアンカヌー競技における艇の移動パターンの分析, 日本体育学会大会予稿集, No.59, p.209 (2008).

[4] 長嶋拓哉, 高橋隆行: 陸上競技者位置計測における GPS の可能性, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010, 1A2-G11, pp.1-4 (2010).

[5] 廣瀬 圭, 土岐 仁, 近藤亜希子: スキーヤーの関節角度・滑走速度計測によるスキー・ターンの運動解析に関する

研究, スポーツ産業学研究, Vol.22, No.1, pp.1-8 (2012).

[6] 千足耕一, 藤原 昌: セーリング競技—GPS を用いた航跡分析の可能性, バイオメカニクス研究, Vol.11, No.2, pp.124-129 (2007).

[7] Ilarri, S., Mena, E., Illarramendi, A. and Marcos, G.: A Location-Aware System for Monitoring Sport Events, *Proc. 8th Int. Conf. Advances in Mobile Computing and Multimedia*, pp.297-304 (2010).

[8] 布野泰志, 石井泰光, 榮樂洋光, 中村夏実, 松下雅雄: イギリス調査報告書セーリング競技: 470 級における GPS データ収集および風情報収集—ロンドン五輪へ向けてマルチサポート活動に参加して, 鹿屋体育大学学術研究紀要, No.45, pp.9-12 (2012).

[9] Hess, B., Farahani, A.Z., Tschirschnitz, F. and von Reischach, F.: Evaluation of Fine-Granular GPS Tracking on Smartphones, *Proc. 1st ACM SIGSPATIAL Int. Workshop on Mobile Geographic Information Systems*, pp.33-40 (2012).

[10] 安田真之助, 石井泰光, 布野泰志, 榮樂洋光, 中村夏実, 松下雅雄: セーリング競技におけるレーザーラジアル級のスネーキング帆走の有効性—国内一流シングルハンド選手による検証, スポーツパフォーマンス研究, No.5, pp.189-201 (2013).

[11] 平成 25 年度全国高等学校体育大会佐賀県実行委員会: 2013 未来をつなぐ北部九州総体佐賀県開催競技情報配信サイト (オンライン), 入手先 <http://2013soutai-sagamovie.jp/yacht/> (参照 2013-10-20).

[12] 東京都ヨット連盟: スポーツ祭東京 2013 セーリング競技特設サイト (オンライン), 入手先 <http://www.sports-sai-tokyo2013-sailing.com/> (参照 2013-10-20).

[13] デジタル・データ・サブライ: どこでもヨットレース (オンライン), 入手先 <http://e-yacht.net/> (参照 2013-10-20).

[14] TracTrac APS: TracTrac (online), available from <http://www.tractrac.com/> (accessed 2013-10-20).

[15] Sail-Vision: SailVision (online), available from <http://www.sail-vision.com/> (accessed 2014-01-26).

[16] 社団法人電波産業会: 特定小電力無線局 400MHz 帯及び 1,200MHz 帯テレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備, ARIB STD-T67 1.3 版 (2007).

[17] IEEE Computer Society: Part 15.4: Wireless Medium Access Control and Physical Layer Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.4-2003 (2003).



塚田 晃司 (正会員)

1996 年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程所定単位取得退学. 同年 (株) 日立製作所システム開発研究所. 2003 年より和歌山大学システム工学部助教授. 現在, 准教授. 博士 (工学). ネットワークサービス, 減災情報システム等の研究に従事. 電子情報通信学会, 日本災害情報学会, システム制御情報学会, IEEE, ACM 各会員.



満田 成紀 (正会員)

1996年京都大学大学院工学研究科博士後期課程単位取得認定退学。同年和歌山大学システム工学部助手。2000年同大学システム工学部講師。2003年同大学システム工学部助教授。現在、准教授。博士(工学)。ソフトウェア

工学, ソフトウェア開発環境, ユーザインタフェース等の研究に従事。電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。



廣崎 清司

1976年大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年三菱重工業(株)入社。1989年(株)宮崎エンジニアリング創設, 代表取締役。2002年より和歌山大学地域共同研究センター(現在, 産学連携・研究支援センター)客

員教授, 2006年より社団法人和歌山情報サービス産業協会副会長を兼務。技術士。新技術の複合活用により, 既成概念を超え, より実効的なシステム開発に従事。