

競技者の負担を軽減した 自転車競技向け参加型位置共有システムの実装と評価

河中 祥吾^{1,a)} 高橋 雄太¹ 雨森 千周¹ 藤本 まなと¹
荒川 豊¹ 藤原 晶² 福島 徹也² 松原 敬信²

受付日 2016年9月30日, 採録日 2017年2月27日

概要: マラソンや自転車競技のようなレース競技において, 競技者を応援するための観客向け位置情報共有サービスが始まっている. しかしながら, 競技者の位置を得るために, 競技者がスマートフォンを持って競技に参加する必要があるという問題がある. そこで本研究では, 観客や先導バイクのスマートフォンを位置捕捉のためのインフラとして利用する参加型位置共有システムを提案する. 提案システムでは, 競技者は, 小型 BLE ビーコンを装着するだけでよく, そのビーコンから発信された電波を受信した観客のスマートフォンの位置情報を競技者の位置情報として共有する. 高速に移動 (自転車競技における自転車の速度は 30 km/h~80 km/h) するビーコンの位置を観客のスマートフォンで計測するシステムは, 先行研究がないため, ビーコンやスマートフォンアプリを開発したうえで, 実験を重ねることで, 高速で移動するビーコンがスマートフォンの前を通過する場合の受信強度, 最大受信距離, GPS から得られる位置情報との差異, 先導バイクで受信する際の電波遮蔽, 地形と電波受信状況の相関関係, ビーコン側の電波強度や送信周期, など実現に必要なパラメータを明らかにした. さらに, 実際のレースに提案システムを導入し, その有効性と可用性を確認した.

キーワード: 自転車, ロードレース, BLE ビーコン, スマートフォン, 参加型センシング, 位置情報共有

Implementation and Evaluation of a Participatory Location Sharing System for Cycling Road Race with Reducing Burden for the Athletes

SHOGO KAWANAKA^{1,a)} YUTA TAKAHASHI¹ CHISHU AMENOMORI¹ MANATO FUJIMOTO¹
YUTAKA ARAKAWA¹ AKIRA FUJIWARA² TETSUYA FUKUSHIMA² TAKANOBU MATSUBARA²

Received: September 30, 2016, Accepted: February 27, 2017

Abstract: Athlete's location sharing service has already started in various cycling events. However, in such system, the athletes have to bring a smartphone for uploading their position in racing. In this paper, we propose a participatory location sharing system that utilizes supporters' smartphone for tracking the position of athletes. In our system, the athletes only have a small BLE beacon, and the supporters along the road have a smartphone in which our application is installed. The application uploads and shares its location when it receives a beacon signal. Since there is no existing work that try to track a fast-passing beacon (the speed of bicycle is 30 km/h~80 km/h), we developed the dedicated beacon and dedicated Android application for experiment. Through various experiments, we clarified the effect of passing speed, the maximum distance for receiving a signal, location accuracy compared with GPS, the effect of landform and shielding. Finally, we conducted an experimental evaluation in the actual cycling events for confirming the availability and effectiveness.

Keywords: bicycle, road cycling race, BLE beacon, smartphone, participatory sensing, location information sharing

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma, Nara 630-0192, Japan

² シャープ株式会社
Sharp Corporation, Tenri, Nara 632-8567, Japan

^{a)} kawanaka.shogo.kp1@is.naist.jp

1. はじめに

マラソンや自転車競技のようなレース競技において, 競技者を応援するための観客向け位置情報共有サービスが始まっている. 具体的なサービスの例として, シャープ株式

会社が自転車競技向けアプリケーションとして提供しているスマココ^{*1}があげられる。本サービスは、競技者がスマートフォンを所持しながら競技に参加し、自身の位置情報を発信し続けることで、観客側はアプリケーションを介して競技者の位置を確認でき、一般競技者からプロ競技者までの使用を目的として開発されている。自転車競技は、レース競技の中でも早くからセンサ類の導入が進んでおり [1], [2], 大会規約が比較的緩い一般の自転車競技では、無線機器やセンサの使用が認められている。しかし、プロや実業団チームが参加する公式レースにおいては、公平性を保つため、スマートフォンなどの相互通信機器の使用が禁止されていることが多い。また、車体重量増加は長距離コースになるほど競技者への負担も増加するうえ、機器のサイズにより取り付け位置が制限される。そのため、特に公式レースにおいては搭載する機器を可能な限り小型化および軽量化する必要がある。これらの理由から、競技者がスマートフォンを所持する必要がある現状のスマココのシステム構成では選手への負担が大きいうえ、公式レースに適応することが難しい。

本研究であげる選手への負担とは、重量増加による負担に加えて、競技中つねにスマートフォンを所持する必要があることに対する物理的な負担や精神的な負担もあげられる。競技者が物を収納できるスペースとして唯一サイクルウェアのバックポケットがある。バックポケットには基本的にレース中のエネルギー不足を補うための携帯食料が入られるが、従来のスマココではスマートフォンを常時所持する必要があることから数少ない収納スペースを圧迫してしまい、物理的な領域の負担を与えることとなる。また、自転車走行中に硬質なスマートフォンが擦れることにストレスが感じられるといった精神的な負担や、携帯食料を取り出す際にスマートフォンを落とす可能性があるといった危険性があげられる。そして、実際にスマココを利用した競技者に対して聞き取り調査を行ったところ、“スマートフォンを常時持っていることに対する違和感が負担になっている”という意見が多数あげられた。

本研究では、上述したような競技者にかかる負担を軽減したうえで、安価に自転車イベントから公式レースまで様々な規模の大会で導入可能な自転車競技向け位置共有システムの実現を目的とする。そこで、受信機は一般的に普及しているスマートフォンを用い、送信機はスマートフォンで受信可能かつ省電力な Bluetooth Low Energy (以下 BLE) ビーコンを用いる。自転車レースの環境から沿道に観客がいる状況が想定でき、自転車に取り付けた小型 BLE ビーコンから送信される電波を観客のスマートフォンで受信し、受信時の受信者位置情報および電波強度から競技者の位置を推定する参加型位置共有システムを提案する。

自転車競技では、自転車の速度が時速 30 km~80 km と高速であることから、高速に移動する車体に取り付けられたビーコンから発信される信号を検知し、位置を特定することが可能であるかが重要な課題となる。そこで、高速で移動するビーコンがスマートフォンの前を通過する場合の受信強度、最大受信距離、GPS から得られる位置情報との差異、先導バイクで受信する際の電波遮蔽、地形と電波受信状況の関係、ビーコン側の電波強度や送信周期など実現に必要なパラメータを実験を繰り返すことで明らかにした。さらに、自転車レースで実証実験を行い、実環境における有用性を確認した。

本論文は、以下の 6 章で構成される。2 章では、既存製品と屋外位置推定に関する関連研究およびそれらの課題について述べ、3 章で提案する参加型位置共有システムについて説明する。4 章では提案システム実現に向けた予備実験について、5 章では実環境における実証実験について述べる。最後に 6 章で結果と今後の予定をまとめる。

2. 既存製品と関連研究

2.1 既存製品

現在、自転車レースに導入されている位置情報共有サービス用の製品として、HIKOB 社製の HIKOB FOX があげられる^{*2}。HIKOB FOX は、GPS モジュールおよび無線通信モジュールが搭載されており、一定間隔で選手の位置情報を取得し、受信機へデータを送信している。送信されたデータは、コースの誘導および競技者の安全な走行をサポートする先導バイクや競技中の負傷者や故障した自転車を回収するための回収車など大会スタッフが所持する端末で受信され、競技者の位置の共有がなされる。本体の大きさは、横 36 mm × 縦 45 mm × 奥行 17 mm で質量が 22 g と小型かつ軽量で、サドル下部分に装着可能なため競技者に対する負担は少ないが、通信プロトコルには ZigBee が用いられている。一般に ZigBee 規格を搭載した既成品は普及しておらず、専用の受信機が必要となり、受信するための回収車などを多数配置する必要がある。そのため、小規模の大会では導入が難しく、現在は世界最大の自転車ロードレースであるツールドフランスでのみ導入されている。

RaceTag9 は株式会社マトリックスが提供する自転車レース向けセンサである^{*3}。本体の大きさは、横 33 mm × 縦 37 mm × 奥行 16 mm で質量が 16 g と軽量かつ小型で自転車に取り付けることが可能である。特定の地点に設置された検知エリアをセンサを着けた自転車が通過すると、競技者の通過時間が記録され、ラップ数、ラップタイム、着順判定などに利用される。本センサはラップタイム計測に特化しており、コース全域での使用は想定されていないため、特定の地点以外で競技者の位置を捕捉することはでき

*1 <https://smcc.cloudlabs.sharp.co.jp/>

*2 <http://www.hikob.com/en/hicob-in-motion/>

*3 <http://matrix-inc.co.jp/race/racetag9.html>

ない。また、通信プロトコルには RFID が用いられているため、検知エリアに専用受信機を設置する必要がある。

一般のサイクリングや自転車イベントで利用できる位置共有サービスとしてスマココがあげられる。スマココは、競技者がスマートフォンを所持しながら競技に参加し、自身の位置情報を 3G や LTE 回線を用いて発信し続けることで、観客側はアプリケーションを介して競技者の位置を確認できる。スマココを導入している自転車イベントにおいては、観客がいつでも招待選手の位置を把握できるサービスが提供されている。しかし、スマートフォンは大きさおよび重量が一般的な自転車向けセンサに比べて大きく自転車に取り付けることが難しいため、競技者がつねに所持する必要があり負担となる。加えて、公式レースでは規定としてスマートフォンの使用が禁止されているため、本サービスを使用することはできない。

2.2 関連研究

次に、Bluetooth やビーコンを用いた位置推定に関する先行研究を紹介する。まず、佐藤ら [3] は、Bluetooth の電波強度を利用し、4 箇所の Bluetooth 発信点から構成された四角形の中にある歩行者の位置推定を行い、3~8m の誤差で位置を確認している。しかし、電波強度にばらつきが生じるため、この結果を得るために同じ位置で 1 時間にわたるデータ取得が必要であるといった問題がある。そのため、数秒で観測地点を通り過ぎるレース競技での使用には適さない。

日坂ら [4] は、自動車の車体の 4 隅に ZigBee 受信器を設置し、交差点において送信器を持った歩行者や自転車、他の車両などの位置受信強度を比較し、歩行者の位置を推定できることを明らかにした。しかし、本手法ではセンサが多数必要な点やバッテリーについて考慮されていない点から軽量化を図りたい自転車レースには向いていない。

渡部ら [5] は、Wi-Fi Direct を用いて端末どうしを接続し、複数の送信端末のみから受信端末の位置を特定する方法を提案している。本手法では、端末間の距離が 12m を超えると位置推定が困難になることが示された。また、受信地点の特定には、最低 3 つの送信端末を適切な位置に分散して配置する必要や電波強度の測定までに数十秒待機する必要がある。加えて、事前に端末どうしを接続しておく必要があり、導入には時間がかかる。

Zhan ら [6] は、RSSI を用いた屋内位置推定手法を提案している。渡辺らと同様に 3 点の計測ノードを使用して発信源を特定するが、屋外の大規模レースでは計測対象とする地点が広域にわたるため、導入は難しい。

Hiroi ら [7] は、屋内における人混みによる電波減衰を考慮した RSSI を用いた屋内位置推定手法を提案している。計測点付近の密集度から電波伝播損失を求め、RSSI の確率分布と比較することで位置推定を行う。自転車レースに

おいては位置推定する対象が集団になって移動することはあっても、特定の地点で移動せずにとどまることはあまりないため、そのまま用いることができない。

Iqbal ら [8] は、位置推定の精度向上を目的として、ビーコンの移動経路を遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する手法を提案している。センサネットワーク内を移動するビーコンの電波強度を計測することで位置推定を行うことができるが、推定時にその移動軌跡を考慮することで、さらに、その精度を向上させることができる。しかし、リアルタイムに位置推定を行う必要がある自転車レースには不向きである。

山野ら [9] は、屋外においてスマートフォンを利用し、BLE ビーコンを持った歩行者の位置を検出する手法を提案している。あらかじめ RSSI 値の分布を測定しておくことで確率的に距離推定を行うが、秒速 1m で移動する歩行者を対象としているため、高速に移動する自転車レースを対象する本研究とは対象が異なる。

Versichele ら [10] は、自転車レースにおける観客の混雑度を推定する手法を提案している。レースコース内を走行する自動車で観客のスマートフォンが発する Bluetooth の電波を受信することで、沿道の観客数を推定する。不特定多数の観客に対してコース内を走行する自動車からその数と大まかな位置の推定を対象としているため、不特定多数の観客が特定の選手の位置を推定することを対象とする本研究にはそのまま用いることができない。

2.3 まとめ

既存製品として、HIKOB FOX や RaceTag9、スマココをあげたがシステムの規模による導入のしにくさやコース中の網羅性、サイズ・重量などそれぞれ課題が残っている。また、関連研究としてビーコンなどの発する電波強度を用いた位置推定に関する研究は多くなされているが、高速で移動するビーコンを用いた屋外位置推定に関する研究はあまりなされていない。

本研究では、小型 BLE ビーコンと観客のスマートフォンを用いた参加型位置共有システムを提案し、高速で移動するビーコンを用いた位置推定に関する実験を行い評価する。ここで、提案システムと既存製品を、重量・サイズ、コース中の網羅性、導入しやすさ、公式レースで使用可能か、位置精度、通信規格の観点からそれぞれ評価し表 1 にまとめる。また、提案方式では以下の 4 点が他と比較して優位であるといえる。

- 競技者は自転車に小型のビーコンを取り付けるだけでよく、競技者に対する負担が軽減されている点
- 相互通信機器の使用が禁止されている公式レースにおいて利用が可能である点
- 専用の受信機を必要とせず、観客の所有するスマートフォンが選手位置を捕捉するための受信器となり、導

表 1 既存製品との比較

Table 1 Comparison with existing products.

Product	HIKOB	RaceTag9	Smacoco	Proposed System
Weight · Size	○	○	×	○
Completeness	△	×	○	△
Ease of Introduction	×	×	○	○
Pro Use	○	○	×	○
Accuracy	○	◎	○	△
Communication Standard	ZigBee	RFID	3G/LTE	BLE



図 2 競技者が所持するビーコン

Fig. 2 BLE beacon.

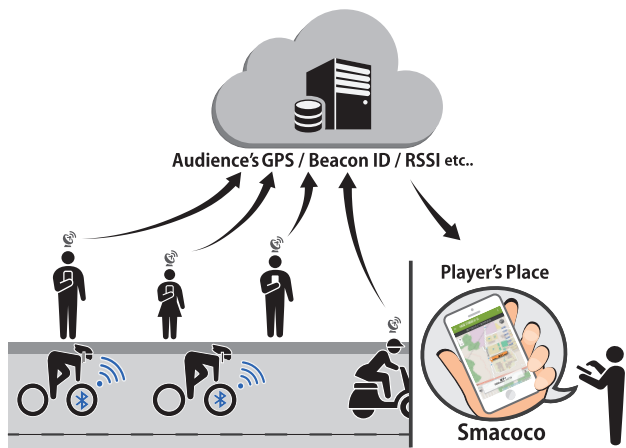


図 1 システムの概要

Fig. 1 System overview.

入が容易である点

- 観客の分布に依存するが、コース内を網羅的に選手的位置を共有することが可能である点

次章において、提案システムの詳細を述べる。

3. ビーコンを用いた参加型位置共有システム

3.1 システム構成

図 1 に本研究で提案するシステムの概要を示す。本システムは、競技者の自転車に取り付ける小型 BLE ビーコン、ビーコンの信号を受信する観客のスマートフォン、競技者の位置の推定・共有を行うサーバから構成される。まず、競技者が観客に接近すると、競技者のビーコンが観客のスマートフォンで検出される。スマートフォンは、このときの自身の GPS 情報を取得し、GPS 情報とビーコン情報をサーバに送信する。この GPS 情報は、観客側の位置情報であるため、競技者の位置情報ではない。そのため、サーバ上でマップマッチングといった位置情報の処理を施し、競技者の位置に近づける。この補正された GPS 情報を競技者の位置情報と見なし、他の観客に共有する。その結果、競技者がどの位置にいるのかをリアルタイムで共有することができる。

実際の自転車レースでは、競技者のほかに先導バイクや

回収車がコースを周回する。先導バイクは、レースの先頭集団より前を走っており、先頭集団が他の競技者と衝突しないように道を開ける役割を担っている。回収車は、レース中に転倒したり、体調が悪くなったりしてレースから途中離脱する競技者の発見と回収を行う。コースによっては、観客が入ることのできないコースが一部あるため、観客のみですべてのコースをカバーすることはできない。そのため、先導バイクと回収車にも受信端末を装着することで、観客が立ち入ることのできない場所での競技者の位置情報の取得を行う。

3.2 競技者の小型ビーコン

図 2 に本研究で用いるために試作した競技者の自転車に取り付けるビーコンを示す。本ビーコンは、縦 34 mm × 横 80 mm × 奥行 11 mm、重さ 25 g と軽量であり、スマートフォンと比べると、100 g 以上軽量化することが可能である。そのため、自転車レースであれば、車体に取り付けることができ、マラソン大会であれば、ゼッケンや、腕に取り付けることができる。通信規格は、消費電力が少なく、スマートフォンで受信できる BLE を採用しており、電波強度は -1.3 dBm (実測値: 0.738 mW) とし、10 Hz でアドバタイズメントパケットを送信する。電源にはボタン電池 (3 V) を使用しており、連続で 60 時間以上動作することを確認している。自転車レースは、最長で 8 時間であるため、実際のレースでビーコンの稼働時間は問題とならない。

3.3 スマートフォンアプリケーション

観客、先導バイク、回収車は、本スマートフォンアプリケーションを用いて、競技者が所持するビーコンの受信を行う。そして、観客は推定された競技者の位置をリアルタイムで知ることができる。図 3 が実際のアプリケーションの表示例である。このスマートフォンアプリケーションの表示例では、競技者の位置を表示しており、同時に 6 つのビーコンを検出している。本アプリケーションを用いて、



図 3 スマートフォンアプリケーション表示例
Fig. 3 Example view of application.

競技者のビーコンを受信し、サーバに GPS 情報とビーコン情報を送信する。GPS 情報は、緯度、経度、高度、位置の精度、速度を含み、ビーコン情報は、受信したビーコンの ID、RSSI、信号を受信した時間を含んでいる。サーバへ送信する間隔は最短で 2 秒に、位置表示の更新間隔は最短で 5 秒に設定できる。

実際の自転車レースでは、参加人数が多く応援したい競技者を発見できない、いつ競技者が回ってくるかわからないなどの問題がある。そのため、競技者の位置情報は観客にとっては有益な情報であり、アプリケーションを使用する動機としては十分である。また、ビーコンの ID と競技者データをサーバ上で結び付けておくことで、近くを通った競技者の情報をスマートフォン上に表示させることもでき、応援したい競技者がいない観客にもアプリケーションを使用してもらおう動機とすることができる。

3.4 実現するための要件

提案システムを実現するために以下の要件を明らかにする必要がある。

- 各環境条件において自転車に取り付けた高速で移動するビーコンを沿道や先導バイクのスマートフォンからどれだけ受信可能か。
- 実際に自転車レースを想定した、複数のビーコンが同時に通過したときの沿道での受信状況。
- 受信距離や指向性など BLE ビーコンの基礎特性。
- 受信強度を用いた選手位置推定手法。

これらの要件を以下 4 章、5 章の実験により明らかにする。

4. 提案システム実現に向けた予備実験

提案システムでは、高速で移動しているビーコンの電波を沿道や先導バイクのスマートフォンからどのような条件でどれだけ検出できるかを確かめる必要がある。そこでデータ受信側が沿道の観客の場合と先導バイクのスタッフの場合、それぞれを想定したうえで予備実験を行った。さ

らに、受信状況を可視化するための可視化アプリケーションを作成した。本章では、まずそれぞれの予備実験について述べ、次に作成した可視化アプリケーションについて紹介する。

4.1 ビーコン検出確認実験

本実験では、競技者に取り付けたビーコンを沿道と回収車のスマートフォンで検出可能であることを明らかにする。

4.1.1 実験内容

本実験において、速度をできるだけ一定に保つため、自転車の代わりにバイクを使用し、バイクの運転手にビーコンを持たせている。回収車の役割の車 1 台には、ビーコンの受信を行うスマートフォンを車内に設置した。実験の手順としては、まず、回収車の役割の車 1 台が先頭を走り、その後ろをビーコンを持ったバイク 2 台がついていく。そして、沿道に設置したスマートフォンでビーコンの受信を行う。なお、沿道のスマートフォンは三脚で固定しており、道に沿って 3m 間隔に 5 台配置した。走行する道路は、直線の道を選択した。速度は時速 30km と時速 50km の場合で行った。

4.1.2 結果と考察

実験結果としては、沿道側でのスマートフォンでは問題なくビーコンを検出できた。速度が上がるとビーコンの受信回数が減ることも確認できた。今回の実験では、2 台のうち片方のバイクのビーコンの受信回数が極端に少なかった。これは、ビーコンを入れていた位置、アンテナの指向性が原因と考えられるが、今回は 2 台とも胸ポケットにビーコンを入れていたため、この結果は、アンテナの指向性の影響が強いと考える。そして、回収車の車中でのビーコンの受信は、ほとんどできなかった。車の外装による電波の減衰が大きく、車内ではビーコンの受信が行えないことが判明した。そのため、実際の自転車レースでは、回収車よりは、先導バイクがビーコンの受信に向いている。回収車でビーコンの受信を行うには、自動車の窓の外側にビーコンの受信端末を取り付ける必要がある。

4.2 沿道検出実験

次に、複数の競技者が同時に走行した場合の、沿道および先導バイクでのビーコンの受信実験を行った。本実験では、沿道の観客と先導バイクでのビーコンの受信回数について明らかにする。

4.2.1 実験内容

沿道には、前回と同様の設置方法で 6 台のスマートフォンを設置し、直線の道で計測を行った。バイクの台数は 6 台に増やし、先頭のバイクにはビーコンの受信端末を持たせ、競技者・先導バイク両方の役割を担わせる。今回は、事前にビーコンの指向性を調査し、通行方向に対して直交方向に電波が飛ぶようにすべてのバイクにビーコンを装着

した。バイクは指定したコースを4周まわる。このときのバイクのスピードや距離については任意とした。ビーコンの受信情報とGPS情報は2秒おきにサーバに送信される。

4.2.2 結果と考察

図4に沿道でのビーコンの検出結果を示す。表の行が周回数、列がスマートフォンのIDを表しており、数値は検出したビーコンの数を示している。おおむね沿道から6つすべてのビーコンの受信が行えている。しかし、1周目のSmartphone Eと3周目のSmartphone Cにおいて受信に失敗している。前者では、スマートフォンの設定が正しくなされていなかったことに起因していることを確認している。後者においては、モバイルルータでのネットワークの接続障害に起因していると考えられる。正常に接続されていた場合、少なくとも数個のビーコンを受信できていると考えられるからである。

図5に先導バイクがビーコン信号を受信した結果を示す。この結果はサーバのログデータから得られたものである。グラフには、先頭から2番目、5番目、6番目(最後尾)のバイクのビーコンの信号の受信回数を示している。先頭から2~4番目のビーコン信号の受信回数には、大きな違いはなくどれも1分あたり30回程度信号を受信していた。しかし、5番目と6番目のバイクのビーコン信号の受信結果において変化が見られた。5番目のバイクのビーコンから受信できていない場合が少しずつ現れ、6番目のバイクでは、数回のみ受信できている場合が存在する。受信回数が30に近づいているときは、信号待ちによって先導バイクに接近しているときである。この結果から先導バ

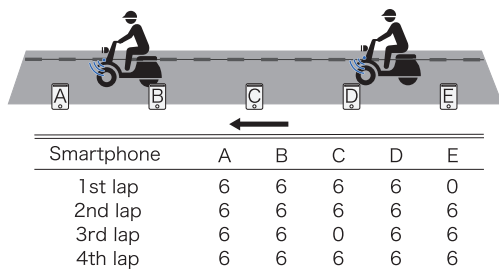


図4 沿道の各スマートフォンが検出したビーコンの数
Fig. 4 Beacons detected by smartphone along road.

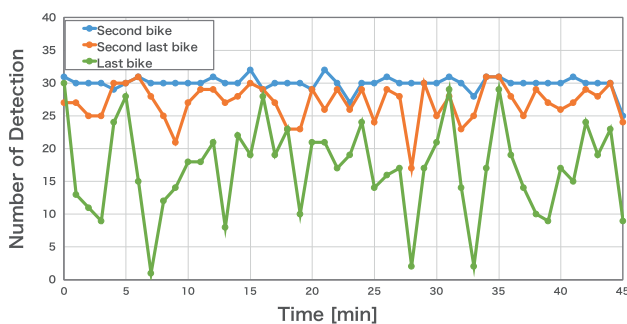


図5 先導バイクでのビーコン信号の受信回数
Fig. 5 Beacon signals received by lead bike.

イクでのビーコンの受信は5台程度の距離だと安定して受信が行え、それ以降になると受信回数が急激に減ることが判明した。このときの先頭車両と5台目の車両の距離は、実験中のGPSデータから算出したところ40m~50m程度であった。

4.3 先導バイク検出実験

最後に、先導バイクから競技者の位置情報を推定するために、先導バイクでのビーコンの受信実験を行った。先導バイクと競技者はレース状況により間隔が変化するため、走行中にどの程度離れた状態でビーコンを受信できるか明らかにする必要がある。また、コース環境により受信結果が変化すると考えられる。そこで、先導バイクと先頭競技者間の最大受信距離、受信距離と電波強度の関係、コース環境による受信状況の変化について明らかにする。

4.3.1 実験内容

本実験では、先導バイクを想定したバイク1台、先頭競技者を想定したバイク1台、後続競技者かつ実験観測車を想定した自動車1台を用いた。各者は、位置情報の記録およびビーコンの電波受信のためにスマートフォンを所持し、先頭競技者のバイクと後続競技者の自動車には図6で示すようにビーコンを取り付けた。

図7に実験コースを示す。実験コースの環境は、区間①~②: S字カーブの坂道、区間②~③、区間④~⑤: 直線、区間③~④、区間⑤~⑥: 下り坂、区間⑥~①: 緩やかなカーブとなっている。本コースを先導バイク、先頭競技者、後続競技者の順番で一定の車間距離を開けながら3周回し、計測を行った。ここで、車間距離は、1周目



図6 ビーコン取り付け位置

Fig. 6 Beacon mounted position: Lead bike and car.

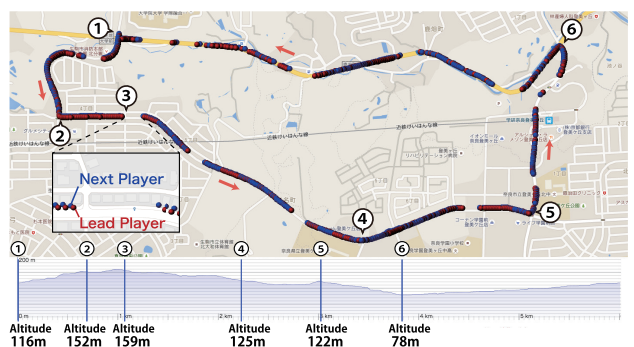


図7 実験コース：先導バイク検出実験

Fig. 7 Course: Detection from lead bike experiment.

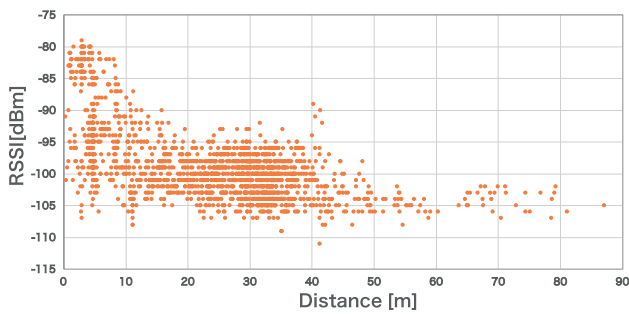


図 8 距離と RSSI の関係

Fig. 8 Relation between distance and RSSI.

10 m, 2 周目 30 m, 3 周目 50 m を目安とした。

4.3.2 結果と考察

図 8 に先導バイクと先頭競技者間の距離と電波強度の関係をプロットした結果を示す。距離が 20 m 以内の場合は、 $-80 \sim -90$ dBm 程度の比較的強い強度の電波も受信できているものの -100 dBm 程度の電波を受信することもある。20 m 以上の場合では、 -100 dBm 程度の強度で受信している。これらの結果から、電波強度は不安定であり、1 回の受信で -100 dBm 程度の電波強度を受信したとしても、一意に距離が決まるわけではない。受信強度から距離を求めるためには、一定距離を保ったまま複数回受信した電波の RSSI を平均することで、 ± 10 m 程度の精度で距離を求めることが可能であると考えられる。また、本実験において最大受信距離は 87.1 m であった。距離が 80 m 周辺においても複数のプロットが得られていることから、環境条件が良ければ 80 m 程度の距離が離れていたとしても受信可能であることが分かった。これらの結果から、電波強度から一意に位置を推定することは難しいと考える。

図 7 中、赤色プロットと青色プロットは先頭競技者と後続競技者 1 周目における電波受信時の位置を示している。電波受信が遮断されたコース環境の特徴として、1 つ目に坂道の出入り口があげられる。2 つ目の特徴として、緩いカーブがあげられる。これら 2 つの環境条件から用いているビーコンは指向性により緩やかなカーブ (区間 ⑥~①) や坂道の入り口 (区間 ③~④) の小さな角度のブレでも電波遮断が起りやすくなることが分かった。一方、急なカーブでは減速することで車間距離が縮まり、受信しやすくなっていると考えられる。

4.4 可視化アプリケーション

ビーコン検出確認実験で得られた実験結果から、競技者と沿道の観客との位置関係、受信状況および電波強度を可視化するため、可視化アプリケーションを作成した。図 9 に Processing を用いて、可視化アプリケーションの実行画面を示す。図中 ① で示すヘッダ部分に実験名、走行速度、沿道に設置したスマートフォンの間隔、日時、電波出力強度をそれぞれ記している。次に、図中 ② 内で示すア

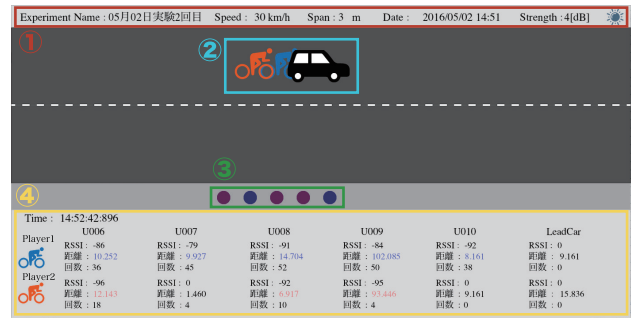


図 9 可視化アプリケーション

Fig. 9 Visualization application.

イコンはそれぞれ競技者および先導バイクの位置を示しており、③ で示す円形の印が沿道に設置したスマートフォンを示している。その印の色変化により、その時間においてどのスマートフォンでどの競技者に取り付けたビーコンの信号を受信しているかを表している。また、図中 ④ で示すフッタ部分にはそれぞれの競技者のアイコンの色に対応して、各スマートフォンで受信した電波強度、スマートフォンと競技者間の距離、総受信回数を示している。

4.5 予備実験のまとめ

本章では予備実験として以下のことを明らかにした。

- 自転車に取り付けた高速で移動するビーコンを沿道および先導バイクから受信可能である。
- 同時に多数のビーコンが通過する場合であっても沿道に複数のスマートフォンが配置されていることですべて検出可能である。
- 環境条件により、ビーコンとスマートフォンが最大 80 m 程度離れていたとしても受信可能である。
- 瞬間的な RSSI の値から、一意に距離を求めることは難しい。
- BLE ビーコンには指向性があり、緩やかなカーブや坂道の出入口などで電波遮断が起りやすくなる。

予備実験の結果より、本研究では位置推定ではなく、位置捕捉としておおよその位置の特定を行うこととした。これは、本研究では、観客が応援する際に必要となる選手の位置情報を共有することを要件としており、位置共有に齟齬が発生しない程度の誤差は許容できると判断したためである。

5. 実環境における実証実験

予備実験の結果をふまえたうえで、実際の自転車レースにおいて本システムの有用性を確認するために、2016 年 5 月 29 日に実施された「第 7 回スズカ 8 時間エンデューロ春 sp^{*4}」および 2016 年 7 月 3 日に実施された「サマーエンデューロード in はりちゅう^{*5}」の 2 つの自転車レー

*4 http://suzuka8h.powertag.jp/2016/spring_top.html

*5 http://crra.powertag.jp/summer_harichu/guide.html

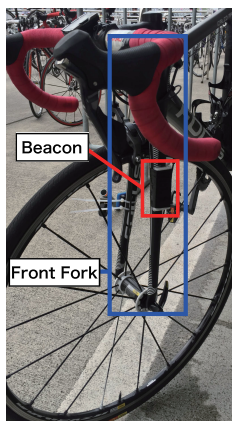


図 10 ビーコン取り付け位置

Fig. 10 Beacon mounting position.

表 2 沿道で検出した周回回数と真値との比較

Table 2 Number of beacons detected by smartphone along road.

Player	A	B	C	D	E
Result	24	23	27	32	28
Truth	26	25	27	32	28

スイベントで実証実験を行った。これらの大会は実験を行うにあたり先導バイクなど、大会スタッフおよび Matrix PowerTag の選手に協力を依頼した。

5.1 実証実験：第 7 回スズカ 8 時間エンデューロ春 sp

本大会のコースは、全長 5.807km、コース幅 10~16m、最大高低差 52m となっている。ヘアピンカーブや S 字コーナー、スプーンカーブなど様々なカーブが存在する。国際レーシングコースとして使われるためコース幅も広くコース全体を通して見通しが良い。

5.1.1 実験内容

実環境の自転車レースにおけるの有用性を確認するため、本実験では、10人以上の集団ができた状態でのデータ取得状況と先導バイクとの距離、実環境のレースにおける地形と検出量の関係を確認することを目的として行った。

スタート・ゴール地点を計測位置とし、4台のスマートフォンを 3m 間隔で沿道に設置した。加えて、先導バイク 4台と回収車 2台にもスマートフォンを配布し、コース上での計測も同時に行った。なお、通過回数の真値とするため、沿道側で計測対象の自転車が通過したときに、競技者名を手入力により記録した。

図 10 にビーコンの取り付け位置を示す。競技者の身体に触れることなく、沿道から信号を取得することを考慮したうえで、自転車の左フロントフォークに取り付けた。先導バイクではズボンのポケットに、回収車では後方左側の窓に貼り付けた。本実験では 5 人の選手を検出対象とした。

5.1.2 結果と考察

図 11 に、沿道からの検出結果の一例として選手 D にお

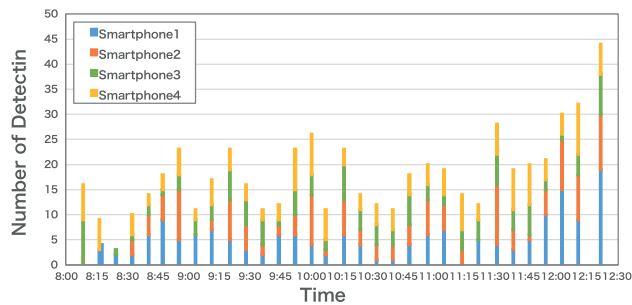


図 11 沿道における選手 D のビーコン検出結果

Fig. 11 Results of beacon detection along road (Player D).

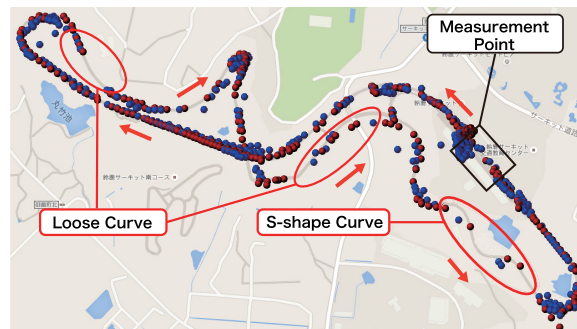


図 12 先導バイクからビーコンを検出した場所

Fig. 12 Beacons detected by smartphone from leadcar.

ける沿道からのビーコン検出回数を示す。実験開始直後はまた、特定の端末で多く取得した場合は、他の端末での検出回数が低下している。これらの結果から、沿道でのビーコンの検出においても指向性が大きく関わっていることが分かる。表 2 に沿道に設置した 4 台のスマートフォンから各選手のビーコンを検出した結果より得られた周回回数と真値の比較を示す。表 2 中、選手 A, B においてそれぞれ 2 回の検出漏れが発生している。しかしこれらの検出漏れは、ピットインしたことにより設置していたスマートフォン付近を通過しなかったため検出できていなかった。よって、集団が発生した状態においても、沿道に複数の端末が存在することで、沿道から漏れることなくビーコンを検出し、選手位置を捕捉できることが分かった。本実験では、5 人の選手のみを検出対象としたが、本実験結果および同時接続台数に制約がない BLE の性質から全選手がビーコンを装着した場合においても複数の受信端末が存在することでビーコンを検出することができ、選手の位置を捕捉できると考える。

図 12 に先導バイクからビーコンを受信した場所を示す。直線やヘアピンカーブなど急なカーブでは比較的多く取得できているが、図中赤丸で囲った緩やかなカーブやコースの高低差が生じる場所では検出回数が少なくなっている。予備実験で得られた結果と同様の傾向が見られ、実際のコースにおいても緩やかなカーブや坂道の入り口といった小さな角度のプレでも電波遮蔽が起こることが分かった。

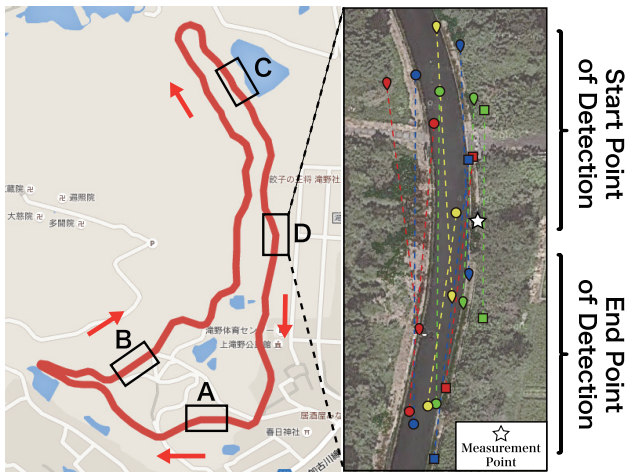


図 13 実験コース：サマーエンデューロード in はりちゅう
 Fig. 13 Experiment course: Summer enduroad in Harichu.

5.2 実証実験：サマーエンデューロード in はりちゅう

本コースは、全長 3.0km、コース幅 7.5m、最大高低差 40m となっている。ヘアピンカーブや S 字カーブがあり、全体として緩いカーブおよび坂道が多く存在する。図 12 で示したコースと比べて全長は短く、高低差も少ない。また、コース脇には木々が茂っており見通しの悪い部分も多々存在する。

5.2.1 実験内容

本実験では、5.1.1 項であげた目的に加えて、コース環境の違いによる沿道、先導バイクでの検出への影響および位置捕捉精度を明らかにする。そこで、図 13 中 A：緩やかなカーブ、B：平坦な道、C：坂道、D：カーブのある坂道と異なる環境を計測地点に選んだ。4 台のスマートフォンを各計測地点の沿道に 1 台ずつ配置し、計測を行った。また、先導バイク 3 台と回収車 1 台にスマートフォンを配布し、周回回数の真値とするために、対象選手が通過したときに手入力で選手名を記録した。

ビーコンおよびスタッフ用のスマートフォンは前回と同様の位置に配置し、3 人の選手を検出対象とした。

5.2.2 結果と考察

各位置に 1 台ずつスマートフォンを設置した結果、すべての地点において取り漏らすことなく沿道から検出できた。図 13 に選手 B の D 地点における各周回の検出開始地点（図中上部）と検出終了地点（図中下部）をそれぞれ示している。表 3 に各地点での検出開始地点から検出終了までの間の時間、距離、受信回数の平均を示す。受信距離は、C 地点において最長となっている。これは C 地点が長い直線の坂道の間地点に位置していたため、電波の遮蔽が少なかったためであると考えられる。一方、D 地点において受信距離は最短となった。これは、緩やかなカーブかつ坂道の出口付近であったためであると考えられる。他の選手においても同様の結果が得られた。

図 14 に選手 B が 2 時間の走行中に先導バイクから検出

表 3 各地点における連続受信時間、受信距離、受信回数

Table 3 Continuous detection time, detection range, number of detection at each point.

Measurement Position	A	B	C	D
Received Distance [m]	48.7	55.9	70.0	48.1
Continuous Detection Time [s]	7.0	7.8	5.4	3.1
Number of Detection	39	42	35	24



図 14 先導バイクから選手 B のビーコンを受信した位置
 Fig. 14 Beacons detected by smartphone from leadcar (PlayerB).

表 4 各地点における位置捕捉誤差

Table 4 Position estimation errors at each point.

Measurement Position	A	B	C	D	Total
Average Error [m]	20.6	18.6	24.9	16.9	20.4
Maximum Error [m]	61.5	39.1	67.5	41.4	67.5
Minimum Error [m]	2.6	0.7	3.6	0.6	0.6

された場所を示す。レース開始直後は、先導バイクと選手間の距離が近く連続的に検出されているが、それ以降は部分的にのみ検出されている。本実験コースの特徴として、坂道が多く見通しが悪かったことがあげられる。これらの要因から、安全面に配慮し、先導バイクと競技者間の距離が比較的広くなり、先導バイクでの検出回数が少なくなったと考えられる。また、ビーコンの指向性により電波遮蔽が頻繁に起こったと考えられる。

表 4 に各地点における位置捕捉誤差を示す。本表は受信データすべてを用いており、平均誤差 20.4m、最大誤差 67.5m、最小誤差 0.6m という結果となった。平均誤差は 20.4m 程度に収まっているが、最大誤差が 67.5m といった非常に大きい値を示している。図 8 に示した距離と RSSI の関係から、RSSI の値が小さくなればなるほど分散が大きくなっていることが分かっている。そこで、表 5 に、-100 dBm を閾値として RSSI が -100 dBm 以上の受信データを用いた各地点における位置捕捉誤差を示す。そ

表 5 各地点における位置捕捉誤差 (-100 dBm)

Table 5 Position estimation errors at each point (-100 dBm).

Measurement Position	A	B	C	D	Total
Average Error [m]	13.4	12.9	15.8	12.3	13.7
Maximum Error [m]	35.4	31.9	33.7	35.0	35.4
Minimum Error [m]	2.6	0.7	3.6	0.6	0.6

の結果, 各周回において検出漏れすることなく, 平均誤差 13.7m, 最大誤差 35.4m まで誤差を抑えることができた. 一方, -100 dBm 以上の値を閾値とすると誤差は減少するものの, 周回回数の検出漏れが発生してしまうため, -100 dBm を閾値として用いることで検出漏れなく誤差が最小となることが分かった.

以上の結果をふまえて, 位置捕捉誤差の影響について考察する. まず, 自転車の移動速度は時速 30 km~80 km であり, 秒速に換算すると 8m~22m となる. アプリケーション上で選手位置表示の更新間隔は 3.3 節で述べたように最短で 5 秒であるため, その間に 40m~110m 程度移動することで誤差が生じると考えられる. この仕様をふまえて, 位置捕捉における最大誤差の 35.4m は, 観客が選手を応援するために位置を把握するといった目的への影響は小さく, 十分実用環境でも使用可能だと考える.

6. おわりに

本研究では, 自転車レース競技において競技者の負担を軽減したうえで位置共有システムを実現するために, 小型 BLE ビーコンと観客のスマートフォンを用いた参加型位置共有システムを提案し実装した. その結果, 本システムを用いることで従来のスマココのシステムから 100g 以上軽量化できた. また, スマートフォンを常時所持する必要がないため, 本研究で定義した競技者への負担を軽減できた. 提案システムの有用性を確かめるために, まず自転車に取り付けられた高速で移動するビーコンから発信される電波を沿道に配置したスマートフォンから検出可能であることを実験から明らかにした. また, 実験を繰り返すことによりビーコンの指向性, 最大受信距離, 距離と受信強度の相関関係および地形や環境による電波遮蔽など電波受信に関する基礎特性を明らかにした. さらに, 実際の自転車レースにおいて 2 度実証実験を行い, 複数の競技者による集団ができた際にも沿道に複数のスマートフォンが存在することで競技者位置を捕捉できることが分かり, 観客が選手を応援するために位置を把握する目的に対する本システムの有用性を示した.

実用化に向けた今後の課題および予定として大きく分けて以下の 2 つがあげられる. 1 つ目が, 競技者の位置推定精度についてである. 現在のシステムではビーコン受信時に受信者の位置情報を競技者位置としているため, 正確な選手の位置を特定するためには修正する必要がある. 4.3 節

の結果および先行研究から, RSSI から距離を一意に決めることは難しいことが分かっている. そこで, 同時刻に複数の観客が受信した複数のデータから得られる集合知およびコース形状情報に基づくマップマッチングにより正確な位置を推定, 表示する必要がある. 今後実装する予定である. 2 つ目が, 実際に導入されることを想定して, より多くの競技者の自転車にビーコンを装着した状況での実験を行う必要がある. 現在, 実用化に向けてビーコンを量産するにあたり改良を進めている. その後, より多くの競技者にビーコンを装着し, 実験を行うことで実用化に向けたシステムの問題点を明らかにしていく予定である.

謝辞 本研究の一部は, JSPS 科研費 16H01721 の助成を受けたものである. また, 本研究を実現するにあたり, シャープ株式会社の西岡氏, 相曾氏, 森長氏, 久保氏, 株式会社マトリックスの大鳥居氏, 兼山氏, 吉村氏, TEAM MATRIX POWERTAG の安原監督, 真鍋選手, 向川選手, 永良選手, 田窪選手, 橋本選手, 金子選手, NAIST ユビキタスコンピューティングシステム研究室の藤原氏, 日高氏, 音田氏, 木戸氏, 梅木氏, 森田氏, 千住氏, 荒川氏, 前田氏, 小芝氏, 水本氏にご協力いただいた. ここに謝意を示す.

参考文献

- [1] 佐藤永欣, 佐々木毅, 浅沼和彦, 檜山 稔, 猿舘 貢: 自転車競技のためのオープンなセンサ統合情報プラットフォームの提案, マルチメディアと分散処理ワークショップ 2015 論文集, Vol.2015, No.5, pp.273-278 (2015).
- [2] Bisberg, A.M.: Bicycle training device for simulating the movement of a bicycle equipped with gears, US Patent, US3903613 A (1974).
- [3] 佐藤智美, 小宮山哲, 下田雅彦, 劉 渤江, 横田一正: Bluetooth の電波強度を用いた位置推定方式の検討, DEIM Forum 2011 B9-4 (2011).
- [4] 日坂翔馬, 三浦俊祐, 上條俊介: 実交差点における受信電波強度 (RSSI) を用いた移動物体検知, J-stage 生産研究, Vol.66, No.2, pp.77-83 (2014).
- [5] 渡辺雄太, 松本倫子, 吉田紀彦: 無線モバイル端末の Wi-Fi Direct による電波強度を用いた位置推定, 情報処理学会第 75 回全国大会, 1W-2 (2013).
- [6] Zhan, J., Liu, H. and Huang, B.: A New Algorithm of Mobile Node Localization Based on RSSI, *Wireless Engineering and Technology*, Vol.2, No.2, pp.112-117 (2011).
- [7] Hiroi, K., Kawaguchi, N. and Shinoda, Y.: A Better Positioning with BLE Tag by RSSI Compensation through Crowd Density Estimation, *UBICOMP/ISWC '16 ADJUNCT*, pp.831-840 (2016).
- [8] Iqbal, A., Zhou, L., Huber, M. and Záruba, G.: Optimizing trajectories of mobile beacons to localize sensor networks, *ACM*, pp.44:1-44:7 (2010).
- [9] 山野太靖, 白松 俊, 岩田 彰, 永井明彦, クグレ・マウリシオ: 高齢者徘徊見守りシステムのための Bluetooth と GPS を併用した位置推定手法, 情報処理学会第 78 回全国大会講演論文集, Vol.2016, No.1, pp.995-996 (2016).
- [10] Versichele, M., Neutens, T., Goudeseune, S., van Bossche, F. and van de Weghe, N.: Mobile Mapping

of Sporting Event Spectators Using Bluetooth Sensors: Tour of Flanders 2011, *Sensors* 2012, Vol.12, No.10, pp.14196-14213 (2012).

付 録

提案システムでは、ターゲットとする大会規模として、実証実験を行った「はりちゅうサマーエンデューロード」や「スズカ8時間エンデューロ」のような参加者が数百人から数千人程度の大会を想定している。また、対象とする大会の要件として先導バイクや回収車といった競技者以外にコース上を巡回するスタッフがいること、またはコースの沿道に観客が点在可能な環境があることとし、そのような大会において選手の位置を捕捉することを目的としている。そこで、1つの指標として先導バイクや沿道のスマートフォンからコース全体のうちどの程度選手位置を捕捉できるかをコース網羅率と定義し、ターゲットとしている大会におけるコース網羅率を確認するために追加実験を行った。

A.1 コース網羅率について

追加実験は、2016年11月12日に実施された「第17回スズカ8時間エンデューロ秋 sp^{*6}」で実施した。本実験で用いたコースの特徴は5.1節で述べたものと同様である。

A.1.1 実験内容

本実験では、先導バイクや沿道のスマートフォンからコース全体のうちどの程度選手位置を捕捉できるか確認することを目的とする。そこで、3人の先導バイクと図 A.1 中に黒丸で示す位置に配置されている大会審判スタッフにそれぞれスマートフォンを配布し、5人の選手を検出対象とする。ここで、検出対象となる選手の自転車には図 10 に示すようにビーコンを取り付け、ビーコンの電波強度が -1.3 dBm のものを1台と、 3.0 dBm のものを4台使用した。また、コース中どれだけ捕捉できたかを、コース網羅率とし、コース全長に対する1ラップあたり連続受信でき

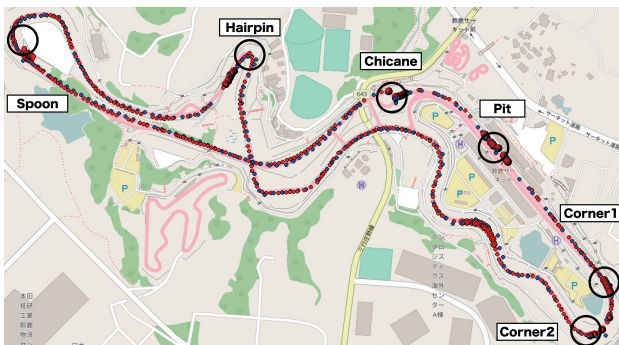


図 A.1 実験コース：スズカ8時間エンデューロ秋 sp

Fig. A.1 Experimental Course: Suzuka 8h Enduro Fall SP.

た場合のデータの2点間距離の総和距離と定義する。電波強度の異なるビーコンそれぞれにおいて、データ受信側が沿道のみ、先導バイクのみ、沿道と先導バイクの場合における網羅率について算出し考察を行う。

A.1.2 実験結果

電波強度が -1.3 dBm のビーコンにおいては沿道のみで最大5%、先導バイクのみで最大32%、沿道+先導バイクで最大36%の網羅率が得られた。一方で、電波強度が 3.0 dBm のビーコンにおいて4人の選手から得られた結果を平均化したところ、沿道のみで最大平均11%、先導バイクのみで最大平均78%、沿道と先導バイクで最大平均81%の網羅率が得られた。この結果から、データ受信側がいずれのパターンにおいても、ビーコンの電波強度が -1.3 dBm のときのビーコンと比べて、2倍以上の網羅率を得られることが分かった。

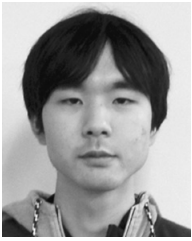
本実験において、沿道に6人配置した状態で最大13%、最大平均11%の網羅率を得られている。この結果から、沿道の観客1人あたり最大2%の網羅率を得られることがいえ、本実験においては50~60人がコース中に均等に配置されている状態であると100%に近い値で選手の位置を捕捉することが可能であると考えられる。また、観客が沿道にいない状況を想定した場合、先導バイクのみで選手位置を補足する必要がある。今回の実験結果においては、最大で91%、最大平均で78%の網羅率が得られていることから、実用環境でも使用可能であると考えている。しかし、ターゲットとしていない大会要件やコースにおいて、観客規模や分布を一般化していくためには、大規模なシミュレーションや追実験を行う必要があるため、今後の課題とする。



河中 祥吾 (学生会員)

2014年奈良工業高等専門学校電子制御工学科卒業。2016年同校機械制御工学専攻卒業。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学。モバイル端末を用いた環境情報センシングに関する研究に従事。

*6 http://suzuka8h.powertag.jp/2016/autumn_top.html



高橋 雄太 (学生会員)

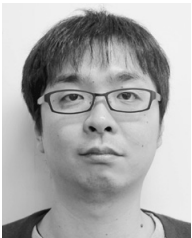
2014年茨城工業高等専門学校電子情報工学科卒業。2016年佐賀大学理工学部知能情報システム学科卒業。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学。IoTデバイスを用いたアプリケーションに関する

研究に従事。



雨森 千周 (学生会員)

2016年同志社大学理工学部インテリジェント情報工学科卒業。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程入学。ウェアラブルデバイスを用いた生活の質の定量化に関する研究に従事。



藤本 まなと (正会員)

2009年関西大学工学部卒業。2011年同大学大学院博士課程前期課程修了。2015年同博士課程後期課程修了。博士(工学)。2015年より奈良先端科学技術大学院大学助教。位置推定、行動認識、無線通信に関する研究に従事。

電子情報通信学会, IEEE 各会員。



荒川 豊 (正会員)

2001年慶應義塾大学理工学部卒業。2006年同大学大学院博士課程修了。博士(工学)。同大学院特別研究助教、九州大学大学院システム情報科学研究科助教、仏トゥールーズ大学および独DFKI 客員研究員を経て、2013年より奈良先端科学技術大学院大学准教授、現在に至る。2016年より情報処理学会関西支部「行動変容と社会システム研究会」主査およびJST さきがけ研究員、一般社団法人ブロードバンド推進協議会理事を兼務。センサとAIを駆使した行動認識および行動変容に関する研究に従事。IEEE, ACM, および IEICE 各会員。



藤原 晶

2003年大阪大学基礎工学部情報科学科卒業。2005年同大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻修士課程修了。同年シャープ株式会社入社。IoT・クラウドサービスの研究開発に従事。



福島 徹也

2004年京都大学大学院情報学研究科通信情報システム専攻修士課程修了。同年シャープ株式会社入社。デバイス開発を経て、IoTセンサを用いたクラウドソリューション・プラットフォームの構築に従事。



松原 敬信

1997年京都大学工学部情報工科学科卒業。同年シャープ株式会社入社。ネットワーク・クラウドサービスの研究開発に従事。2014年クラウド・IoT技術を活用した新規事業創出プロジェクト「SHARP Cloud Labs」立ち上げ。